

Návrh polyuretanové vrstvy pro zvýšení akustického útlumu turbodieselového motoru osobního automobilu

Bc. David Svoboda

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Svoboda**
Osobní číslo: **T12380**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh polyuretanové vrstvy pro zvýšení akustického útlumu turbodieselového motoru osobního automobilu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat obecný teoretický základ pro akustické veličiny v technické praxi.
2. Charakterizovat specifika akustických signálů v automobilovém průmyslu.
3. Výběr polymeru na bázi polyuretanu s porézní strukturou pro tlumení hluku dieselového motoru, jeho technická specifikace, výhody.
4. Měření akustických veličin na vybraném a upraveném typu materiálu v laboratorních podmínkách (koeficient zvukové pohltivosti, útlum vlivem překážky).
5. Měření akustických veličin na vybraném a upraveném typu materiálu v praktických podmínkách na motoru dieselového motoru (hluk motoru, stanovení hladiny akustického tlaku, ekvivalentní hladiny a okamžitého akustického tlaku v třetinooktávových pásmech).
6. Zpracovat a vyhodnotit naměřená data.
7. Doporučení a výhody pro tlumení dieselového motoru polyuretany s povrchově upravenou geometrií.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-010-2246-3.
2. BERÁNEK, Leo L. Snižování hluku. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965, 740 s.
3. PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: ČVUT, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
4. PTÁČEK, Luděk. Handbook of noise and vibration control. 2. opr. a rozš. vyd. Editor Malcolm J Crocker. Hoboken: Wiley, c2007, xxiv, 1569 s. ISBN 978-0-471-39599-7.
5. KLEMPNER, Daniel. Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. 2. opr. a rozš. vyd. Editor Malcolm J Crocker. Hoboken: Wiley, 1991, 442 s. ISBN 34-461-5097-8.
6. Flynn, J. H., Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2nd Ed., Supplement Volume, pp. 692?701, John Wiley & Sons, Inc., USA (1989).

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Juříčka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

7. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

30. května 2014

Ve Zlíně dne 7. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

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

.....

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

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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího 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). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

S rozvojem automobilového průmyslu, který má v ČR velmi významný podíl jak na trhu práce, tak ve vývoji a výrobě, roste požadavek na komfort vnitřního prostředí automobilů. Řešení vnitřní hlučnosti automobilů má stálý význam v celkovém kontextu požadavků na automobil ať už nový či zánovní. Mezi nejhlučnější osobní automobily patří ty, které mají pohonnou jednotku tvořenou diesellovým nebo turbodiesellovým motorem. Tato hlučnost potom vychází ze samotné konstrukce vznětového motoru. Pokud budeme uvažovat časovou osu, ve které vozidlo existuje, tak zjistíme, že dochází k únavě a snížená účinnosti jednotlivých komponent nebo celých dílů konstrukce. Náhrada konstrukčních dílů nebo jejich částí při servisu je v dnešní době nedílnou součástí a týká se prakticky jak nových tak ojetých vozů. Zvyšování tepelné nebo akustické izolace je důležité z hlediska rostoucího průměrného věku ojetých vozů, u kterých se hlučnost zvyšuje postupem času (obecně v důsledku stáří vozidla). Mezi nejvýznamnější místa k tlumení motoru a mechanismů kolem motoru patří prostor uvnitř motoru, ale také uvnitř interiéru. Tyto tlumící vrstvy jsou na bázi vláknitých nebo porézních dílů s vyšším nebo vysokým stupněm pohltivosti a zvukové neprůzvučnosti. Zvýšením těchto vrstev pomocí polyuretanové vrstvy, nebo přímo nahrazení stávající izolace je možné dosáhnout, za určitých podmínek, snížení hlukové expozice uvnitř vozidla a tím i zpříjemnit jízdu jako takovou.

Klíčová slova: Akustika, tlumení hluku, turbodiesellový motor, interiér automobilu, polyuretany

ABSTRACT

The development of the automotive industry in the Czech Republic has a very significant share in the labor market, the development and the production. Also the demand for automotive comfort of the interior environment is growing. Solution to the interior noise of vehicles is still important in the overall context of the requirements for new vehicles or almost new. The noisiest passenger cars are those that use a diesel or turbo diesel drive unit. This noise is developed inside the actual construction of a diesel engine. If we consider timeline in which the vehicle exists we find that there is fatigue and reduced efficiency of individual components or whole parts of the structure. Replacement of components or their parts is an inseparable part of service and it applies to both new and used cars. Increasing in thermal or acoustic insulation is important from viewpoint of growing average age of used cars which the noise level increases over time (generally due to the age of the vehicle). The most significant places for noise damping of the motor and mechanisms around the engine are the space inside the drive unit and within the interior. These damping layers are based on fibrous or porous materials with a higher or the highest level of noise absorption and attenuation. Increasing these layers using polyurethanes or directly replacing existing insulation can be more efficient and under certain circumstances the noise exposure inside the interior of vehicle can be reduced and make the ride more comfortable.

Keywords: Acoustic, noise damping, turbo diesel engine, interior of passenger car, polyurethanes

Poděkování

Mé díky patří vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Juříčkovi Ph.D. za věnovaný čas, ochotu, trpělivost a cenné rady potřebné při vzniku této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při mém studiu.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	12
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 AKUSTIKA	14
1.1 HLUK.....	14
1.1.1 Účinky hluku na člověka.....	14
1.1.2 Metody boje proti hluku.....	15
1.2 ZVUK A JEHO VLASTNOSTI.....	16
1.2.1 Zvuk.....	16
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ZVUK.....	17
1.3.1 Lineární oscilátor.....	17
1.3.2 Frekvence a vlnová délka.....	18
1.3.3 Akustická rychlost a akustický tlak.....	19
1.3.4 Rychlost šíření akustických vln.....	20
1.3.5 Energie přenášená vlněním.....	21
1.3.6 Signály a spektra.....	23
1.3.7 Weber – Fechnerův zákon.....	24
1.4 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA.....	25
1.5 DECIBELOVÉ VELIČINY.....	26
1.5.1 Hladina akustického výkonu.....	26
1.5.2 Hladina akustického tlaku.....	26
1.5.3 Hladina intenzity zvuku.....	27
1.5.4 Ekvivalentní hladina akustického tlaku A.....	27
1.6 KMITOČTOVÁ PÁSMA.....	28
1.6.1 Oktávové kmitočtové pásmo.....	28
1.6.2 Třetinooktávové kmitočtové pásmo.....	28
1.7 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	29
1.8 NRC KOEFICIENT.....	30
2 METODY MĚŘENÍ HLUKU	31
2.1 ÚČEL MĚŘENÍ.....	31
2.2 VÁHOVÉ FILTRY.....	32
2.3 ČASOVÉ KONSTANTY.....	32
2.4 PRAKTICKÝ PRŮBĚH MĚŘENÍ HLUČNOSTI.....	33
2.4.1 Hluk v pozadí.....	33
3 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL A HLUČNOST	34
3.1 VNĚJŠÍ HLUK AUTOMOBILŮ.....	35
3.2 VNITŘNÍ HLUK AUTOMOBILŮ.....	36
3.2.1 Zdroje hluku v interiéru automobilu.....	37
3.2.2 Hluk motoru a jeho vznik.....	39
3.3 MĚŘENÍ HLUČNOSTI.....	40
3.3.1 Měřicí technika.....	40
3.3.2 Mikrofon.....	40
3.3.3 Metody měření hlučnosti v interiéru automobilu.....	41

4	VYBRANÉ MATERIÁLY PRO TLUMENÍ HLUKU	42
4.1	ZVUKOVĚ POHLTIVÉ MATERIÁLY	42
4.2	PÓROVITOST	42
4.3	POLYURETANY	43
4.3.1	Technicky důležité polyisokyanáty	44
4.3.2	Polyoly	45
4.4	POLYURETANOVÉ PĚNY	46
4.5	VLASTNOSTI MĚKKÝCH POLYURETANOVÝCH PĚN	47
4.6	AKUSTICKÁ IZOLACE V AUTOMOBILECH	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
5	LABORATORNÍ MĚŘENÍ	49
5.1	MATERIÁLY PRO TLUMENÍ	49
5.1.1	Polyuretan S3535F	49
5.1.2	Polyuretan H3050	50
5.2	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ	51
5.2.1	Kundtova trubice	51
5.2.2	Zvukový analyzátor	52
5.2.3	Další zařízení	53
5.3	MĚŘENÍ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	53
5.3.1	Zvuková pohltivost PUR S3535F; VZ1	54
5.3.2	Zvuková pohltivost PUR S3535F; VZ2	56
5.3.3	Zvuková pohltivost PUR H3050; VZ3	62
5.3.4	Zvuková pohltivost PUR S3535F; VZ1+2	67
5.4	NRC KOEFICIENT	72
5.5	ÚTLUM VLIVEM PŘEKÁŽKY (AKUSTICKÝ ÚTLUM)	75
5.5.1	Útlum vlivem překážky - PUR S3535F; VZ1 a VZ2	77
5.5.2	Útlum vlivem překážky - PUR H3050; VZ3	80
5.5.3	Útlum vlivem překážky - PUR S3535F; VZ1+2	83
6	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ NA VOZIDLE	87
6.1	TECHNICKÁ SPECIFIKACE VOZIDLA	87
6.2	MĚŘENÉ ÚSEKY, RYCHLOSTI A PODMÍNKY MĚŘENÍ	88
6.3	ANALYZÁTOR HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU	92
6.3.1	Měření frekvenční analýzy hladiny akustického tlaku	92
6.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA ZIMNÍCH PNEUMATIKÁCH	94
6.4.1	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ1	95
6.4.2	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ2	98
6.4.3	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ3	102
6.4.4	Ekvivalentní hladina akustického tlaku	105
6.5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA LETNÍCH PNEUMATIKÁCH	110
6.5.1	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ1	111
6.5.2	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ2	115
6.5.3	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ3	118
6.5.4	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ1+2	121
6.5.5	Ekvivalentní hladina akustického tlaku	124

6.6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA STATICKÉM AUTOMOBILU	129
6.6.1	Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, všechny tlumicí vrstvy	129
6.6.2	Ekvivalentní hladina akustického tlaku	133
ZÁVĚR	.....	135
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	.....	137
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	140
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	142
SEZNAM TABULEK	.....	152

ÚVOD

Vnitřní hlučnost vozidla je velmi důležitým parametrem při koupi nového vozu. Hlučnost jako taková je uvnitř vozu způsobena dvěma vlivy, a to vnitřními generátory hluku a vnějšími zdroji hlukové expozice. Mezi neúčinnější kroky při tlumení hluku uvnitř automobilu patří vysoce absorpční a tlumící prvky z porézních nebo vláknitých struktur. Takto konstruované izolační vrstvy pracují na bázi pasivního tlumení a jejich konstrukční umístění vychází z původního konstrukčního řešení automobilu jako takového. V dnešní době má značný význam také repase tlumících vrstev nebo také nahrazení stávajících neúčinných vrstev novými komerčními nebo speciálními materiály na bázích lisovaných směsí, porézních nebo vláknitých struktur. Takto realizované vrstvy jsou pak efektivní jak v hlukové, tak ve vibrační oblasti.

Problematika tlumení prostoru dieselového motoru je poměrně náročná z hlediska širokého spektra frekvencí vznikající nejrůznějšími sub-zdroji daného hlukového zdroje. Projev hluku při jízdách vlastnostech je ovlivněn jak zdrojem motoru, povrchem, na kterém se vozidlo pohybuje, směsí pneumatik, výškou vzorku, povětrnostními vlivy, ale také aerodynamickou složkou automobilu. Vznik hluku, který generuje motor, vychází z předpokladu, že čím je rychlejší jízda, tím vyšší je příspěvek akustické emise do celkového akustického tlaku. Proto je nutné tento aspekt respektovat při návrhu konstrukce polyuretanové izolační vrstvy ať už s, nebo bez, povrchové úpravy. Kombinace nejrůznějších povrchů izolační vrstvy mají výhodu v dobré pohltivosti a velmi nízké hmotnosti vzhledem ke stávajícím materiálům.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 AKUSTIKA

Akustika, jako vědní obor, se začala formovat v 19. století, kdy předmětem zájmu akustiky byly zvuky, které lidem byly příjemné. Například zvuky různých hudebních nástrojů.

V dnešní době, kdy jsme obklopeni širokou škálou zvuků, se akustika zabývá spíše studiem těch nežádoucích. Avšak existují i oblasti akustiky zaměřující se na žádoucí akustické signály, například architekti navrhující koncertní sály a místnosti nebo ultrazvuk, který má široké využití nejen v medicíně pro tvorbu obrazů tkání, ale i jako metoda testování kvality výrobků z různých materiálů.

Akustika je vědní obor zabývající se fyzikálními ději při vzniku, šíření a následném vnímání zvuku [1].

1.1 Hluk

Hluk nelze přesně fyzikálně definovat, jelikož působí individuálně na každého člověka. To co někdo považuje za příjemný zvuk, může jiný považovat za hluk. Například v dnešní době velmi častý případ hlasité hudby. Za hluk tedy můžeme označit každý nežádoucí zvuk narušující přirozenou pohodu člověka jak při relaxaci, tak při práci a dalších činnostech.

Hluk je nedílnou součástí znečištění životního prostředí. Svým významem bývá řazen hned za znečištění ovzduší a vod. Je to velice důležitý faktor, protože lidský organismus prakticky není schopen se proti hluku primárně bránit. Působení hluku na člověka nemusí mít okamžitý dopad na jeho organismus, avšak dlouhodobá expozice má negativní vliv projevující se bolestmi hlavy, ztrátou soustředění nebo sníženou citlivostí sluchu. I v případě, že se hluk šíří z jednoho zdroje, díky svým vlastnostem se šíří na velké vzdálenosti a může tak ovlivnit velké množství lidí [1] [2] [3].

1.1.1 Účinky hluku na člověka

Lidský sluchový orgán – ucho vnímá a přenáší zvukové informace získané z okolí. Frekvence, které je lidský organismus schopen vnímat se pohybují v rozsahu slyšitelného pásma od 20 Hz do 20 kHz. Tento interval slyšitelné oblasti se může individuálně lišit, někteří lidé jsou schopni vnímat frekvence již od 15 Hz. S věkem se horní hranice slyšitelnosti snižuje.

Účinky hluku můžeme kvantitativně hodnotit jeho intenzitou. Různé hodnoty hladiny akustického tlaku působí na člověka různě. Obecně lze říci, že s rostoucí hodnotou hladiny akustického tlaku roste i negativní vliv na lidský organismus, ale i nízké hodnoty pod 20 dB, jež považujeme za hluboké ticho, tvoří pro člověka nepříjemné prostředí. Hladina 30 dB je obecně přijímána jako příjemné ticho. Dlouhodobé vystavení 65 dB a výš již může mít negativní vliv na organismus. Při hladinách 85 dB může dojít k trvalému poškození sluchu. Pocit bolesti nastává při 130 dB, tato hodnota se nazývá práh bolesti, k protržení bubínku dojde při hodnotách vyšších než 160 dB.

Protihluková opatření na pracovišti mohou značně zpříjemnit a zvýšit kvalitu a produktivitu práce. Pro správný odpočinek je akustická pohoda prostředí také velmi důležitá. Se zvyšujícími se nároky životních standardů společnosti souběžně se zvyšujícími se výkony motorů, hustotou dopravy a dalších zdrojů hluku je třeba dbát i na akustické řešení budov, dopravních prostředků a celkově prostředí, ve kterém se člověk vyskytuje [1] [3].

1.1.2 Metody boje proti hluku

Způsoby používané při snižování expozice a působení hluku na člověka lze rozdělit do několika metod.

- *Metoda redukce hluku ve zdroji* – nejvýznamnější z protihlukových opatření je buď úplné odstranění zdroje hluku, nebo snížení jeho hlučnosti již při konstrukci, výrobě a instalaci. Prozatímni technický pokrok nám neumožňuje vytvářet běžně dostupné zcela nehlučné stroje a strojní zařízení.
- *Metoda dispozice* – vhodné situování zdrojů hluku do chráněných prostor, případná centralizace těchto zdrojů na jednom místě.
- *Metoda zvukové izolace* – oddělení zdroje hluku od okolního prostředí ohraničujícími prvky s vhodnými akusticky izolačními vlastnostmi. Tato metoda je značně využívána při návrhu, výpočtu a stavbě zvukoizolačních příček, stropů, krytů a dalších tlumících prvků.
- *Metoda zvukové pohltivosti* – některé materiály mají dobrou schopnost pohlcovat akustickou energii a disipovat ji.
- *Užití 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)

Pro dosažení nejlepších výsledků je vhodné tyto metody kombinovat. Je nutno však brát v potaz i ekonomickou stránku řešení a dosáhnout tak kompromisu mezi snížením hlučnosti a cenou [1] [3].

1.2 Zvuk a jeho vlastnosti

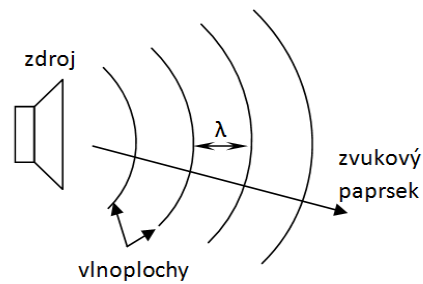
1.2.1 Zvuk

Zvuk je nedílnou součástí projevů přírody a prostředí. Díky sluchovému ustrojí, jsme schopni vnímat akustické vlnění a získávat tak informace z našeho okolí. Na člověka zvuk působí různými způsoby. Lze ho vnímat jako příjemný element prostředí nebo jako rušivou složku. Nejen vysoké intenzity zvuku, ale i absolutní ticho mohou mít na člověka negativní účinky.

Za zvuk považujeme mechanické kmitání pružného prostředí šířící se od zdroje ve vlnoplochách. Zvuk se šíří od zdroje s určitou rychlostí a frekvencí a může se šířit i do velkých vzdáleností. Šíření akustické energie je umožněno oscilací částic prostředí kolem jejich rovnovážných poloh. Zvuk se šíří v plynných, kapalných i tuhých materiálech ve formě akustického vlnění. Jsou dva typy akustického vlnění, příčné a podélné. 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.

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 je v daném okamžiku definován stejným akustickým stavem. V neizotropním prostředí 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.

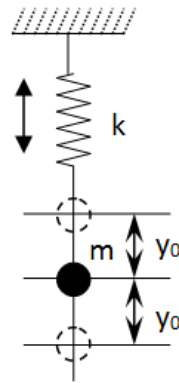
- *Kulové vlnoplochy* – pokud je zdroj vlnění menší než vlnová délka vzniklého vlnění, pak se vlnění šíří v kuloplochách.
- *Plošné vlnoplochy* – vznikají při šíření vlnění z plošných zdrojů, je-li zdroj vlnění několikanásobně větší než vlnová délka vzniklého vlnění. Kulové vlnoplochy ve velké vzdálenosti od zdroje lze přibližně považovat za rovinné vlnoplochy [1] [2] [3].



Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje do volného prostoru

1.3 Základní pojmy a veličiny charakterizující zvuk

1.3.1 Lineární oscilátor



Obr. 2. Lineární oscilátor

Jelikož se zvuk šíří pouze v elastickém prostředí a jeho přenos je umožněn kmitáním částic kolem rovnovážné polohy a jejich interakcí je vhodné definovat základní model pro jednu částici. Nejjednodušší model zastupuje lineární oscilátor. Pohybovou rovnici hmotného bodu oscilátoru získáme řešením diferenciální rovnice periodického pohybu hmotného bodu po přímce v čase [1] [3].

$$m \frac{d^2 y}{d\tau^2} + ky = 0 \quad (1)$$

Kde: y – výchylka; [m]

m – hmotnost kmitajícího bodu; [kg]

τ – čas; [s]

k – tuhost pružiny; [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]

Řešením této diferenciální rovnice získáme výraz pro volné kmitání, kde neuvažujeme tlumící faktor [1].

$$y = y_0 \sin(\omega_0 \tau + \varphi_0) \quad (2)$$

Kde: ω_0 – vlastní úhlová frekvence; [s^{-1}]

φ_0 – fázový úhel; [-]

y_0 – amplituda výchylky kmitání; [m]

Pro vlastní úhlovou frekvenci platí výraz [1].

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

1.3.2 Frekvence a vlnová délka

Frekvence f [Hz], nebo také kmitočet, udává počet kmitů, které hmotný bod vykoná za jednu sekundu. Frekvence je reciproká hodnota doby kmitu.

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

Kde: f – frekvence; [Hz]

T – perioda kmitu; [s]

Úhlovou rychlost lze vypočítat pomocí frekvence dle následujícího vzorce [1].

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

Vlnová délka λ [m] je taková vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jednoho kmitu. Je to vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body, které mají v daném okamžiku stejný akustický stav. Vlnovou délku definujeme pomocí frekvence a rychlosti šíření zvukové vlny [1] [3].

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

Kde: λ – vlnová délka; [m]

c – rychlost šíření akustické vlny; [$m \cdot s^{-1}$]

1.3.3 Akustická rychlost a akustický tlak

Akustická rychlost v $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ udává rychlost kmitání částic pružného prostředí kolem jejich rovnovážných poloh. Pro výpočet akustické rychlosti nejdříve definujeme výchylku částice a následně provedeme parciální derivaci akustické výchylky podle času.

$$u = u_0 \cdot \sin(\omega\tau + \varphi_0) = u_0 \cdot \sin\left(\omega\tau - \omega\frac{x}{c}\right) \quad (7)$$

Kde: u – akustická výchylka; [m]

u_0 – amplituda akustické výchylky; [m]

Akustická výchylka u [m] udává vzdálenost hmotného bodu od rovnovážné polohy.

Pro akustickou rychlost pak platí [1] [3]:

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = u_0 \omega \cos\left(\omega\tau - \omega\frac{x}{c}\right) = v_0 \cos(\omega\tau + \varphi_0) \quad (8)$$

Kde: v_0 – amplituda akustické rychlosti; $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$

Při průchodu akustické vlny plynným nebo kapalným prostředím, dochází k lokálnímu zhušťování a zředování kmitajících částic. V těchto místech dochází ke vzniku přetlaku nebo podtlaku. Celkový statický tlak prostředí je pak dán součtem tlaku barometrického p_b [Pa] a tlaku akustického p [Pa].

$$p_s = p + p_b \quad (9)$$

Kde: p_s – statický tlak; [Pa]

Akustický tlak je při srovnání s barometrickým tlakem velmi malá hodnota, přesto je třeba ho do výpočtu zahrnout, protože lidské ucho je schopné vnímat již velmi malé změny tlaku.

Pro harmonický signál platí vztah popisující průběh tlaku [1] [3].

$$p = p_0 \cos\omega\left(\tau - \frac{x}{c}\right) \quad (10)$$

Kde: p_0 – amplituda akustického tlaku; [Pa]

Akustickou vlnu lze popsat vlnovou rovnicí, vyjadřující průběh kmitání částic závislý na jejich poloze v prostoru.

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} \quad (11)$$

Pravá strana vyjadřuje zrychlení částice a levá sílu působící na element s jednotkovou hmotou [1] [3].

1.3.4 Rychlost šíření akustických vln

Zvuk se šíří v tuhých, kapalných i plynných látkách. V kapalině a plynu se šíří vlnění podélné, kdežto v tuhých látkách se šíří vlnění jak podélně tak příčně. Ve viskózních látkách dochází k lokálnímu zhušťování a zředování částic látek a tomu odpovídají lokální změny tlaku. Pro výpočet rychlosti šíření podélných vln v kapalinách platí vztah.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (12)$$

Kde: K – modul objemové pružnosti; [Pa]

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

Pro plyny je platný vztah:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{P_b}{\rho}} \quad (13)$$

Kde: κ – Poissonova konstanta; [-]

V tuhých elastických látkách dochází při průchodu akustické vlny k lokálním změnám napětí. Pro rychlost šíření vlnění v podélném směru c_L [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] v pevných látkách je dána rovnice.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (14)$$

Kde: E – modul pružnosti v tahu; [Pa]

V příčném směru platí obdobný vztah.

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (15)$$

Kde: G – modul pružnosti ve smyku, [Pa]

Tab. 1. Rychlost šíření podélných vln vybraných materiálů [1]

Materiál	ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	E [MPa]	c_L [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Vzduch 20°C	1,21	-	344
Voda 13°C	1000	-	1440
Hliník	2700	$6,2\cdot 10^4$	4800
Beton	2300	$2,2\cdot 10^4$	3100
Sklo	2700	$7,5\cdot 10^4$	5270
Polystyrén	13	$1,3\cdot 10^2$	315
Plexisklo	1200	$3,0\cdot 10^3$	1580

Složením podélného a příčného vlnění v tělesech, ve kterých převládá jeden nebo dva rozměry (tyče, desky), vzniká ohybové vlnění. Rychlost šíření ohybových vln c_B [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je oproti předchozím závislá na frekvenci, materiálových konstantách a rozměrech výrobku.

Rychlost šíření ohybových vln v tyči s kruhovým průřezem vypočteme podle vztahu [1]:

$$c_B = \sqrt{2\pi f} \cdot \sqrt[4]{\frac{4E \cdot I}{m'}} \quad (16)$$

Kde: I – moment setrvačnosti průřezu dané tyče; [m^4]

m' – hmotnost jednotkové délky tyče; [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]

1.3.5 Energie přenášená vlněním

S šířením akustického vlnění prostředím je spojen přenos akustické energie. Množství této energie šířící se prostředím vztahované na jednotku času nazýváme akustický výkon W [W].

$$W = \frac{dE_a}{d\tau} \quad (17)$$

Kde: E_a – akustická energie; [J]

Pokud akustický výkon vztáhneme na jednotku plochy, dostáváme veličinu měrný akustický výkon N [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

$$N = \frac{dW}{dS \cdot \cos \vartheta} \quad (18)$$

Kde: S – měřicí plocha; [m²]

ϑ - úhel mezi měřicí plochou a dopadajícím paprskem

Měrný akustický výkon lze také vyjádřit jako součin akustického tlaku a rychlosti. Pro zvukovou vlnu dopadající kolmo na měřicí plochu platí.

$$N = p \cdot v \quad (19)$$

Intenzita zvuku I [W·m⁻²] je střední hodnotou měrného akustického výkonu. Pro harmonické signály platí vztah.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N d\tau \quad (20)$$

Intenzitu lze také vyjádřit pomocí efektivních hodnot akustického tlaku a rychlosti. Pro efektivní hodnoty platí.

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

Intenzitu vyjádříme jako jejich součin [1].

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} \quad (23)$$

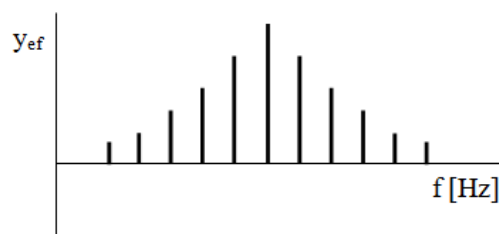
1.3.6 Signály a spektra

Signály lze rozdělit na jednoduché a složené, nebo podle opakování na periodické a neperiodické či harmonické a neharmonické. Akustický signál zaznamenáváme sledováním změny požadované akustické veličiny v čase.

- *Jednoduchý periodický signál* – Za nejjednodušší periodický signál považujeme sinusový průběh sledované veličiny.
- *Složený signál* – Složené signály mají průběh nesinusový. Mohou být jak periodické tak neperiodické v čase.
- *Harmonický signál* – Složený signál, který lze popsat součtem složek, které jsou celočíselnými násobky základní frekvenční složky.

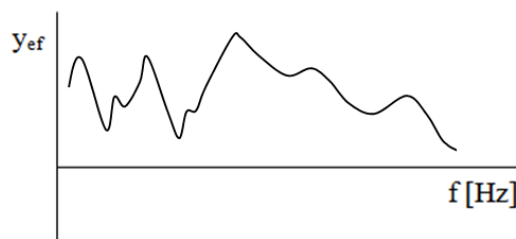
Pro popis akustických signálů se využívají kmitočtová spektra udávající závislost sledované akustické veličiny na frekvenci. Každý signál lze popsat souborem jednoduchých signálů [1] [4].

- *Diskrétní (čárové) spektrum* – Pro popis jednoduchých i složených signálů, u kterých lze jednoznačně určit jejich jednotlivé složky, slouží diskrétní spektrum.



Obr. 3. Diskrétní spektrum složeného signálu

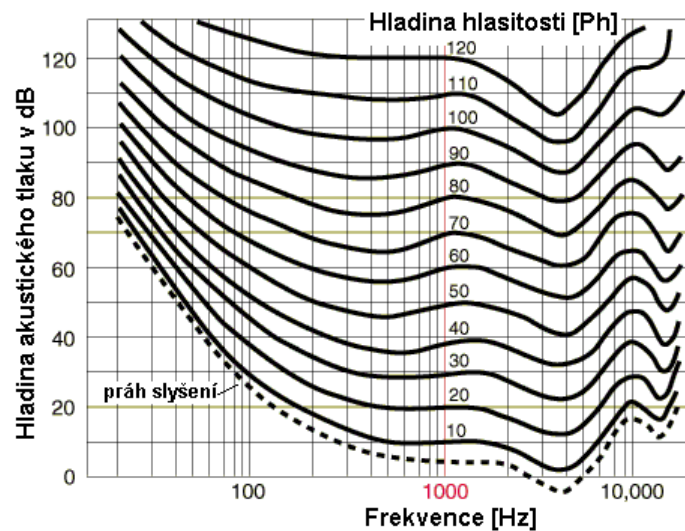
- *Spojité spektrum* – Pro popis neperiodických signálů, které mají sledovanou složku rozloženou spojitě ve velkém rozsahu kmitočtů, využíváme spojitá spektra.



Obr. 4. Spojité spektrum neperiodického signálu

1.3.7 Weber – Fechnerův zákon

Vzhledem k tomu, že člověk vnímá různé frekvence, které mají stejnou intenzitu, různě hlasitě, bylo zapotřebí pro měření s hlukoměrnými přístroji zavést jednotnou normu, která tuto závislost popíše. Byly vytvořeny závislosti hladiny akustického tlaku na frekvenci pro různé úrovně hladiny hlasitosti. Tyto křivky nazýváme izofony.



Obr. 5. Křivky stejné hlasitosti [5]

Weber – Fechnerův zákon definuje, že hlasitost daného tónu roste aritmetickou řadou, pokud jeho fyzikální intenzita roste geometrickou řadou. Z předešlé závislosti na Obr. 5. je zřejmé, že hladina hlasitosti a hladina akustického tlaku je stejná pro frekvenci 1000 Hz. Pro tuto frekvenci platí vztah.

$$L_N = 10 \log \frac{I}{I_0} = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (24)$$

Kde: L_N – hladina hlasitosti; [Ph]

Pro ostatní frekvence je třeba hladinu hlasitosti přepočítat v závislosti na hladině o referenční frekvenci 1000 Hz.

Bylo dokázáno, že hladina hlasitosti ve fónách nevyjadřuje přesně úroveň fyziologického vjemu zvuku. Vyjadřuje totiž pouze hladinu hlasitosti pro jednu frekvenci. V případech, kdy vnímáme široké spektrum frekvencí, výše uvedené závislosti neplatí dostatečně přesně. Byla proto zavedena veličina hlasitost N [son]. Vzájemná závislost mezi hladinou hlasitosti a hlasitostí je následující.

$$N = 2^{\frac{L_N - 40}{10}} \quad (25)$$

Hlasitost uvedená v sonech je subjektivně vnímaná hlasitost zvuku. Závislost mezi hladinou hlasitosti ve fónech a hlasitostí v sonech je lineární. Ze vztahu 25 lze definovat, že 1 son je roven hlasitosti tónu o frekvenci 1000 Hz a intenzitě 40 dB [1] [6].

1.4 Spektrální analýza

Za spektrální (kmitočtovou) analýzu považujeme transformaci časového průběhu mechanického kmitání do kmitočtové oblasti. Kmitání je nahrazeno posloupností jeho kmitočtových složek.

Frekvenční složení hluku během určitého časového úseku lze vyšetřit pomocí frekvenční analýzy hlukového spektra. Jako detektory jsou využívány mikrofony nebo snímače vibrací. Frekvenční analýzou periodického signálu získáme jeho jednotlivé frekvenční složky. Pro neperiodický signál lze tyto složky určit jen statisticky. Základem frekvenční analýzy je Fourierova transformace. Pro výpočet jednotlivých frekvenčních složek neperiodických signálů lze použít Fourierovu transformaci ve formě dvou integrálů.

- *Inverzní transformace*

$$s(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (26)$$

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

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

- *Přímá transformace*

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (27)$$

Veličiny $S(\omega)$ a $s(\tau)$ se nazývají Fourierovy transformační páry. Komplexní funkce $S(\omega)$ dává informaci o amplitudách a fázích harmonických frekvencí obsažených ve funkci $s(\tau)$ [1] [3] [4].

1.5 Decibelové veličiny

Vzhledem k velkému rozpětí hodnot akustických veličin a k praktičtějšímu zpracování těchto hodnot se zavádějí decibelové hladiny. K jejich definici byl využit Weber – Fechnerův fyziologický zákon, který udává, že závislost mezi objektivními veličinami a subjektivním vjemem člověka je logaritmická. Společnou jednotkou pro decibelové veličiny je decibel [dB].

1.5.1 Hladina akustického výkonu

Hodnoty akustického výkonu se pro různě hlasité děje mění v rámci řádů. Pro slabý šepot je hodnota výkonu 10^{-9} W, křik dosahuje hodnot 10^{-3} W a motory proudového letadla vyzařují, až 10^5 W. Pro správnost výpočtu byly pro decibelové veličiny stanoveny referenční hodnoty, u výkonu je tato hodnota rovna 10^{-12} W. Hladinu akustického výkonu L_w [dB] definujeme vztahem [1] [7].

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (28)$$

Kde: W_0 – referenční akustický výkon; $W_0 = 10^{-12}$ W

1.5.2 Hladina akustického tlaku

Zdravé lidské ucho je schopné registrovat změny tlaku od hodnot 20 μ Pa pro frekvenci odpovídající asi 1000 Hz. Již takto malá změna tlaku dokáže rozvibrovat membránu sluchového orgánu. Na druhé straně lidské ucho dokáže snést i hodnoty mnohem vyšší a to až 10^6 krát větší. Pro hladinu akustického tlaku byla zavedena referenční hodnota 20⁻⁵ Pa, odpovídající hodnotě 0 dB na decibelové stupnici. Pro hladinu akustického tlaku L_p [dB] platí následující vztah [1] [7].

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (29)$$

Kde: p_0 – referenční hodnota akustického tlaku; [Pa]

1.5.3 Hladina intenzity zvuku

Jak pro předchozí hladiny i pro hladinu intenzity hluku L_I [dB] platí obdobný vztah [1].

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (30)$$

Kde: I_0 – referenční hodnota intenzity zvuku; $I = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

1.5.4 Ekvivalentní hladina akustického tlaku A

Hladina zvuku A je definována jako hladina akustického tlaku váženého filtrem A. Protože vnímání hluku je u člověka závislé na frekvenci, je třeba použít při měření účinků hluku na člověka korekci. Váhové filtry jsou součástí každého zvukoměru. Váhový filtr A je nejčastěji používaný a nejlépe odpovídá charakteristice lidského sluchového orgánu. Další váhové filtry jsou B, C a D. Korekční hodnoty váhových filtrů jsou standardizovány. Hladina akustického tlaku A L_{pA} [dB] charakterizuje hlukovou expozici působící na lidi.

Jelikož se v praxi setkáváme s různými případy hlukové expozice je třeba si tyto situace definovat.

- *Hluk ustálený* – časové ustálený signál, kdy se hladina akustického tlaku nemění ve vyšším rozmezí než 5 dB.
- *Hluk proměnný* – u těchto signálů změny akustického tlaku v čase přesahují rozsah 5 dB.
- *Hluk proměnný přerušovaný* – je případem proměnného hluku, kdy dochází k vypínání a zapínání zdroje hluku např.: kompresory, dochází tak k náhlým změnám akustického tlaku

Pro hodnocení v čase neustálených signálů byla zavedena veličina hladina akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$ [dB]. 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 časový interval [1] [3].

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{\Delta \tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{p_A^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right] \quad (31)$$

Kde: $p_A(\tau)$ – okamžitý akustický tlak A zvukového signálu; [s]

$\Delta \tau$ – časový interval, v němž je určena ekvivalentní hladina akustického tlaku A;

$\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1$ [s]

1.6 Kmitočtová pásma

Při měření akustických veličin v praxi by bylo nepraktické používat škálovací frekvenci o šířce 1 Hz. Používají se tedy kmitočtová pásma, která mají buď procentuálně konstantní šířku pásma, nebo konstantní šířku pásma. Nejčastěji využívaná jednooktávová nebo třetinooktávová pásma jsou případy pásem s procentuálně konstantní šířkou pásma. Toto zjednodušení výrazně neovlivňuje přesnost naměřené celkové hlučnosti.

1.6.1 Oktávové kmitočtové pásmo

Toto pásmo je charakterizováno poměrem svých okrajových frekvencí.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (32)$$

Každou oktávu lze označit její střední frekvencí f_m .

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (33)$$

Střední frekvence jsou určeny normou. Šířka oktávového pásma se se středním kmitočtem zvětšuje.

1.6.2 Třetinooktávové kmitočtové pásmo

Pokud rozdělíme jednooktávové pásmo na třetiny (v logaritmických stupnicích) dostaneme třetinooktávové pásmo. Pro třetinooktávové pásmo platí následující vztah.

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2 \quad (34)$$

Kde: f_1 a f_4 – okrajové frekvence pásma jedné oktávy; [Hz]

f_2 a f_3 – okrajové frekvence vnitřní třetiny oktávy; [Hz]

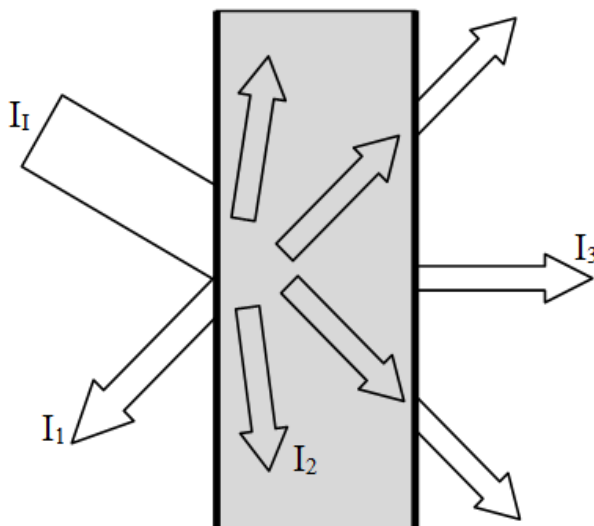
Pro poměry sousedících frekvencí platí rovnost.

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \quad (35)$$

Pro výpočet střední frekvence třetino-oktávového pásma platí vztah 33.

1.7 Činitel zvukové pohltivosti

Pokud akustická vlna narazí na rozhraní dvou fází, nejčastěji rozhraní vzduch a pevná překážka, jen určité množství energie projde skrz, část se odrazí od povrchu překážky a část energie je překážkou pohlcena [1] [8].



Obr. 6. Průchod akustické vlny překážkou

Dopadající akustická intenzita I_I [W/m^2] je při dopadu na překážku rozdělena na tyto části:

- I_1 [W/m^2] – Odražená intenzita
- I_2 [W/m^2] – Pohlcená intenzita
- I_3 [W/m^2] – Prošlá intenzita

Při pohlcení akustické energie dojde k její přeměně na teplo uvnitř materiálu tedy absorpci. Míru pohlcené akustické energie udává koeficient zvukové pohltivosti α [-], který je závislý na frekvenci a je definován jako podíl pohlcené intenzity a intenzity akustické vlny dopadající na materiál [9].

$$\alpha = \frac{I_2}{I_I} \quad (36)$$

Koeficient zvukové pohltivosti nabývá hodnot 0 až 1. Materiály dokonale pohlcující zvuk mají hodnotu koeficientu zvukové pohltivosti rovnu 1, naopak dokonale odrazivé materiály rovnu 0 [1].

Obdobným způsobem lze definovat činitel zvukové odrazivosti β [-]. Vyjadřujeme ho jako podíl intenzity odražené a intenzitě dopadající [1].

$$\beta = \frac{I_1}{I_I} \quad (37)$$

Třetí složkou, na kterou se dopadající intenzita rozdělí, je energie, která projde za překážku, průzvučnost γ [-]. Skládá se z intenzity prošlé póry a dutinami v materiálu a intenzity vyzářené materiálem do druhého poloprostoru vlivem vlastního ohybového kmitání. Je dána poměrem prošlé intenzity a intenzity dopadající na plochu materiálu [1] [3].

$$\gamma = \frac{I_3}{I_I} \quad (38)$$

1.8 NRC koeficient

NRC (Noise Reduction Coefficient) je materiálový parametr charakterizující jedno číselně zvukově pohltivé vlastnosti. Udává průměrnou hodnotu koeficientu zvukové pohltivosti získanou z hodnot pro frekvence 250, 500, 1000 a 2000 Hz. Označuje se $\bar{\alpha}_n$ [-]. Využívá se pro hrubou charakterizaci tlumících vlastností materiálu. Pro přesnou charakterizaci je více vypovídající grafické zobrazení závislosti činitele zvukové pohltivosti na frekvenci [9].

$$\bar{\alpha}_n = \frac{\alpha(250) + \alpha(500) + \alpha(1000) + \alpha(2000)}{4} \quad (39)$$

Kde: $\alpha(250, 500, 1000 \text{ a } 2000)$ = hodnoty koeficientu hlukové pohltivosti pro danou frekvenci; [-]

2 METODY MĚŘENÍ HLUKU

Vzhledem k vysokému množství zdrojů hluku a jejich charakteristik je třeba, pro akceptovatelné, reprodukovatelné a průkazné výsledky, zvolit vhodný postup měření. Pro volbu vhodného měření lze použít základní kritéria závislá na postupu či podmínkách [4] [8].

Mezi tato kritéria patří:

- metoda měření
- přístrojové vybavení
- měřené veličiny
- způsob měření
- měřící místo
- charakter sledovaného hluku
- rušivé signály
- doba měření
- okolí
- klimatické podmínky

2.1 Účel měření

V průmyslu je mnoho různých důvodů pro měření hlučnosti.

Nejčastější z nich jsou:

1. Určit, zda úroveň hluku nedosahuje takových hodnot, kdy dochází k poškození sluchového orgánu.
2. Získání základních hlukových charakteristik daného zdroje hluku. Tyto charakteristiky jsou pak použity pro vytvoření optimálního tlumení.
3. Určit úroveň hluku daného přístroje a výsledky porovnat s hodnotami dodanými výrobcem.
4. Ujistit se, že úroveň hluku daného zdroje neobtěžuje vzdálené okolí např.: v obytných zónách.

Měřicí přístroje a postupy by se měli shodovat s normami či předpisy pro dané měření hlučnosti. V normě jsou obsaženy požadavky na zařízení, průběh a podmínky měření. Dále obsahují hodnocení úrovně hlučnosti a jejich negativních vlivů [8].

2.2 Váhové filtry

Lidské ucho vnímá nejen úroveň hluku, ale také jeho frekvenci a dobu trvání. Zároveň nevnímá intenzitu hluku pro všechny frekvence stejně. Tyto parametry by měly být brány v potaz při návrhu měřících přístrojů a jejich následné aplikaci. Hlukoměry využívají váhových filtrů tak, aby co nejdříve simulovaly chování lidského sluchového orgánu. V praxi se využívají 4 typy váhových filtrů. Nejčastěji využívaný filtr typu A, dále typ B, C a letecký průmysl používá váhový filtr typu D.

Ne všechna měření využívají váhových filtrů. Pro frekvenční analýzy hluku různých zařízení se, používá měření bez korekcí. Například, když se srovnávají frekvenční spektra před a po aplikaci tlumících prvků [8] [10].

2.3 Časové konstanty

Při výběru vhodného časového intervalu je třeba vzít v potaz i charakter měřeného hluku. Intenzita hluku vždy kolísá, ať v malém či velkém rozsahu. Zobrazení měřícího přístroje, digitální nebo analogové, potřebuje jistý čas na zobrazení daných hodnot a nedokáže reagovat na okamžité změny hluku. Stejně tak lidské oko nedokáže zaznamenat velmi rychlé pohyby a tak je zobrazení na displeji uvážene zpomaleno. Standardně se využívají tyto časové režimy.

1. S – vysoké zpomalení dává poměrně pomalé zobrazení; střední doba snímání je 1 s.
2. F – nízké zpomalení a rychlé pohyby v zobrazení na displeji; střední doba snímání je 0,125 s.
3. I – zobrazení má velice rychlý náběh hodnot a následně jejich pomalé ubývání. Tento režim reprezentuje, jak hlasitě lidské ucho vnímá krátce trvající hluk a je zaměřeno spíše na rušivý charakter hluku.
4. Peak – měření úrovně špičky akustického tlaku pro velmi krátké zvuky. Umožňuje nám měřit špičkové hodnoty zvuků, jejichž délka může být až 50 mikrosekund. Toto měření je zaměřeno na nebezpečné účinky hluku.

Při měření hluku, který má rázový charakter (výstřel, dopad kladiva) a použití různých časových režimů, nedostaneme stejné výsledky hladiny akustického tlaku. Špičkové (Peak) hodnoty budou vždy vyšší než ostatní [8].

2.4 Praktický průběh měření hlučnosti

Účelem měření hlučnosti je zajistit spolehlivé, přesné a důkladné měření, které vhodně popíše danou hlukovou situaci a je možné jej opakovat. Následující postup zajišťuje tyto požadavky [8].

1. Vždy provést kalibraci používaného vybavení, před a nejlépe i po proběhnutí měření.
2. Zakreslit si měřicí uspořádání a poznamenat si referenční hodnoty.
3. Zakreslit si pozice zdrojů hluku a měřících přístrojů, případně pozici lokálních odrazových ploch, které mohou mít vliv na výsledky měření.
4. Při venkovních měřeních si poznamenat aktuální meteorologické podmínky, zejména směr větru a jeho rychlost, teplotu a vlhkost.
5. Zkontrolovat úroveň hluku na pozadí. Musí mít dostatečně nízké hodnoty oproti měřeným hodnotám, případně provést korekci.
6. Zaznamenat si nastavení měřícího přístroje (váhový filtr, časový režim atp.)
7. Zaznamenat si změny v nastavení zařízení, neobvyklé události a dělat si důležité poznámky pro výsledky měření.

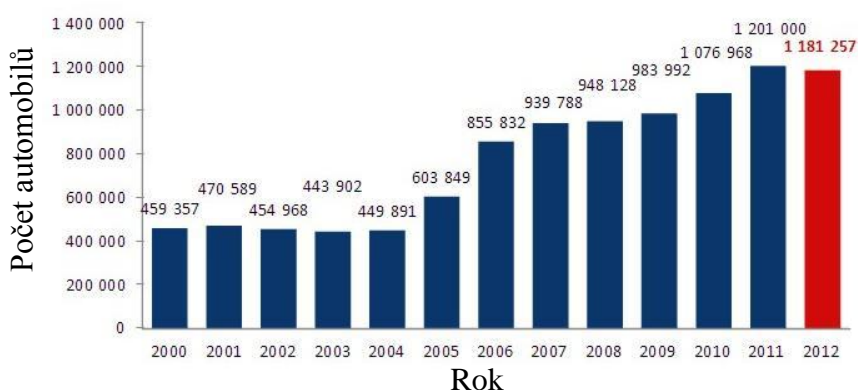
2.4.1 Hluk v pozadí

Hluk generovaný nechtěnými zdroji, také označovaný jako pozadí, musí být minimálně o 10 dB pod úroveň hluku vydávaného zdrojem, který je pro měření stěžejní. V tomto případě je přesnost měření do 0,5 dB. Pozadí musí být zaznamenáno vždy před začátkem vlastního měření. V případě, že rozdíl mezi pozadím a měřeným hlukem je v rozmezí 3 až 10 dB, je třeba provést korekce. Pokud je rozdíl mezi pozadím a měřením menší než 3 dB, nelze měření považovat za dostatečně přesné [8].

3 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL A HLUČNOST

Dlouholetá tradice, silná dodavatelská základna, technické a technologické zázemí České republiky umožnilo vzniku jednoho z nejrozvinutějších automobilových odvětví v rámci střední a východní Evropy. Automobilový průmysl je významnou součástí celkové průmyslové výroby ČR [13].

V roce 2012 bylo v tuzemsku vyrobeno téměř 1,2 milionů motorových vozidel. Přestože výroba osobních automobilů zaznamenala pokles, je tato hodnota druhá nejvyšší v historii. Světová produkce motorových vozidel byla v roce 2012 podle záznamů OICA 84 100 167 a zaznamenala tak 5,1% nárůst oproti roku 2011 [11] [12].



Obr. 7. Celkový počet vyrobených motorových vozidel od roku 2000 po rok 2012 [13]

Počet registrovaných vozidel k datu 21. 12. 2013 činil 4 787 849 osobních automobilů. Průměrný věk těchto vozidel je 14,2 roku, což je asi o půl roku více než v roce 2000, přičemž za rok 2013 bylo prodáno přibližně 200 tisíc automobilů z kategorie ojeté. Toto by znamenalo, že při průměrném stáří vozu 14,2 let, je celkový technický stav karoserie a vnitřních komponentů ve stavu, kdy se začíná projevovat časová únava materiálů (a to znamená vyšší hlučnost, vrzání, klepání atd.) [14].

Tab. 2. Prodejnost jednotlivých značek nových vozidel v letech 2012 a 2013 [15]

Pořadí	Model	2013 [ks]	2012 [ks]	Změna [ks]	Změna [%]	Podíl [%]
1.	Škoda	49 971	53 778	-3 807	-7,10%	30,30%
2.	Hyundai	16 239	15 162	1 077	7,10%	9,90%
3.	Volkswagen	14 948	15 185	-237	-1,60%	9,10%
4.	Ford	9 460	12 719	-3 259	-25,60%	5,70%
5.	Peugeot	7 252	6 725	527	7,80%	4,40%

3.1 Vnější hluk automobilů

V hustě obydlených lokacích, jako centra měst a sídliště, je hluk automobilové dopravy jeden z hlavních nežádoucích zdrojů. Vysoké hodnoty hluku lze pozorovat v okolí dopravních magistrál, velkých křižovatek, výpadových a rychlostních silnic [1].

Celková úroveň akustického tlaku je dána více faktory:

- mechanický výkon motoru
- rychlost vozidla
- režim práce motoru
- technický stav vozidla
- kvalita vozovky
- okolní zástavba
- aktuální meteorologická situace

Vývoj v automobilovém odvětví nepředstavuje vozidlo pouze jako prostředek dopravy osob, materiálu a zboží, ale také i jako předmět sportu a závodních klání. Zejména úpravami motoru (chip-tuning) a zevnějšku se dosahuje vyšších výkonů a tedy i rychlostí. Tyto sportovní a upravené vozy se staly inspirací pro úpravy běžně používaných automobilů.

Mezi nejčastější úpravy motoru, pro zvýšení jeho výkonu patří:

- Zvýšení efektivity sání
- Zvýšení průchodnosti výfukového systému
- Přepřínování – turbo režim (jak pro benzinové, tak pro diesellové motory)
- Řízení paliva přísady paliva jako takového
- Zapalování
- Dodatečné prořezání pneumatik
- Nízko-profilové ráfky

S rostoucím výkonem motoru roste i jeho hlučnost, což vychází z předpokladu, že se zvyšujícím se mechanickým pohybem celého systému se zvyšuje všeobecně i hlučnost systému. Díky kombinaci výše uvedených úprav jsou tyto automobily slyšitelné již na velké vzdálenosti, kdy generují zejména hluk v oblasti nízkých frekvencí. Je si potřeba však uvědomit, že v tomto případě se však jedná o požadovaný zvukový efekt = „image vozidla“ [16].

3.2 Vnitřní hluk automobilů

Je to jeden z nejdůležitějších faktorů, které slouží k posuzování kvality zpracování výrobku (v tomto případě dílenského zpracování). Hluk je nedílnou součástí automobilového průmyslu jako stupeň komfortu, který lze v tomto segmentu nabídnout. V automobilu lze zaznamenat koherentní širokopásmové zdroje, které lze charakterizovat z hlediska hluku od žádoucího až po nežádoucí.

Ve většině případů jsou postaveny osobní vozidla (až 95 %) do té roviny, že u nich jak vnitřní, tak vnější hluk není žádoucí v jakékoliv formě.



*Obr. 8. Škoda Octavia II
(nejprodávanejší vůz v ČR) [17]*

Existují také studie, které prokázaly, že např. ve značkových sportovních vozech bude vznikající hluk žádoucí, protože je součástí image (požadavek zákazníka, který se formoval po celá desetiletí až do současnosti a stále se vyvíjí). Hluk motoru o vysoké hlasitosti je „propouštěn“ do vnitřního interiéru převážně v nízkých a středních frekvencích, protože uživatel si to takto přeje z hlediska „subjektivního požitku“ z jízdy.



Obr. 9. Ferrari California (8V) [18]

Naprostou odlišnou kategorií z hlediska hodnocení vnitřního hluku vozidel jsou vozidla sportovní, nákladní, těžká vozidla, ale také speciální vozidla. U těchto vozidel je jejich podstata využití postavena nade všechny limity v oblasti hlučnosti. Tyto vozidla/stroje se vyznačují maximy užitečných vlastností, jako jsou rychlost, hmotnost, plocha pro převážený náklad apod. Běžný uživatel se s těmito vozidly (stroji) dostane do kontaktu jen minimál-

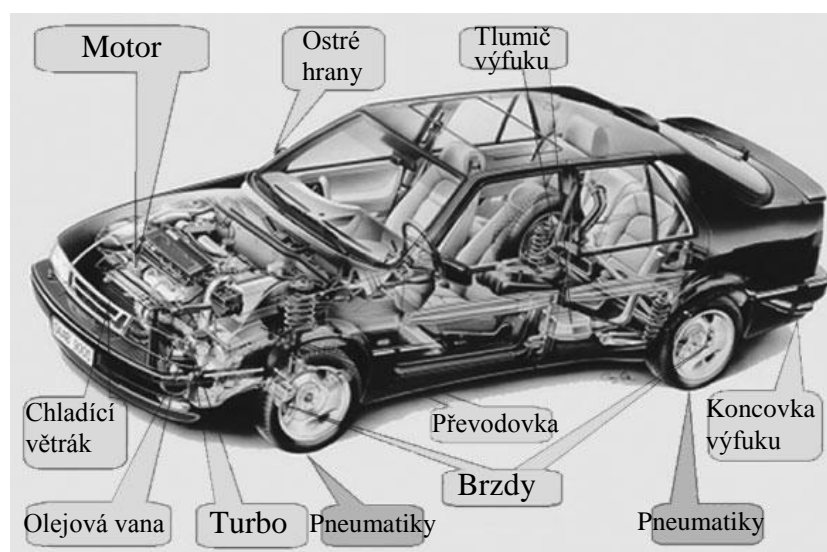
ně. Druhým faktorem ovšem je, že operátor takového specificky hlučného stroje je vystaven poměrně vysokým hodnotám hluku v oblasti převážně nízkých frekvencí. Pokud s takovým strojem vykonává pracovní činnost, je nucen využít osobních prostředků pro ochranu svého sluchu. Ve spojitosti s vibracemi, či rázy nebo přetížením, které vzniká v souvislosti s provozem takového prostředku, je osoba nebo osoby vystaveny poměrně vysokému pracovnímu zatížení v celé oblasti lidského organismu (sluch, zrak, kloubní a svalový aparát, centrální nervový systém apod.) [19]



Obr. 10. Zleva Hyundai i20 (WRC rally speciál – výkon 300koní) [20], Dampr Caterpillar 775F (100tunové nákladní vozidlo) [21], Spot-55 (hasící vozidlo na pásovém podvozku) [22]

3.2.1 Zdroje hluku v interiéru automobilu

Hluk automobilu neovlivňuje pouze cestující, ale stejně tak má vliv i na okolí. Hlavní zdroje hluku jsou motorová jednotka s ní spojené součásti a hluk vznikající vlivem pohybu a aerodynamického proudění vzduchu nad povrchem vozidla. V interiéru automobilu rozeznáváme dva mechanismy šíření hluku. Vlastní vibrace přenášené nosnou konstrukcí a hluk šířící se vzduchem.



Obr. 11. Umístění hlavních zdrojů hluku u automobilu [9]

U osobních automobilů jsou četné zdroje hluku, které působí na posádku. Mezi hlavní a nejvýznamnější zdroje hluku uvnitř automobilu patří:

- motor (spalovací či vznětový),
- chladicí větráky, sání, výfukový systém,
- převodovka a přenos krouticího momentu motoru na podvozek,
- interakce pneumatik a vozovky,
- aerodynamický hluk vznikající obtékáním vzduchu okolo automobilu.

Mezi méně významné zdroje hluku patří:

- klimatizace,
- elektronické ovládání zrcátek,
- hluk zámků,
- hluk vznikající při manipulaci s řídicími mechanismy jako je volant, pedály, řadicí páka [9] [23].



*Obr. 12. Největší zdroje hluku u „běžného“ osobního automobilu
(zleva pneumatika a motor vozidla)*

V neposlední řadě velmi významným činitelem, který přispívá do celkového stavu vnitřního hluku, patří aerodynamický hluk vznikající obtékáním „plynu“ v tomto případě vzduchu kolem karoserie. Obecně lze parametry aerodynamiky stanovit výpočtem, nicméně platí, že čím „kapkovitější“ těleso, tím menší aerodynamický odpor a tím pádem i vznik hlučnosti je nižší.



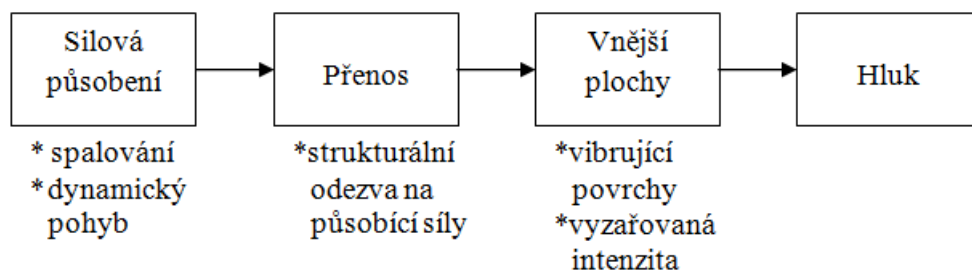
Obr. 13 Aerodynamické proudy obtékání vozidla [24]

3.2.2 Hluk motoru a jeho vznik

Spalovací motory pracují na dvou principech. Zážehové motory využívají k zapálení směsi benzínu a vzduchu jiskru, zatímco vznětové motory využívají vysoké komprese a ohřátí vzduchu ke vznícení vstříknuté nafty. Tyto dva různé spalovací procesy také vedou k významně rozdílným hlukovým charakteristikám. Síly, vznikající uvnitř spalovacích motorů, způsobují vibrace konstrukce motoru, které vedou k vyzařování hluku.

Hlučnost motoru je stejně jako hlučnost celého automobilu závislá na výkonu hnacího ústrojí, provozních otáčkách a technickém stavu. Při různých rychlostech a různých otáčkách je různá nejen úroveň hlasitosti motoru, ale i frekvenční složení hluku, který motorová složka vydává. Nejvyšší hodnoty akustického tlaku se pohybují mezi 20 až 1000 Hz v závislosti na otáčkách. Diesellové motory pracují z pravidla při nižších otáčkách než benzinové a jejich komponenty jsou navrhovány tak, aby vydrželi větší zatížení.

Uvnitř motoru vznikají značné síly, které jsou přenášeny na jednotlivé hnací části. Můžeme je rozdělit do dvou kategorií: síly vzniklé při spalování (tlak ve válci) a mechanické síly. Působením těchto sil, vznikají vibrace ve struktuře a ty jsou dále přenášeny na vnější komponenty, které mohou produkovat hluk. Celková konstrukce motoru a vnějších prvků určuje, jak jsou vibrace přenášeny a jaké množství vibrací je vyzářeno v podobě hluku [9] [25] [26].



Obr. 14. Blokový diagram vzniku hluku generovaného motorem [9]

3.3 Měření hlučnosti

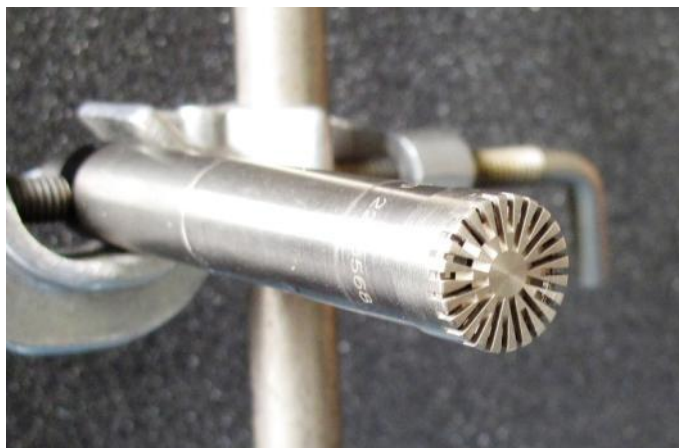
3.3.1 Měřicí technika

Měřicí soustava pro zjišťování akustických veličin se obecně skládá ze tří částí. Snímače zvuku, elektroniky zpracující signál a indikačního zařízení. Pro snímání akustického tlaku se využívají mikrofony. Další snímanou veličinou může být akustické zrychlení vibrací, pro něž se používají akcelerometry. Před začátkem měření je důležité měřicí zařízení řádně zkalibrovat [4].

3.3.2 Mikrofon

Mikrofony převádějí snímaný zvuk na výstupní elektrický signál, který se dále digitálně nebo analogově zpracovává. V praxi je pro své vhodné vlastnosti nejvíce používaný kondenzátorový mikrofon. Má malé rozměry a hmotnost, jeho citlivost se s časem nemění a je dostatečně přesný.

Princip kondenzátorového mikrofону je následující. Membrána mikrofónu je jednou z elektrod a je schopná reagovat na kmitání okolního prostředí. Jejím pohybem proti druhé elektrodě se mění kapacita kondenzátoru a vyvolané pohyby membrány jsou tak převáděny na změny elektrického napětí mezi oběma elektrodami. Vzniká elektrický signál s malými amplitudami, který je zesílen předzesilovačem umístěným v blízkosti mikrofónu. Zesílený signál je dále zpracováván ve zvukoměrném systému například za použití váhových filtrů, rozložení spektra signálu do oktávových pásem a dalších [4].



Obr. 15. Kondenzátorový mikrofon Brüel & Kjaer typ 4190

3.3.3 Metody měření hlučnosti v interiéru automobilu

Vzhledem k povaze zdrojů hluku v interiéru automobilu je možné k jejich charakterizaci použít různé druhy měření a tak i měřících přístrojů. Hluk je složen ze stacionárních zdrojů – motor, pneumatiky, aerodynamický hluk a další, a z náhodných zdrojů hluku okolí vznikající lidskou činností nebo přirozených projevů přírody.

Pro popis hlučnosti interiéru je vhodné použít ekvivalentní hladinu akustického tlaku A $L_{Aeq,T}$. Lze použít i maximální hodnoty akustického tlaku A $L_{A,max}$. Pro větší názornost je vhodné použít frekvenční spektrum průběhu hladiny akustického tlaku A nebo histogram hladin akustického tlaku A .

Umístění měřícího zařízení by mělo odpovídat zdroji hluku. Pokud měříme celkové účinky hluku na člověka, používá se figurína s mikrofony v oblasti uší. V případě měření specifických zdrojů hluku se mikrofony nainstalují kolmo směrem ke zdroji ve vhodné vzdálenosti.

Doba měření by měla být dostatečně reprezentativní a odvozuje se od délky posuzovaného děje [4].

4 VYBRANÉ MATERIÁLY PRO TLUMENÍ HLUKU

Pokud materiál špatně odráží akustickou energii, mluvíme o zvukové pohltivosti - absorpci. V případě, že materiál brání průchodu akustické energie za překážku, označujeme tuto vlastnost jako neprůzvučnost. Dobře neprůzvučné materiály jsou většinou tvrdé s hladkým povrchem a jsou schopny odrazit vysoký podíl dopadající akustické energie, ale mají minimální pohltivost.

4.1 Zvukově pohltivé materiály

Akustická pohltivost materiálů je obecně využívána ve dvou případech.

V prvním případě požadujeme, aby materiál pohlcovал co nejvíce akustické energie dopadající na jeho povrch, avšak už pro nás není důležité, jaké množství energie projde za materiál. Konstrukce z těchto materiálů lze označit za akusticky dobře pohltivé a jsou využívány při řešení prostorové akustiky místností, koncertních sálů, nahrávacích studií apod. Pro kvalitativní vyjádření zvukové pohltivosti materiálu je používán činitel zvukové pohltivosti definován v kapitole 1.7.

V případě druhém požadujeme od materiálu, aby vytvořil bariéru mezi zdrojem hluku a případným příjemcem. Tyto konstrukce pro akustickou izolaci využívají materiály schopné absorbovat akustickou energii a nevyzářít ji dále do okolí za konstrukcí. Některé materiály mají vhodné vlastnosti pro použití v obou případech. V dnešní době se však více využívají kombinace různých materiálů k tvorbě kompozitních nebo sendvičových struktur k dosažení požadovaných vlastností výsledné konstrukce.

Existuje řada materiálů s rozdílnými zvukově pohltivými vlastnostmi, které jsou ovlivněny strukturou materiálu, jeho složením, tloušťkou a povrchovou úpravou. Pórovité a vláknité materiály obvykle vykazují vysoké hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Nejhojnějším zástupcem pórovitých materiálů tvoří polyuretanové pěny, vláknité materiály mohou být přírodního (celulózová vlákna) nebo umělého charakteru (skelné vlákna) [1] [3] [9].

4.2 Pórovitost

Pórovitost materiálu představuje poměr mezi volným objemem uvnitř materiálu a celkovým objemem materiálu. Udává tedy poměr objemu pórů obsažených v materiálu k celkovému objemu. Nabývá hodnot 0 – 1 nebo 0 – 100%.

$$P = \frac{V_{\text{pórů}}}{V_{\text{celkem}}} \quad (40)$$

Kde: P – pórovitost; [-]

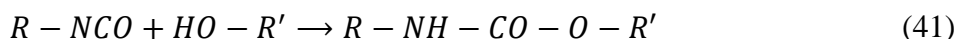
$V_{\text{pórů}}$ – objem pórů; [m³]

V_{celkem} – celkový objem; [m³]

Pórovitost polymerních pěn se pohybuje od 60 – 95%. Množství a velikost pórů ovlivňuje výsledné akustické vlastnosti daného materiálu. Stejně tak jestli se jedná o póry otevřené nebo uzavřené.

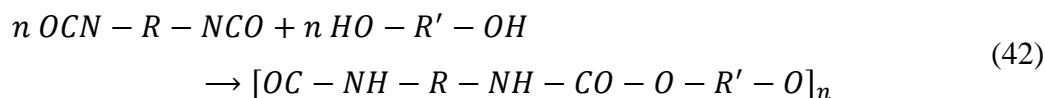
4.3 Polyuretany

Polyuretany nemají vlastní monomer. Uretany vznikají při reakcích isokyanátů s alkoholy, lze je také nazvat jako estery kyseliny karbamové.



K výrobě polyuretanů se využívají reakce více funkčních isokyanátů s polyalkoholy. Iso- kyanátová skupina je značně reaktivní a může reagovat s látkami obsahující aktivní vodíkové atomy. Díky vysoké reaktivitě isokyanátové skupiny může hlavní růstovou reakci doprovázet řada vedlejších reakcí, při nichž vznikají jiné než uretanové skupiny. Tyto vedlejší reakce jsou buď záměrně vyvolané, nebo samovolné.

Při výrobě polyuretanů je třeba dosáhnout absolutně bezvodého prostředí. V přítomnosti vody u reakce polyisokyanátů s polyhydroxysloučeninami dochází ke vzniku CO₂ a ke vzniku močovinových vazeb, avšak v případě výroby lehčených hmot se vzniku CO₂ v reakční směsi využívá. Polyadice probíhají při pokojové teplotě a jsou exotermické. Reakce je možné urychlit přidávkem katalyzátorů (cín, terciární aminy). Pro přípravu lineárních řetězců polyuretanů se používají diisokyanáty a dihydroxysloučeniny. Při použití polyisokyanátů a polyhydroxidů vznikají větvené řetězce.



Vzhledem k možným kombinacím různých polyisokyanátů a polyalkoholů je možné připravit různé polyuretany s různými vlastnostmi a pro různé aplikace. Dále se při výrobě používají extendery, neboli prodlužovače řetězců a katalyzátory.

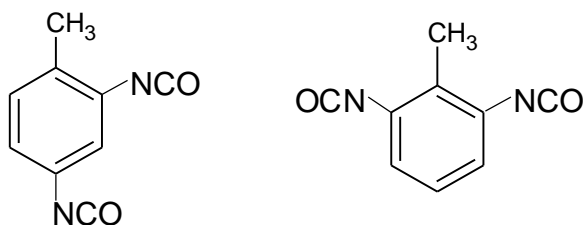
Většinový objem výroby zaujímají lehčené polyuretanové pěny, avšak polyuretany mají i další využití při výrobě lepidel, vláken a filmů, licích pryskyřic, nátěrových hmot a polyuretanových elastomerů [27] [28].

4.3.1 Technicky důležité polyisokyanáty

Při výrobě polyuretanů se převážně používají aromatické polyisokyanáty, které jsou levnější a reaktivnější než alifatické. K nejvíce používaným patří diisokyanatotoulen a diisokyanatodifenylmethan.

- *Diisokyanatotoulen* [2,4- a 2,6-toluylendiisokyanatan] – TDI

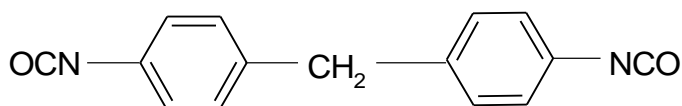
Je dodáván jako směs v různém poměru 2,4 a 2,6 izomerů. Je využíván pro výrobu měkkých pěn a elastomerů. Lze z něj vyrábět netěkavé předpolymery.



Obr. 16. 2,4- a 2,6-diisokyanatotoulen

- *Diisokyanatodifenylmetan* [4,4'-difenylmethandiisokyanát] – MDI

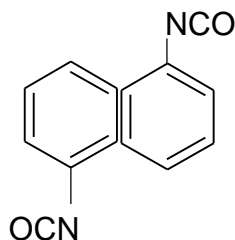
Slouží k výrobě tvrdých a integrálních pěn a k přípravě elastomerů.



Obr. 17. 4,4'-diisokyanatodifenylmetan

- *Diisokyanatonaftalen* [1,5-naftylendiisokyanát]

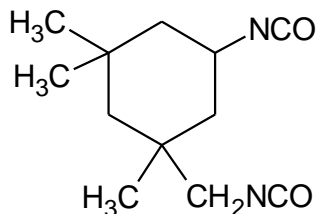
Vysoce reaktivní a slouží k přípravě mechanicky náročných elastomerů.



Obr. 18. 1,5-Diisokyanatonaftalen

Aromatické diisokyanáty vlivem světla a přítomnosti kyslíku žloutnou. Pro pohledové výrobky se používají alifatické a cykloalifatické diisokyanáty.

- *Diisokyanatohexan* [hexametylendiisokyanát]
Slouží k výrobě nežloutnoucích elastomerů a fyziologicky nezávadných lékařských meziproduktů.



Obr. 19. 1,6-Diisokyanatohexan

Isokyanátová skupina velmi ochotně reaguje se všemi sloučeninami obsahující vodík, tedy i s tkáněmi. Isokyanáty jsou dráždivé jedy a jejich účinky se projevují vznikem kožních alergií, dermatózami, slzením a pálením očí, drážděním ke kašli až plicní otoky. Nebezpečné jsou hlavně jejich páry, takže lehce těkavé isokyanáty [27] [28].

4.3.2 Polyoly

Pro výrobu polyuretanů se výhradně používají oligomerní až polymerní produkty s koncovými hydroxylovými skupinami, kvůli jejich vhodné reaktivitě a možnosti řídit průběh síťovacích reakcí. Polyhydroxylová složka je mnohem levnější než isokyanáty. Používají se polyetheralkoholy a polyesteralkoholy.

- *Polyesteralkoholy*

Připravují se polyesterifikací dikarboxylových kyselin (kyseliny adipové a ftalananhydridu) a přebytku diolů (dietylenglykolu, 1,4-butandiolu, 1,6-hexandiolu, neopentylglykolu), kvůli obsazení konců řetězců hydroxylovými skupinami. Pokud požadujeme rozvětvené produkty, část diolů se nahradí trioly. Molární hmotnosti běžně používaných polyolů se pohybují od \bar{M} 2000 až \bar{M} 4000. Výhodou produktů vytvrzovaných polyestery je vyšší odolnost proti povětrnostním podmínkám, zvýšené teplotě a mají vyšší tvrdost. Nevýhodou pak je jejich snazší hydrolyzovatelnost.

- *Polyetheralkoholy*

Vyrábí se polymerací propylenoxidu nebo směsi propylenoxidu s etylenoxidem. V závislosti na použití iniciující látky se získávají produkty lišící se funkcí. Lineární polyetherdiol vzniká při reakci vody a propylenoxidu. Při použití sloučeniny s vyšším obsahem aktivních vodíků dostáváme rozvětvené vícefunkční polyetheralkoholy. Pro vícefunkční polyetherpolyoly se používají iniciátory pentaerthritol a aromatická a alifatické diaminy. Pro zvýšení reaktivity polyetheralkoholů se na je-

jich řetězce roubují etylenoxidové skupiny. Polyethery používané pro výrobu polyuretanů se pohybují v rozmezí molárních hmotností \bar{M} 300 až \bar{M} 6000. Oproti polyesteralkoholům, které mají mezimolekulové vazby, mají polyetheralkoholy nižší viskozitu [27] [28] [29].

4.4 Polyuretanové pěny

K výrobě polyuretanových lehčených hmot je používána reakce diisokyanátů s polyhydroxysloučeninami (polyethery nebo polyestery) a vodou. Přítomnost vody v reakční směsi zajišťuje vznik CO_2 během reakce, který působí jako nadouvadlo. Průmyslově vyráběné pěny se neobejdou bez přítomnosti katalyzátorů. Nejčastěji používané jsou terciární aminy, dále se používají organokovové sloučeniny cínu.

Podle objemu isokyanátové složky ve směsi mají výsledné pěny různou tvrdost. Rozlišujeme měkké, tvrdé, polotvrdé a integrální pěny.

- *Měkké pěny* – obsah isokyanátové složky je do 40 % hmotnosti. Tím se dosáhne dlouhých a elastických polymerních řetězců mezi jednotlivými uzly polymerní sítě. Asi 90% měkkých pěn se připravuje v blocích (výroba matrací, sedacího nábytku). Další využití měkkých pěn je při laminování textilu, výroba izolačních a těsnících pásek a obalových materiálů. V automobilovém a nábytkářském průmyslu se využívá měkkých pěn tvarovaných ve formách pro výrobky, kde požadovaného tvaru nelze dosáhnout ořezáváním.
- *Tvrdé pěny* – obsah isokyanátové složky je až 70 % celkové hmotnosti. Hydroxylová složka tedy musí být rozvětvená. Tvrdé pěny se výhradně připravují ve formách a to otevřených či uzavřených. Pro výrobu výrobků z tvrdých pěn lze využít předpolymeru, který lze vypěnit následně přidávkem vody.
- *Polotvrdé pěny* – výhradně se vyrábějí v blocích s použitím polyesterové báze. Ve formě desek a bloků slouží pro izolační účely ve stavebnictví, izolace ledniček a potrubí.

- *Integrální pěny* – jsou zvláštním typem lehčených polyuretanů, ve kterých směrem od středu k povrchu stěny výrobku klesá pórovitost, tedy se zvyšuje hustota materiálu. Vytvářejí pórovité jádro a nepórovitý povrch. Jako nadouvadlo se používá fluortrichlormetan. K rozdělení objemu pórů dochází díky teplotnímu gradientu mezi stěnou formy a teplotou uvnitř materiálu. Se snižující se teplotou formy se zvyšuje tloušťka povrchové slupky. Integrální pěny se využívají pro výrobu tvarovaných podrážek bot, automobilových nárazníků, nábytku, jader lyží a snowboardů apod.

4.5 Vlastnosti měkkých polyuretanových pěn

Vysoká pórovitost těchto materiálů (60 – 95 %) zajišťuje jejich dobré zvukové a tepelně izolační vlastnosti. Jejich pevnost a tuhost je však velmi malá, proto nejsou vhodné jako konstrukční prvek. Využívají se jako výplň hlukově pohltivých konstrukcí, kde jsou umístěny v pevném hliníkovém nebo dřevěném rámu.

4.6 Akustická izolace v automobilech

Díky vývoji a rozmanitosti automobilového průmyslu existuje řada materiálů používaných pro hlukovou izolaci interiéru automobilu. Využívají se měkké polyuretanové desky opatřené samolepicí vrstvou, které se vlepují mezi prostor motoru a interiéru nebo do dveří či na strop. Prodejci dále nabízejí lepicí pryžové desky snižující vibrace kapoty, prostoru dveří, podlahy automobilu, které snižují přenos vibrací a snižují tak hlučnost. Pro odhlučnění motorové části automobilu jsou využívány lisované rohože ze skelných vláken, či jiných nehořlavých vláknitých materiálů. Řada těchto odhlučňovacích prvků je opatřena fólií z hliníkové slitiny nebo přímo z hliníku. Tento kompozitní materiál pak vykazuje ještě lepší zvukově izolační vlastnosti.

Některé akustické prvky lze vytvořit s takovým povrchem, který tlumí přesně požadované frekvence v daném místě. Tyto takzvané laděné tlumící prvky lze najít hlavně v oblasti motoru.

Dále za akustickou izolaci lze považovat i standardní vybavení automobilu, jako jsou koberečky, dveřní a přístrojové obložení a autosedačky. Všechny tyto komponenty zabraňují průniku hluku z daných zdrojů směrem k cestujícím.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Byly vybrány polyuretanové materiály, na kterých byla provedena měření hlukové pohltivosti a hlukové neprůzvučnosti. Výsledky jsou prezentovány formou grafů a tabulek naměřených příslušných hodnot.

5.1 Materiály pro tlumení

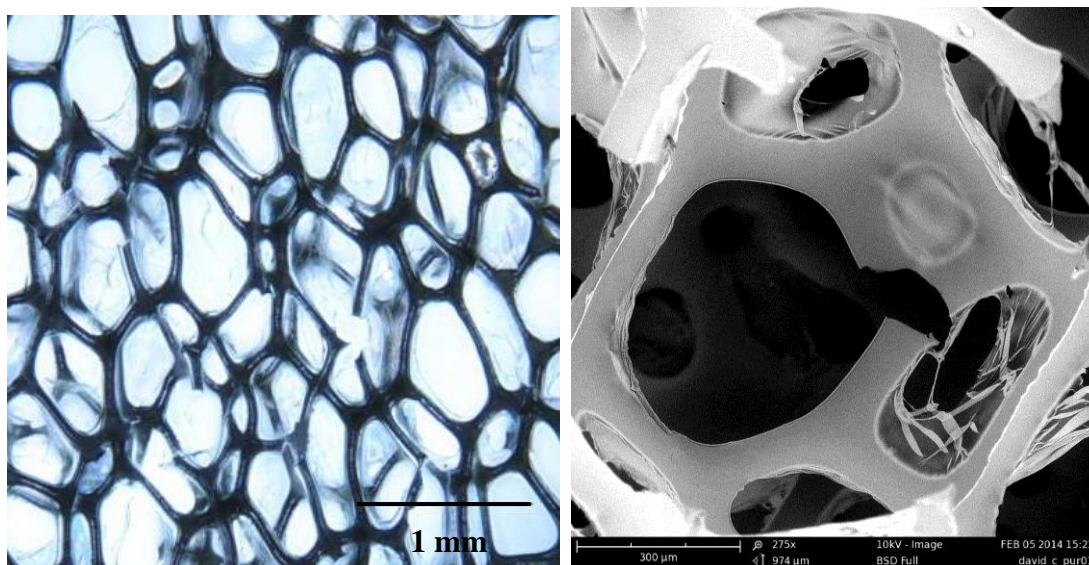
Byly vybrány dva typy polyuretanů. Polyuretan S3535F ve formě desek o tloušťce 1,1 cm a polyuretan H3050 ve formě desky s profilem. Na řezu má profil sinusový průběh.

Tab. 3. Popis jednotlivých tlumicích vrstev

Materiál	Tlumicí vrstva	Popis
S3535F	VZ1	Deska
	VZ2	Deska s definovaným odebráním povrchu
	VZ1+2	Kombinace VZ1 a VZ2
H3050	VZ3	Profilovaná deska

5.1.1 Polyuretan S3535F

Tento polyuretan je polyetherového speciálního typu. Nejčastěji je využíván na bloky, desky, přířezy, tvarované výrobky, v automobilovém průmyslu, jako spotřební zboží nebo zvuková izolace.



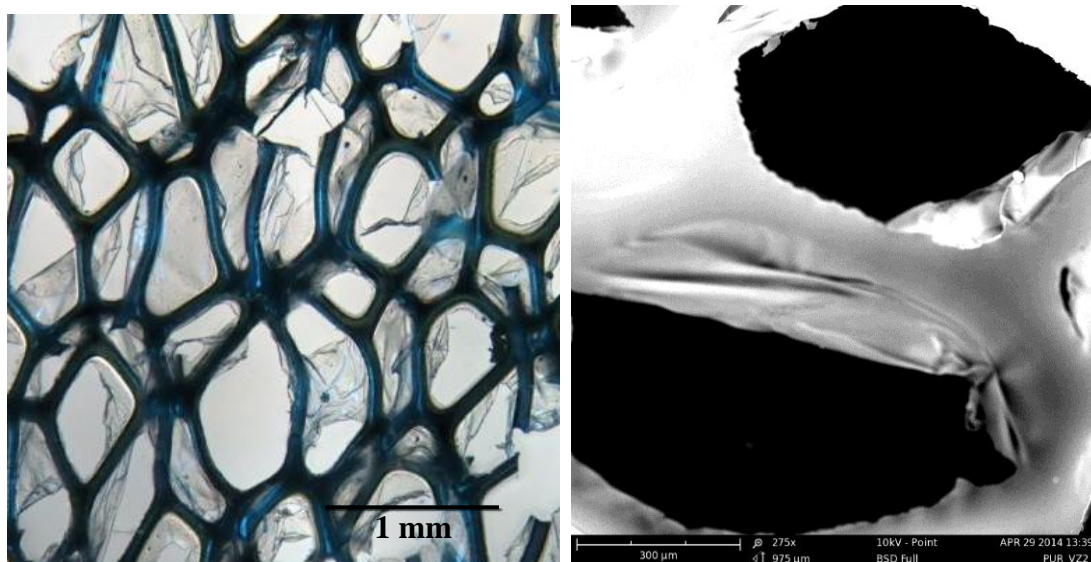
Obr. 20. Struktura pórů PUR S3535F zleva snímek z optického mikroskopu a snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu

Tab. 4. Vybrané vlastnosti PUR S3535F

Typ polyuretanu	Barva	Hustota [kg·m ⁻³]	Odpor při stlačení [kPa]	Pevnost v tahu [kPa]	Tažnost [%]	Trvalá deformace [%]
S3535F	šedá	35	3,5	130	190	2

5.1.2 Polyuretan H3050

H3050 je označení polyetherového tvrdého typu polyuretanu. Je používán k výrobě opěrných prvků, sedadlových a lehacích ploch. Dále také na bloky, desky, přířezy, tvarované výrobky, pásy. Využívá se při výrobě čalouněného nábytku, matrací, jako výplňový či obalový materiál.



Obr. 21. Struktura pórů PUR H3050 zleva snímek z optického mikroskopu a snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu

Tab. 5. Vybrané vlastnosti PUR H3050

Typ polyuretanu	Barva	Hustota [kg·m ⁻³]	Odpor při stlačení [kPa]	Pevnost v tahu [kPa]	Tažnost [%]	Trvalá deformace [%]
H3050	šedá	30	5,0	170	170	2,5

5.2 Měřicí zařízení

V laboratorní části byly pro charakteristiku akustických vlastností vybraných materiálů použity tyto přístroje.

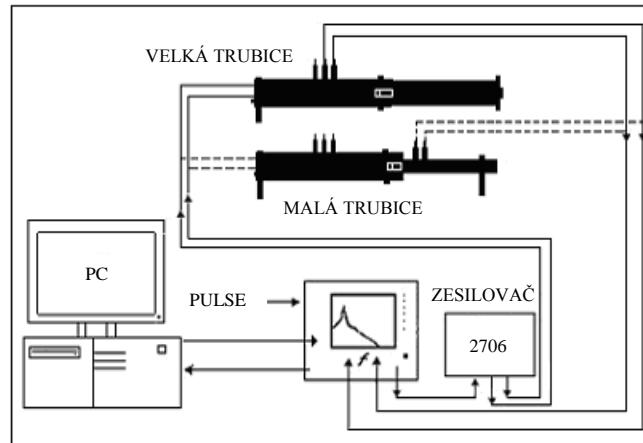
5.2.1 Kundtova trubice

Kundtova trubice je zařízení určené pro měření zvukové pohltivosti materiálů. Při měření je využito metody přenosové funkce. Tato metoda je dána normou ČSN ISO 10534-2.

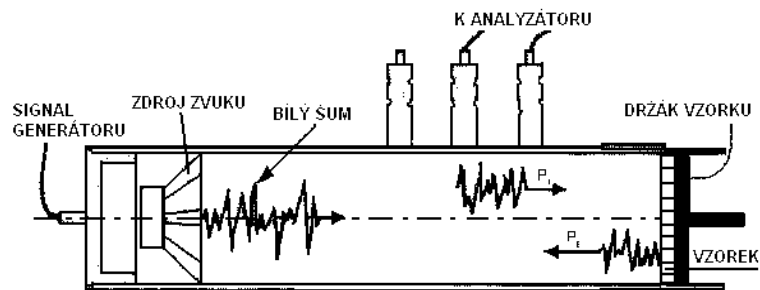
Vzorek kruhového tvaru o daných rozměrech malé, nebo velké trubice je umístěn na jeden konec trubice. Na druhém konci se nachází generátor zvuku – reproduktor. K reproduktoru je připojen zesilovač. Zdrojem signálu je multianalyzátor PULSE Brüel & Kjaer, který dodává signál do zesilovače a zároveň ho snímá dvěma mikrofony umístěnými na Kundto-
vě trubici. K multianalyzátoru je připojený počítač s vyhodnocovacím programem Pulse Lab-Shop, kde jsou zaznamenána a graficky vyhodnocena naměřená data [30].



Obr. 22. Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 [31]



Obr. 23. Zapojení aparatury s velkou a malou měřicí trubici



Obr. 24. Vnitřní hlukové uspořádání Kundtovy trubice

5.2.2 Zvukový analyzátor

K měření zvukové neprůzvučnosti materiálů byl použit zvukový analyzátor Brüel & Kjaer typ 2146. Je to přenosný mnohafunkční analyzátor. Skládá se z mikrofону a samotného analyzátoru. Umožňuje okamžitou kmitočtovou analýzu ve zlomkooktávových pásmech. Pro přesné měření je potřeba měřicí soustavu správně zkalibrovat. K tomu slouží kalibrační zařízení tónový kalibrátor Brüel & Kjaer typ 4231.



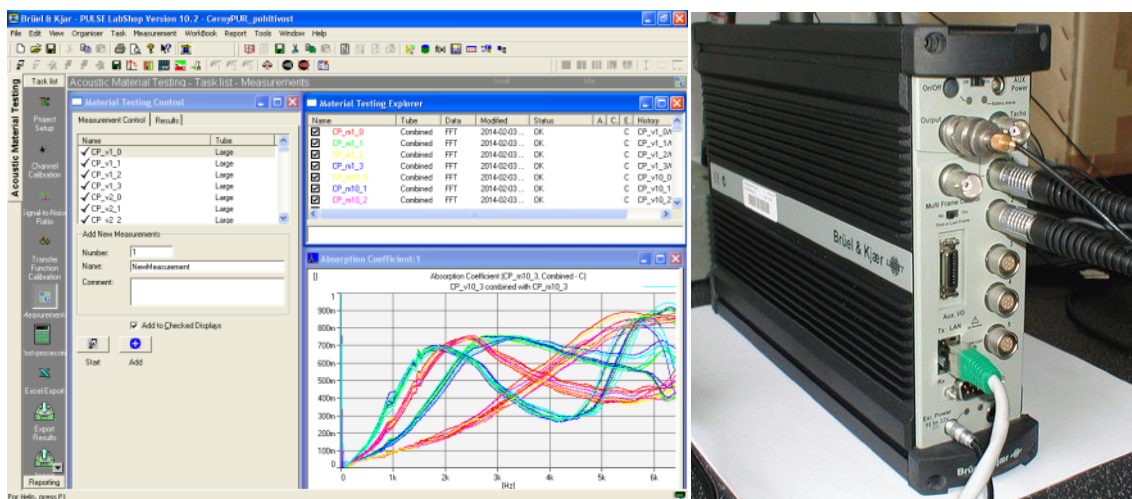
Obr. 25. Zvukový analyzátor Brüel & Kjaer typ 2146 a tónový kalibrátor Brüel & Kjaer typ 4231

5.2.3 Další zařízení

- Optický mikroskop Nikon Eclipse 50i
- Skenovací elektronový mikroskop Phenom Pro
- Fotoaparát Canon Powershot A640 – pro fotografie z optického mikroskopu
- Fotoaparát Canon Powershot G10 – pro fotografie vzorků, vybavení a podmínek
- Software LabShop Pulse – pro zpracování dat naměřených na Kundtově trubici
- Software Terminal RS 232 – pro zpracování dat z analyzátoru BaK 2238
- Software Helicon Focus 5.1 – pro rekonstrukci obrazu z optického mikroskopu

5.3 Měření zvukové pohltivosti

Měření zvukové pohltivosti bylo provedeno na třech sadách vzorků polyuretanů s různým typem povrchu a tloušťkou. Byly připraveny vzorky z polyuretanových desek. Vzorky byly vyseknuty vysekávacím nožem o průměru 30 a 100 mm. Na kundtově trubici bylo provedeno měření hlukové pohltivosti pro malý vzorek (30 mm) a následně pro velký vzorek (100 mm). Tato měření byla zpracována v programu Pulse LabShop verze 10.2.



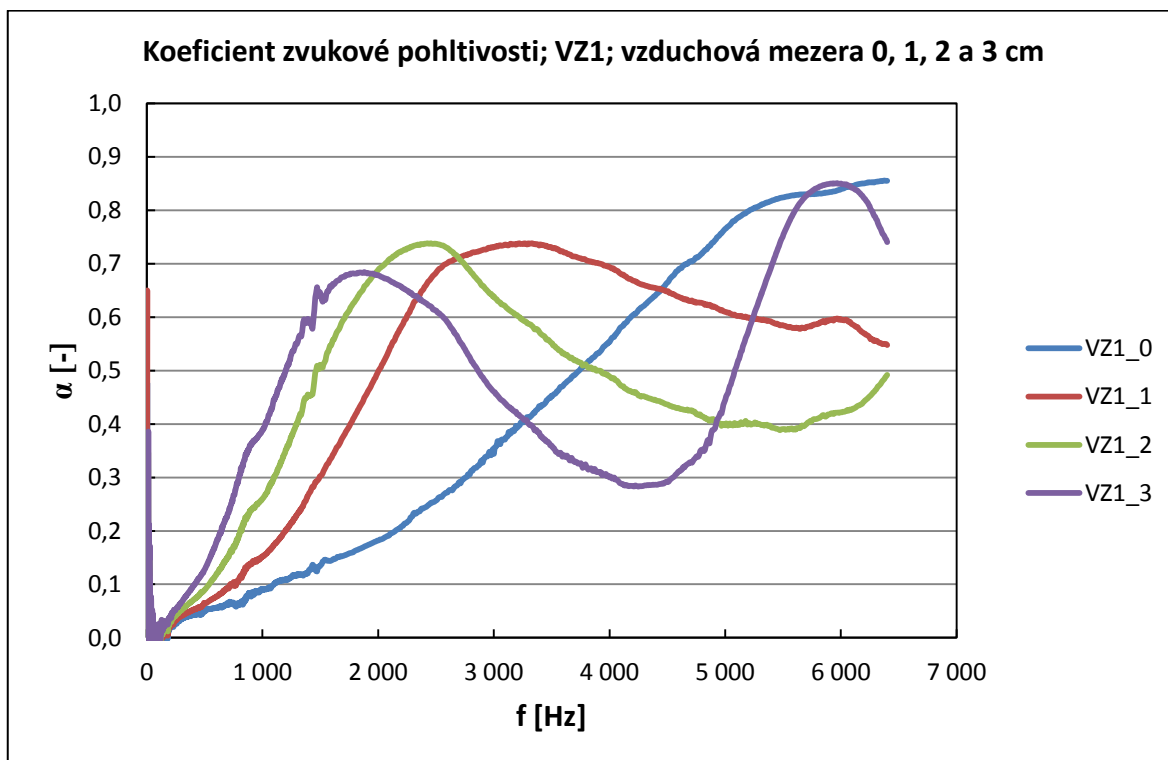
Obr. 26. Pracovní prostředí softwaru Pulse LabShop verze 10.2 a multianalyzátor Pulse typ 3506-B-030

5.3.1 Zvuková pohltivost PUR S3535F; VZ1

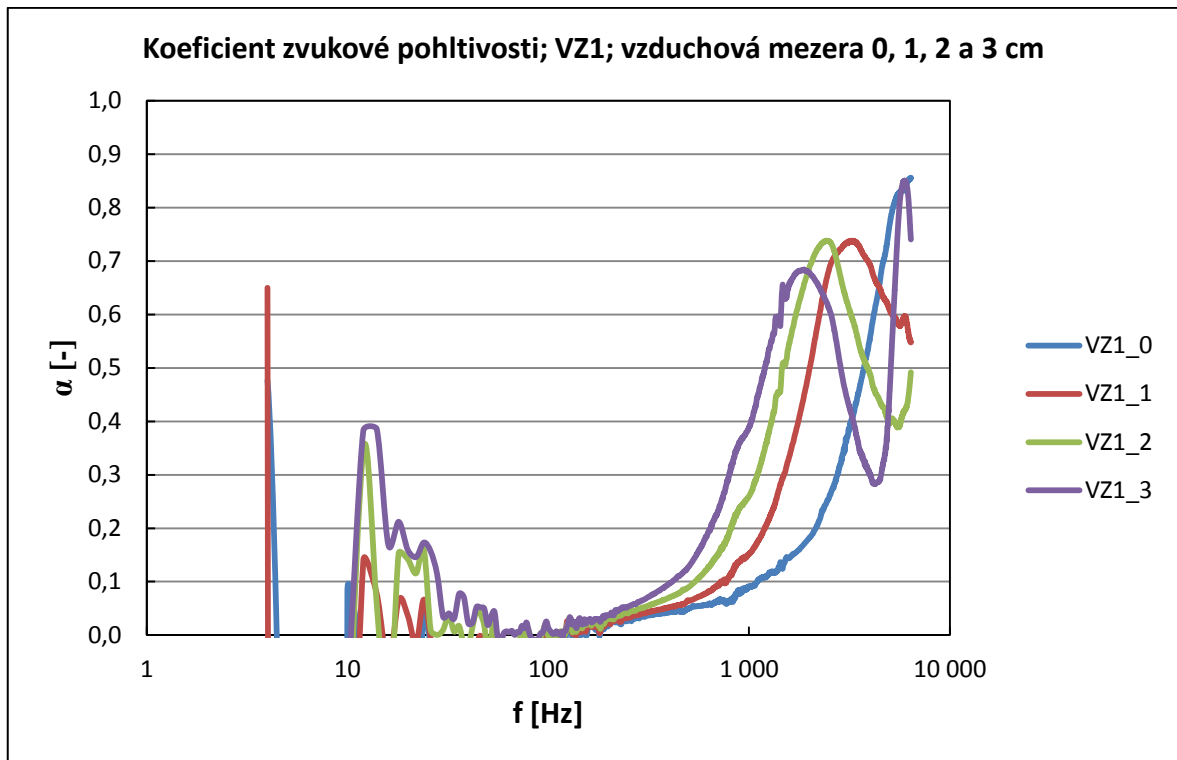
Pro měření koeficientu zvukové pohltivosti je nutné vyseknout dva vzorky pro dvě různé trubice (malou a velkou). Tyto vzorky jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 27.).



Obr. 27. Vzorky VZ1 pro měření zvukové pohltivosti PUR S3535F 30 a 100 mm



Obr. 28. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F VZ1 (lineární zobrazení osy frekvence)



Obr. 29. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F VZ1 (logaritmické zobrazení osy frekvence)

Ve výše uvedených grafech jsou zpracovány totožné závislosti, ale v jiném zobrazení v ose X. Takového zobrazení nám dává informaci o lineárním průběhu (zobrazeno v Obr. 28.), a také v logaritmickém průběhu (Obr. 29.). Tyto křivky mají několik důležitých údajů:

- Zobrazení ve frekvenčním pásmu od 20 Hz do 6400 Hz (s nižší přesností v nízkých frekvencích což je vysvětleno u výsledných měření).
- Lineární průběh vykazuje maxima rovnoměrně a ukazuje přehledně spíše vyšší frekvence.
- Logaritmický průběh je zaměřen více do nižších frekvencí, které jsou pro automobilový průmysl důležité s ohledem na konstrukci motorových jednotek.
- Hladiny pohltivosti jsou v obou případech totožné (pokud je hodnota nad 0,8 jde o vynikající pohltivé vlastnosti materiálu).

Takto jsou zpracovány všechny grafy zvukové pohltivosti, aby byly zaměřeny vždy na nízké frekvence (oblasti do 1 000 Hz a logaritmické zobrazení), ale také na vyšší frekvence (oblast nad 3 000 Hz v lineárním zobrazení).

5.3.2 Zvuková pohltivost PUR S3535F; VZ2

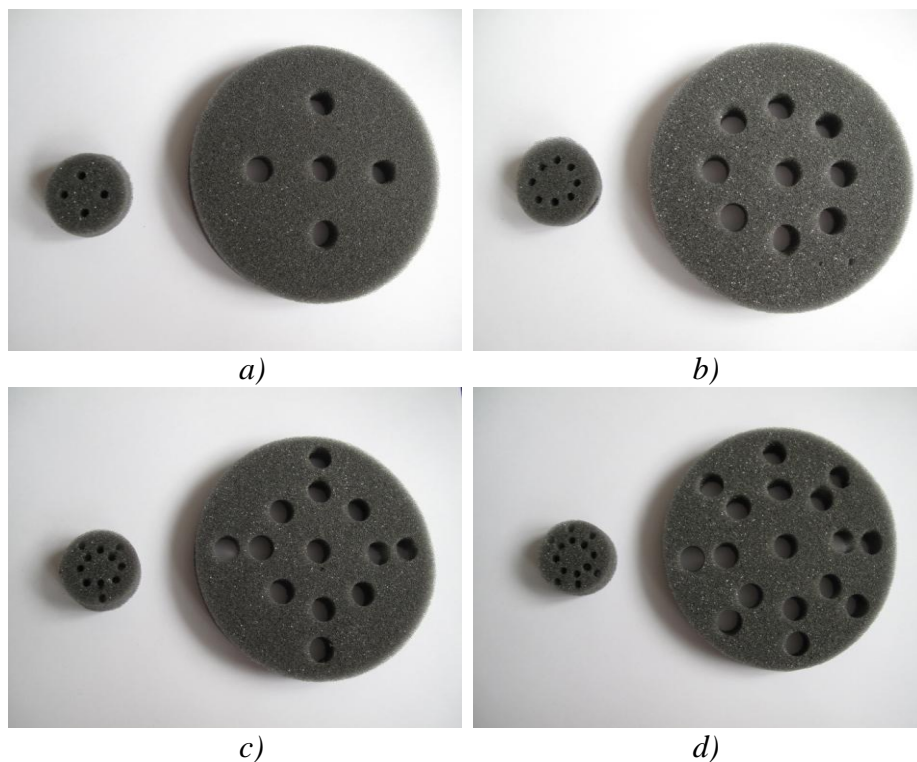
Do vzorků pro měření zvukové pohltivosti byly vysekávacím nožem vyseknuty díry jak u velkých tak u malých vzorků. Počet děr ve velkém vzorku byl 5, 9, 13 a 17 a v malém vzorku 4, 8, 11 a 13. Počet děr ve vzorcích odpovídá procentuálnímu odebrání povrchu vzorku. Následující tabulka (Tab. 6) vysvětluje označení vzorků použitých v grafech a na obrázcích uvedených níže.

Tab. 6. Označení vzorků VZ2 pro měření zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F

Vzorek	Označení	Průměr otvoru*	Počet děr	Počet % odebraného povrchu
100 mm	VZ2_5	10 mm	5	5
100 mm	VZ2_9	10 mm	9	9
100 mm	VZ2_13	10 mm	13	13
100 mm	VZ2_17	10 mm	17	17
30 mm	vz2_5	3,2 mm	4	5
30 mm	vz2_9	3,2 mm	8	9
30 mm	vz2_13	3,2 mm	11	13
30 mm	vz2_17	3,2 mm	13	17

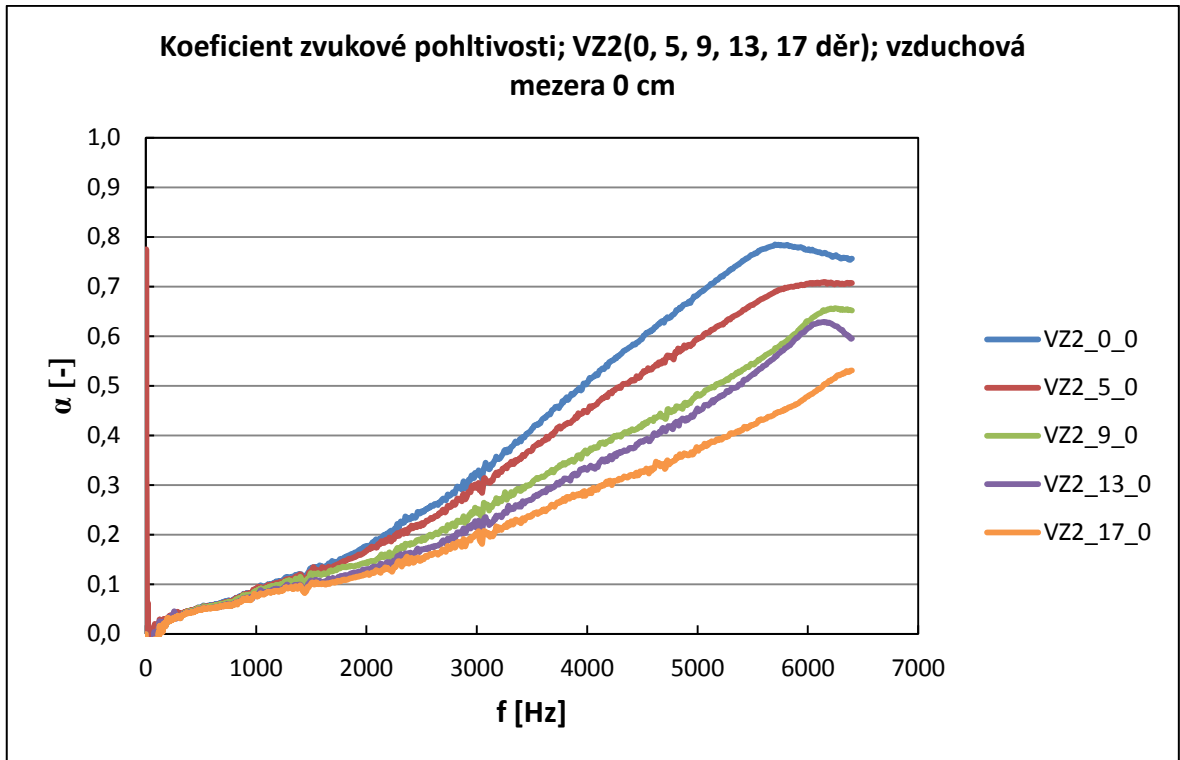
* průměr otvoru dán popisem výrobce použitého průbojníku

V následujícím obrázku (Obr. 30.) jsou zobrazeny umístění děr na povrchu velkého a malého vzorku a to tak, aby byl vždy zachován poměr odebraného objemu děr k celkovému objemu vzorku.

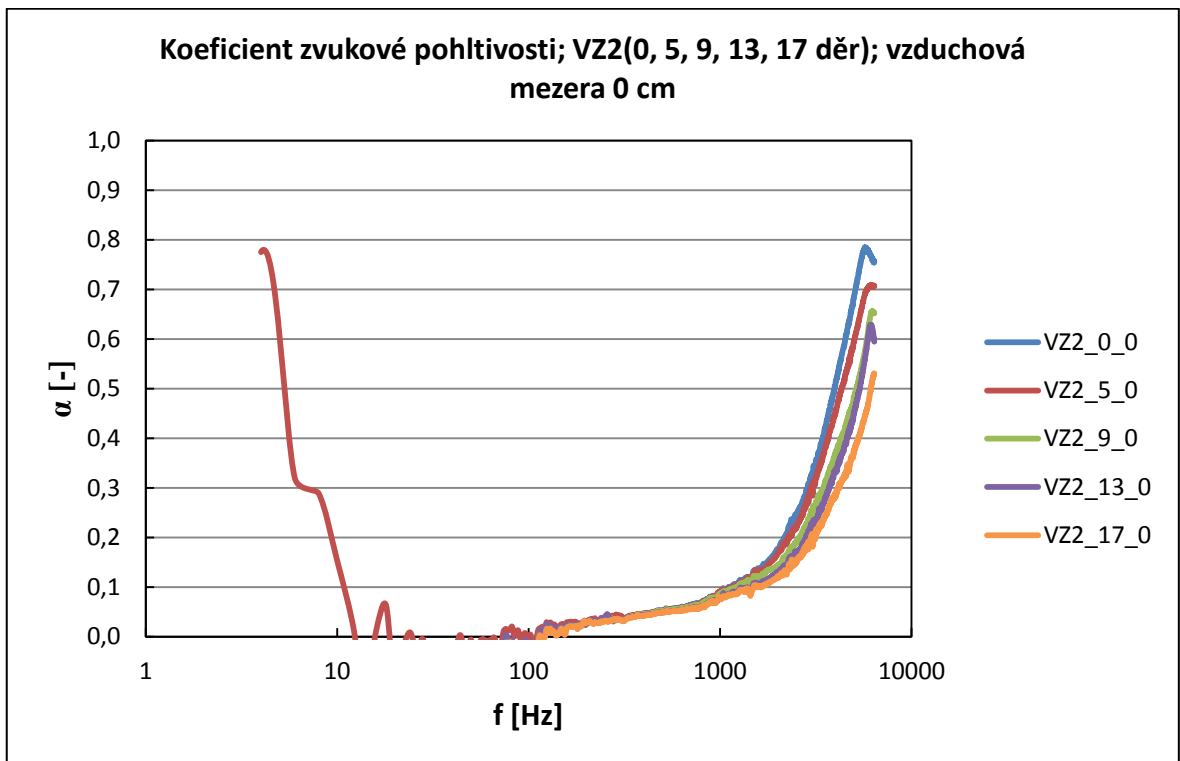


Obr. 30. Vzorok vz2 (30 mm) a VZ2 (100 mm) a) 5 b) 9 c) 13 d) 17 pro měření zvukové pohltivosti PUR S3535F

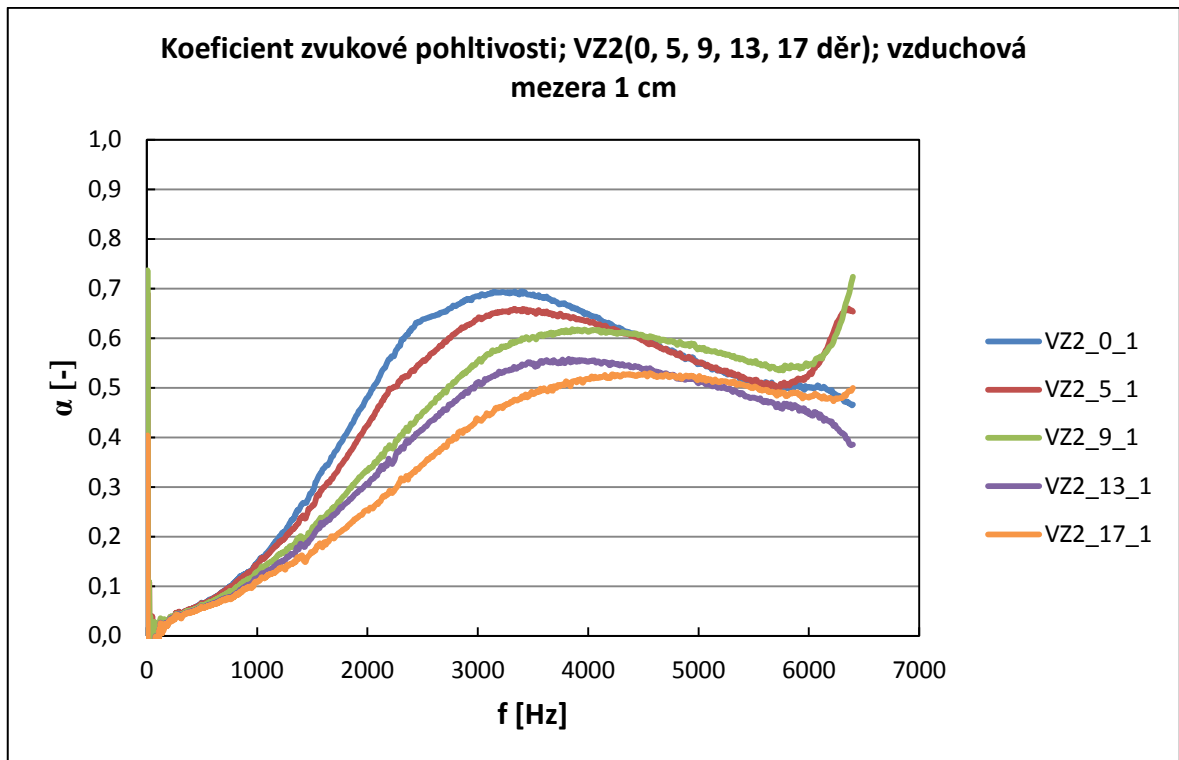
Následující graf (Obr. 31.) akustické pohltivosti ukazuje jednoduchou lineární závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci. V tomto případě se jedná o rovnoměrný náběh křivek a zvýšení pohltivosti s rostoucí frekvencí. Celý rozsah je bez významných maxim, a tudíž tento materiál je nejméně použitelný v nízkých frekvencích a jen částečně použitelný pro vyšší pohltivosti nad 5 000 Hz (nutno dodat, že pohltivosti nad 5 000 Hz jsou otázkou velmi vysokých rychlostí a spadají spíše do oblasti sportovních automobilů až oblasti letectví a vyšší aerodynamiky).



Obr. 31. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku bez vzduchové mezery (lineární zobrazení osy frekvence)



Obr. 32. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku bez vzduchové mezery (logaritmické zobrazení osy frekvence)

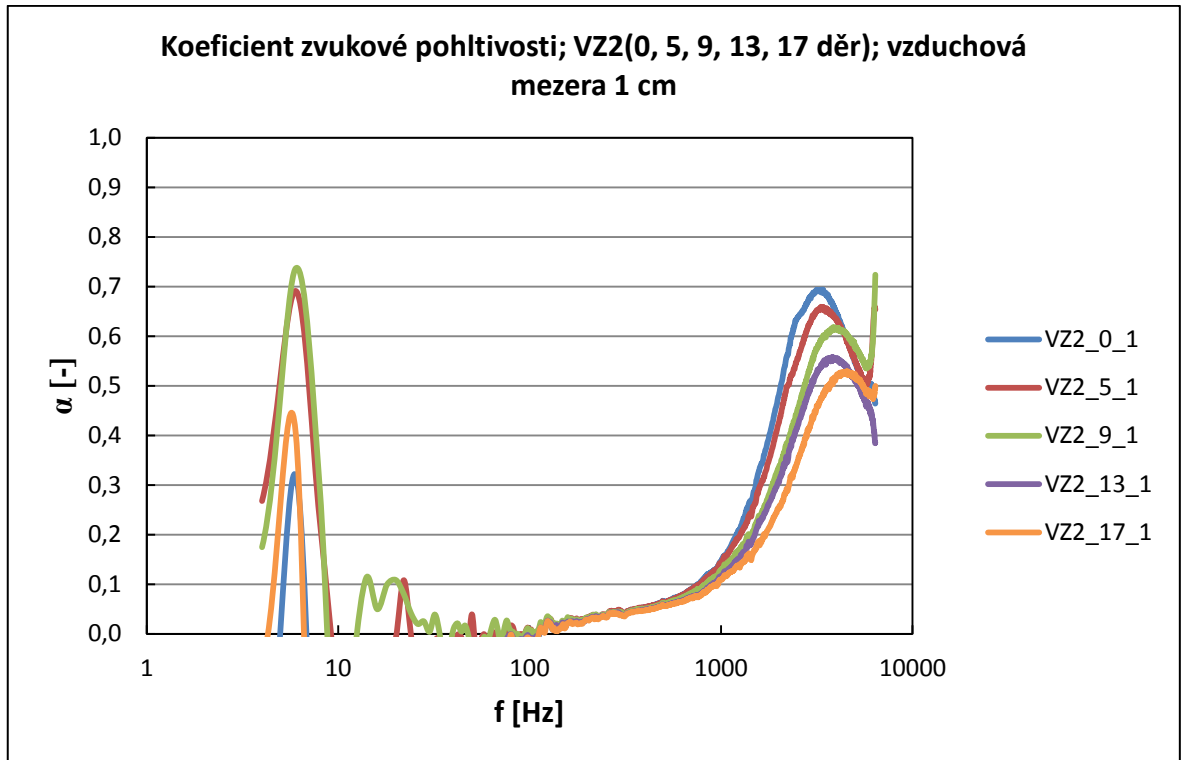


Obr. 33. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 1 cm (lineární zobrazení osy frekvence)

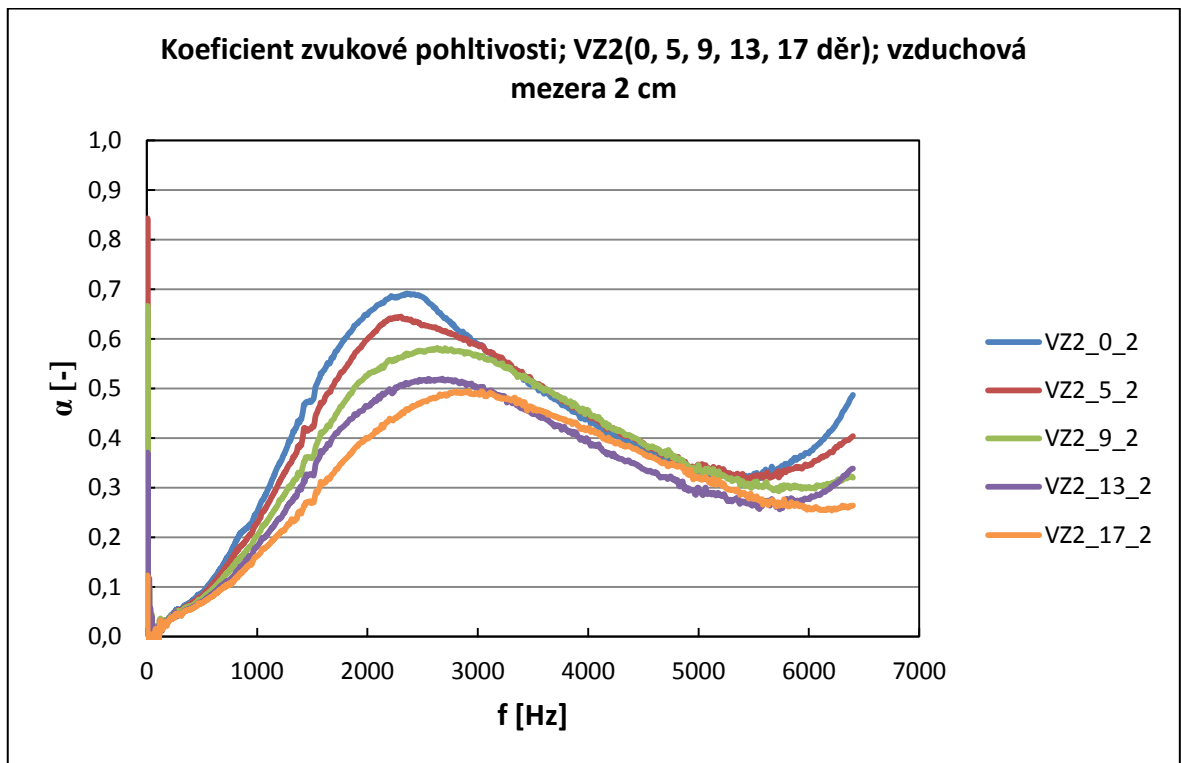
U výše uvedeného grafu je zřejmá tvorba prvního maxima v oblasti kolem 3 000 Hz, což nám dává již širší možnosti pro tlumení a pohltivost než u vzorku, jehož grafická závislost je zobrazena na grafu (Obr. 31.). Z průběhu celého prvního maxima je zřejmá oblast, která spadá do intervalu 2 – 4 000 Hz, a v tomto rozsahu je již možné použít takto připravený materiál polyuretanu. Jedná se zejména o vnitřní prostor automobilu, který vykazuje problematické tlumení nebo pohltivost v oblasti mezi 2 – 4 000 Hz.

Naproti tomu graf s logaritmickou stupnicí na ose X, který je uveden níže (Obr. 34) je zpracován tak, aby byly snadněji viditelné nízké frekvence. Lze si povšimnout velmi nízkých frekvencí (pod 20 Hz), kde jsou viditelné relativně vysoké píky, což je způsobeno nízkou rozlišovací schopností mikrofonů a velkou vlnovou délkou generovaného signálu. Tyto oblasti jsou pro naši aplikaci nepoužitelné, ale již nad 20 Hz je oblast hluku relevantní mají své opodstatnění v rozklíčování oblastí v nízkých frekvencích.

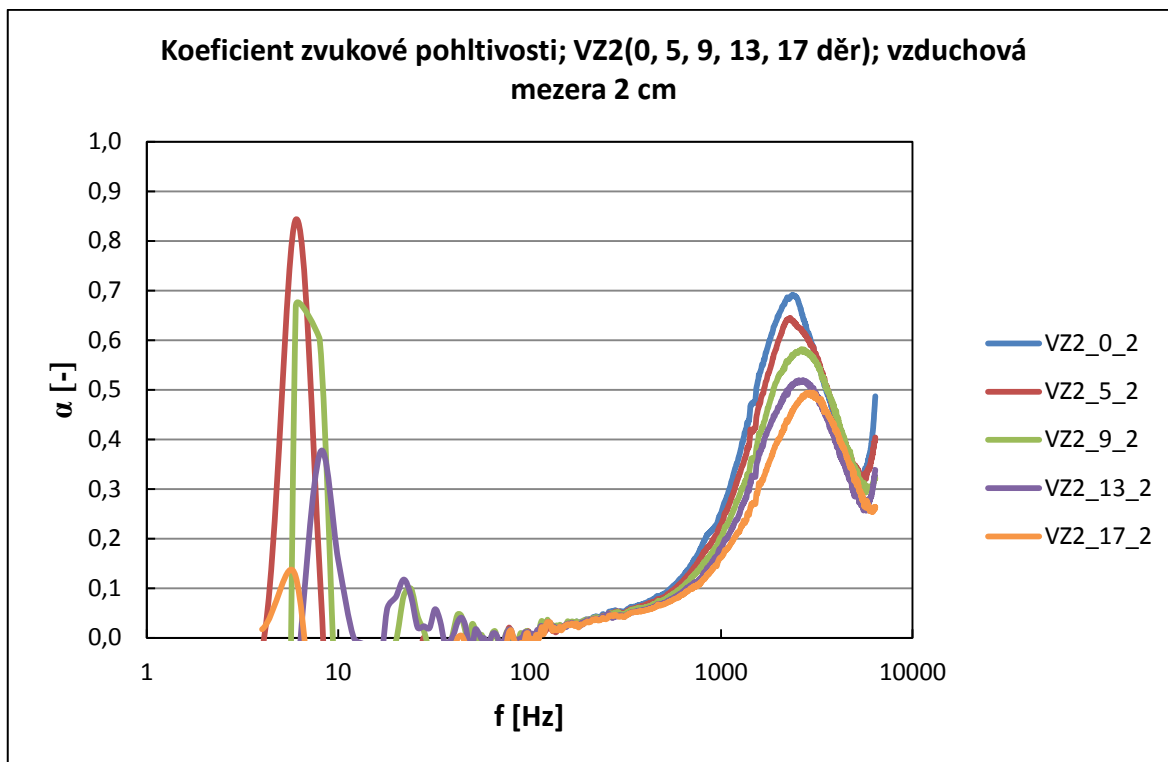
Tyto průběhy potom lze sledovat u dalších variant materiálů na bázi polyuretanu, které byly upraveny na povrchu a ve vnitřní struktuře tak, aby byly sledovatelné změny jak v pohltivosti a útlumu vlivem překážky. Dílčí komentáře jsou uvedeny u příslušných grafů.



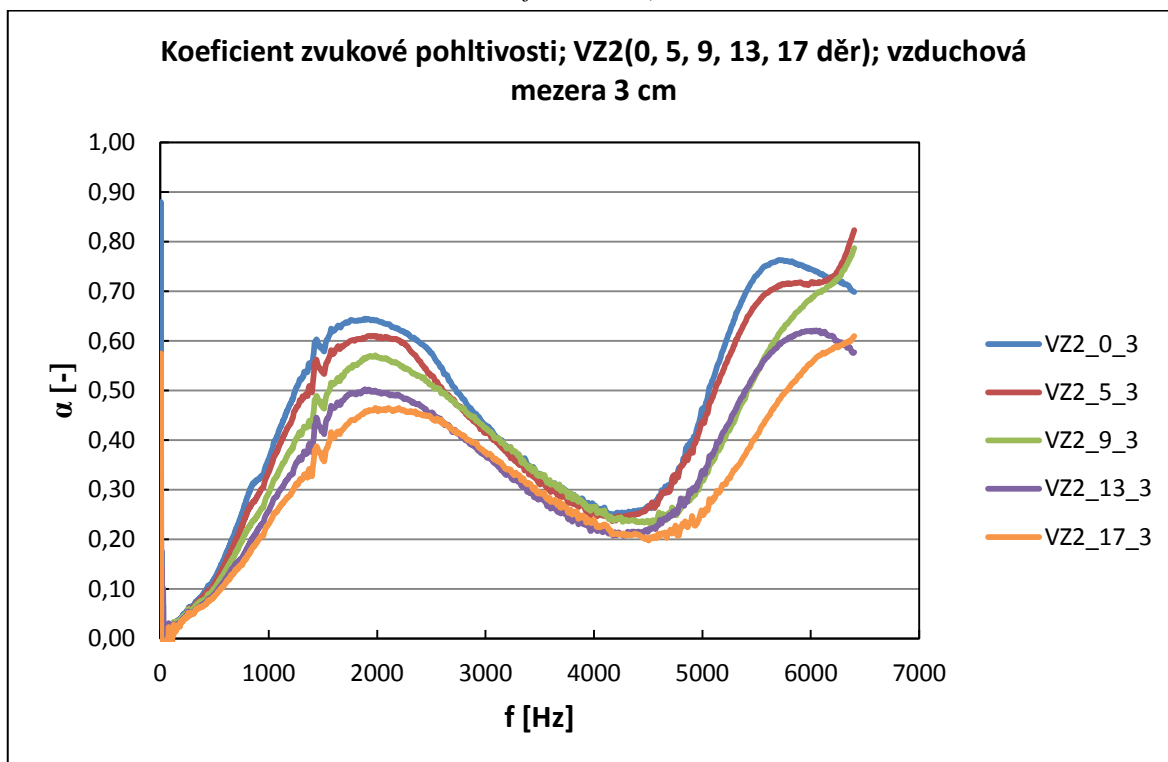
Obr. 34. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 1 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)



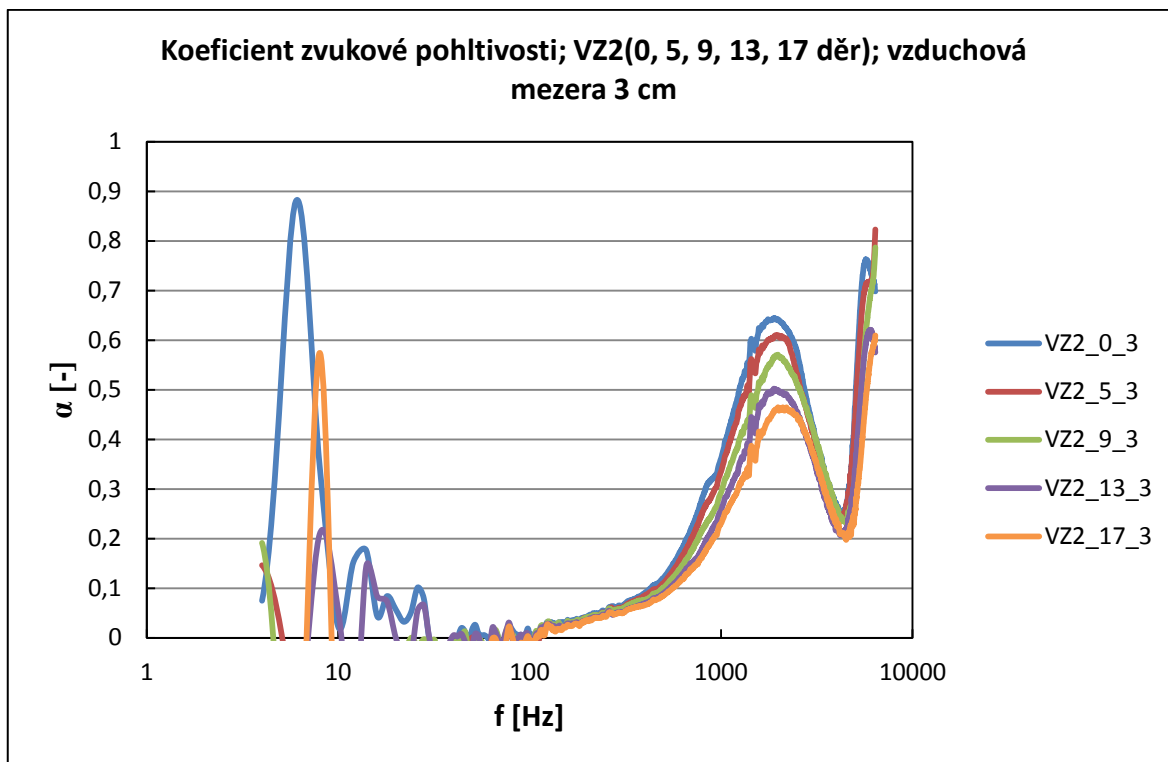
Obr. 35. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 2 cm (lineární zobrazení osy frekvence)



Obr. 36. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 2 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)



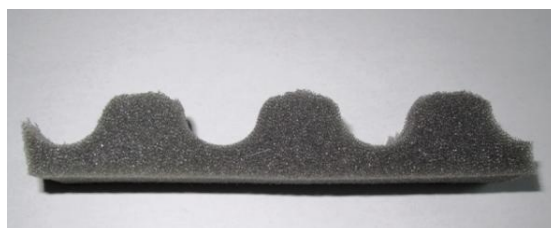
Obr. 37. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 3 cm (lineární zobrazení osy frekvence)



Obr. 38. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 3 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)

5.3.3 Zvuková pohltivost PUR H3050; VZ3

Kvůli nerovnoměrnému povrchu, bylo připraveno z polyuretanu H3050 několik vzorků, u kterých byla zvuková pohltivost měřena. Tab. 7. vysvětluje označení vzorků použitých v následujících grafech a obrázcích.



Obr. 39. Průřez profilovaným PUR H3050

Tab. 7. Označení vzorků VZ3 pro měření zvukové pohltivosti polyuretanu H3050

Vzorek	Označení	Popis
100 mm	V1	Propad uprostřed
100 mm	V2	Vrchol uprostřed
30 mm	m1	Propad mezi čtyřmi vrcholy
30 mm	m2	Propad mezi dvěma vrcholy
30 mm	m3	Vrchol



Obr. 40. Vzorky VZ3 pro měření zvukové pohltivosti PUR H3050 zleva m1V1 a m1V2

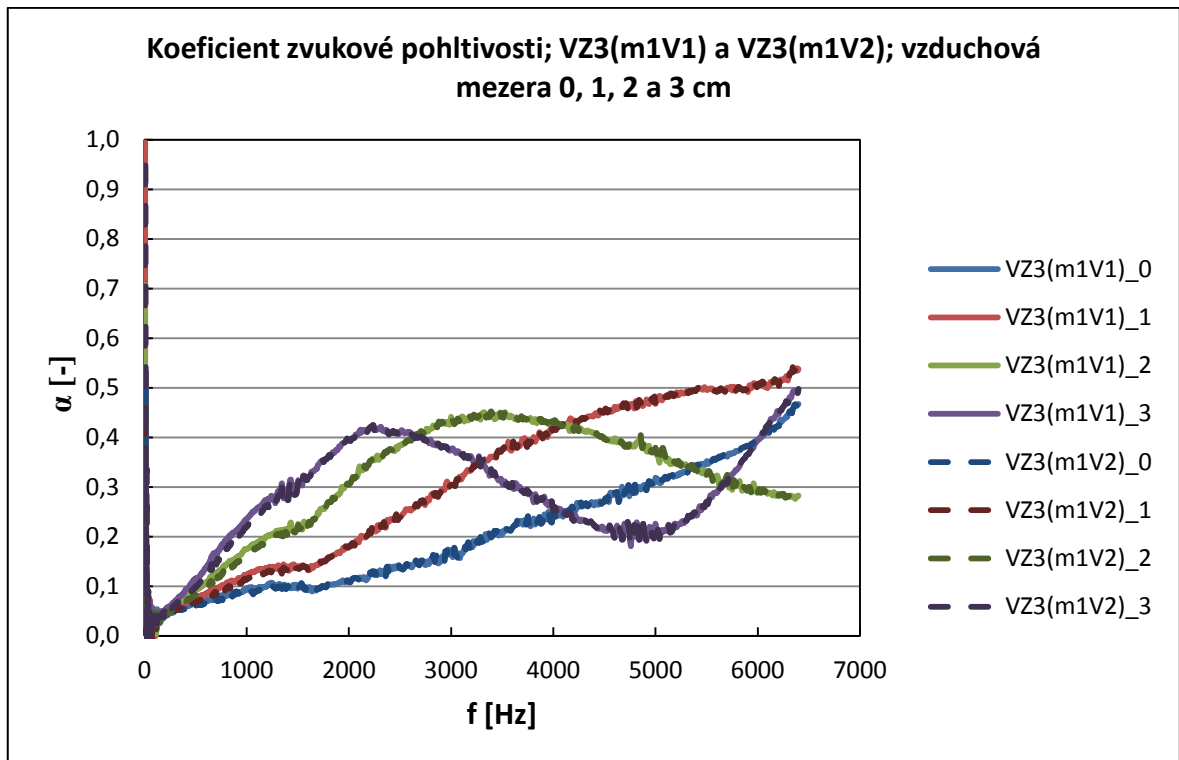


Obr. 41. Vzorky VZ3 pro měření zvukové pohltivosti PUR H3050 zleva m2V1 a m2V2



Obr. 42. Vzorky VZ3 pro měření zvukové pohltivosti PUR H3050 zleva m3V1 a m3V2

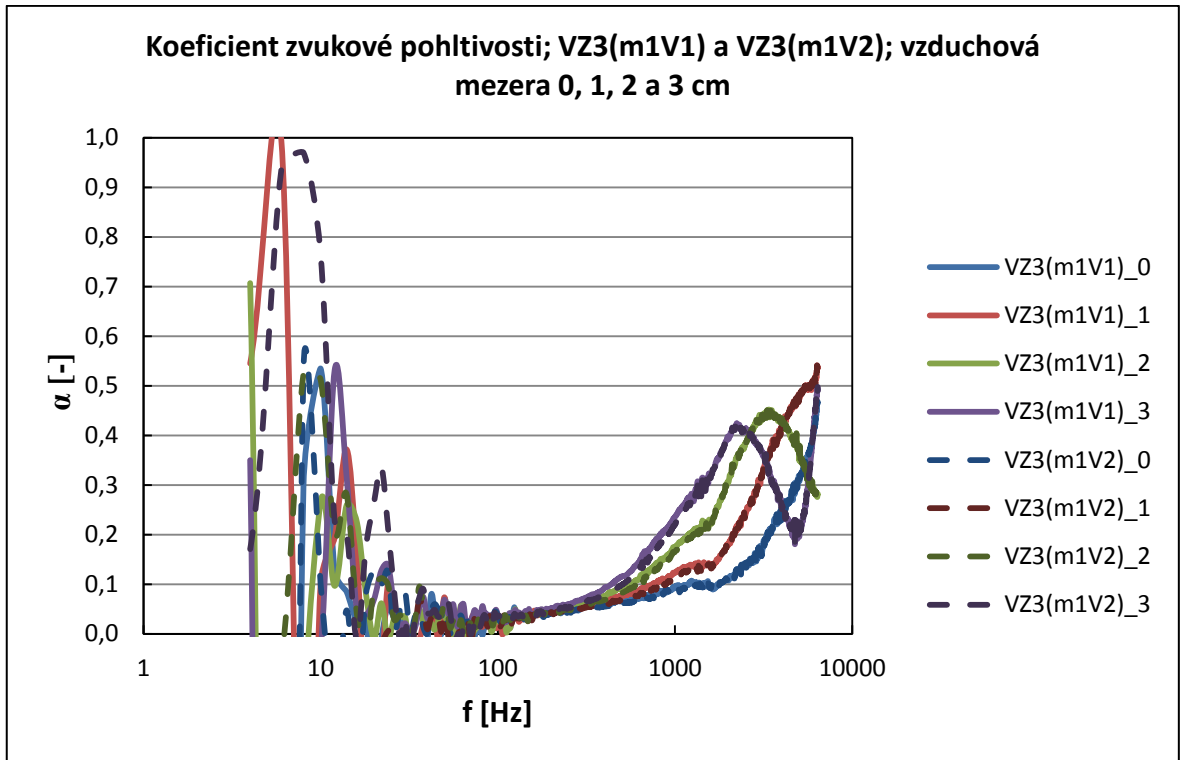
Vliv různé geometrie, které jsou znázorněny na výše uvedených obrázcích dle níže zpracovaných grafů, byl na průběh akustické pohltivosti minimální. Větších odchylek od standardního průběhu je dosaženo převážně v nízkých frekvencích, ale tato oblast je poměrně nestabilní z hlediska měřeného signálu, takže k těmto odlišnostem je nutno přistupovat s rezervou. Tento jev lze pozorovat zejména na křivkách, které jsou jednak plné, ale také ve stejném průběhu přerušované ve vyšších frekvencích.



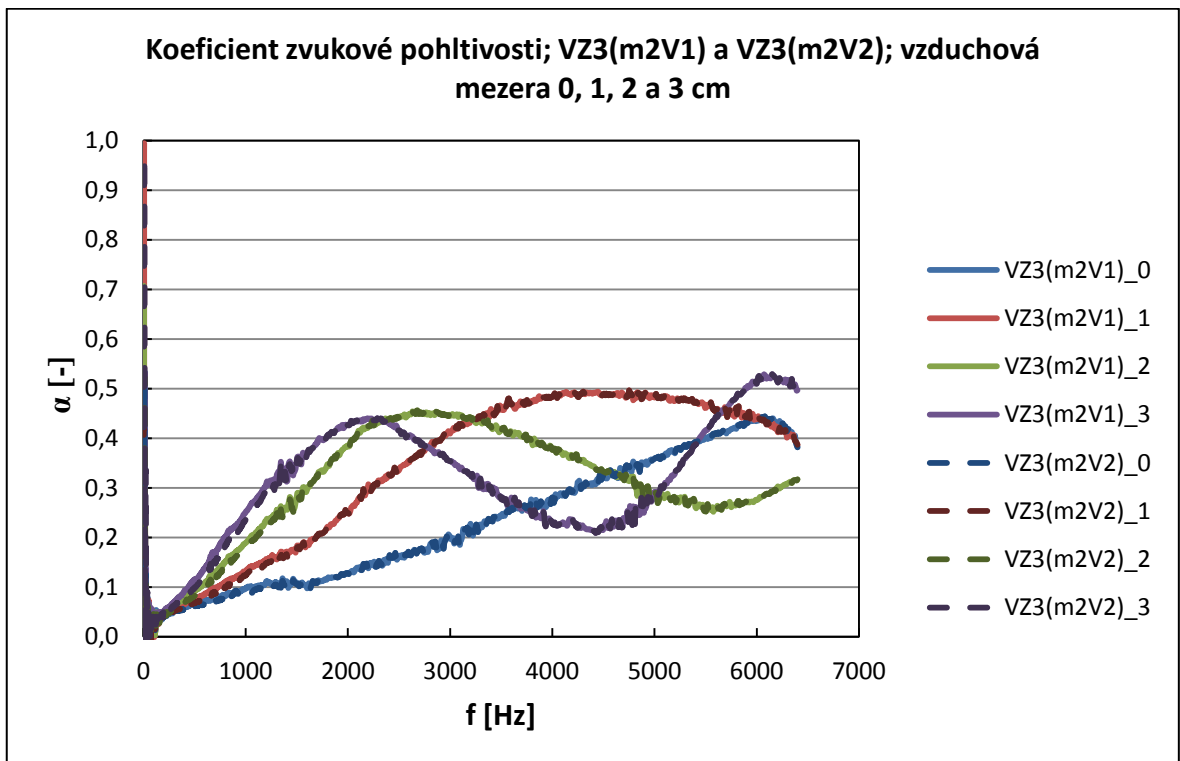
Obr. 43. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m1V1) a VZ(m1V2) (lineární zobrazení osy frekvence)

V následujícím grafu, který je zobrazen s logaritmickou stupnicí na ose X pro frekvenci jsou typické odchylky v nízkých frekvencích. Z důvodu vysoké vlny jsou tyto projevy viditelné i u geometricky plochých vzorků. Spektrum nestabilní analýzy signálu je výrazné mezi 10 – 100 Hz, přičemž pro lidské vnímání je důležitá oblast až od 20 Hz. Od 100 Hz k vyšším frekvencím pak lze již pozorovat standardní podobný průběh mezi různými geometriemi, tak jak byly vyseknuty.

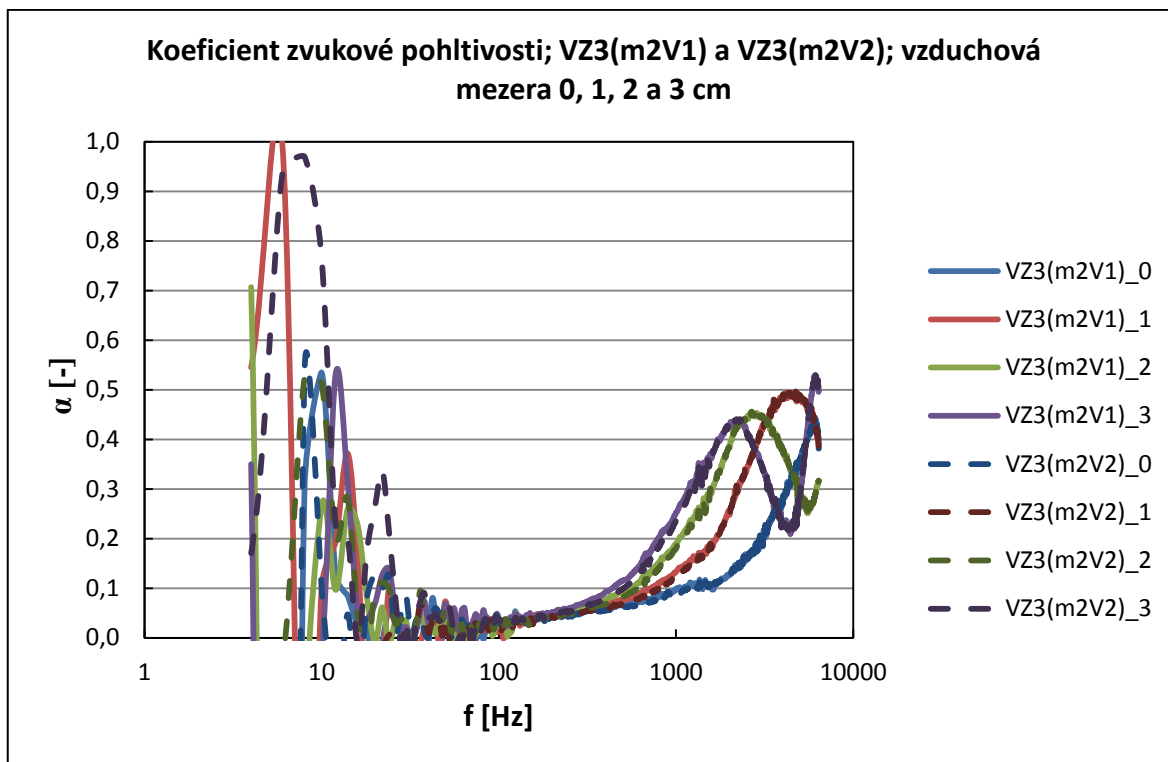
Celkově takto upravený materiál o hustotě $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ není z hlediska pohltivosti příliš efektivní v samostatné aplikaci pro tlumení motoru. Náběhová charakteristika křivky v nízkých frekvencích není tak strmá jak by bylo potřeba. Naproti tomu v kombinaci s jiným efektivněji tlumícím materiálem poskytuje tento materiál zajímavé hodnoty akustické pohltivosti jak v nízkých, tak vysokých frekvencích.



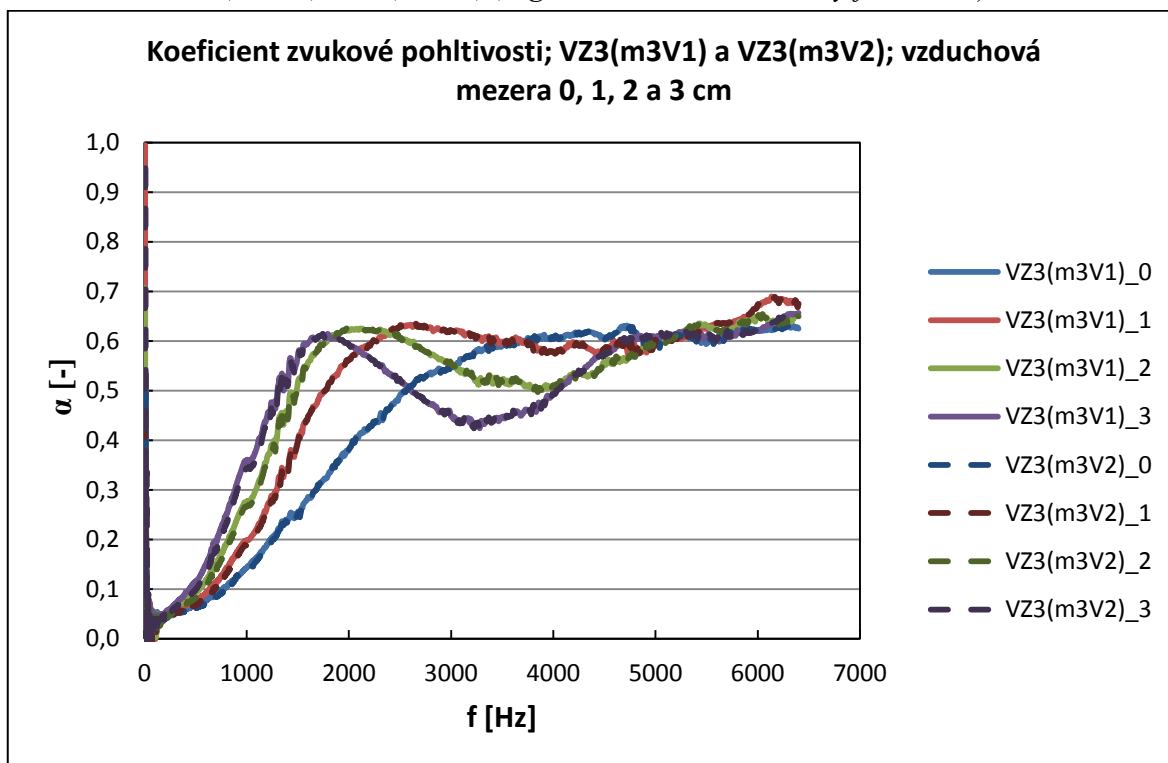
Obr. 44. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m1V1) a VZ(m1V2) (logaritmické zobrazení osy frekvence)



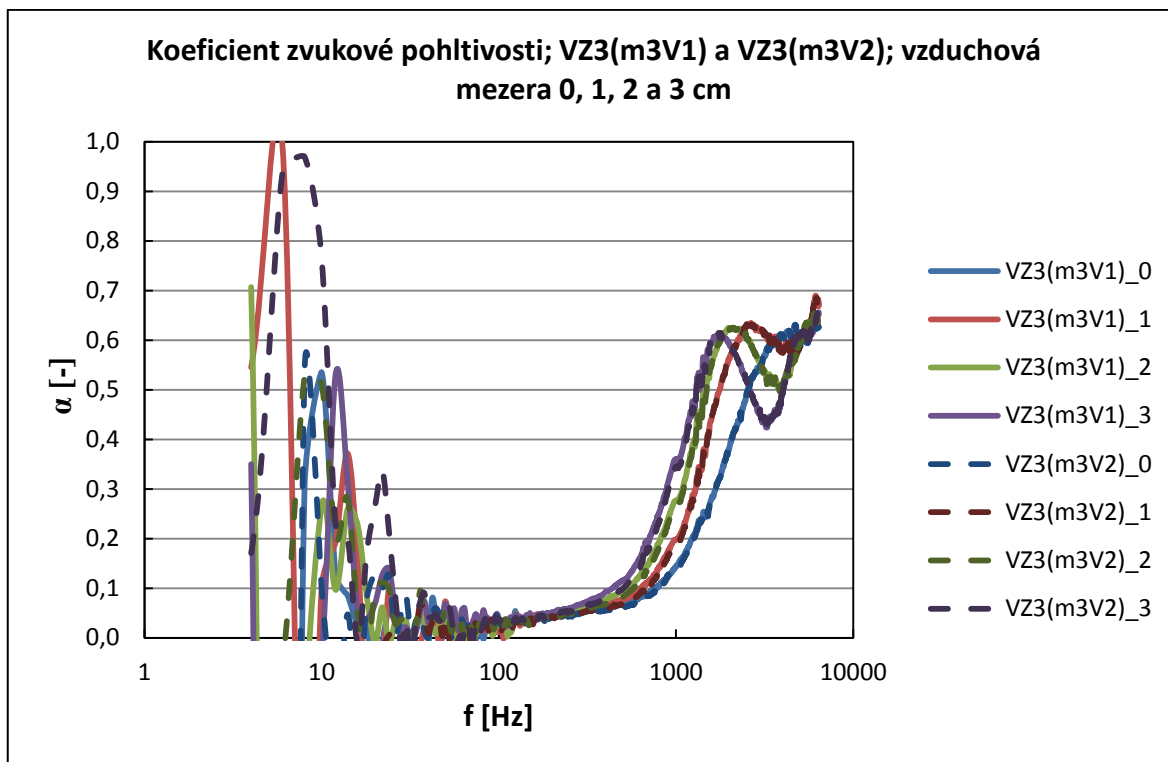
Obr. 45. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m2V1) a VZ(m2V2) (lineární zobrazení osy frekvence)



Obr. 46. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m2V1) a VZ(m2V2) (logaritmické zobrazení osy frekvence)



Obr. 47. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m3V1) a VZ(m3V2) (lineární zobrazení osy frekvence)



Obr. 48. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m3V1) a VZ(m3V2) (logaritmické zobrazení osy frekvence)

5.3.4 Zvuková pohltivost PUR S3535F; VZ1+2

VZ1+2 je složen ze dvou vrstev. První vrstvu tvoří deska VZ1 a k ní přiléhající druhá vrstva, děrovaná deska VZ2. Druhá vrstva obsahovala postupně 5, 9, 13 a 17 děr u velkého vzorku a 4, 8, 11 a 14 děr u malého vzorku. Počet děr u obou vzorků odpovídá stejnému poměru odebrání plochy vzorku.

Tab. 8. Označení vzorků VZ1+2 pro měření zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F

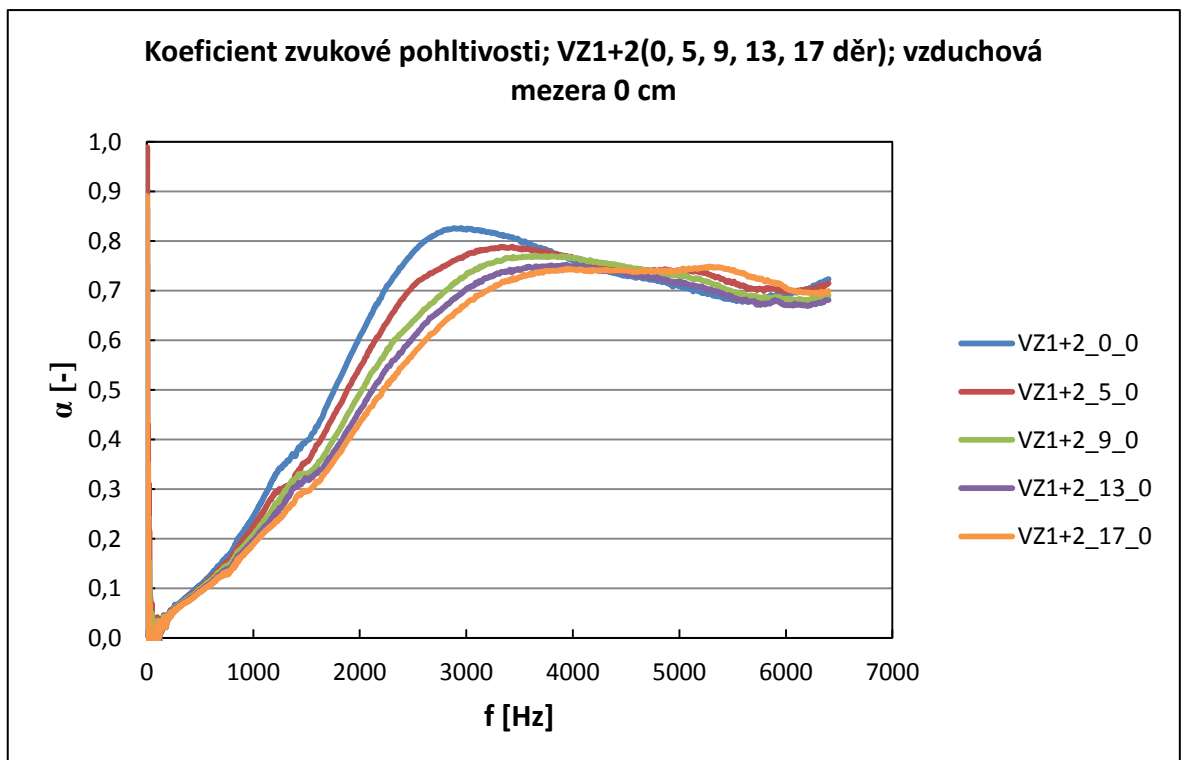
Vzorek	Označení	Průměr otvoru*	Počet děr	Počet % odebraného povrchu
100 mm	VZ1+2_5	10 mm	5	5
100 mm	VZ1+2_9	10 mm	9	9
100 mm	VZ1+2_13	10 mm	13	13
100 mm	VZ1+2_17	10 mm	17	17
30 mm	vz1+2_5	3,2 mm	4	5
30 mm	vz1+2_9	3,2 mm	8	9
30 mm	vz1+2_13	3,2 mm	11	13
30 mm	vz1+2_17	3,2 mm	13	17

* průměr otvoru dán popisem výrobce použitého průbojníku

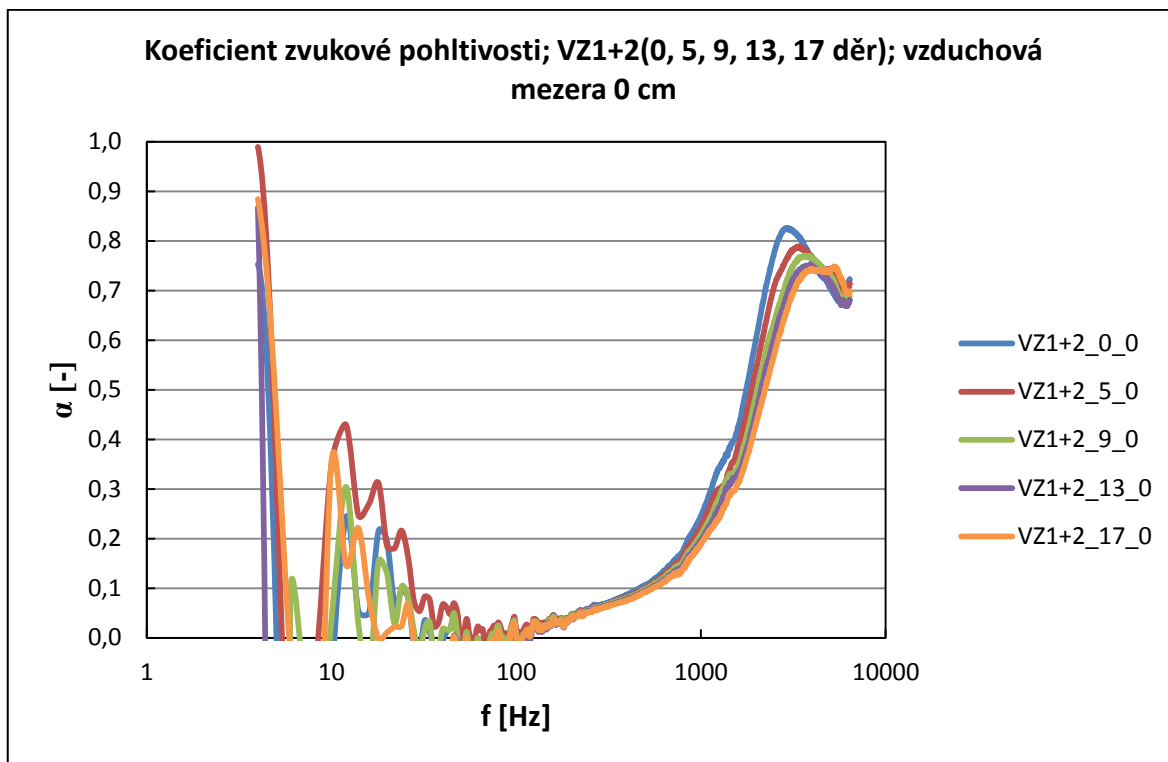


Obr. 49. Vzorky VZ1+2_17 pro měření zvukové pohltivosti PUR S3535F zleva 30 a 100 mm

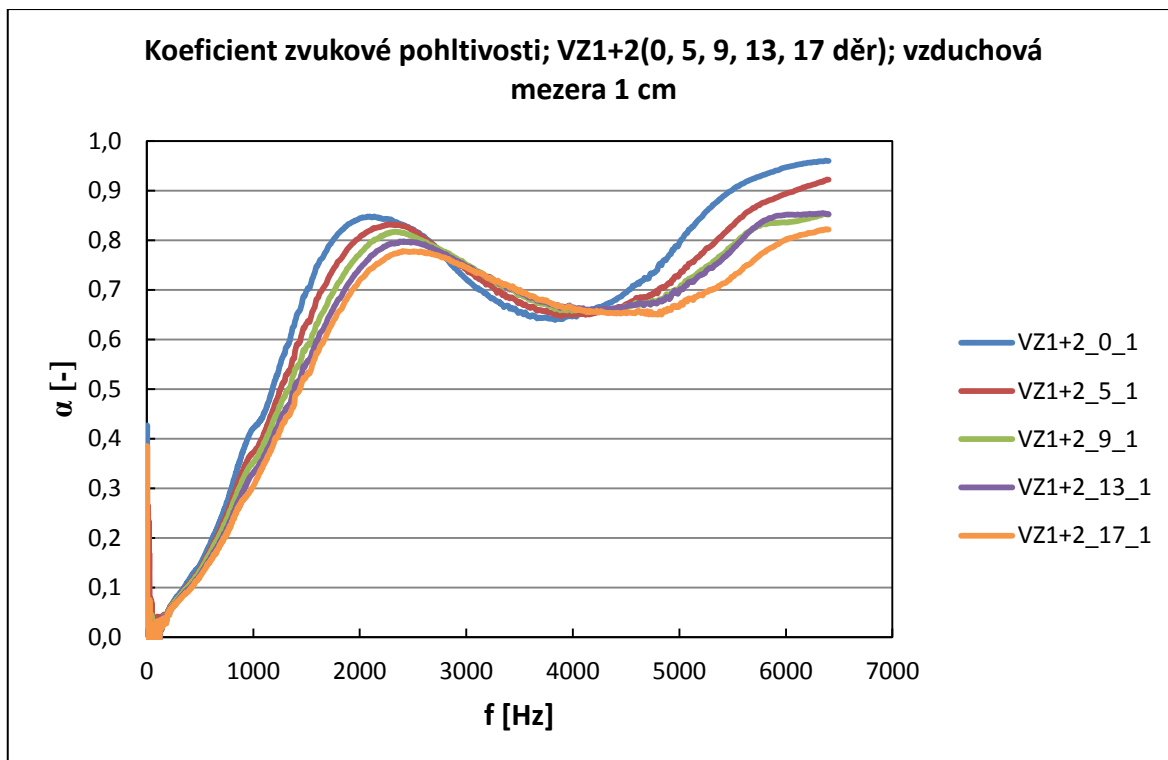
Níže uvedený graf (Obr. 50.) ukazuje již posun maxima směrem k nižším frekvencím. V porovnání s prvotními průběhy celistvého povrchu i struktury lze pozorovat nižší pohltivost ve frekvenční oblasti 2 – 3 000 Hz.



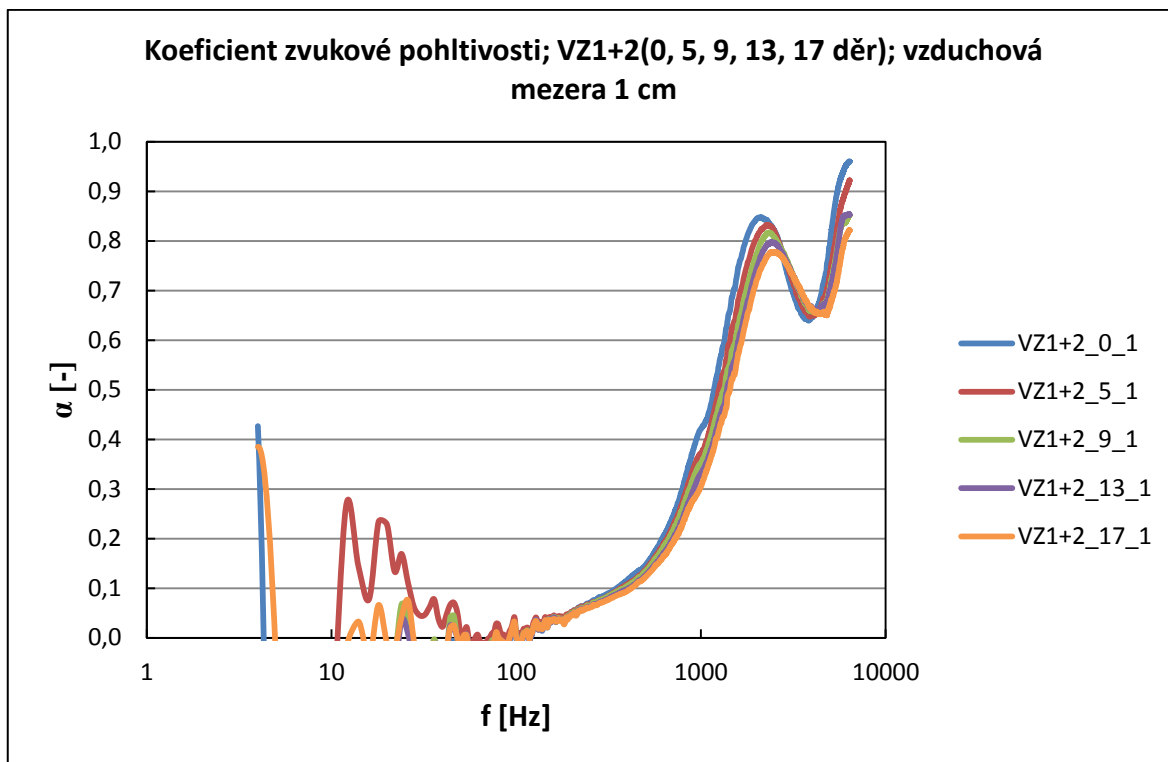
Obr. 50. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 bez vzduchové mezery (lineární zobrazení osy frekvence)



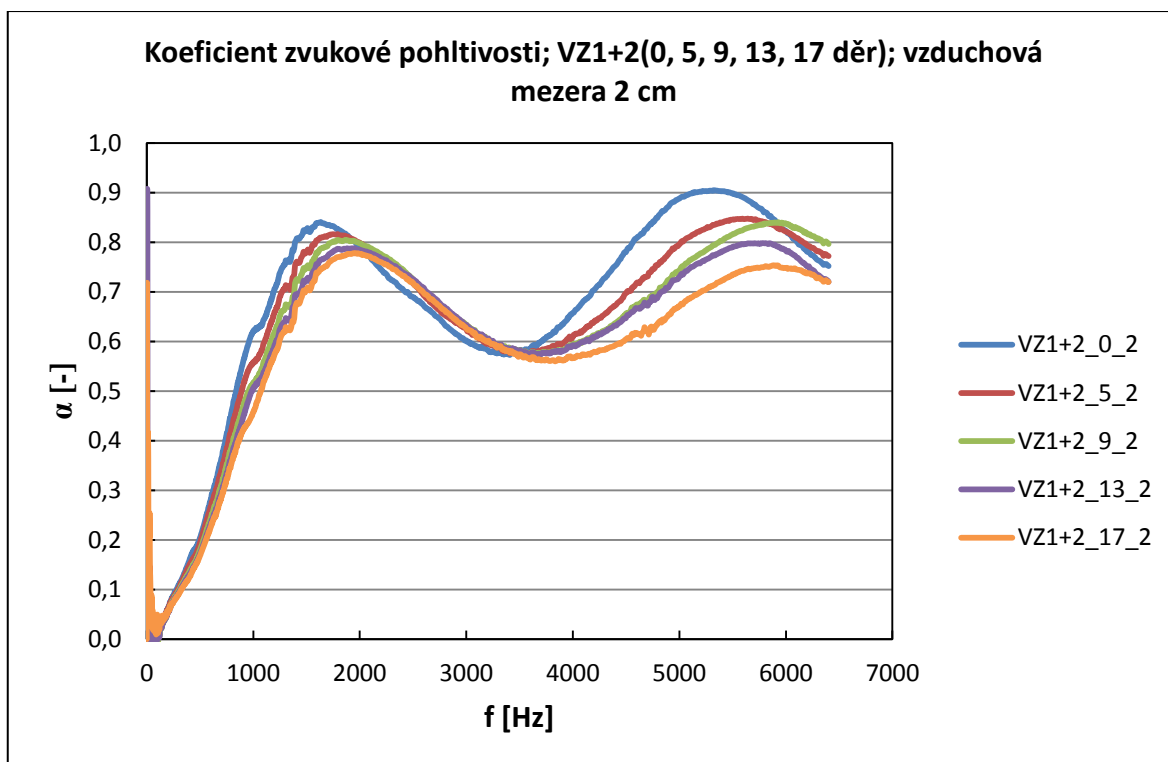
Obr. 51. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 bez vzduchové mezery (logaritmické zobrazení osy frekvence)



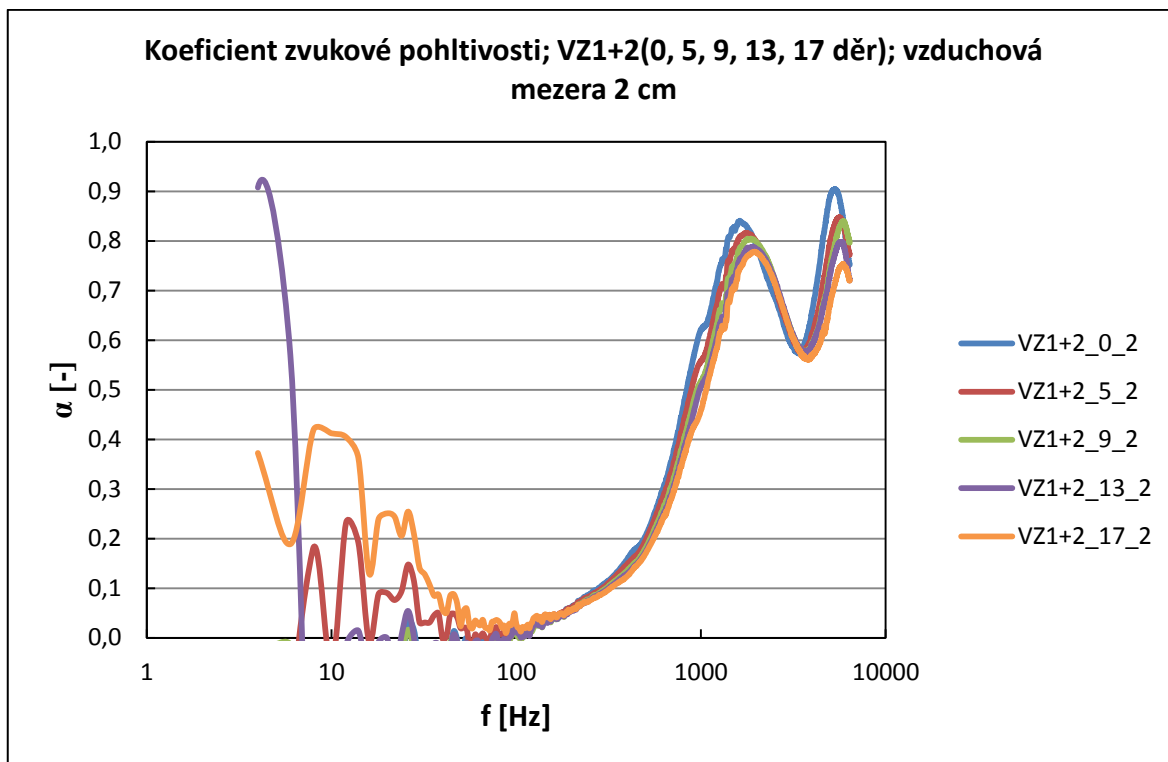
Obr. 52. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 1 cm (lineární zobrazení osy frekvence)



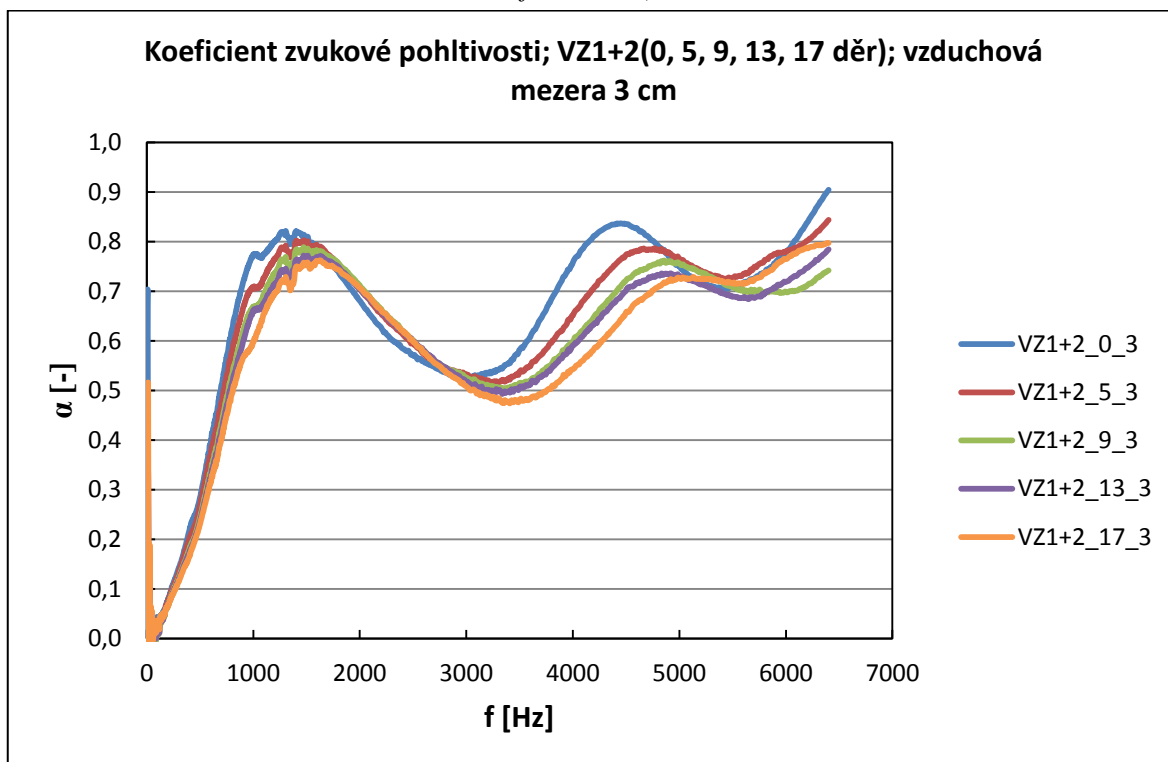
Obr. 53. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 1 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)



Obr. 54. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 2 cm (lineární zobrazení osy frekvence)

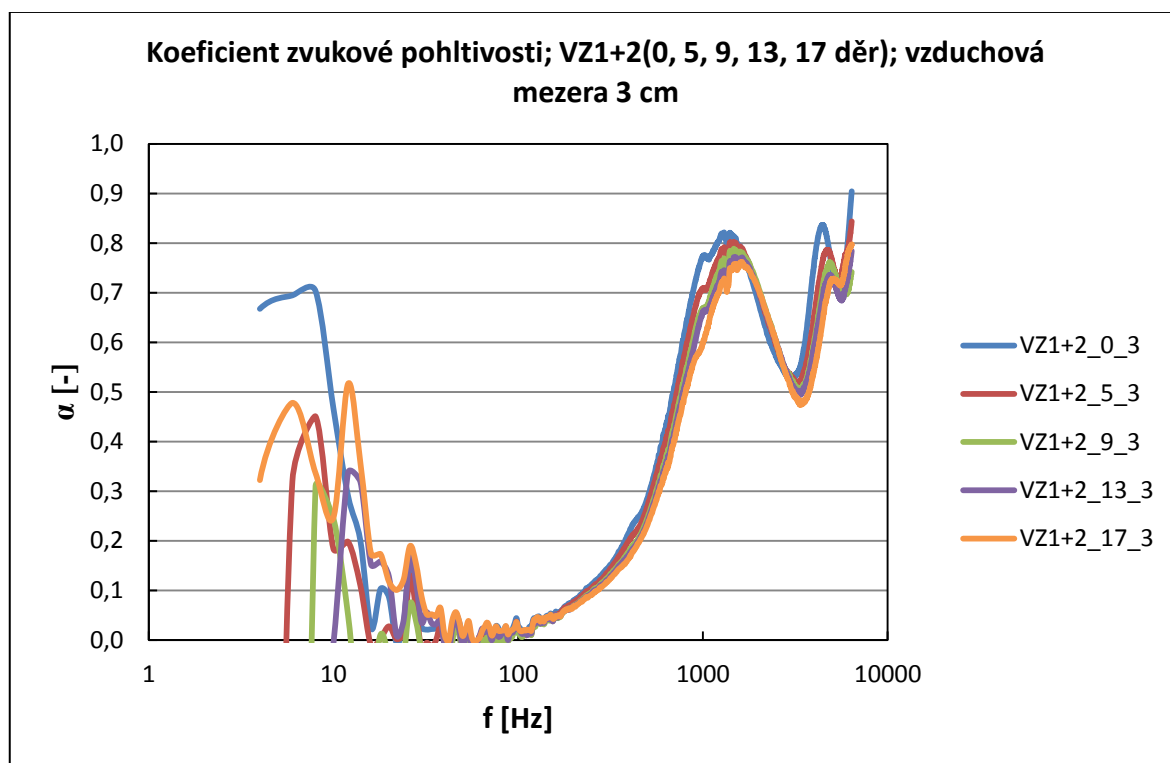


Obr. 55. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 2 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)



Obr. 56. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 3 cm (lineární zobrazení osy frekvence)

Průběh zobrazený na Obr. 54. a Obr. 56. již ukazuje dvojici maxim, která jsou situována do frekvenčních oblastí 1 – 2 000 Hz, respektive 4 – 5 000 Hz. První maximum ukazuje i poměrně strmý nárůst do vyšších stupňů pohltivosti, která je v nižších frekvencích žádoucí, ale poměrně obtížně dosažitelná u jednoduchých (na povrchu rovných, homogenních a nízko-hustotních) porézních struktur. Děrovaný materiál, který disponuje v okolním prostoru vzduchovou mezerou do velikosti 30 mm, má již vynikající pohltivost, a je koncentrována v nízkých frekvencích, ve které disponuje svojí efektivní pohltivostí. Vyšší stabilita analyzovaného signálu (Obr. 53., Obr. 55., Obr. 57.) je již viditelná v nízkých frekvencích na ose X pro frekvenční popis začínající v hodnotách kolem 30 Hz až do hodnot kolem 100 Hz.



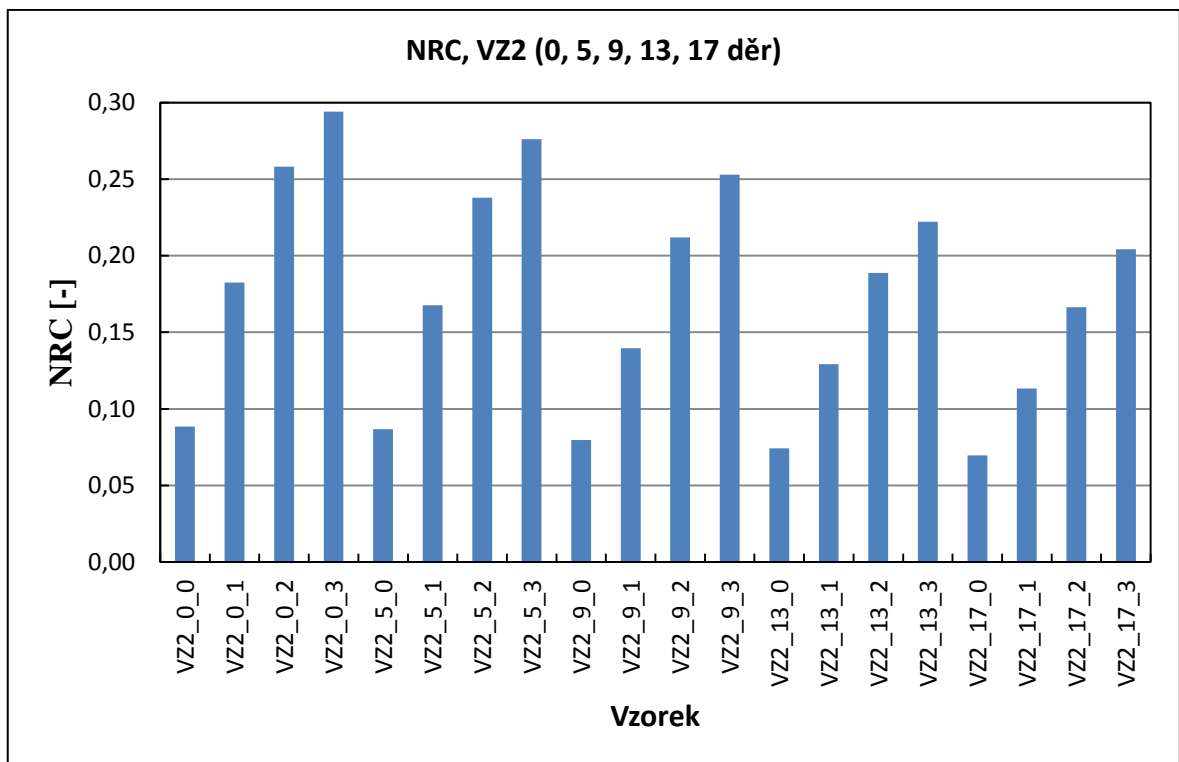
Obr. 57. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 3 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)

5.4 NRC koeficient

NRC koeficient udává základní informaci o pohltivosti materiálů ve frekvenčním rozsahu 250 až 2000 Hz. Jde o materiálové hodnocení s ohledem na pohltivost. Velmi často toto hodnocení udávají výrobci komerčních pohltivých materiálů a to zejména skelné vaty, sendvičových struktur izolačních aplikací budov apod. V tomto ohledu je požadavek na stanovení konečné hodnoty pohltivosti dán evropskou legislativou v oblasti standardů ISO.

Výhodou je, že pohltivost je dána konečným číslem, nevýhodou je, že nelze z něho zjistit závislosti a případná maxima.

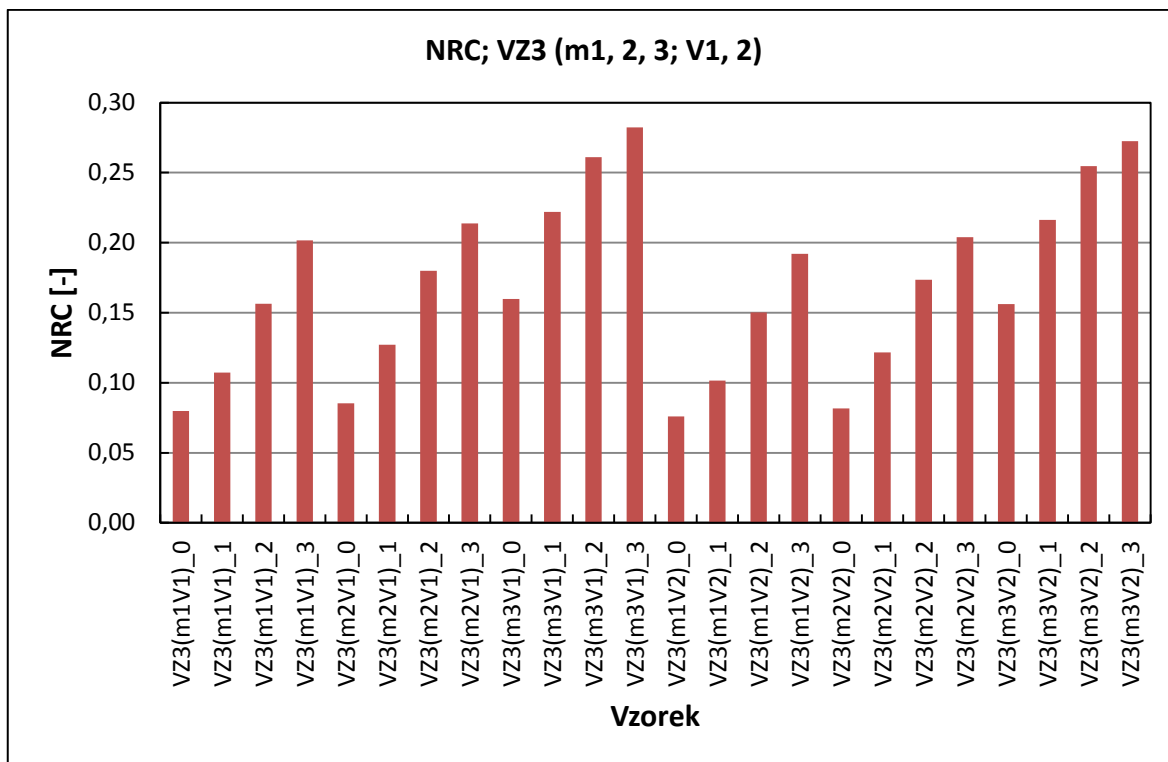
Označení v grafech odpovídá označení, popsáném v předchozích tabulkách (Tab. 6., Tab. 7., Tab. 8.). Vzorek VZ2_0 odpovídá vzorku VZ1 a VZ1+2_0 odpovídá dvěma vrstvám VZ1 na sobě.



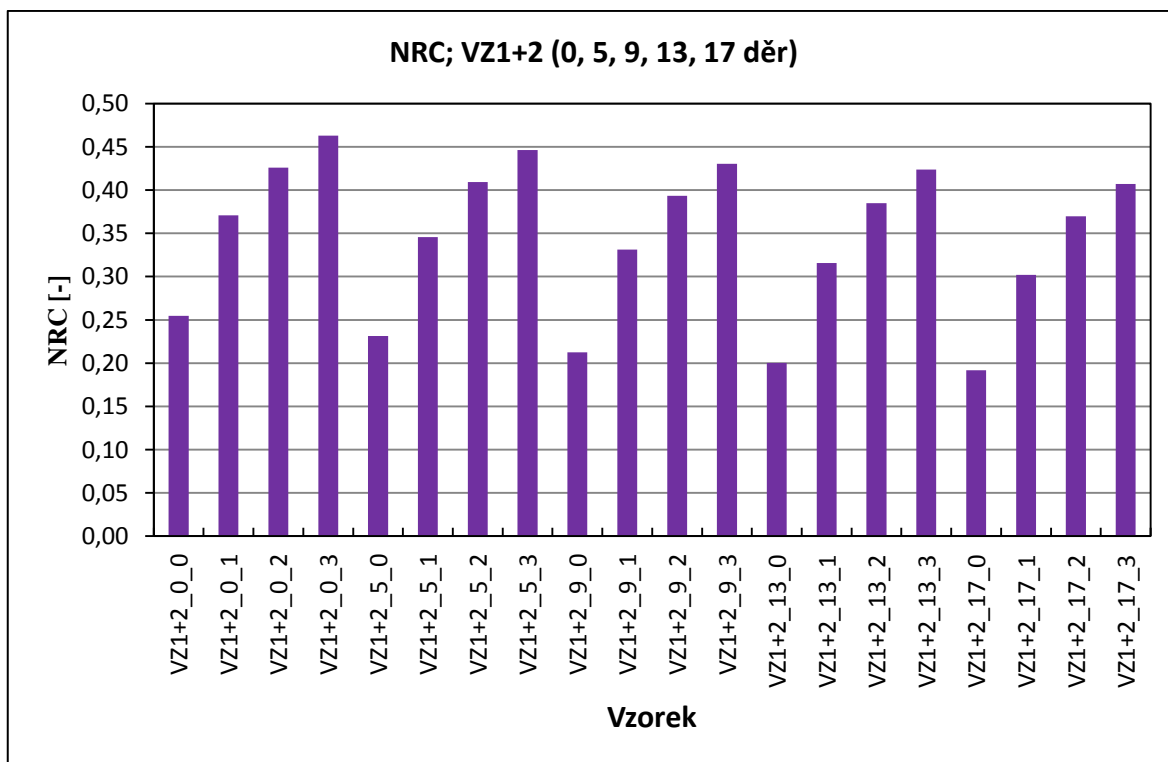
Obr. 58. NRC koeficient polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku a pro vzduchovou mezeru za vzorkem 0, 1, 2 a 3 cm

Z grafů je patrné, že i hodnota NRC, stejně jako koeficient akustické pohltivosti narůstají s vyšší vzduchovou mezerou. Tento maximální projev vlivu vzduchové mezery je patrný u vzorků VZ2_0_3, VZ2_5_3, VZ2_9_3, VZ2_13_3 a VZ2_17_3. Jelikož se v prostoru (pod kapotou a krytem mezi motorem a čelním sklem), ve kterém byly umístěny tlumící vrstvy, nacházely konstrukční mezery do velikosti 30 mm, je nutné přistupovat k výsledkům koeficientu NRC podobně, jak byl změřen v laboratorních podmínkách. Nelze tedy vyjádřit konečný výsledek jedním číslem (potažmo čísly) jednoho druhu připravovaného vzorku materiálu, ale je nutné ho prezentovat jako dosažitelný „rozsah“.

Podobně je nutné nahlížet také na následující grafy pro koeficient NRC, který se nachází v níže uvedených obrázcích pro vybrané druhy materiálů VZ3 a VZ1+2,



Obr. 59. NRC koeficient polyuretanu H3050 pro různě vyřezané vzorky a pro vzduchovou mezeru 0, 1, 2 a 3 cm



Obr. 60. NRC koeficient polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vzorku a pro vzduchovou mezeru za vzorkem 0, 1, 2 a 3 cm

Tab. 9. Porovnání NRC koeficientu jednotlivých materiálů pro dané vzduchové mezery (materiály jsou seřazeny podle klesajícího NRC koeficientu)

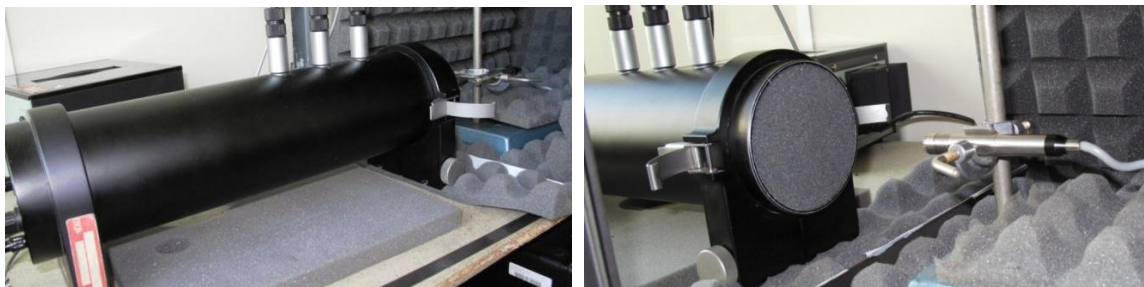
0 cm		1 cm		2 cm		3 cm	
VZ1+2_0_0	0,25	VZ1+2_0_1	0,37	VZ1+2_0_2	0,43	VZ1+2_0_3	0,46
VZ1+2_5_0	0,23	VZ1+2_5_1	0,35	VZ1+2_5_2	0,41	VZ1+2_5_3	0,45
VZ1+2_9_0	0,21	VZ1+2_9_1	0,33	VZ1+2_9_2	0,39	VZ1+2_9_3	0,43
VZ1+2_13_0	0,20	VZ1+2_13_1	0,32	VZ1+2_13_2	0,38	VZ1+2_13_3	0,42
VZ1+2_17_0	0,19	VZ1+2_17_1	0,30	VZ1+2_17_2	0,37	VZ1+2_17_3	0,41
VZ3(m3V1)_0	0,16	VZ3(m3V1)_1	0,22	VZ3(m3V1)_2	0,26	VZ2_0_3	0,29
VZ3(m3V2)_0	0,16	VZ3(m3V2)_1	0,22	VZ2_0_2	0,26	VZ3(m3V1)_3	0,28
VZ2_0_0	0,09	VZ2_0_1	0,18	VZ3(m3V2)_2	0,25	VZ2_5_3	0,28
VZ2_5_0	0,09	VZ2_5_1	0,17	VZ2_5_2	0,24	VZ3(m3V2)_3	0,27
VZ3(m2V1)_0	0,09	VZ2_9_1	0,14	VZ2_9_2	0,21	VZ2_9_3	0,25
VZ3(m2V2)_0	0,08	VZ2_13_1	0,13	VZ2_13_2	0,19	VZ2_13_3	0,22
VZ3(m1V1)_0	0,08	VZ3(m2V1)_1	0,13	VZ3(m2V1)_2	0,18	VZ3(m2V1)_3	0,21
VZ2_9_0	0,08	VZ3(m2V2)_1	0,12	VZ3(m2V2)_2	0,17	VZ2_17_3	0,20
VZ3(m1V2)_0	0,08	VZ2_17_1	0,11	VZ2_17_2	0,17	VZ3(m2V2)_3	0,20
VZ2_13_0	0,07	VZ3(m1V1)_1	0,11	VZ3(m1V1)_2	0,16	VZ3(m1V1)_3	0,20
VZ2_17_0	0,07	VZ3(m1V2)_1	0,10	VZ3(m1V2)_2	0,15	VZ3(m1V2)_3	0,19

5.5 Útlum vlivem překážky (akustický útlum)

Pro měření neprůzvučnosti byly použity stejné vzorky ve stejném uspořádání, jako pro měření hlukové pohltivosti. Zdrojem hluku byl reproduktor Kundtovy trubice. Bylo změněno hlukové pozadí, dále hluk samotného reproduktoru a následně hluk, který prošel přes vzorek umístěný v ústí Kundtovy trubice. Naměřená data byla zkorigována, aby byl odečten vliv hlukového pozadí. Dále byly naměřené výsledky mezi sebou porovnány a byl určen útlum materiálu v závislosti na frekvenci. Naměřené výsledky jsou prezentovány formou grafických závislostí hladiny akustického tlaku na frekvenci vyjádřené v třetinooktávovém pásmu.

Tab. 10. Parametry měření zvukovým analyzátozem

Parametr	Velikost	Jednotka
Časová konstanta	1/2	s
Doba měření	3	s
Frekvenční rozsah	10 – 20000	Hz
Režim hold	on	

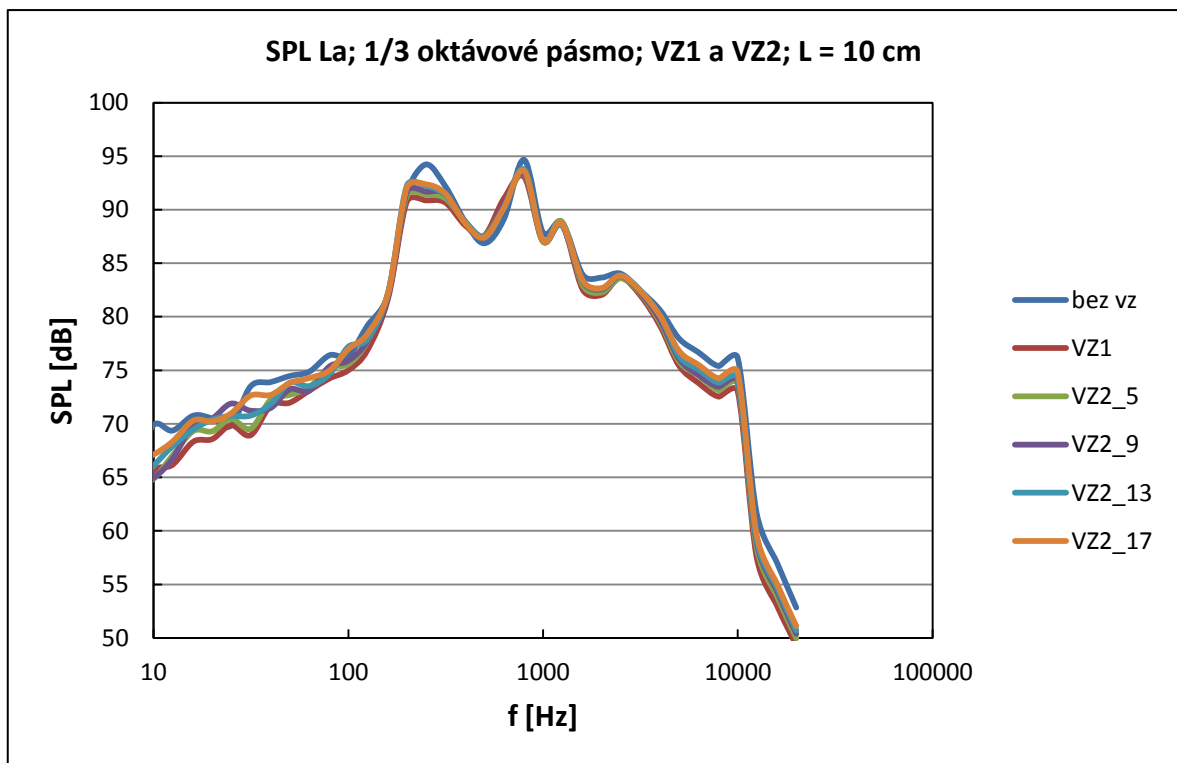


*Obr. 61. Uspořádání experimentu pro měření neprůzvučnosti (akustického útlumu)
(pohled zezadu a zepředu)*

Výše zobrazená aparatura byla uspořádána tak, aby vnější akustický tlak nejméně ovlivňoval zdroj uvnitř trubice, ze které vycházel signál stejný jako pro akustickou pohltivost. Vzorek je umístěn v trubici, ze které jde signál přes materiál směrem k mikrofonu a ten jej snímá okamžitou hladinou akustického tlaku ve třetionótkových pásmech až do hodnoty 20 000 Hz, což je o velkou část více než u akustické pohltivosti.

Celý systém měření byl zpracován pro různé vzdálenosti mikrofonu za vzorkem a to 10, 30 a 50 cm. Toto zpracování je důležité pro stanovení útlumu vlivem překážky a přesnosti mikrofonu s ohledem na okolní „rušivé“ prostředí.

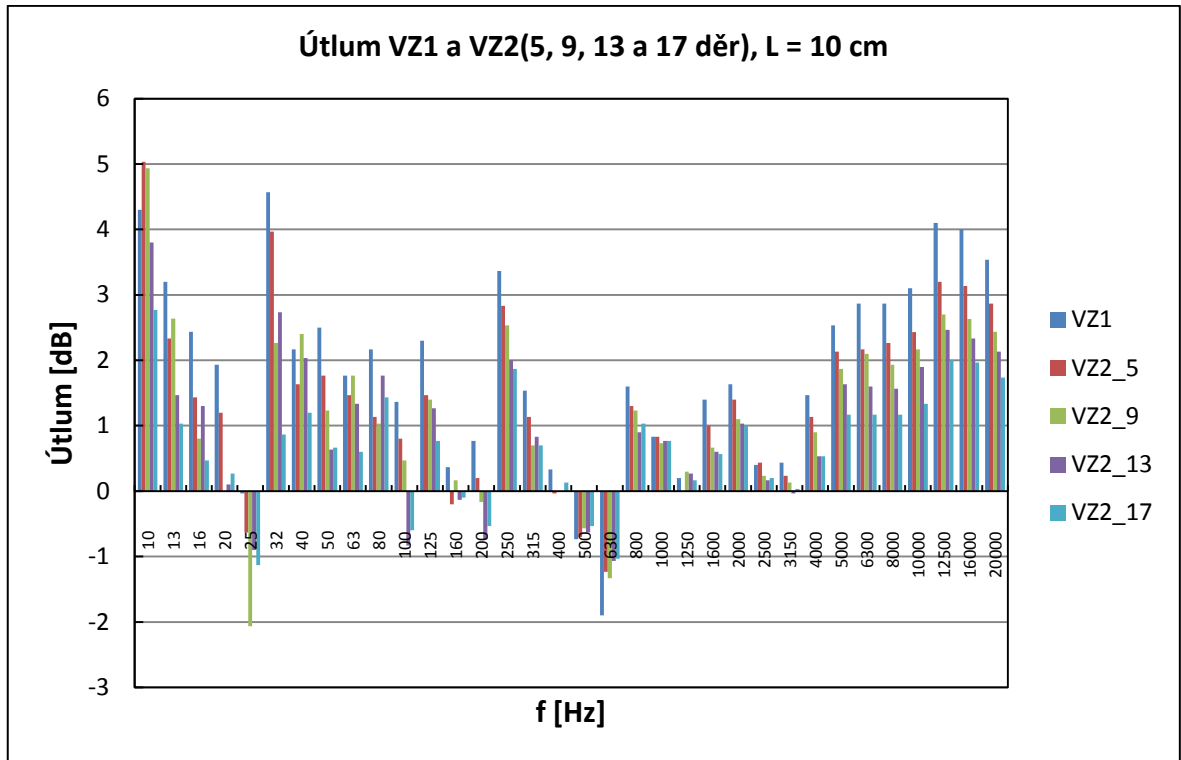
5.5.1 Útlum vlivem překážky - PUR S3535F; VZ1 a VZ2



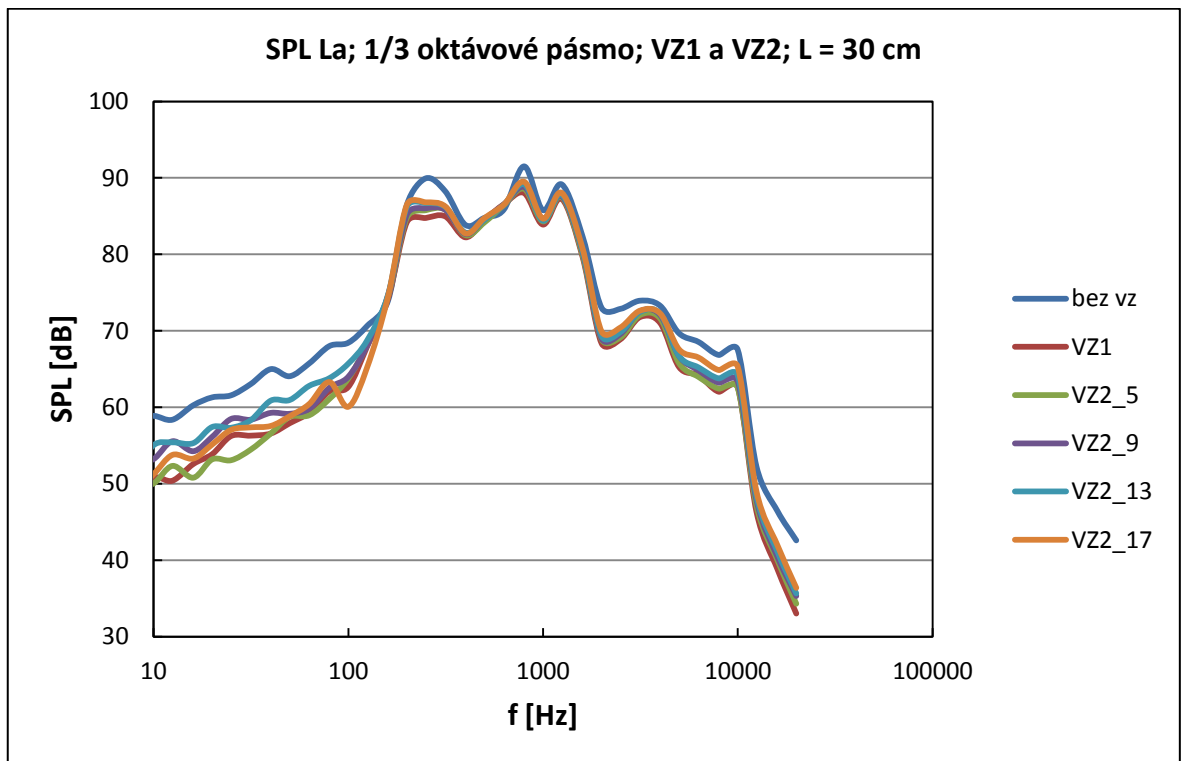
Obr. 62. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm

Na Obr. 62. je znázorněna závislost hladiny akustického tlaku ve třetionoktávových pásmech pro vzorky bez perforace a s postupnou perforací děr od 5 až do 17. Pokud budeme sledovat průběh, tak tyto jsou velmi podobné od základního měření materiálu bez perforace a materiálu s maximální perforací 17 děr. Z průběhu je patrné, že změna poklesu akustického útlumu je minimální, zatímco pokles hmotnosti a objemu odebraného množství materiálu je od 5 až do 17 % na dopadající povrch vzorku.

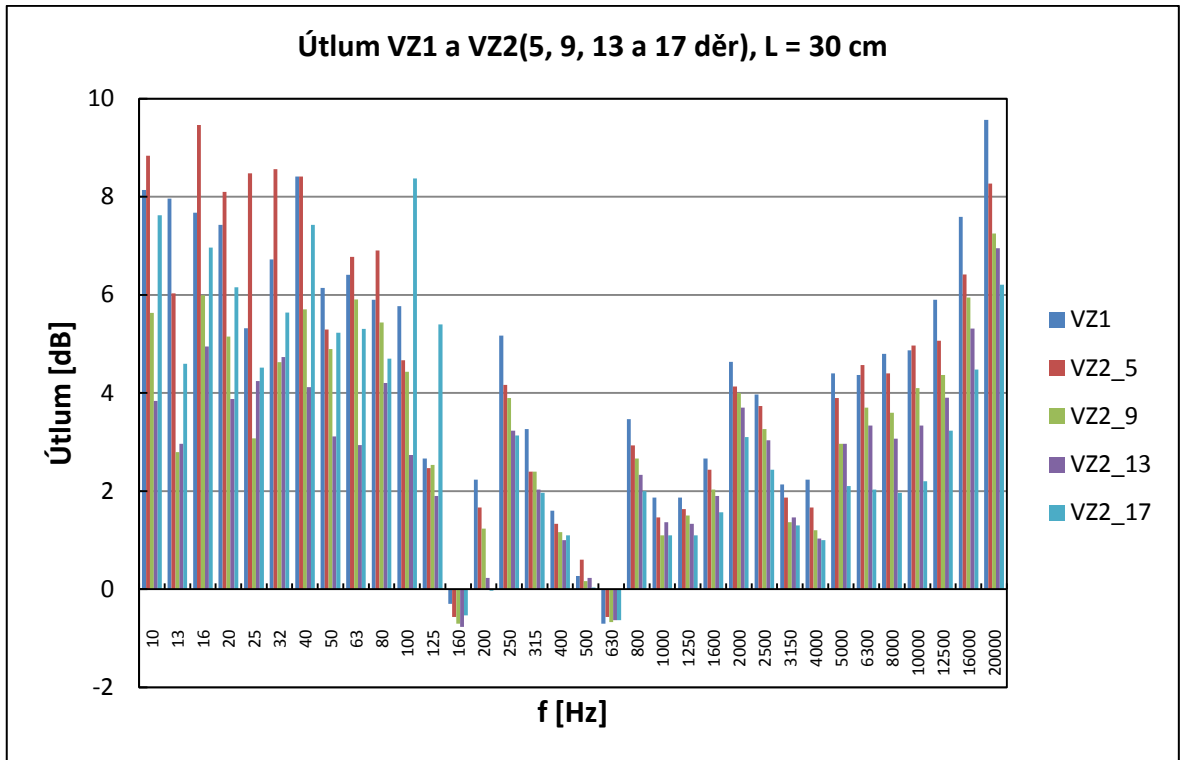
Tento postup úpravy vzorků v praxi je výraznější čím vyšší je hustota použitého materiálu za stávajícího stupně pórovitosti.



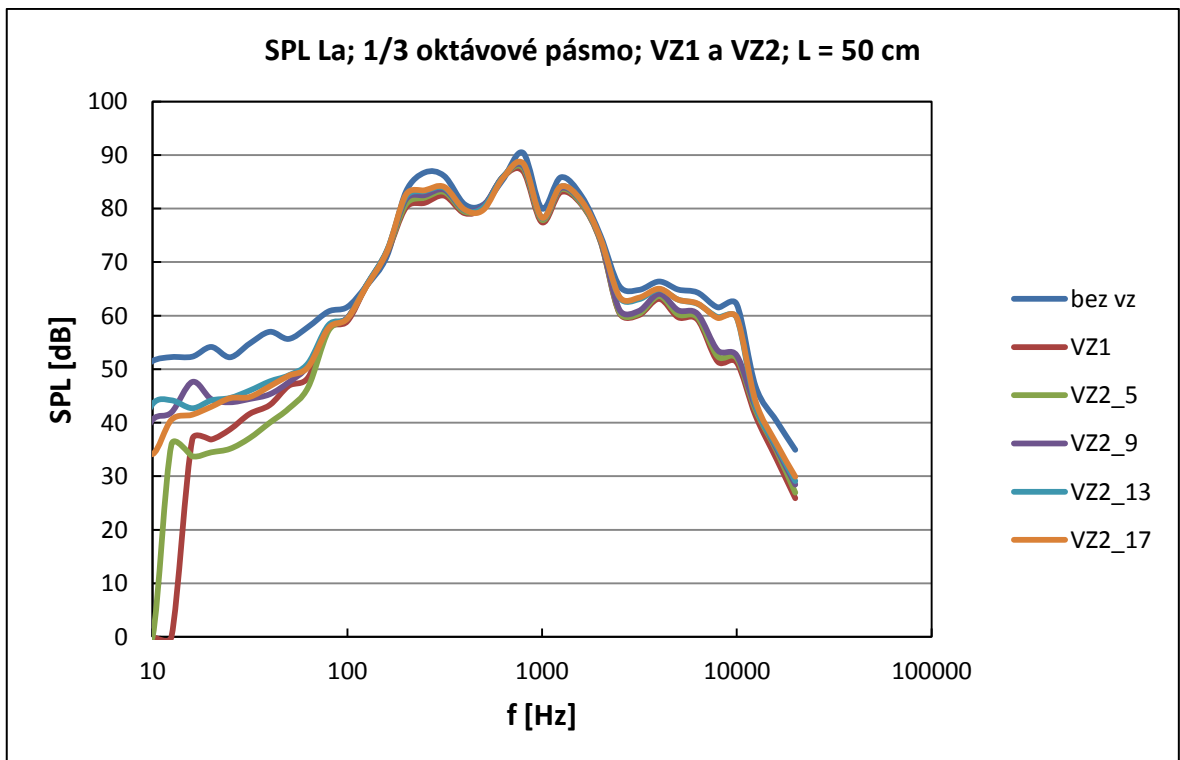
Obr. 63. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm



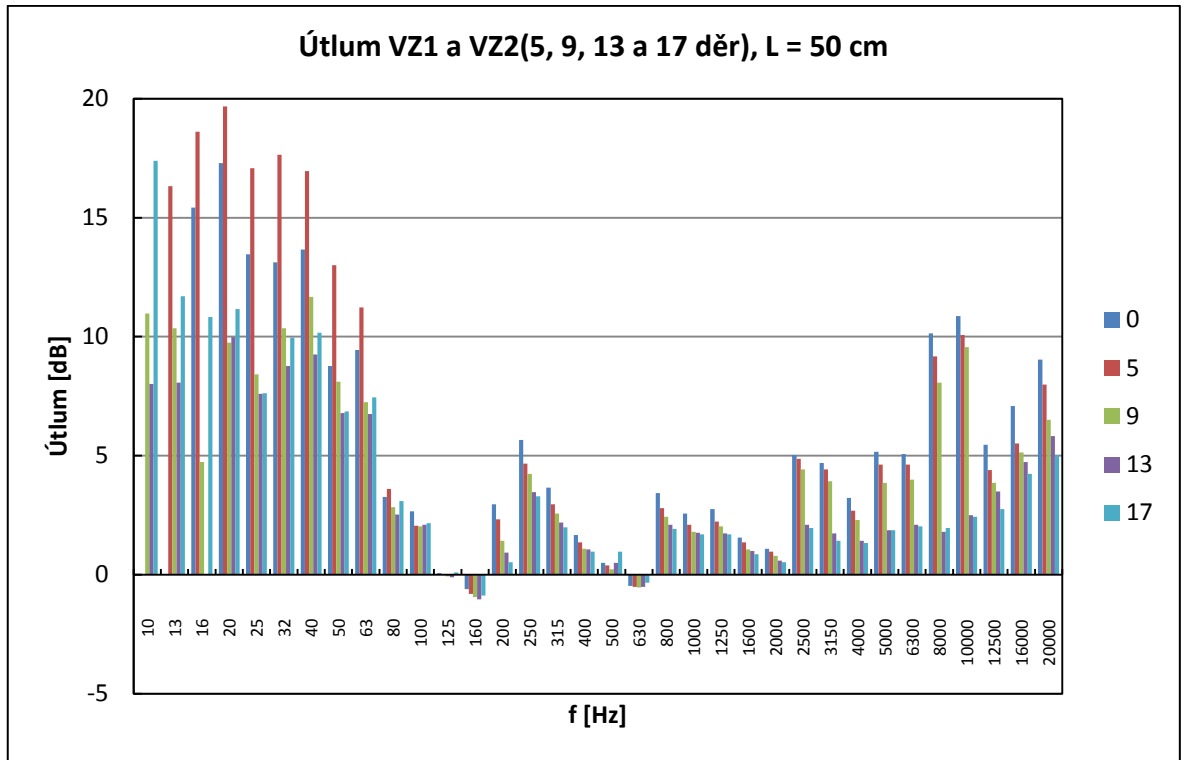
Obr. 64. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm



Obr. 65. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 30 cm

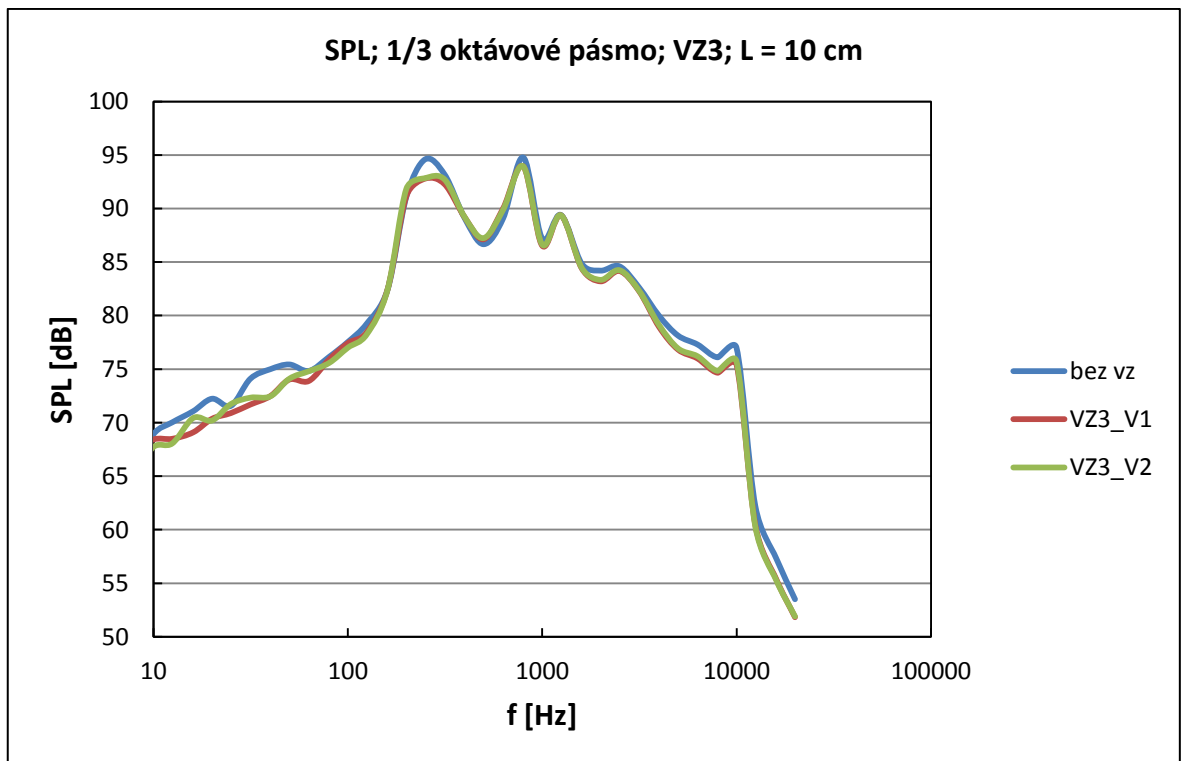


Obr. 66. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 50 cm

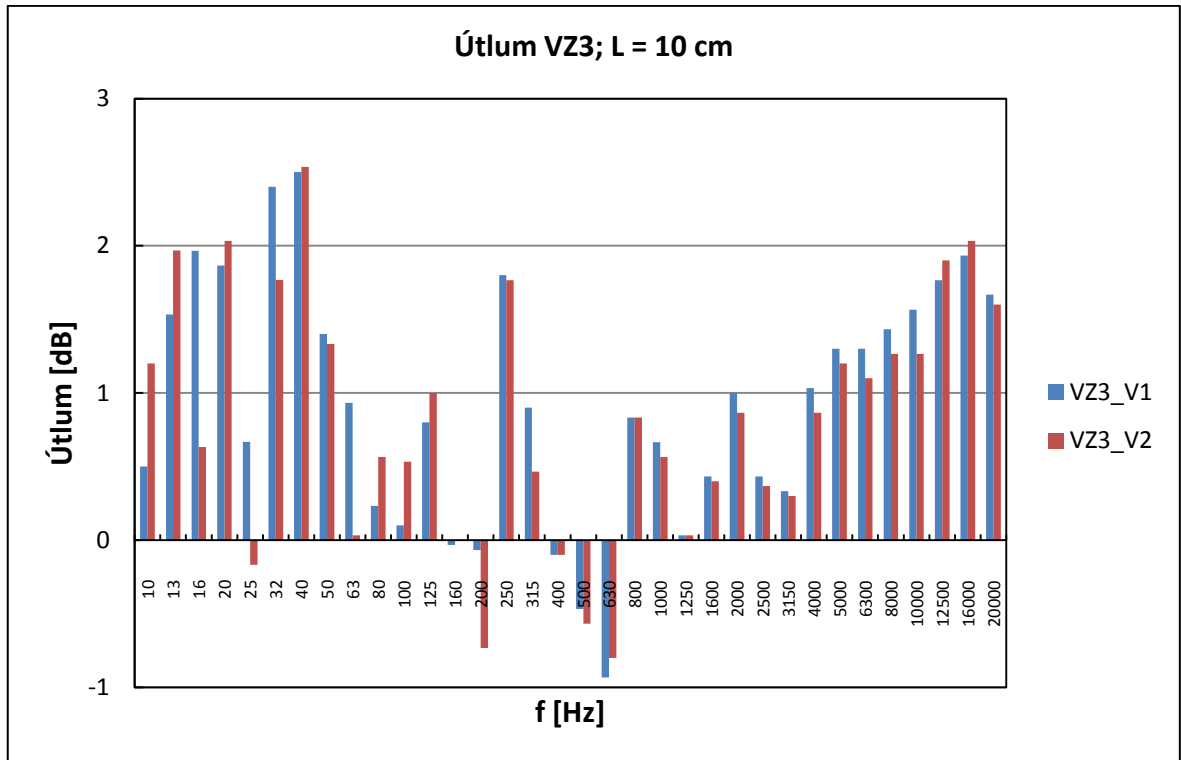


Obr. 67. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm

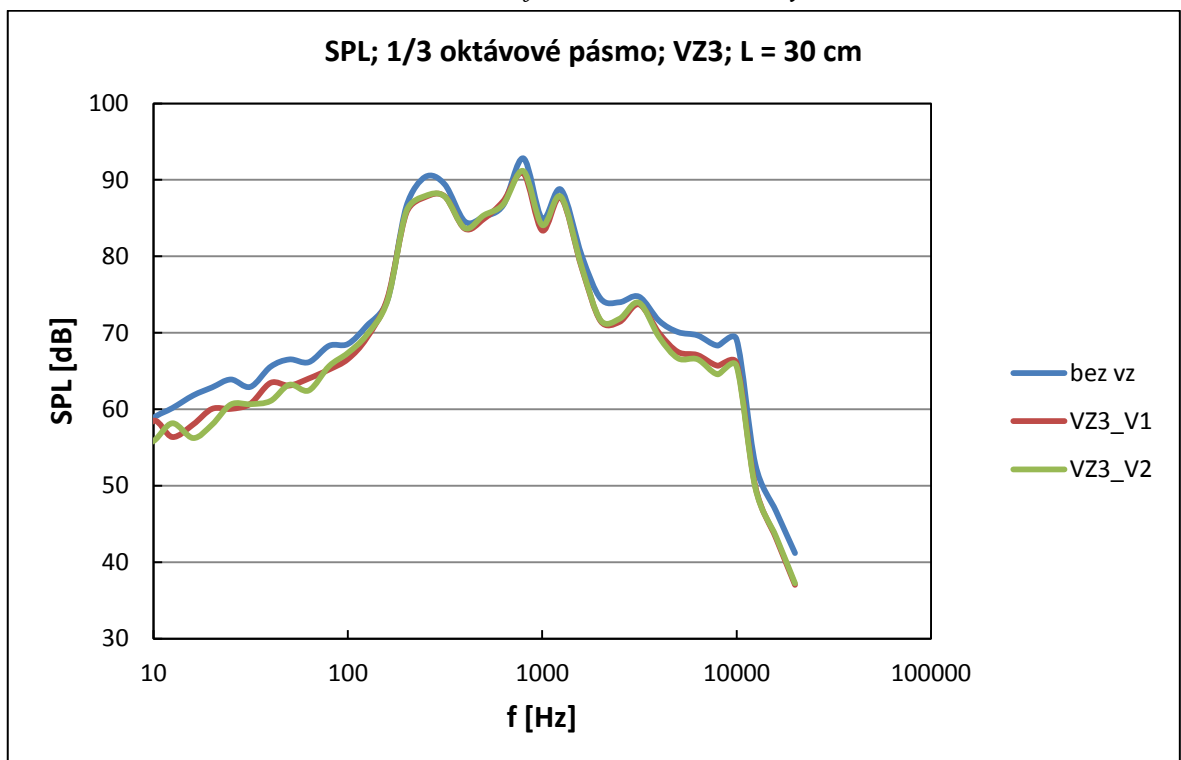
5.5.2 Útlum vlivem překážky - PUR H3050; VZ3



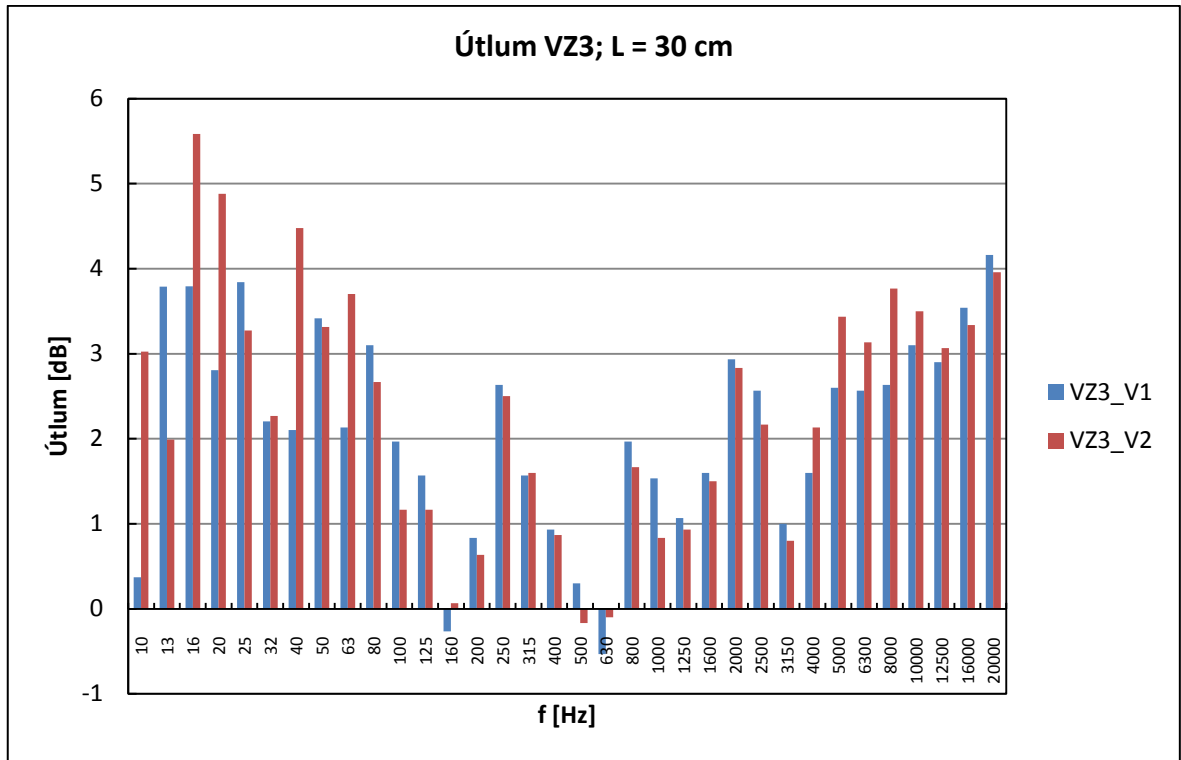
Obr. 68. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm



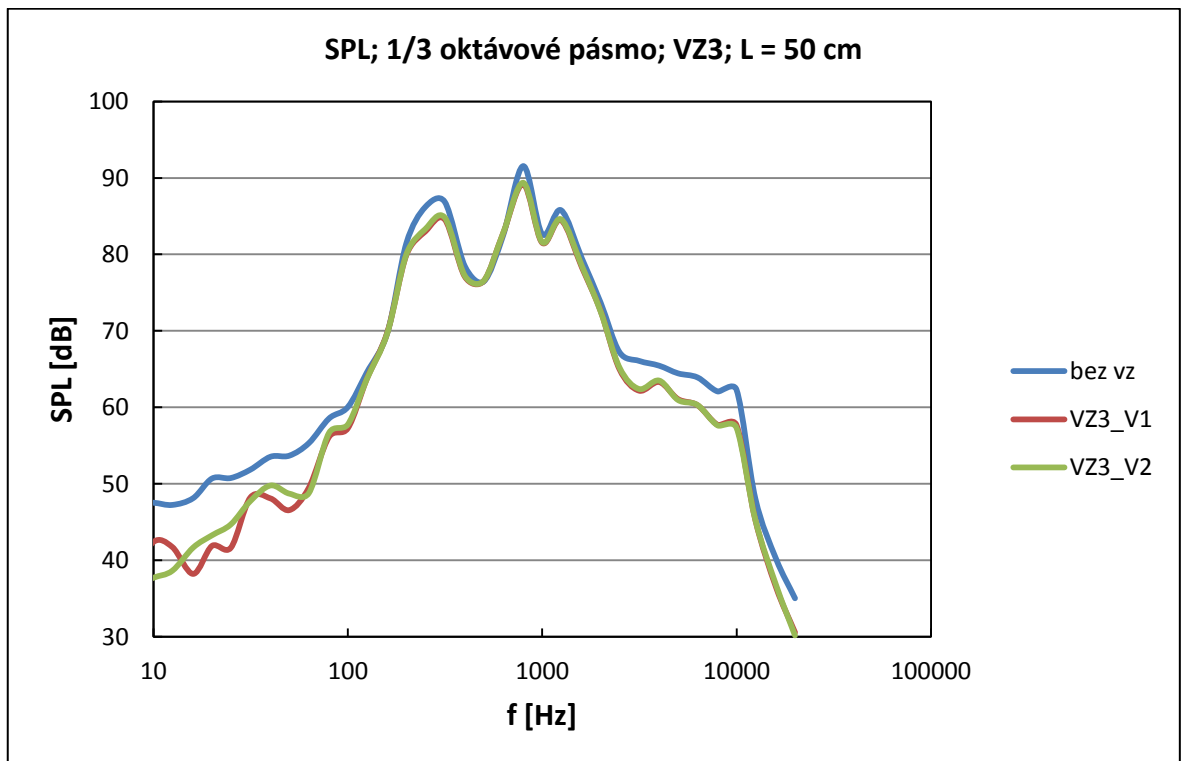
Obr. 69. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm



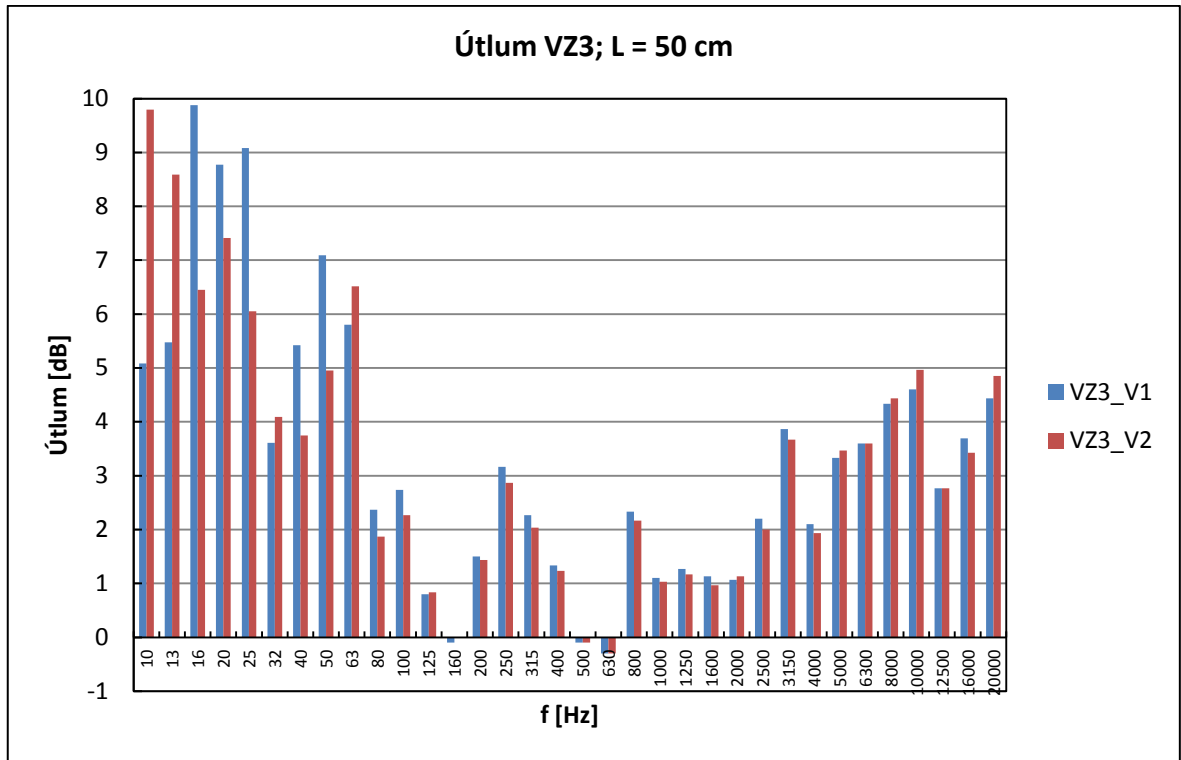
Obr. 70. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm



Obr. 71. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm

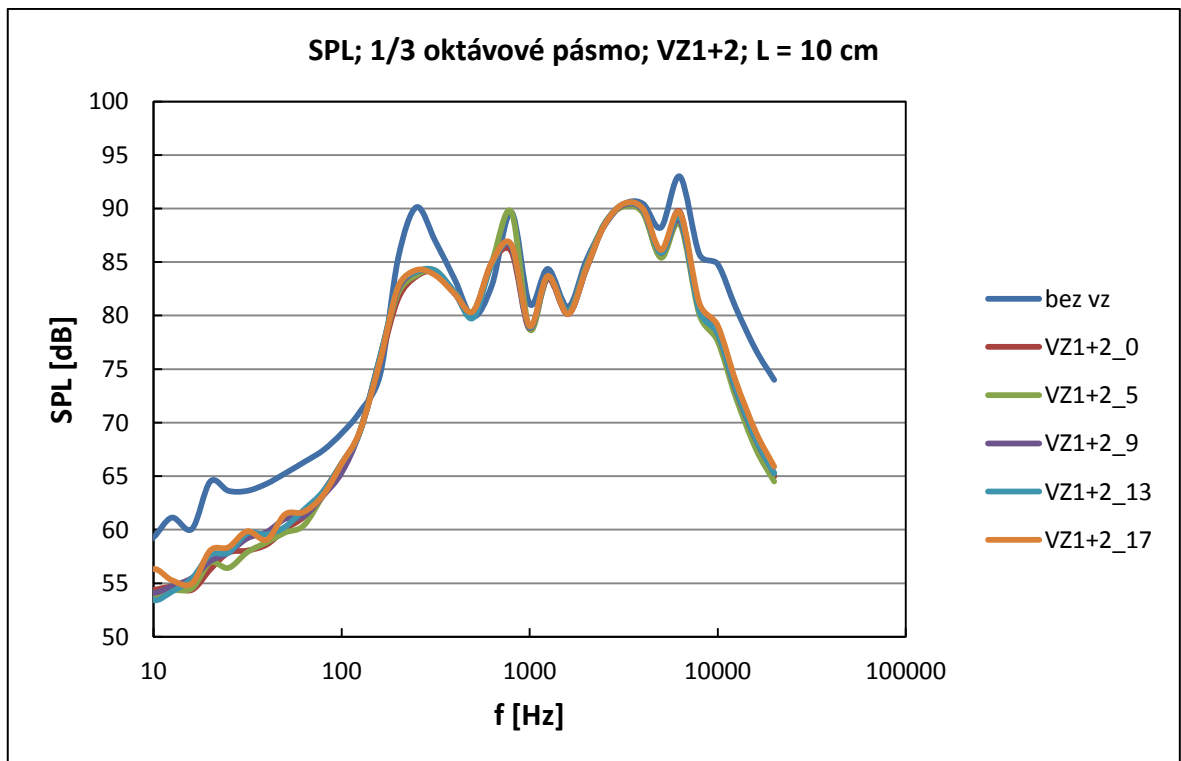


Obr. 72. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm

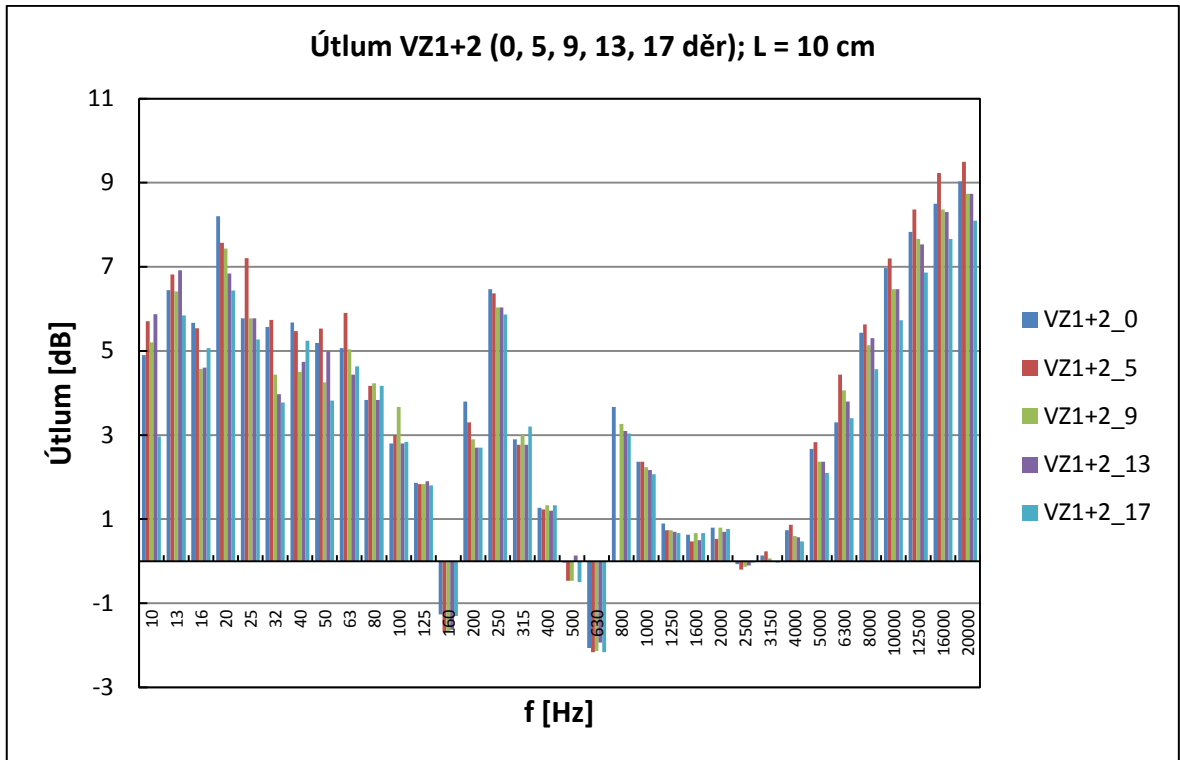


Obr. 73. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm

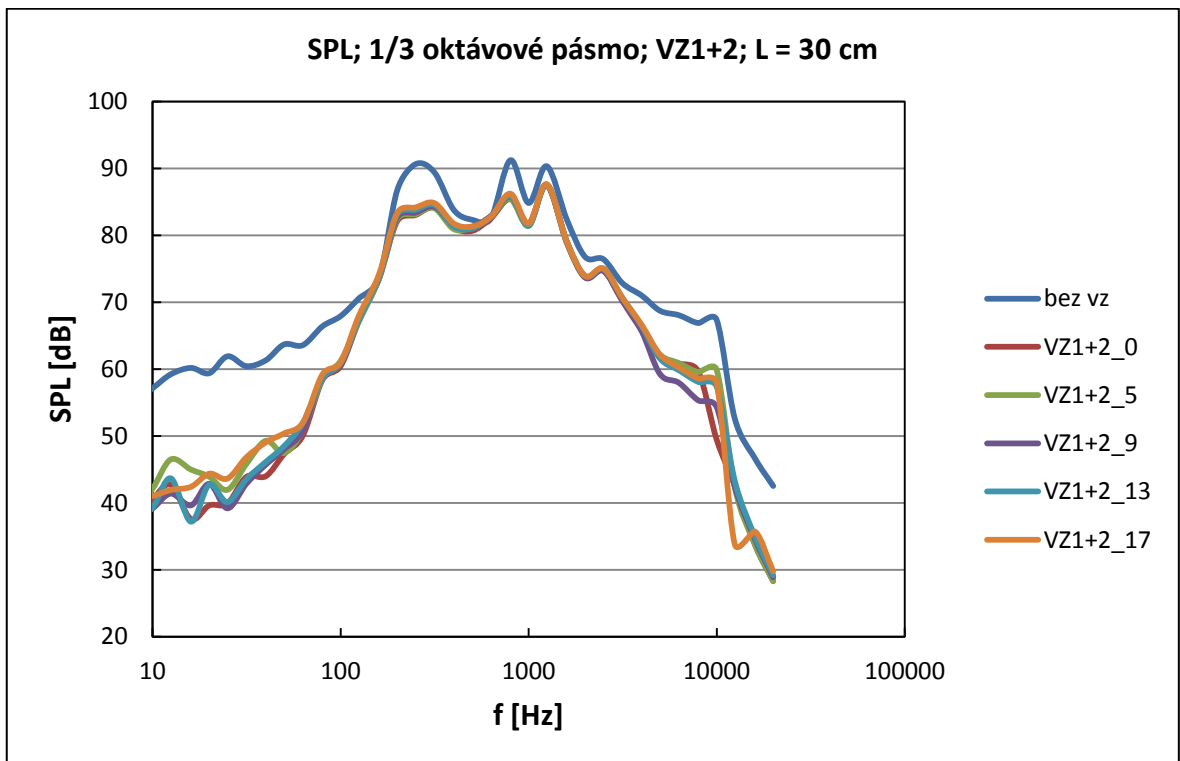
5.5.3 Útlum vlivem překážky - PUR S3535F; VZ1+2



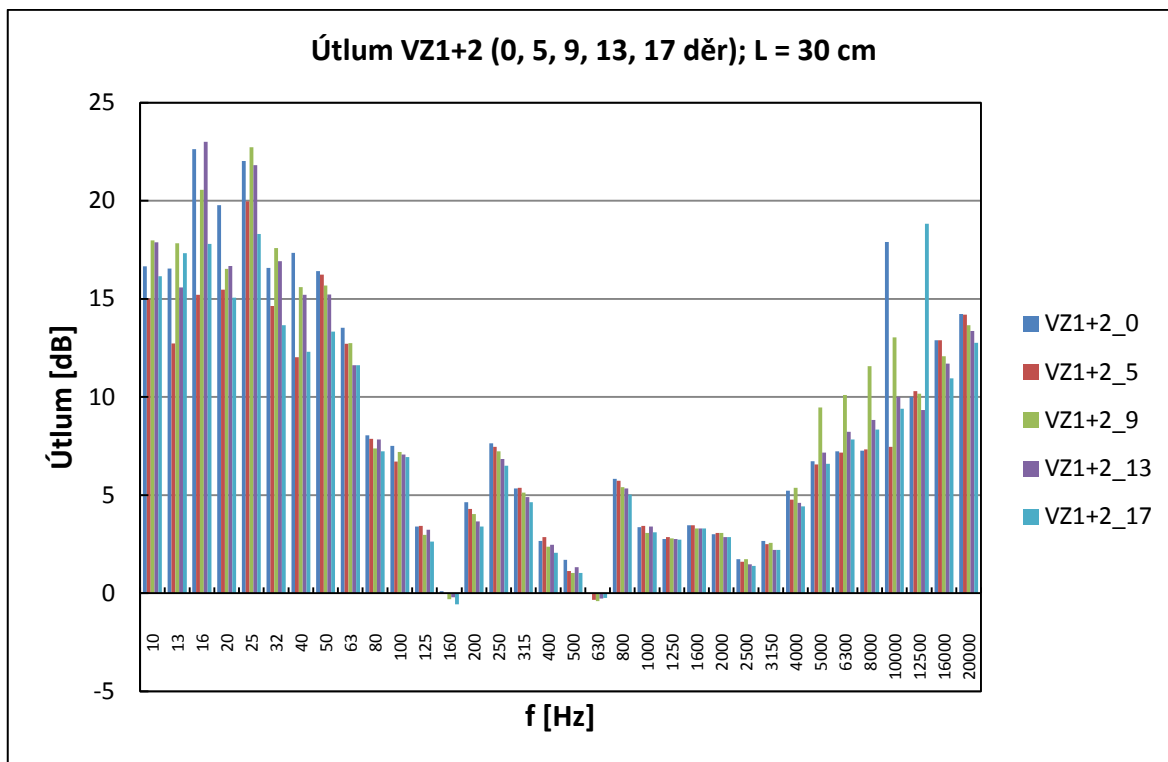
Obr. 74. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm



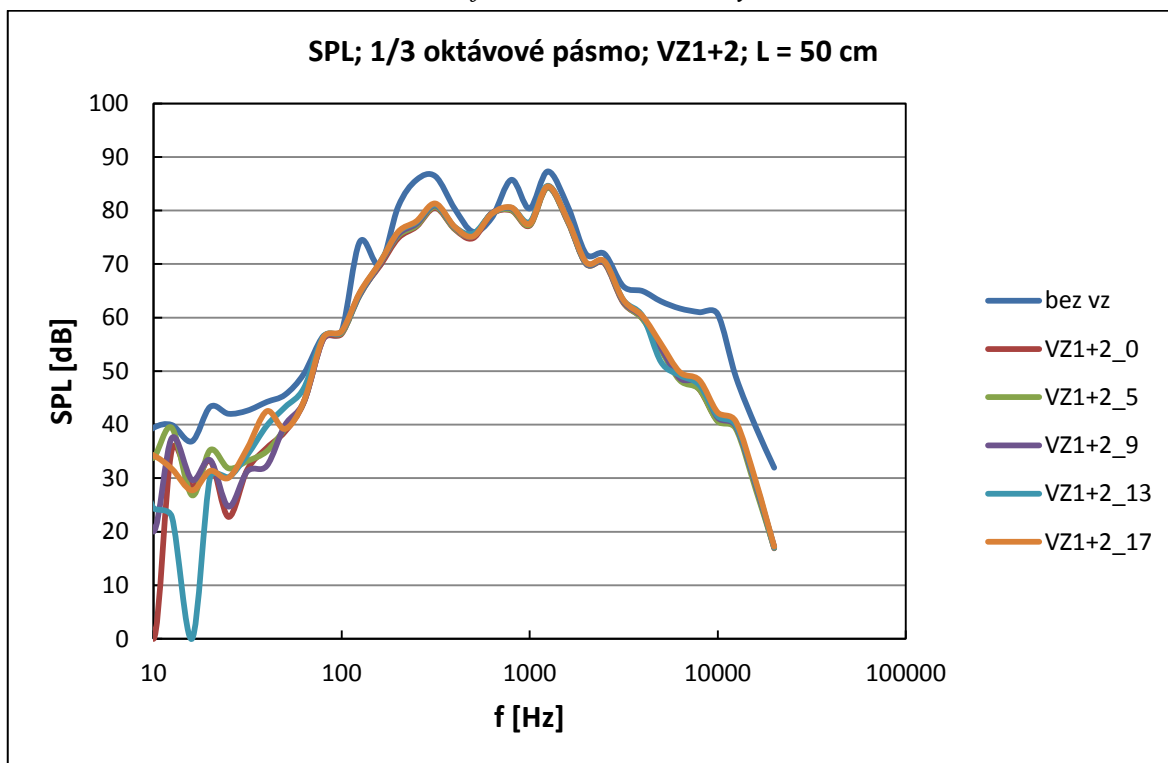
Obr. 75. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm



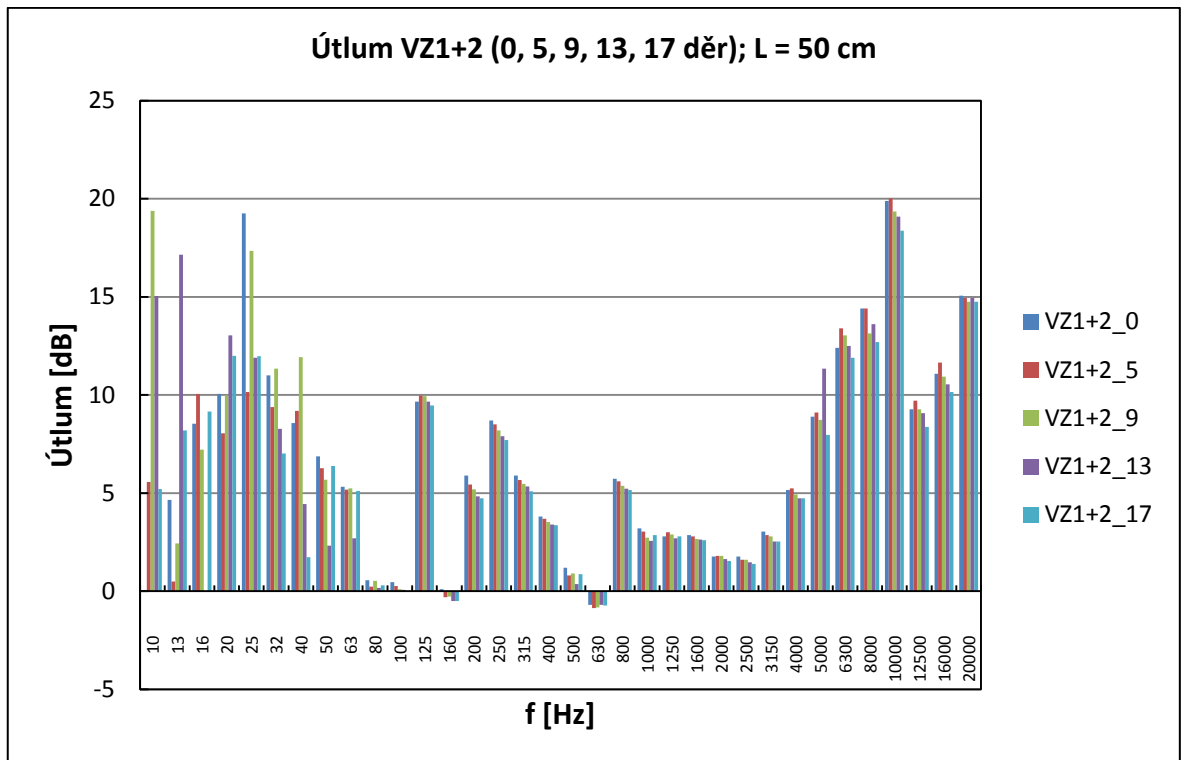
Obr. 76. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm



Obr. 77. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm



Obr. 78. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm



Obr. 79. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm

Grafy v kapitole 5.5 získané jako hodnoty útlumu vykazují téměř vždy pozitivní útlum, což v konečném důsledku ukazuje na fakt, že vrstvy použité pro tlumení generovaného signálu mají kromě pohltivosti také dostatečný útlum. Ten je proměnlivý se vzdáleností měřeného zdrojového signálu a mikrofonu. Mikrofon byl umístěn kolmo jako jednoosý snímač akustického tlaku pronikající skrz překážku. Jen zřídka jsou viditelné negativní hodnoty útlumu ve středních oblastech kolem 100, 200, 640 a 800 Hz. Takto získané negativní útlumy jsou pravděpodobně způsobeny rezonancí vzorku uvnitř trubice. Přestože se jedná o standardizovaný rozměr dle požadavků ISO na vzorky umístěné v Kundtově impedanční trubici, její otevřený stav ovlivňuje expozice signálu do okolí a lze tento jev rezonance pozorovat.

6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ NA VOZIDLE

Byla měřena frekvenční analýza a ekvivalentní hladina hluku uvnitř interiéru automobilu. Praktická část byla provedena na vozidle značky VW Touran 2.0 TDI roku výroby 2005 a nájazdem 255 tisíc km. Měření bylo provedeno ve dvou provedeních a to jak na zimních, tak na letních pneumatikách (pro všechny stanovené režimy a izolace).

6.1 Technická specifikace vozidla

Tab. 11. Údaje z technického popisu vozidla

Druh vozidla	Osobní automobil - kombi
Tovární označení	Volkswagen
Obchodní označení	Touran
Typ	BKD
Palivo	NM
Max. výkon / Otáčky	103 kW / 4000 ot. min ⁻¹
Zdvih. objem	1968 cm ³
Počet míst	5
Délka / Šířka / Výška	4391 mm / 1794 mm / 1620 mm
Provozní hmotnost	1633 kg – 1785 kg
Nejvyšší rychlost	200 km/h
Vnější hluk vozidla: stojícího / za jízdy	78 dB / 72 dB



Obr. 80. Měřené vozidlo VW Touran 2.0 TDI a motor měřeného vozidla

Měřené vozidlo, které je zobrazeno na obrázku 80 je z kategorie MPV, která vykazují vysoký aerodynamický odpor z důvodu své užitnosti (vysoký a objemný vnitřní prostor). Tento fakt, kdy se v celkovém měření frekvenční analýzy projevuje aerodynamická složka je poměrně zásadní a nelze ho opomenout pro vysoké rychlosti. Přesto odseparování této

aerodynamické složky od celkové hlučnosti přesahuje rámec praktického zjištění této práce. Možnost jak zjistit přesnou aerodynamickou složku u takto provedeného vozidla je analýza hlučnosti v aerodynamickém tunelu, který nebyl v průběhu práce k dispozici, a proto jsou výsledky pouze z provozní činnosti vozidla.

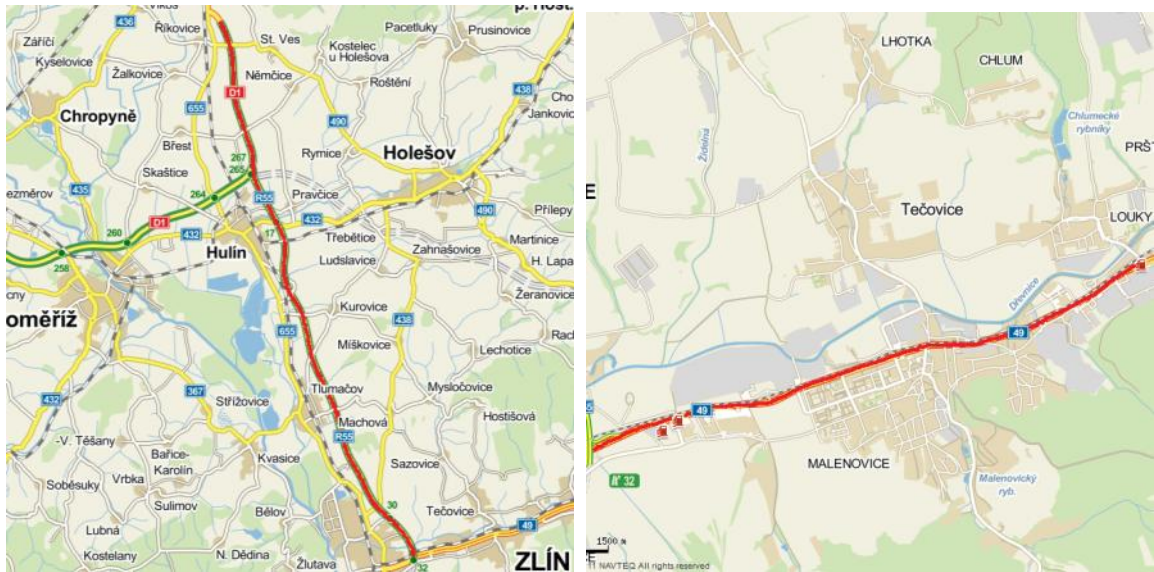
Níže uvedené fotografie na Obr. 81. ukazují dvojici kol, která byla použita pro měření v zimních měsících a jarních měsících. Pro zimní měření byla použita zimní pneumatika, která byla na plechovém ráfku s krycí poklicí stejného rozměru. Naproti tomu v jarních měsících bylo použito letní směsi pneumatiky, která byla na alu ráfku. Tento ráfek je v jarních a letních měsících výhodný z hlediska odvodu tepla při brzdění, ale stejně tak plní i funkci vzhledu a přispívá k celkovému designu vozidla.



Obr. 81. Pneumatiky měřeného vozidla zleva zimní pneu a letní pneu obě se stejným rozměrem

6.2 Měřené úseky, rychlosti a podmínky měření

Měření frekvenční analýzy uvnitř vozidla bylo provedeno na rychlostní silnici R55 ve směru z Otrokovic do Přerova a zpět. Na této silnici byly ve stejných úsecích měřeny rychlosti 130 km/h a 90 km/h s umístěním analyzátoru na pozici spolujezdce, ve středu mezi spolujezdcem a řidičem a na pozici řidiče. Další měření pro rychlost 50 km/h bylo provedeno na silnici číslo 49 ve směru z Otrokovic do Zlína a zpět. Opět byly měřeny stejné úseky pro dané rychlosti a umístění analyzátoru. Měření bylo prováděno ve večerních hodinách od 20:00 do 23:00 za minimálního provozu a za přibližně stejných meteorologických podmínek a to zejména z důvodu zachování nízkého okolního hluku, který by negativně ovlivňoval vnitřní akustická měření.

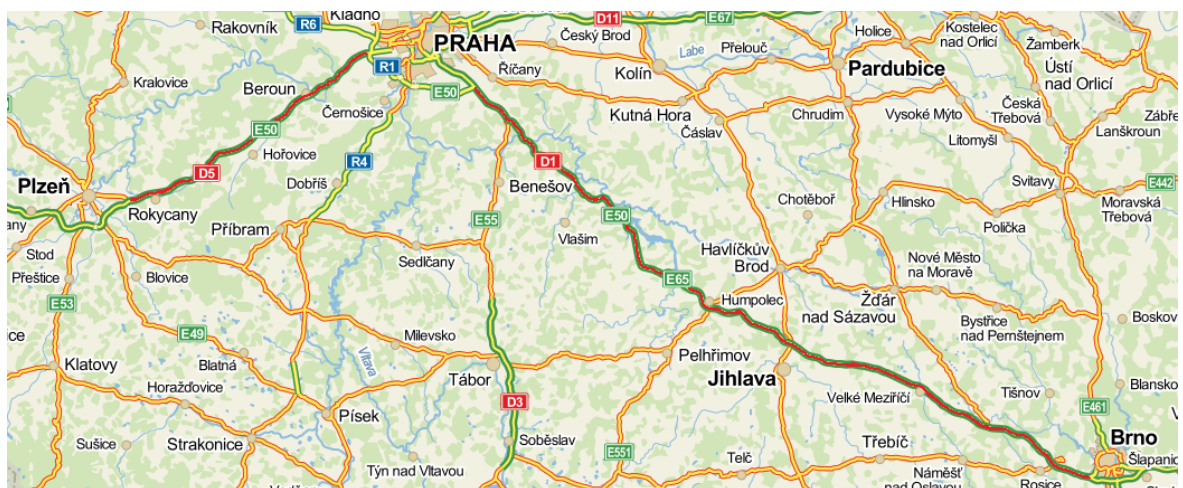


c)

b)

Obr. 82. Měřené úseky frekvenční analýzy a) rychlostní silnice R55 pro rychlosti 130 km/h a 90 km/h a b) silnice první třídy číslo 49 pro rychlost 50 km/h

Měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku v interiéru vozidla bylo provedeno na dálnici D1 ve vybraných úsecích ve směru z Brna do Prahy a zpět a na dálnici D5 ve směru z Prahy do Plzně a zpět. Tyto úseky byly vybrány kvůli jejich délce, kdy bylo možné provést dlouhodobá měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku. Cílem tohoto měření bylo získat ekvivalentní hladinu akustického tlaku v dlouhodobém časovém intervalu. Takto realizované měření podalo informaci o tom, jaká je převážná hodnota L_{Aeq} na nejdelší a nejfrekventovanější dálnici.

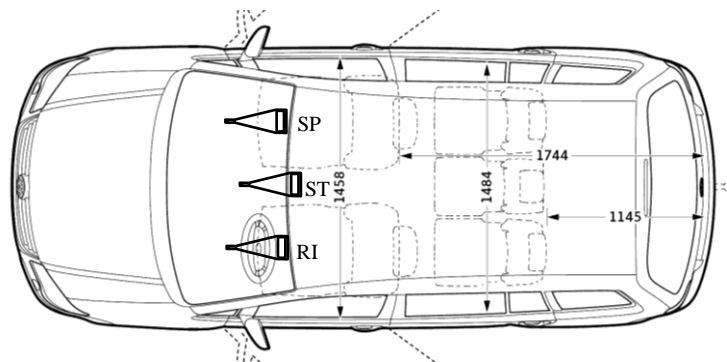


Obr. 83. Měřené úseky ekvivalentní hladiny akustického tlaku na dálnicích D1 a D5 pro rychlosti 130 km/h a 90 km/h



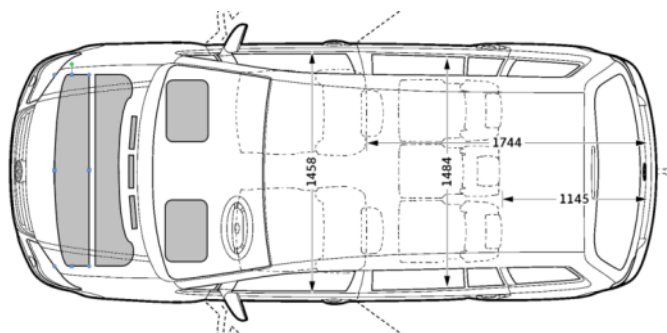
Obr. 84. Vnější podmínky na vozovce při měření frekvenční analýzy a ekvivalentní hladiny akustického tlaku; a) 130 km/h, b) 90 km/h, c) 50 km/h d) režim statického vozidla

S ohledem na aerodynamický hluk a hluk generovaný zejména z motoru a kontaktu mezi nápravou a vozovkou, jsou mikrofony situovány kolmo proti těmto zdrojům hluku z několika pozic, jak je zobrazeno na Obr. 85. Analyzátor byl během měření umístěn do prostoru spolujezdce, středu a řidiče, kolmo k motoru automobilu. Během měření byla vypnuta veškerá rušivá a nepotřebná zařízení (rádio, klimatizace, mobilní telefony).



Obr. 85. Umístění analyzátoru během měření v pozicích spolujezdec, střed a řidič

Izolace, které byly připraveny pro měření specifikovaných režimů, byly umístěny pod kapotou (nad motorem), v přechodovém místě palubní desky a pod koberečky u nohou řidiče a spolujezdce (tyto pozice jsou zobrazeny na následujícím schématu Obr. 86.). V těchto pozicích – místech byly měněny použité izolace a provedeno měření. Velmi důležitý fakt byl, že všechny režimy byly měřeny s ohledem také na letní a zimní pneu použitou na vozidle ve stejném rozměru.



Obr. 86. Umístění izolace pod kapotou vozidla a v prostoru pod koberečky uvnitř vozidla



Obr. 87. Tlumící vrstva VZ1 umístěná v prostoru za koberečky uvnitř interiéru zleva spolujezdec a řidič



Obr. 88. Tlumící vrstva zleva VZ3 a VZ1+2 umístěná pod kapotou vozidla

6.3 Analyzátor hladiny akustického tlaku

Pro měření hladiny akustického tlaku a ekvivalentní hladiny akustického tlaku v interiéru osobního automobilu byl použit analyzátor hladiny akustického tlaku Brüel & Kjaer typ 2238 Mediator. Tento analyzátor slouží k záznamu hladiny akustického tlaku váženého filtrem A v třetinooktávovém frekvenčním pásmu. Dále s ním lze zaznamenat ekvivalentní hladinu akustického tlaku A. Analyzátor je přenosný a má integrovaný mikrofon. Ke zpracování naměřených dat byl použit software Terminal RS 232.



Obr. 89. Analyzátor hladiny akustického tlaku Brüel & Kjaer 2238 Mediator

Tab. 12. Rychlostní režimy měření

rychlost [km/h]	stupeň převodovky v režimu tempomatu	otáčky [ot/min]
0	neutrál	800
50	3	1900
90	5	2000
130	6	2500

6.3.1 Měření frekvenční analýzy hladiny akustického tlaku

Měření probíhalo při rychlostech 50, 90, 130 km/h a během stání vozidla (pro stanovení základního hluku generovaného motorem v přibližné 800 ot/min – pozice převodovky neutrál). Při dosažení požadované rychlosti byl spuštěn analyzátor. Měření trvalo 1 minutu a 53 vteřin. Během měření byly zaznamenány hladiny akustického tlaku A v jednotlivých třetinooktávových frekvenčních pásmech. Dále se také během měření zaznamenávala ekvivalentní hladina akustického tlaku A.

Značení jednotlivých měření v grafech:

Schéma značení je rozděleno do tří pozic = 1_2_3.

První údaj - rychlost

Druhý údaj - umístění měřicího zařízení

Třetí údaj - tlumicí vrstva

Značení rychlostí = 50 km/h, 90 km/h a 130 km/h

Značení pozic mikrofonu

SP = pozice mikrofonu na místě spolujezdce

ST = pozice mikrofonu na středu interiéru

RI = pozice mikrofonu u řidiče

Značení tlumících vrstev

VZ1 = polyuretan S3535F, deska bez úprav

VZ2 = polyuretan S3535F, perforovaná deska s odebráním 17% povrchu

VZ3 = polyuretan H3050, deska s jednostranným profilem se sinusovým průběhem na řezu

VZ1+2 = kombinace VZ1 a VZ2, na VZ1 je přiložena deska VZ2

Příklad uvedení použitého značení

50_SP_VZ1 = rychlost 50 km/h_umístění mikrofonu v prostoru spolujezdce_tlumicí vrstva VZ1

130_RI = rychlost 130 km/h_umístění mikrofonu v prostoru řidiče_bez tlumicí vrstvy

6.4 Výsledky měření na zimních pneumatikách

V následujících grafech jsou uvedeny frekvenční závislosti hladiny akustického tlaku pro měření s tlumicí vrstvou v porovnání s měřením bez tlumicí vrstvy. Každý z grafů zastupuje jednotlivé umístění měřicího zařízení uvnitř automobilu.

Tab. 13. Den, doba měření a meteorologická situace pro měření na zimních pneumatikách

Datum	Čas	Tlumicí vrstva	Teploty	Náraz větru*	Srážky*	Nejvyšší tlak	Nejvyšší vlhkost
31. 3. 2014	21:00 – 23:00	Bez	8 – 10 °C	39,6 km/h	0,0 mm	1014,0 hPa	100%
14. 4. 2014	21:00 – 23:00	VZ1	7 – 12 °C	57,6 km/h	4,6 mm	1014,3 hPa	100%
16. 4. 2014	15:00 – 18:00	VZ2; VZ3	4 – 7 °C	68,4 km/h	0,0 mm	1025,9 hPa	99%

*průměrné hodnoty za celý den – hodnoty získány z meteorologické stanice Zlín

Tab. 14. Den, doba měření a meteorologická situace pro dlouhodobé měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku na zimních pneumatikách

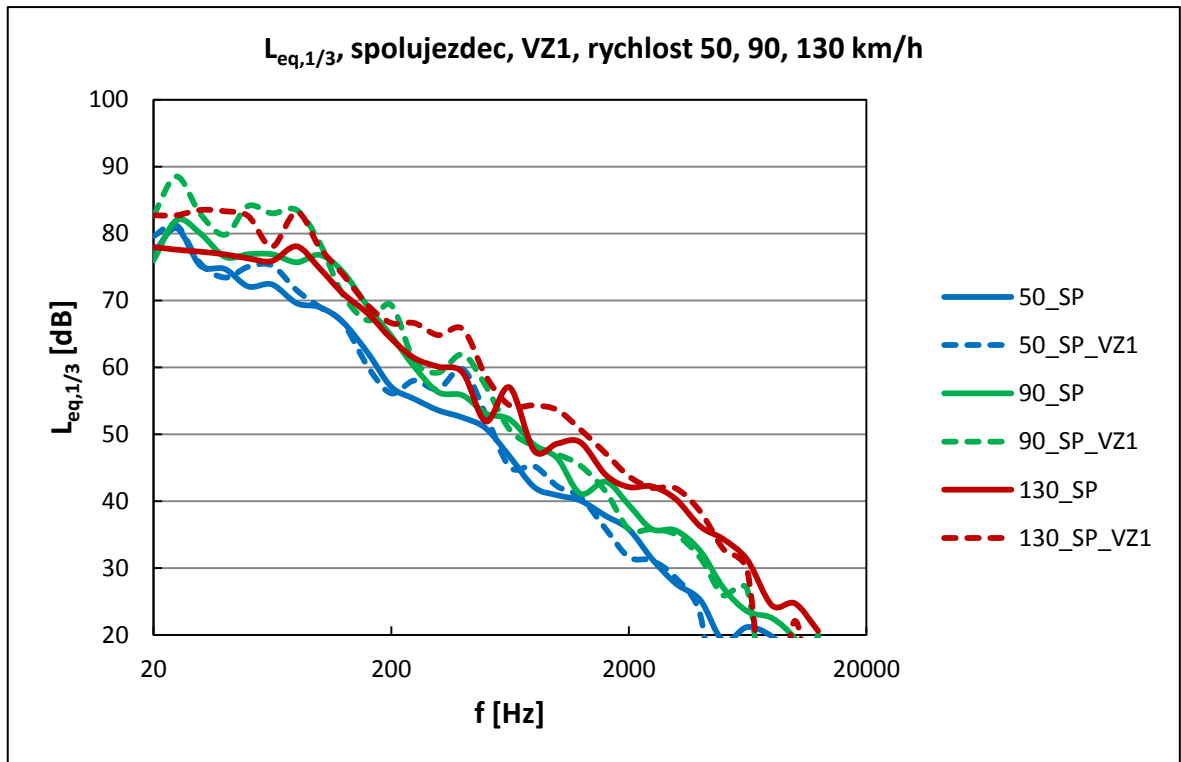
Datum	Pneu	Tlumicí vrstva	Teploty*	Náraz větru*	Srážky*	Nejvyšší tlak	Nejvyšší vlhkost
9. 4. 2014	Zimní	Bez	4,4 - 11,4 °C	64,8 km/h	0 mm	1021,8 hPa	76%

*průměrné hodnoty za celý den – hodnoty získány z meteorologické stanice Praha 6, Strahov

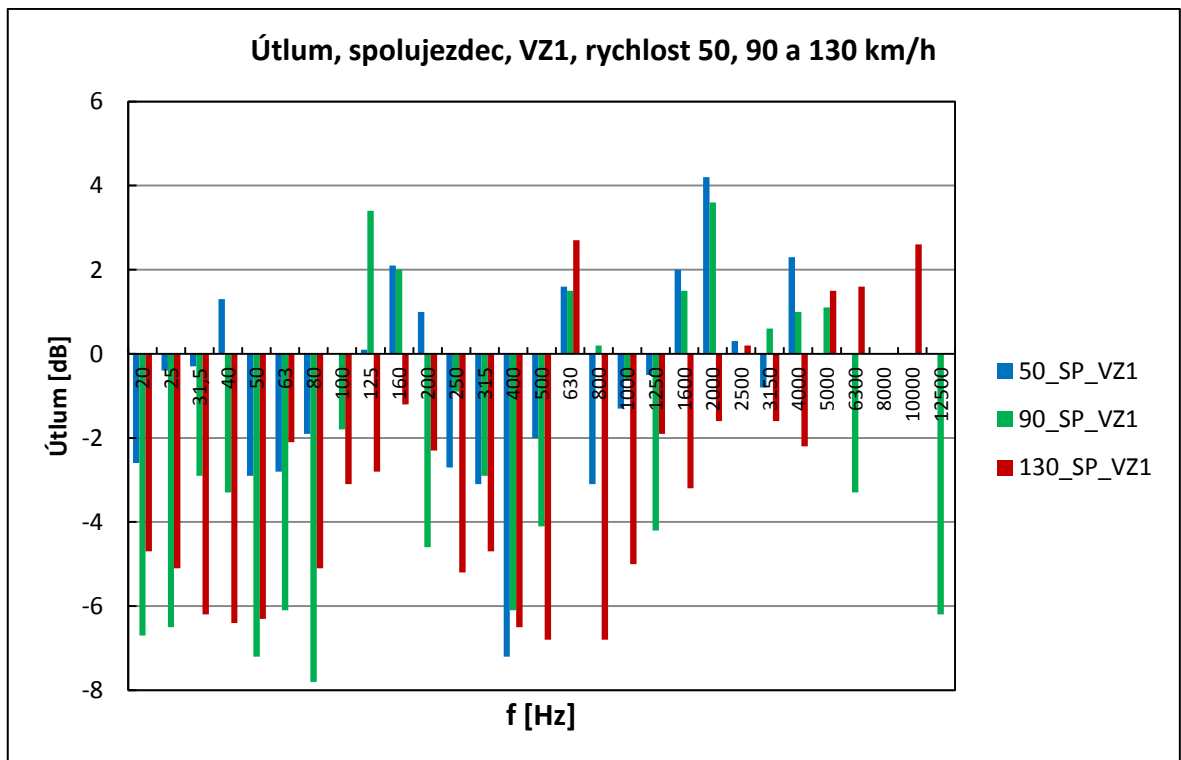
V grafech jsou zobrazeny dvojice křivek, které odpovídají jednak základnímu měření bez izolace na dané pozici uvnitř interiéru vozidla (v dále uvedeném grafu jsou ukázány tlumicí křivky na pozici SP = spolujezdec). Plná křivka popisuje stav bez tlumicí vrstvy a přerušovaná křivka popisuje již naměřené hodnoty v rámci použité tlumicí vrstvy. Z prezentovaného průběhu křivek je zřejmé, že frekvenční maxima jsou v rozsahu do 200 Hz a do maximální hodnoty L_{eq} rovnající se hodnotě mezi 80 – 90 dB. V dalším průběhu lze pozorovat spíše pozvolné klesání bez ohledu na zvolenou rychlost. Měření jako takové bylo silně ovlivněno teplým zimním až jarním počasím, kdy se teploty pohybovali výrazně nad hranicí 5°C, což je pro funkčnost zimní pneumatiky „nepřirozená“ oblast používání.

Tyto křivky jsou zpracovány pro režimy rychlostí 50, 90 a 130 km/h. Měřená veličina byla hladina akustického tlaku v třetionoktávovém pásmu, a to vždy v ekvivalentní mezihodnotě pro dané třetionoktávové pásmo. Celkové ekvivalentní hodnoty akustického tlaku jsou zpracovány v následujících kapitolách.

6.4.1 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ1

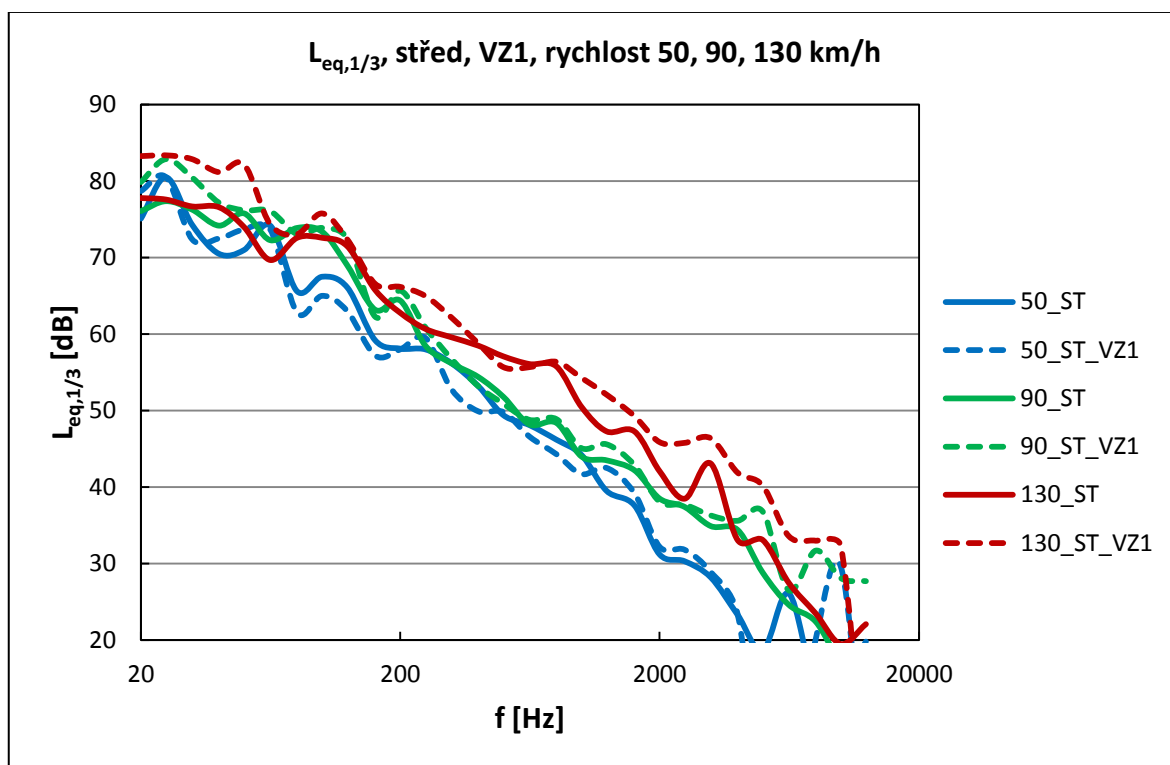


Obr. 90. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce

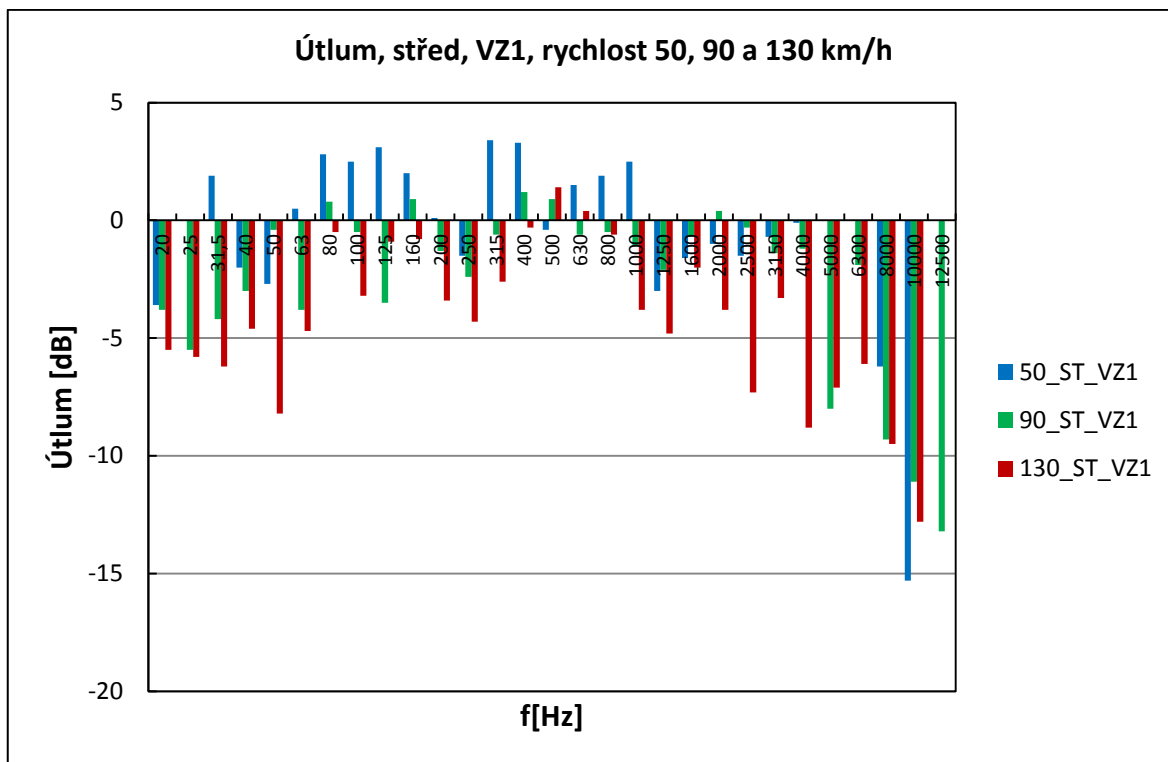


Obr. 91. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce

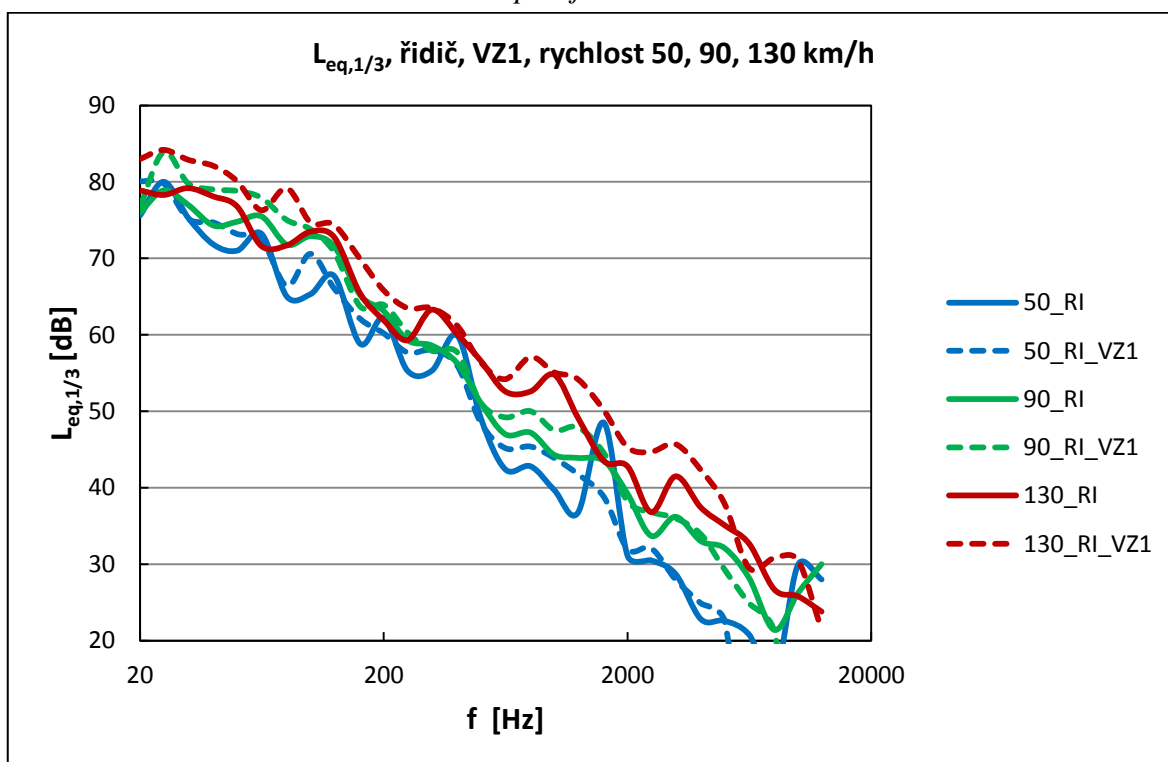
Jak již bylo poznamenáno v kapitole 5.5, kdy vzorky vykazovali téměř v celém frekvenčním rozsahu maximální útlumy, tak výše uvedený graf tyto zjištěná fakta nepotvrzuje. V grafu je prezentován decibelový útlum mezi základním režimem vozidla a použitou izolační tlumící vrstvou. V tomto případě se jedná o zjištění, že při jízdě na zimních pneumatikách, ve vyšších teplotách než jsou 4°C, dochází k celkovému negativnímu vlivu šíření chvění v nízkých frekvencích a to vlivem vysokého prohřátí směsi pneumatiky na povrchu vozovky a následnému hlukovému efektu. Tyto zvukové efekty ve formě „hučení“ jsou obvyklé u vozidel, která jezdí na zimních pneumatikách i v létě. Tento fakt - jev ukazuje graf Obr. 91., kdy jsou hodnoty očekávaného útlumu v minusovém (negativním) pásmu.



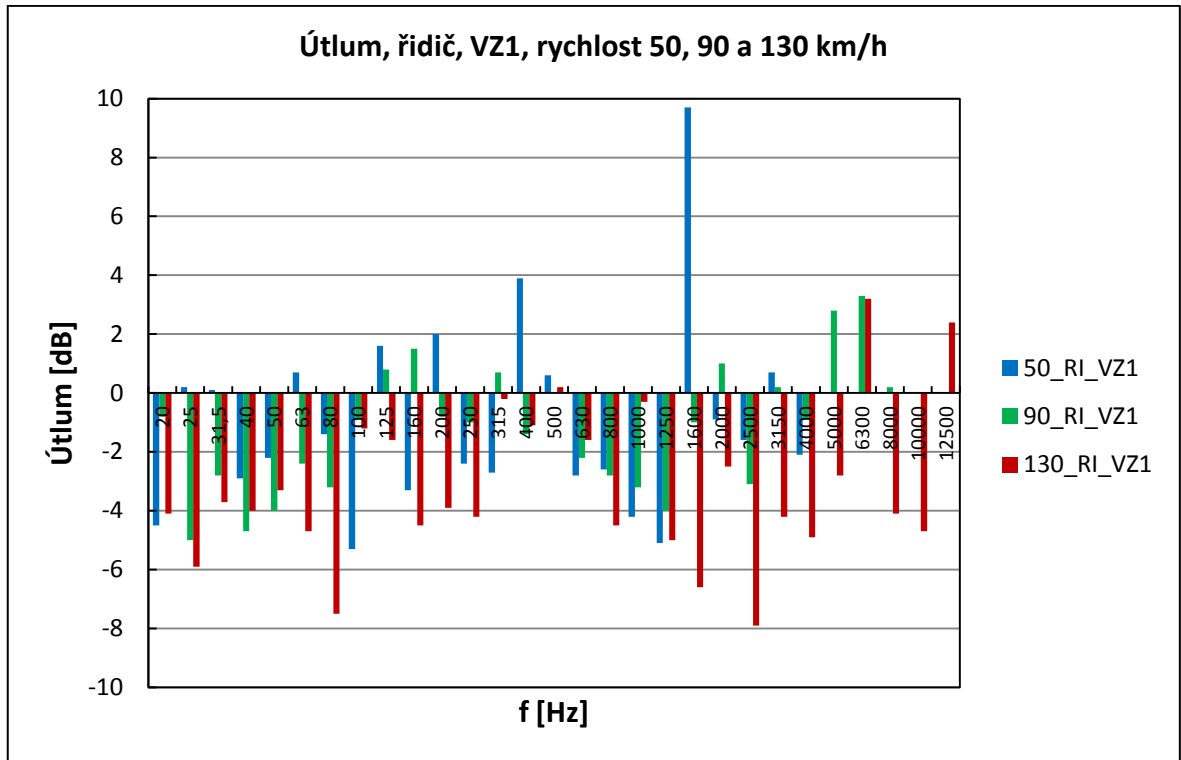
Obr. 92. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 93. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem

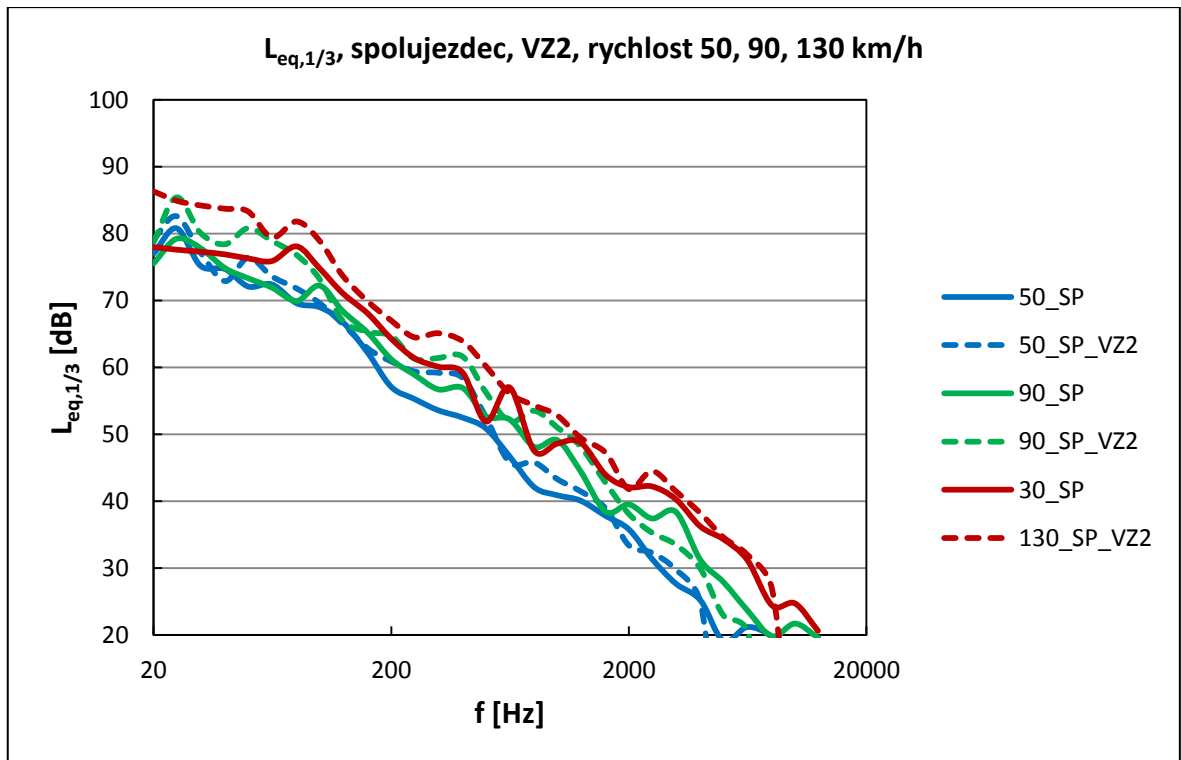


Obr. 94. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče

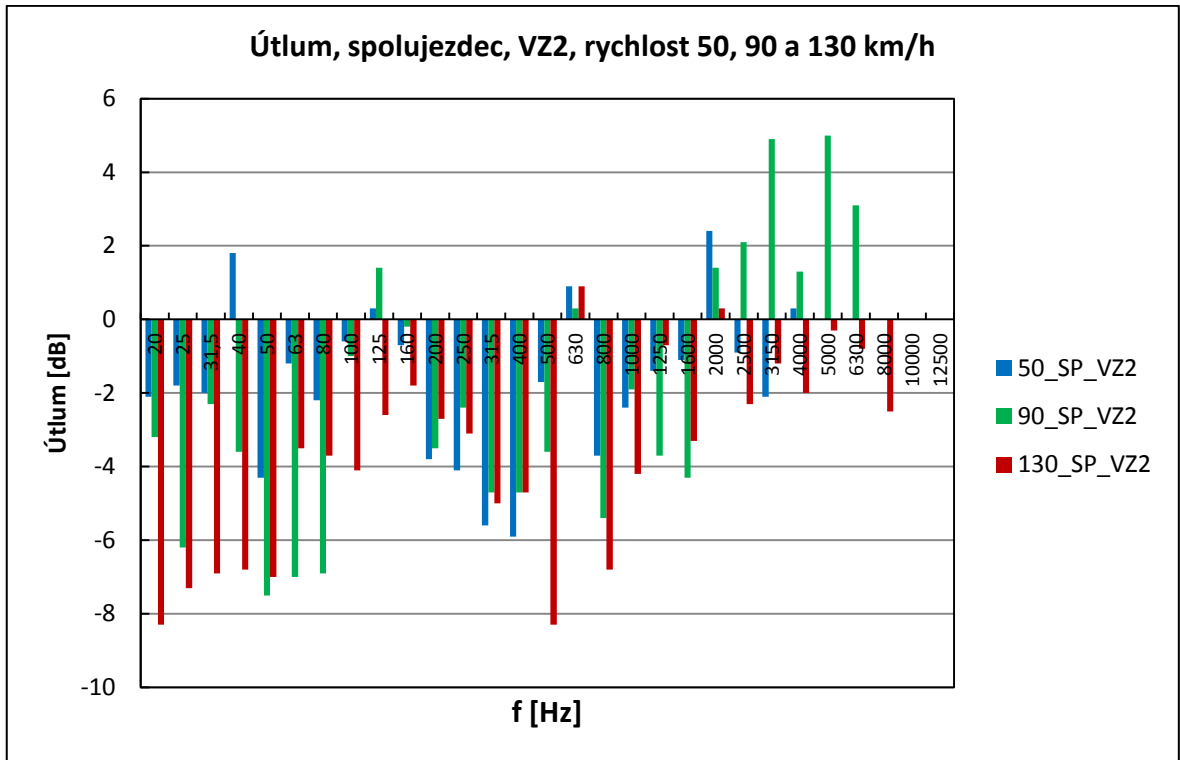


Obr. 95. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče

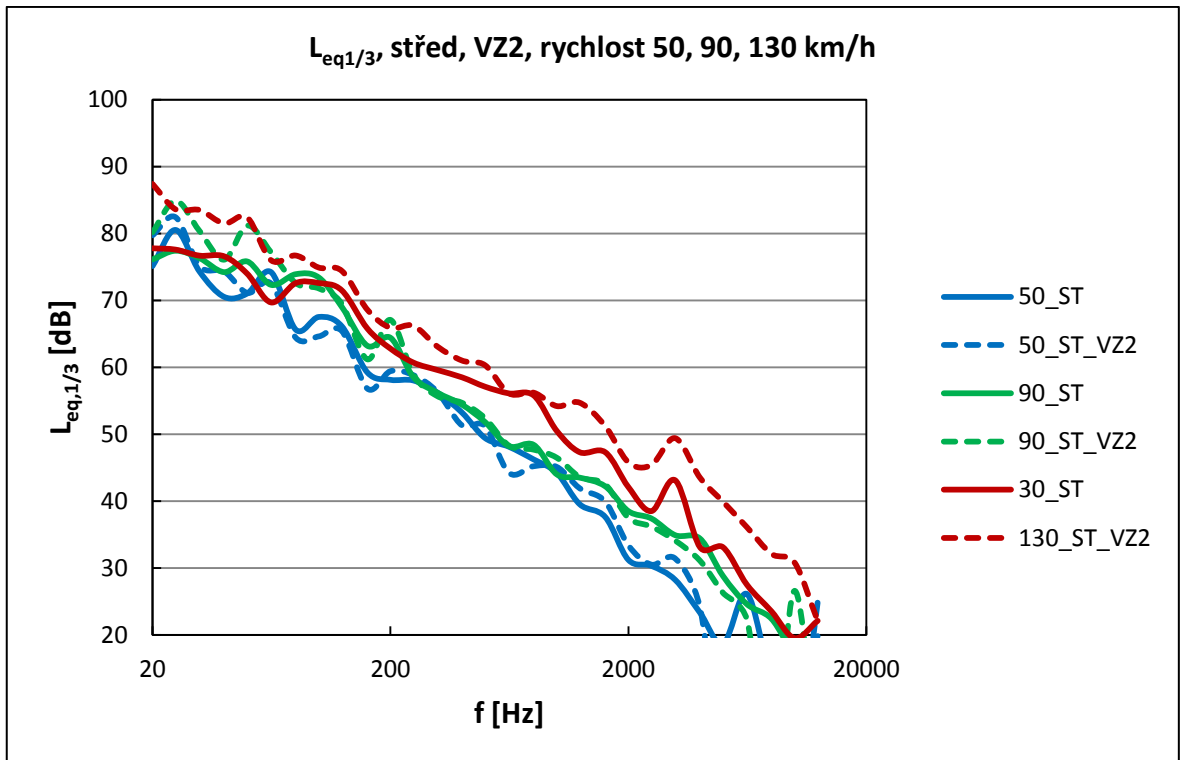
6.4.2 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ2



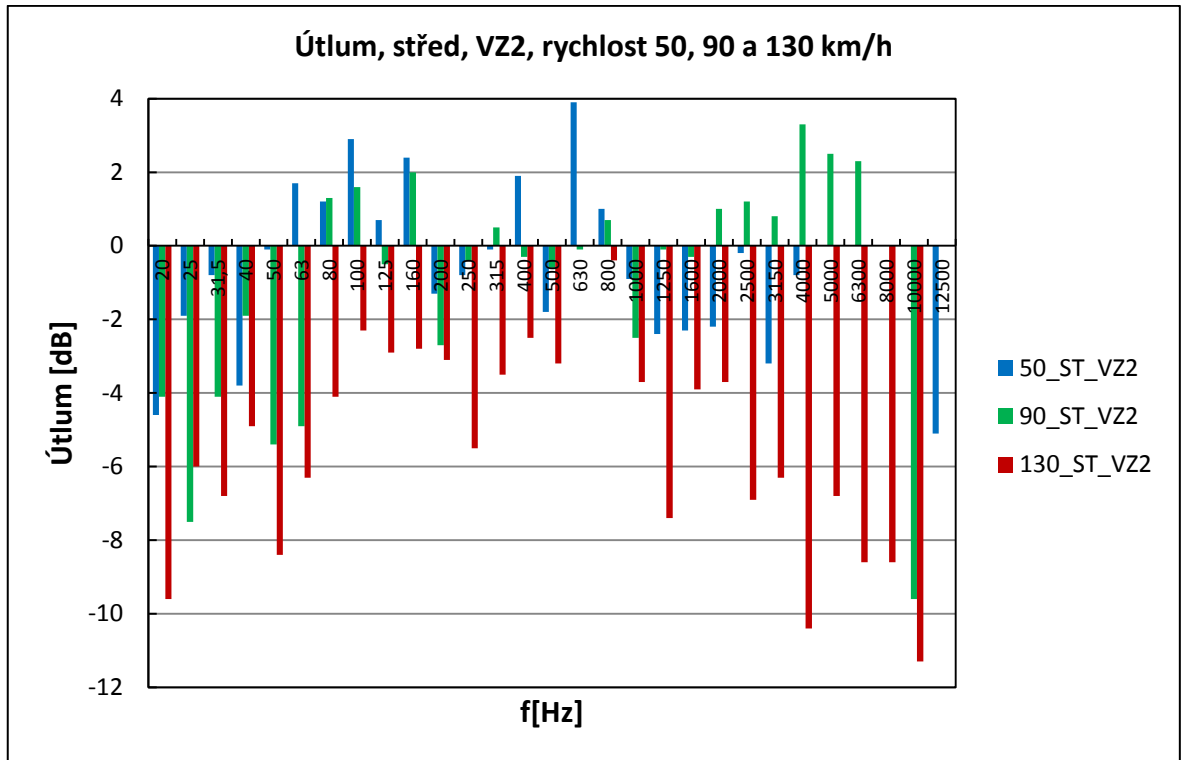
Obr. 96. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce



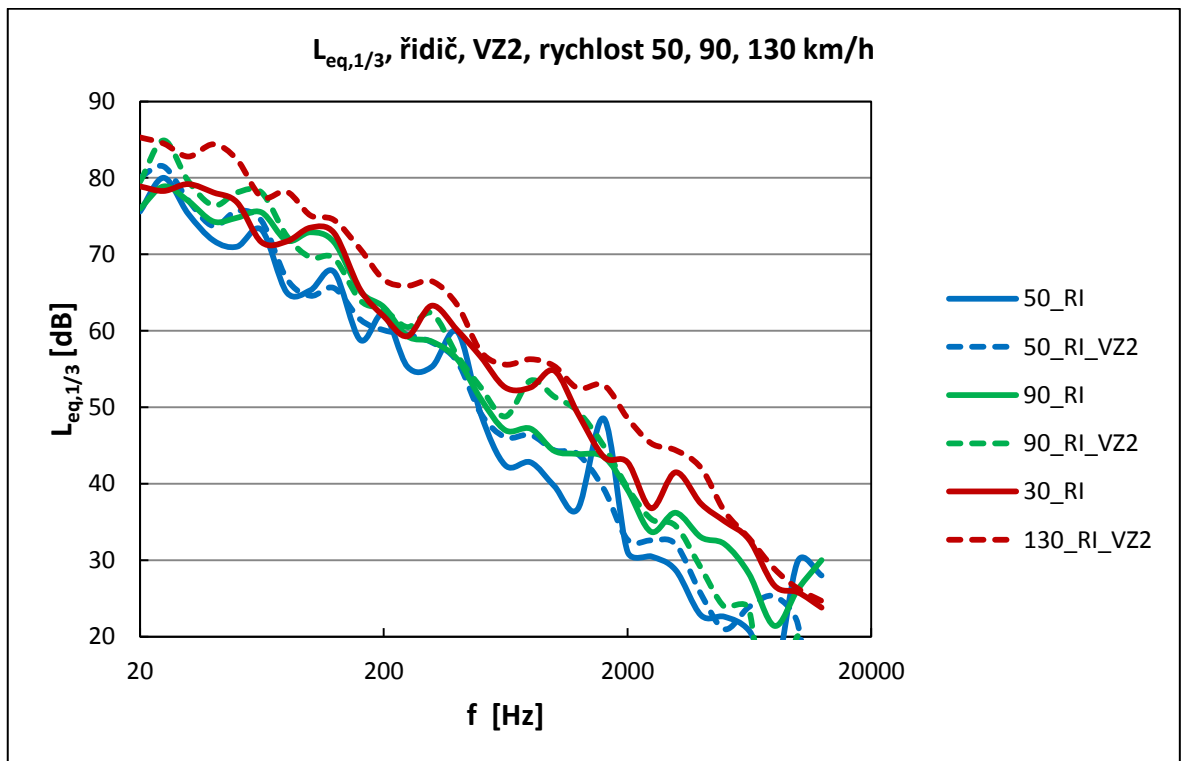
Obr. 97. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce



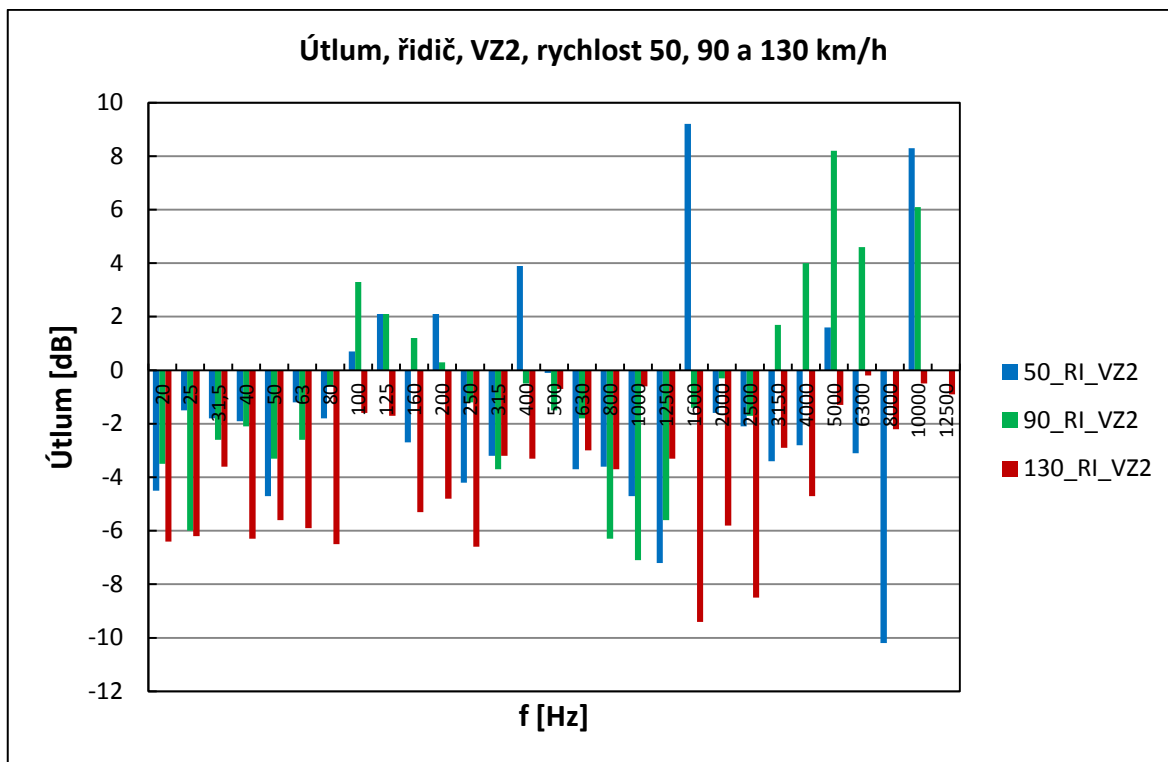
Obr. 98. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 99. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 100. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče



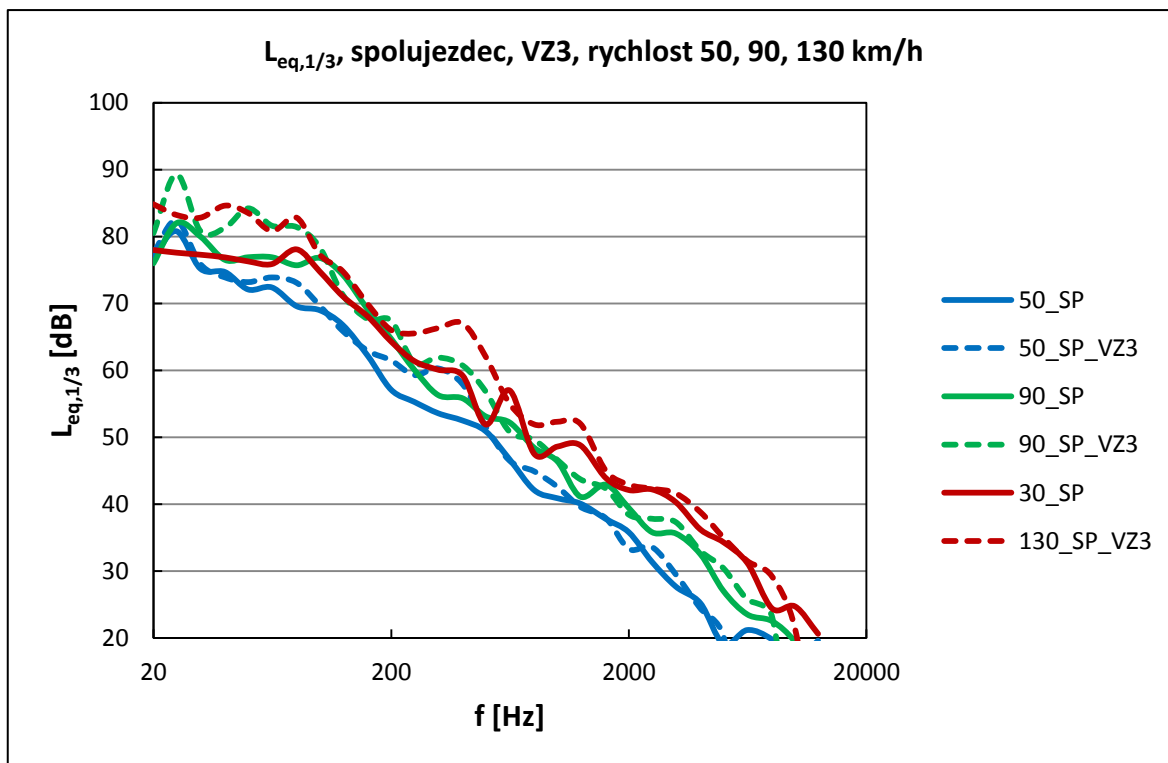
Obr. 101. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřící zařízení na místě řidiče

Zjištěná fakta negativního útlumu lze rozdělit do tří oblastí. Jedná se o:

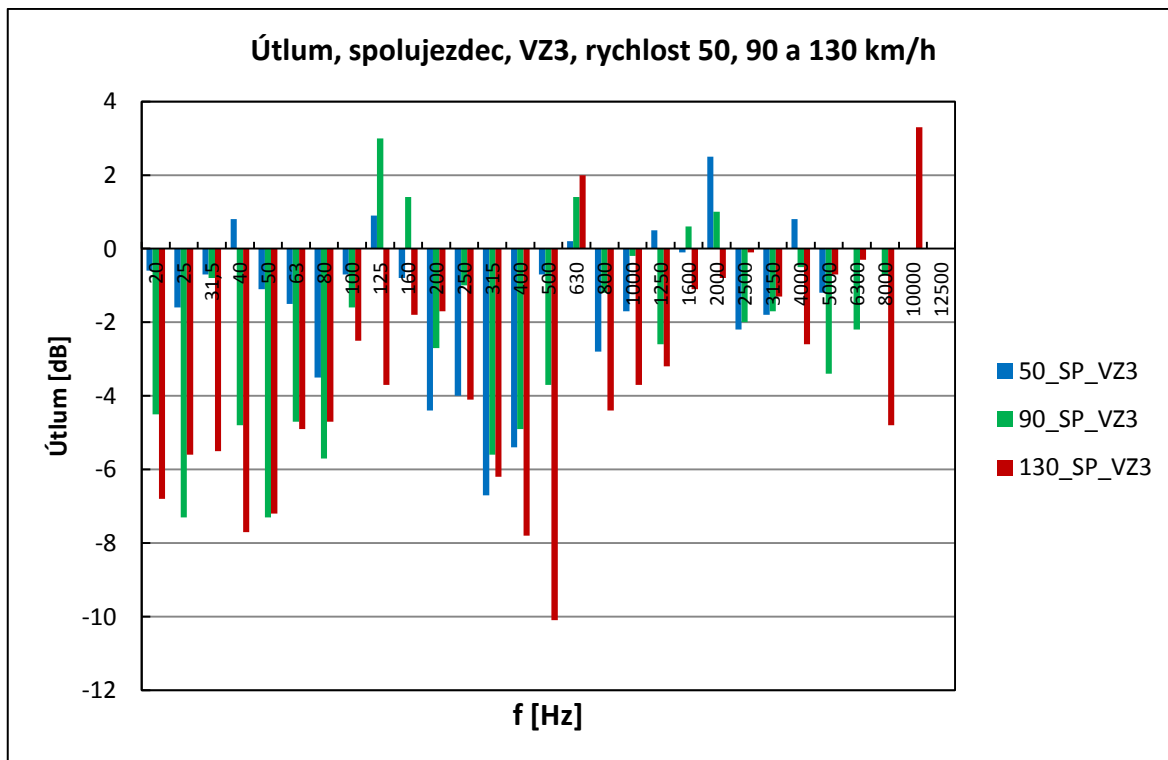
- Nízké frekvence (do 500 Hz)
- Střední frekvence (500 – 2 500 Hz)
- Vysoké frekvence (2 500 – 12 500 Hz)

V těchto oblastech lze definovat zdroje vznikajícího hluku jednak z kontaktu pneumatiky s vozovkou, jednak chvěním konstrukce a vlivy řízení a motoru, a v neposlední řadě je to aerodynamická složka. Posledně jmenovaná složka hluku v oblasti aerodynamiky je poměrně významná u tohoto typu vozidla.

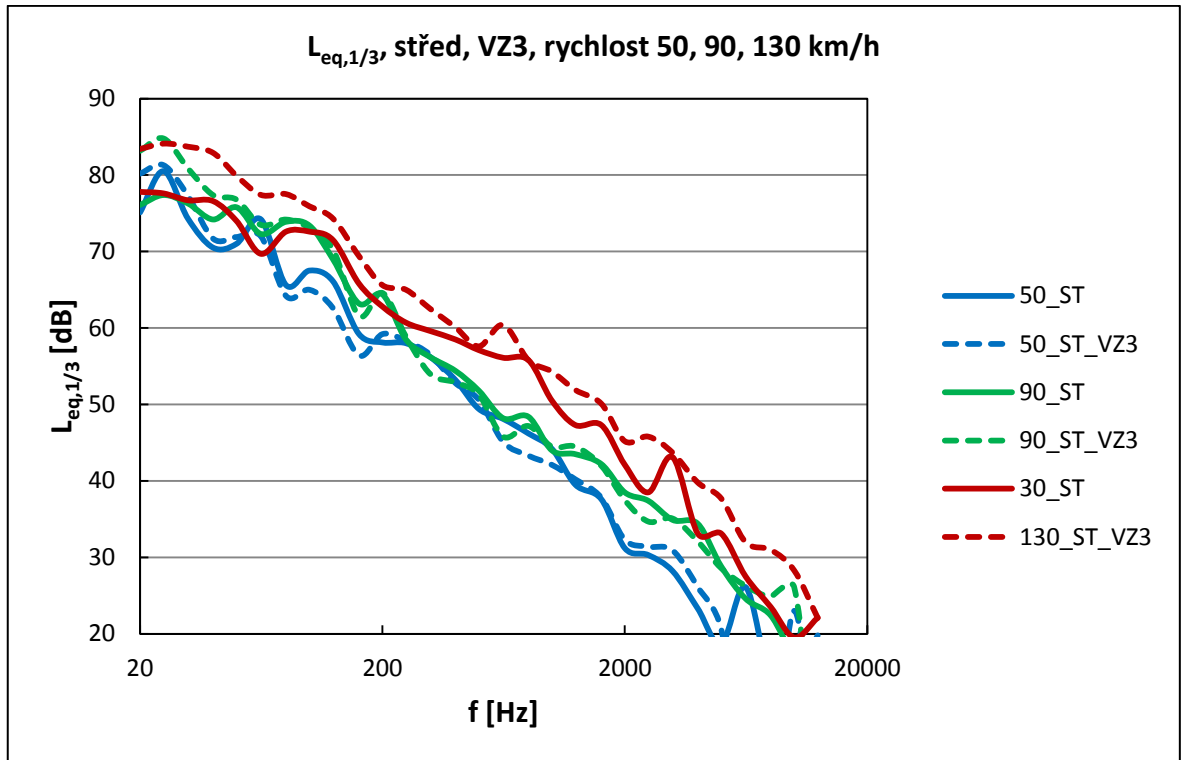
6.4.3 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ3



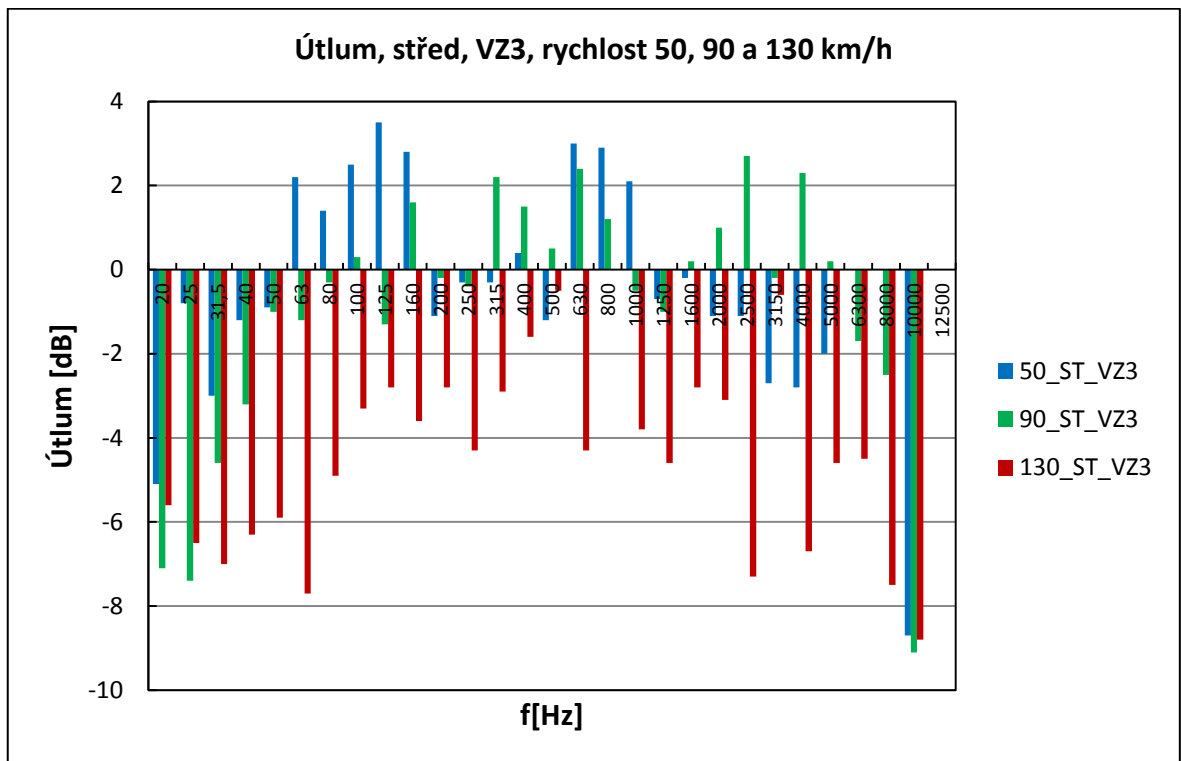
Obr. 102. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě spolujezdce



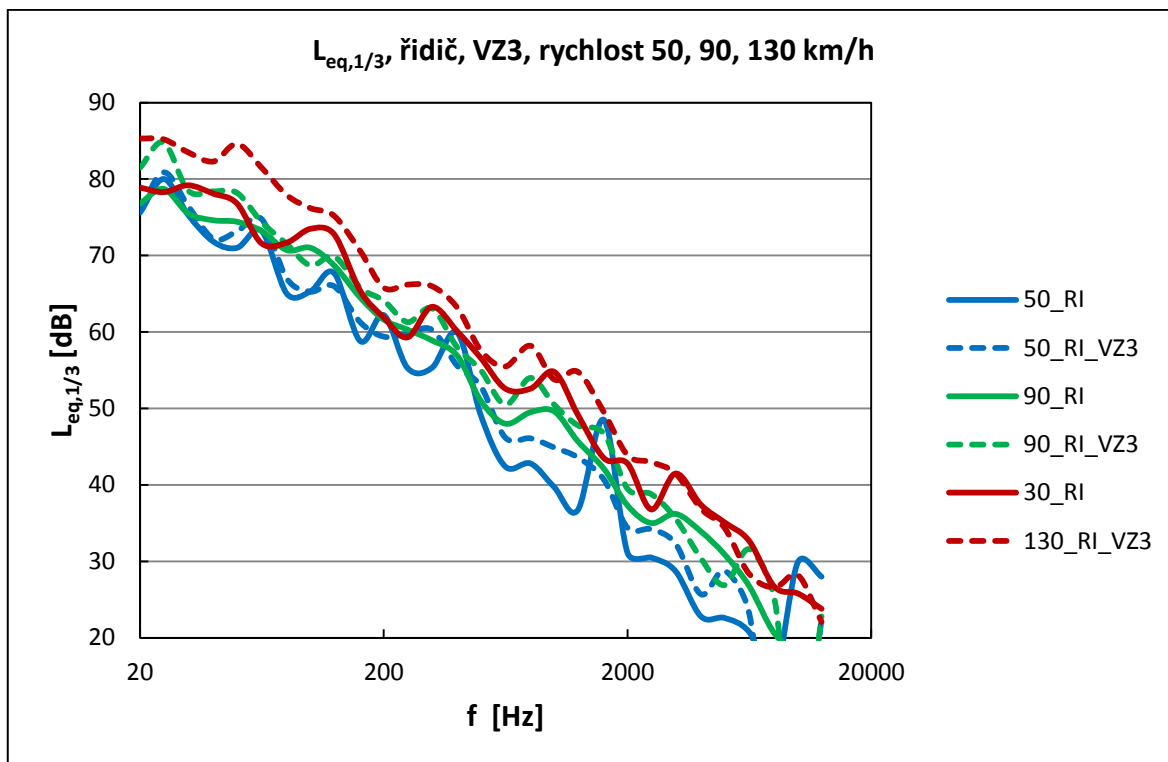
Obr. 103. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě spolujezdce



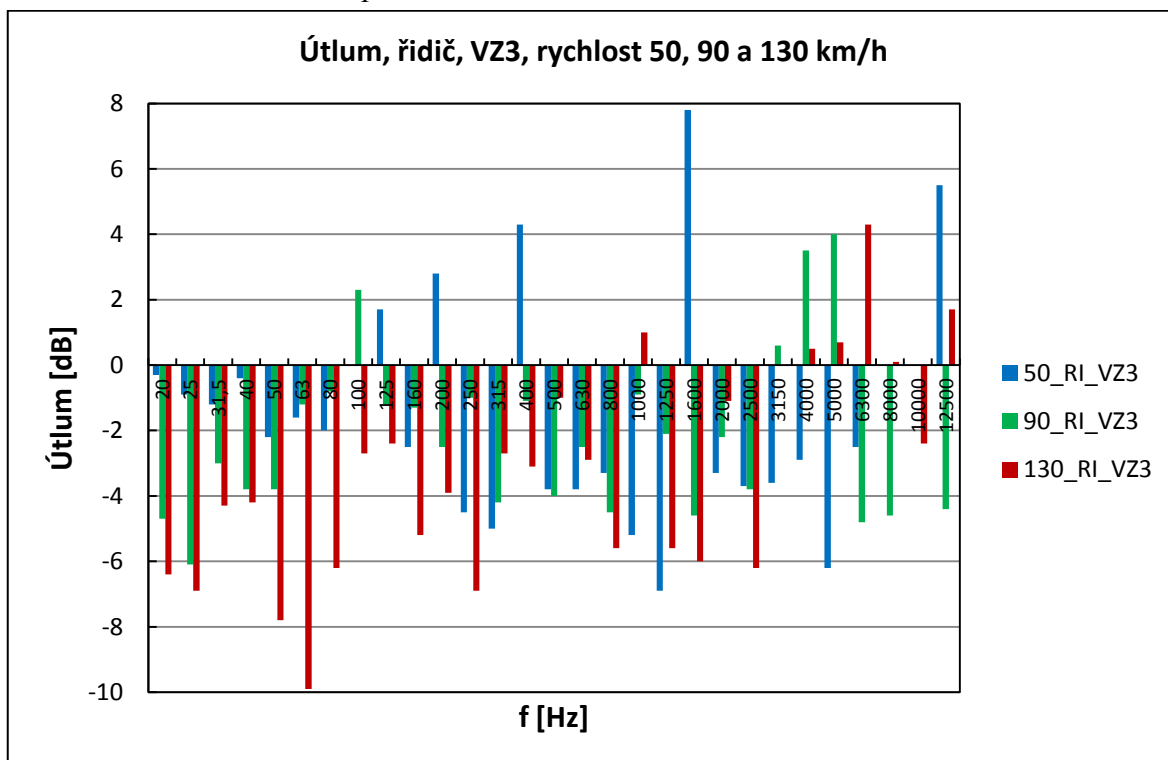
Obr. 104. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 105. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidičem a spolujezdcem



Obr. 106. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče

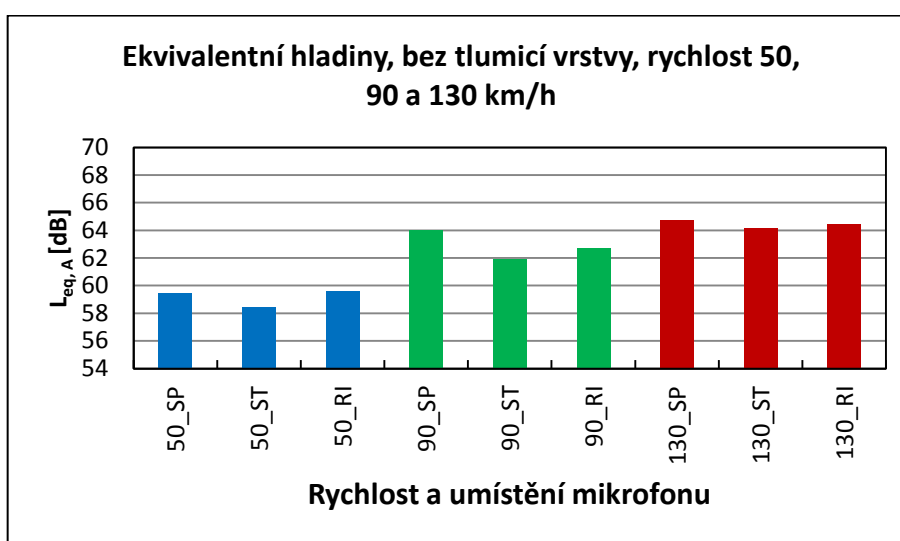


Obr. 107. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče
 Pokud budeme porovnávat všechny rozdíly útlumu zjištěné v praktickém měření tak lze vidět, vyšší hodnoty do minusu a to v závislosti na větším objemu použité tlumící látky.

Toto je způsobeno větší hmotou, která kmitá uvnitř konstrukce a přispívá tak k celkové hmotě generující hluk.

6.4.4 Ekvivalentní hladina akustického tlaku

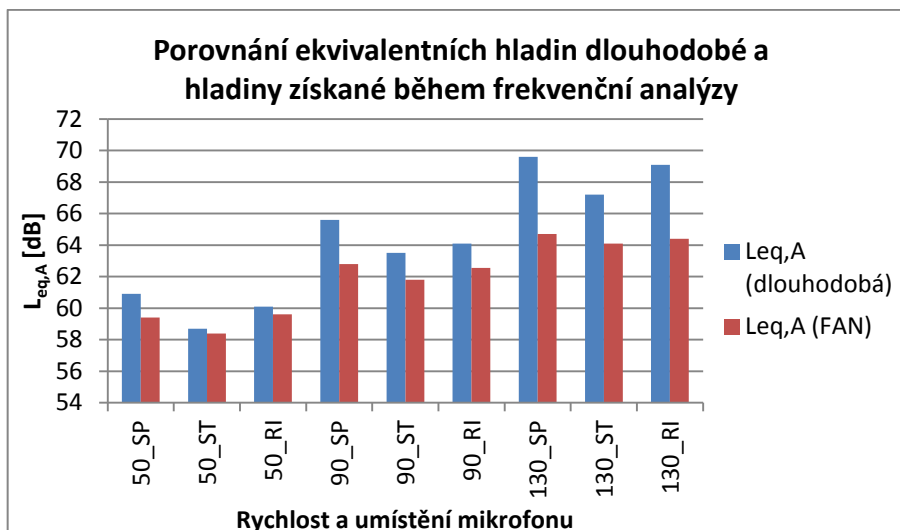
Ekvivalentní hladiny akustického tlaku v průběhu desítek minut byly zpracovány v níže uvedeném grafu (Obr. 109.). Jedná se o získání dat z dlouhodobého měření na dálničním úseku D1, kdy byly měřeny a získána data z pozic uvnitř interiéru jak je popsáno ve značkách na ose X pro váhový filtr A. Další grafy zobrazují ekvivalentní hladinu akustického tlaku získanou během měření frekvenční analýzy.



Obr. 108. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení bez tlumicí vrstvy

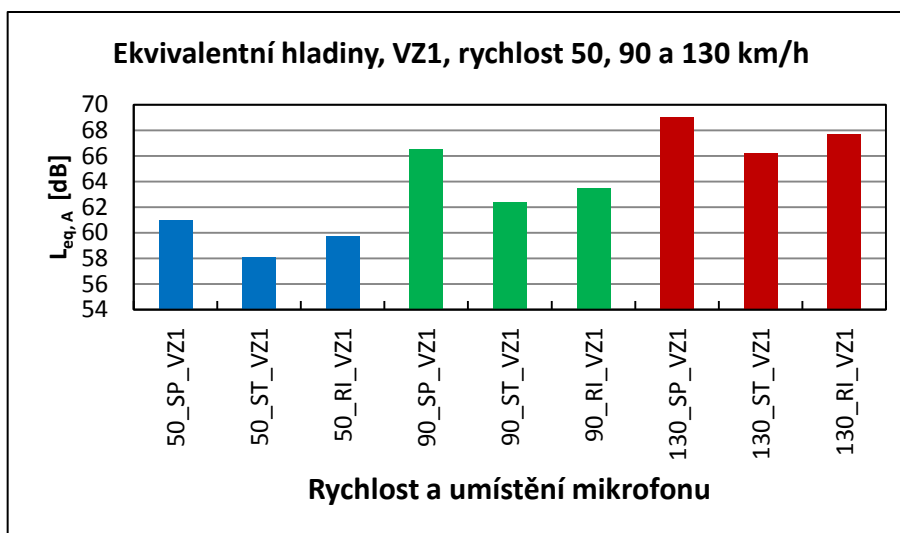
Následující graf ukazuje dvojí zjištění pro hladinu ekvivalentního tlaku. Jedná se jednak o modrou závislost, která byla přímo zjištěná metodikou měření hladiny ekvivalentního tlaku zvukoměru a červenou závislost, která popisuje hladinu ekvivalentního tlaku zjištěnou v rámci měřené frekvenční analýzy. Nutno podotknout, že hodnoty prezentovány jako modré byly zjištěny v rámci 10 minutových časových intervalů. Naproti tomu červené hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku byly zjištěny v časovém intervalu 1:53 minuty, kdy tato hodnota byla získána na zvukoměru BaK jako vedlejší hodnota frekvenční analýzy.

Z grafu je patrné, že hodnoty dlouhodobé jsou vyšší než krátkodobé a to hlavně proto, že delší měřený úsek byl charakterizován také vysokou změnou povrchu dálnice D1, která je v některých částech ve velmi špatném technickém stavu. Tento fakt se na hladině akustického tlaku podepsal velkou měrou až do hodnot 70 dB.

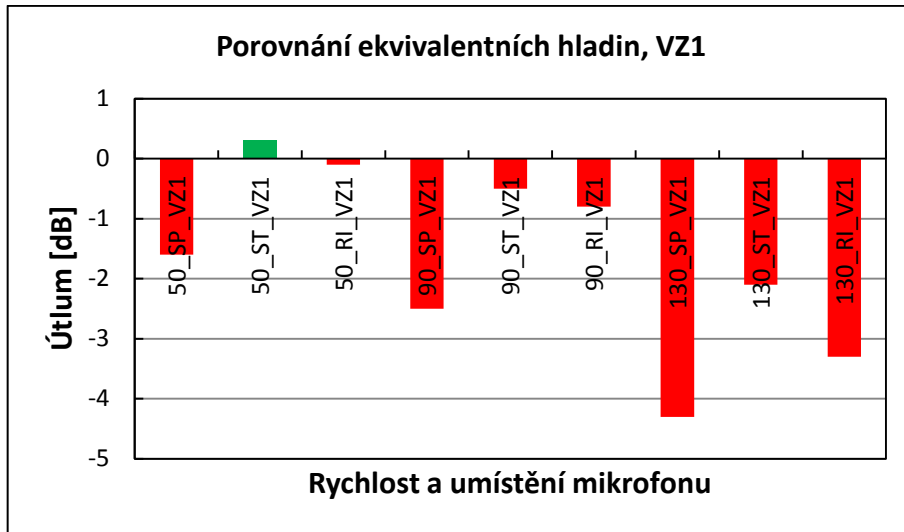


Obr. 109. Porovnání ekvivalentních hladin získaných z dlouhodobého měření a z měření frekvenčních analýz na zimních pneumatikách

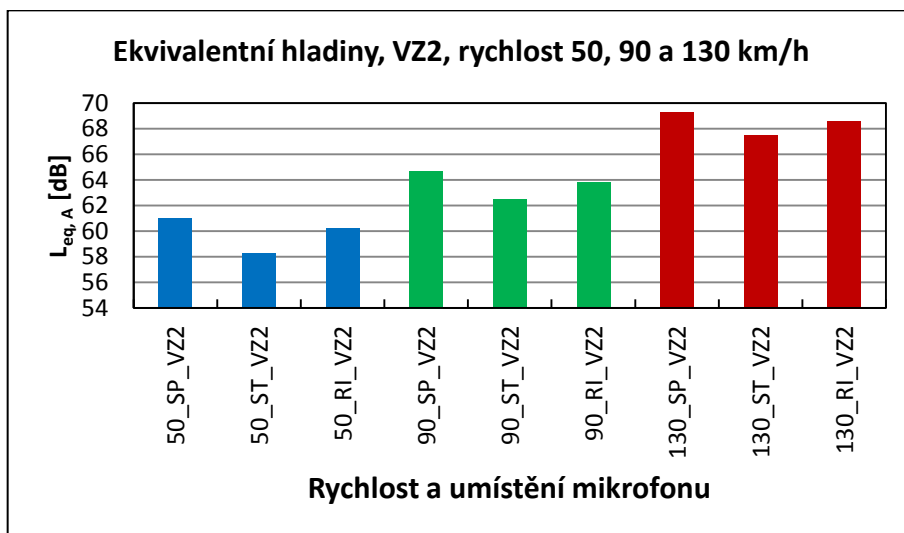
Z průběhů jednotlivých rychlostí je zřejmá závislost mezi rychlostí a celkovou ekvivalentní hladinou akustického tlaku $L_{A,eq}$ a to pro všechny případy a varianty umístění mikrofonu. Pro dané rychlosti jsou potom zřetelné mírné odchylky v rámci změny pozice mikrofonu v měřené rychlosti.



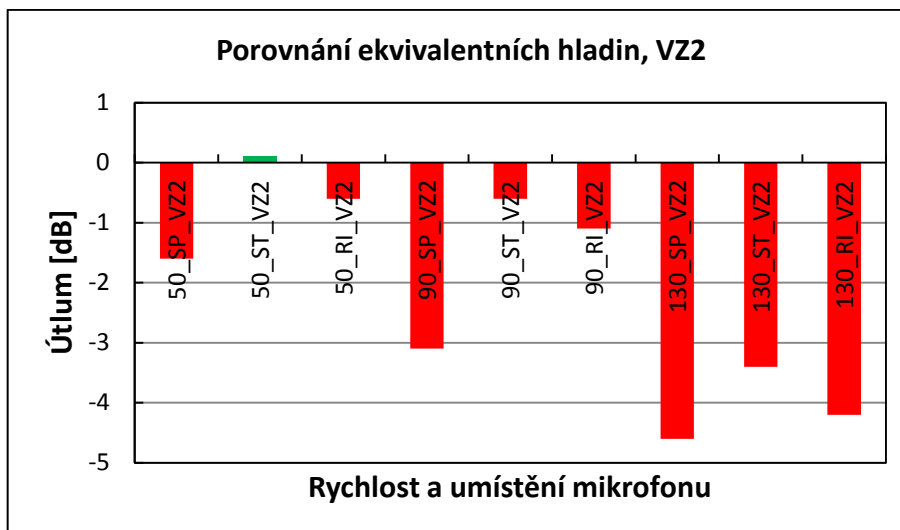
Obr. 110. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1



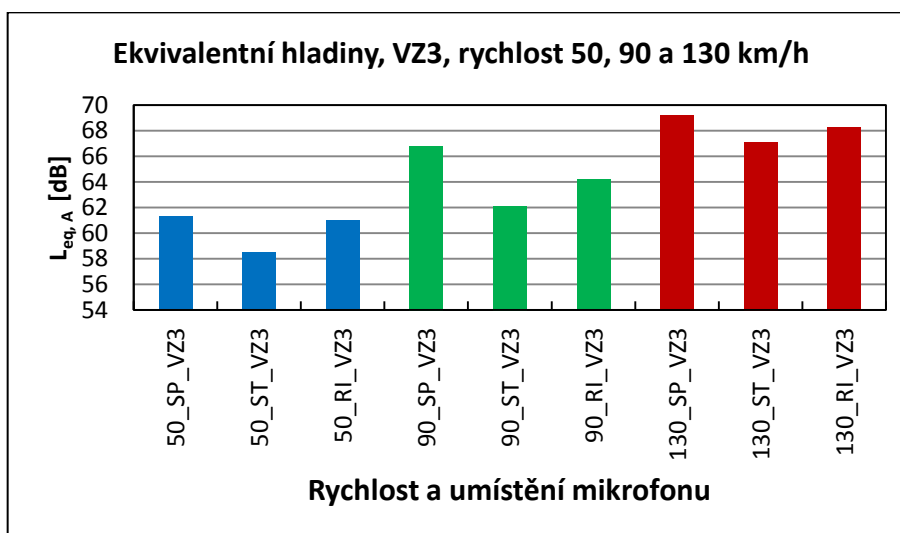
Obr. 111. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1



Obr. 112. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2

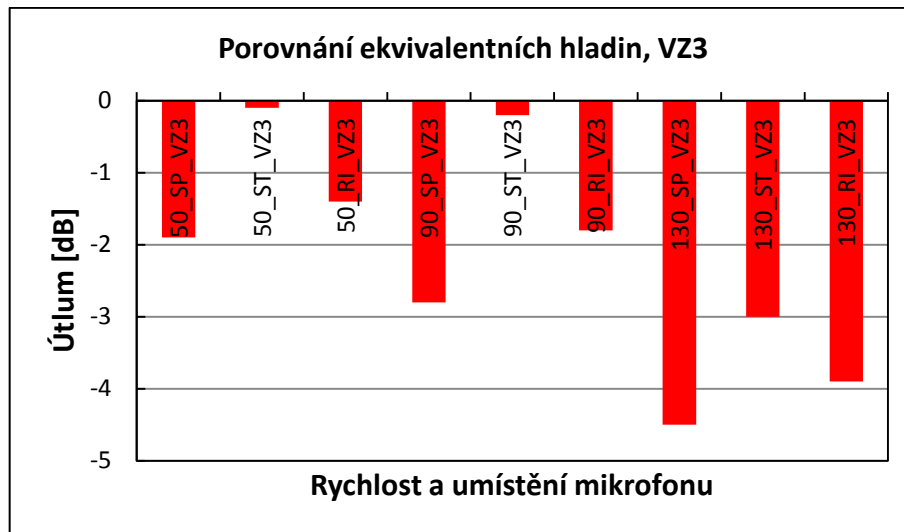


Obr. 113. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2



Obr. 114. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3

Útlumové charakteristiky popsány v grafech pro příslušné ekvivalentní hladiny tlaku jsou prakticky velmi podobné frekvenčním analýzám. Jelikož se jedná o data získaná ze stejného průběhu měření, jsou konečné výsledky těchto hladin vždy kladné nebo záporné a to s ohledem na trend jaký byl získán z měření frekvenční analýzy. Tento jev je viditelný pro všechny tři rychlosti, které byly měřeny.



Obr. 115. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3

6.5 Výsledky měření na letních pneumatikách

Pro letní pneumatiky byla provedena stejná měření na stejných úsecích jako pro měření na zimních pneumatikách. V průběhu měření zimních pneumatik bylo měření relativně nestabilní a výsledky tomu odpovídaly. V této části měření byly na vozidle již letní pneumatiky, které se vyznačují diametrálně odlišnou směsí pryže. V rámci měření na letním vzorku byla přidána dodatečná tlumicí vrstva označená VZ1+2. Výsledky získané při měření na letních pneumatikách jsou zpracovány v následujících podkapitolách.

Tab. 15. Den, doba měření a meteorologická situace pro měření na letních pneumatikách

Datum	Čas	Tlumicí vrstva	Teploty	Náraz větru*	Srážky*	Nejvyšší tlak	Nejvyšší vlhkost
28. 4. 2014	20:00 - 23:00	Bez; VZ1	15 - 18 °C	46,8 km/h	1,0 mm	1006,8 hPa	100%
29. 4. 2014	20:00 - 23:00	VZ2; VZ3	15 - 19 °C	46,8 km/h	0,0 mm	1008,2 hPa	100%
30. 4. 2014	20:00 - 21:30	VZ1+2	16 - 18 °C	39,6 km/h	0,0 mm	1007,5 hPa	100%

* průměrné hodnoty za celý den – hodnoty získány z meteorologické stanice Zlín

Tab. 16. Den, doba měření a meteorologická situace pro dlouhodobé měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku A na letních pneumatikách

Datum	Pneu	Tlumicí vrstva	Teploty*	Náraz větru*	Srážky*	Nejvyšší tlak	Nejvyšší vlhkost
7. 5. 2014	Letní	Bez	10,9 - 16,4 °C	57,6 km/h	5,6 mm	1014,7 hPa	94%

*průměrné hodnoty za celý den – hodnoty získány z meteorologické stanice Praha6, Strahov

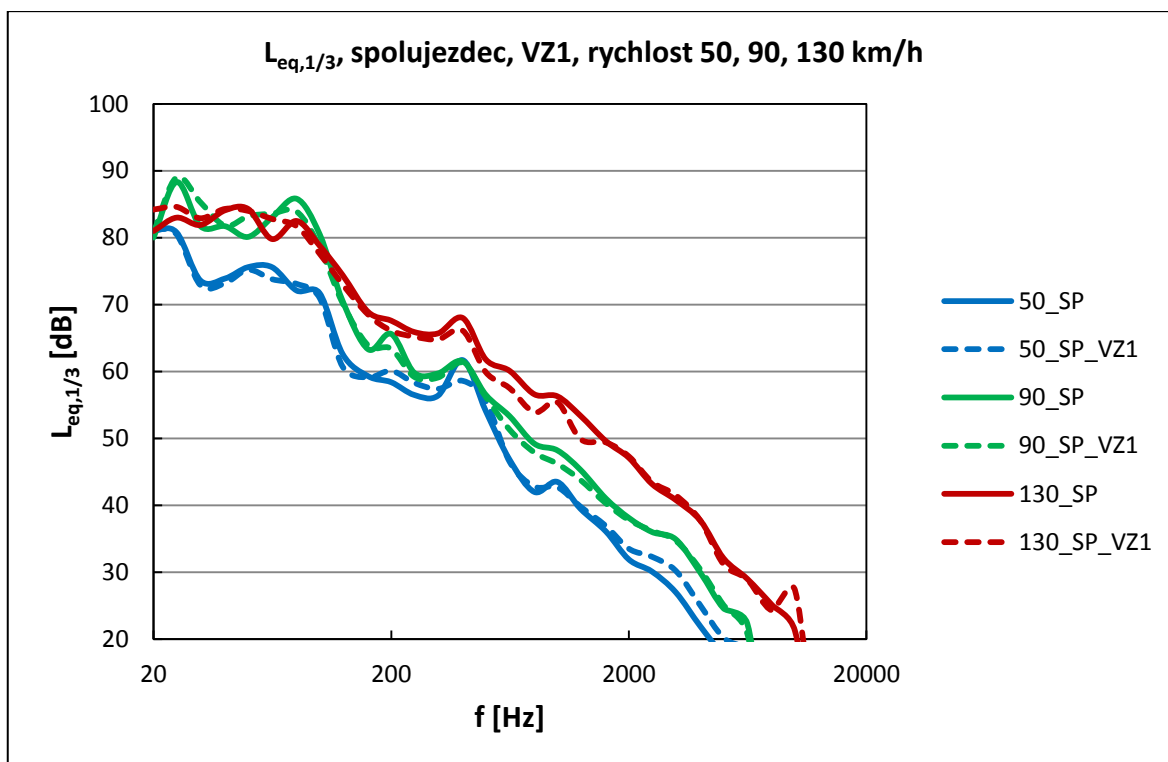
Z průběhů křivek pro měření na letních pneumatikách a použité tlumicí vrstvy vyplývá, že se již neopakuje stav jako u zimních pneumatik, kdy jsou hodnoty izolací vyšší v celém průběhu. U letních pneumatik jsou již výsledky dosaženy v souladu s přidavkem tlumicí vrstvy, což bylo z větší míry způsobeno letní směsí pneumatik, které jsou použitelné nad 5°C a jejich funkčnost je v období jara vysoce efektivní.

Průběhy křivek frekvenční analýzy i dlouhodobého měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku ukazují pozitivní útlum v celé oblasti frekvencí nebo alespoň v širších frekvenčních pásmech.

6.5.1 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ1

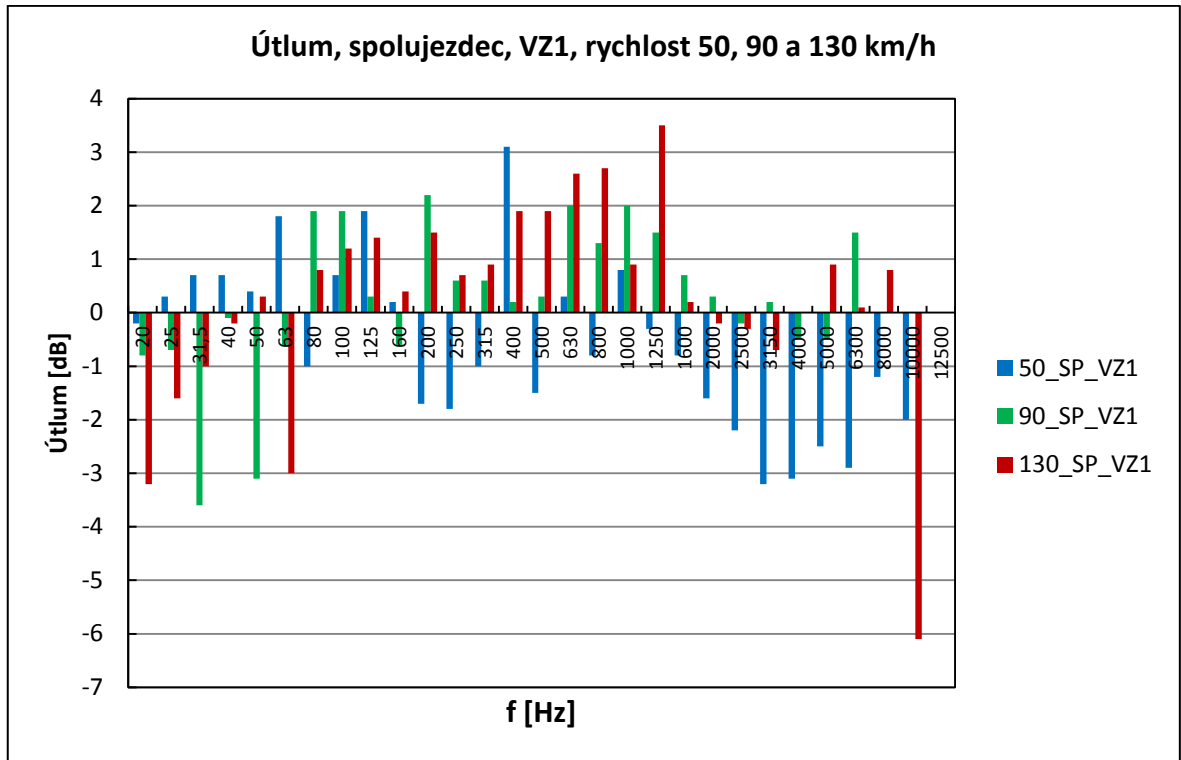
V následujících frekvenčních analýzách jsou popsány závislosti v režimu letních pneu a vybraných izolačních tlumících vrstev. Mezi hlavní směr řešení tlumící vrstvy patří fakt, že křivky označené jako plné by měly být vždy nad křivkami přerušovanými u daných dvojic. Pokud takto je, je tlumící vrstva efektivní a vykazuje decibelový útlum ve frekvenčním rozsahu 20 – 12 500 Hz.

Jestliže byly zjištěny oblasti nebo místa, ve kterých je tato požadovaná závislost obráceně pro plnou a přerušovanou křivku, jedná se o případné rezonance struktur nebo chybu v měření celé soustavy tak jak byla složena. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o lokální píky netlumeného stavu, které jsou nad závislostí pro tlumící vrstvy lze konstatovat, že chyba měření je eliminována maximální možnou měrou.

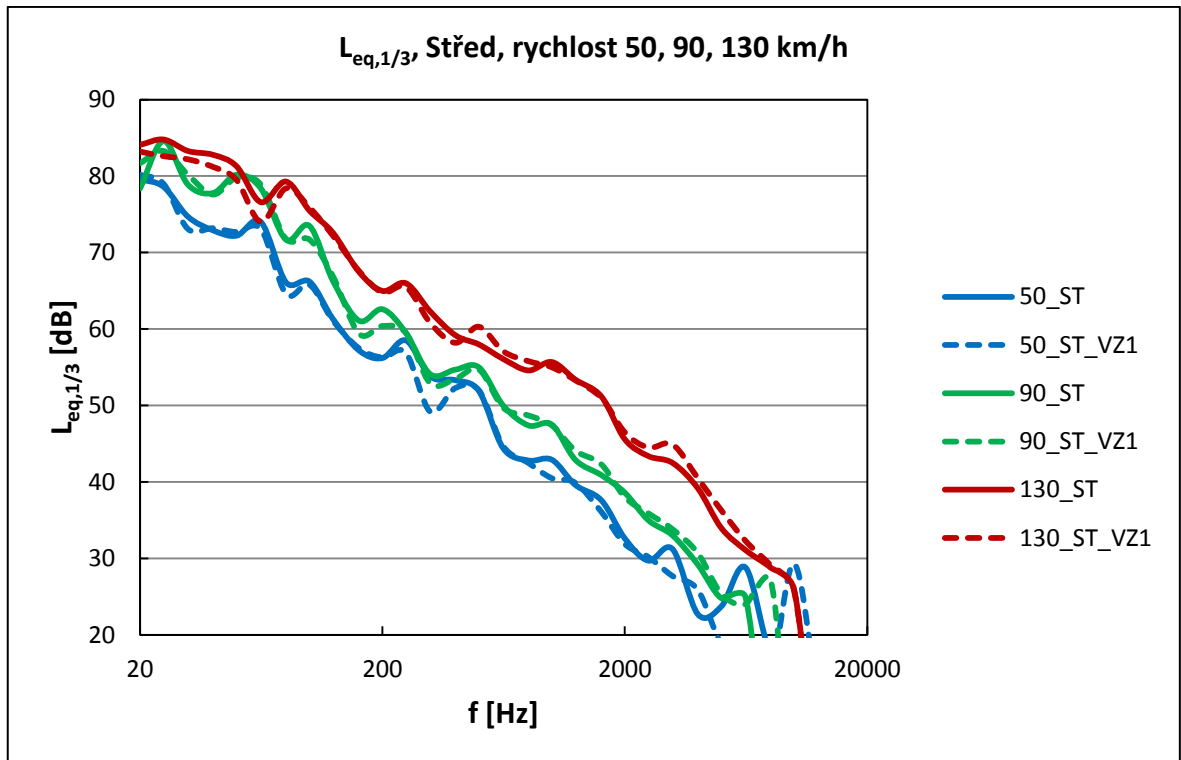


Obr. 116. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce

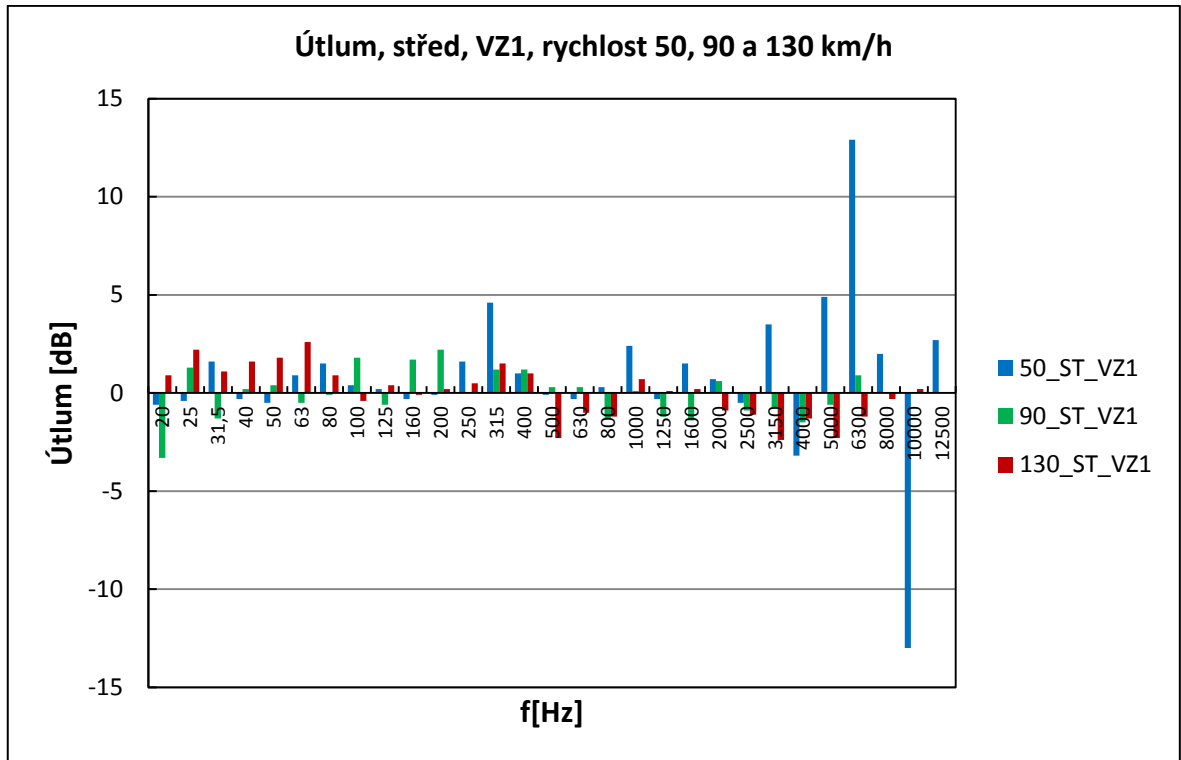
Následující realizovaný graf popisuje rozdíl mezi základním stavem (netlumeným), který byl získán ze základního měření frekvenční analýzy a měřením, které popisuje tlumící vrstvu ve frekvenčním rozsahu do 12 500 Hz a v třetionootkávových pásmech. Čím více vrstvy tlumí v dané frekvenčním třetionoktávové oblasti, tím vyšší pík je nad osou 0 (osy Y) a obráceně.



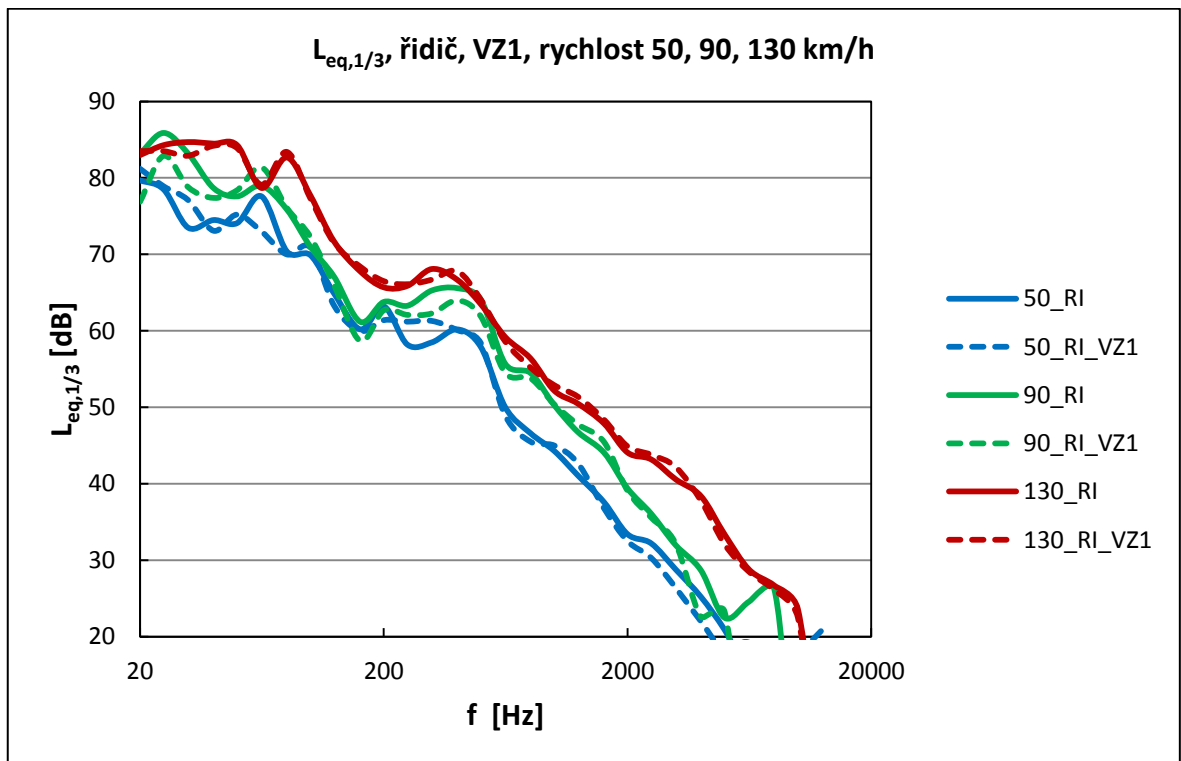
Obr. 117. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřící zařízení na místě spolujezdce



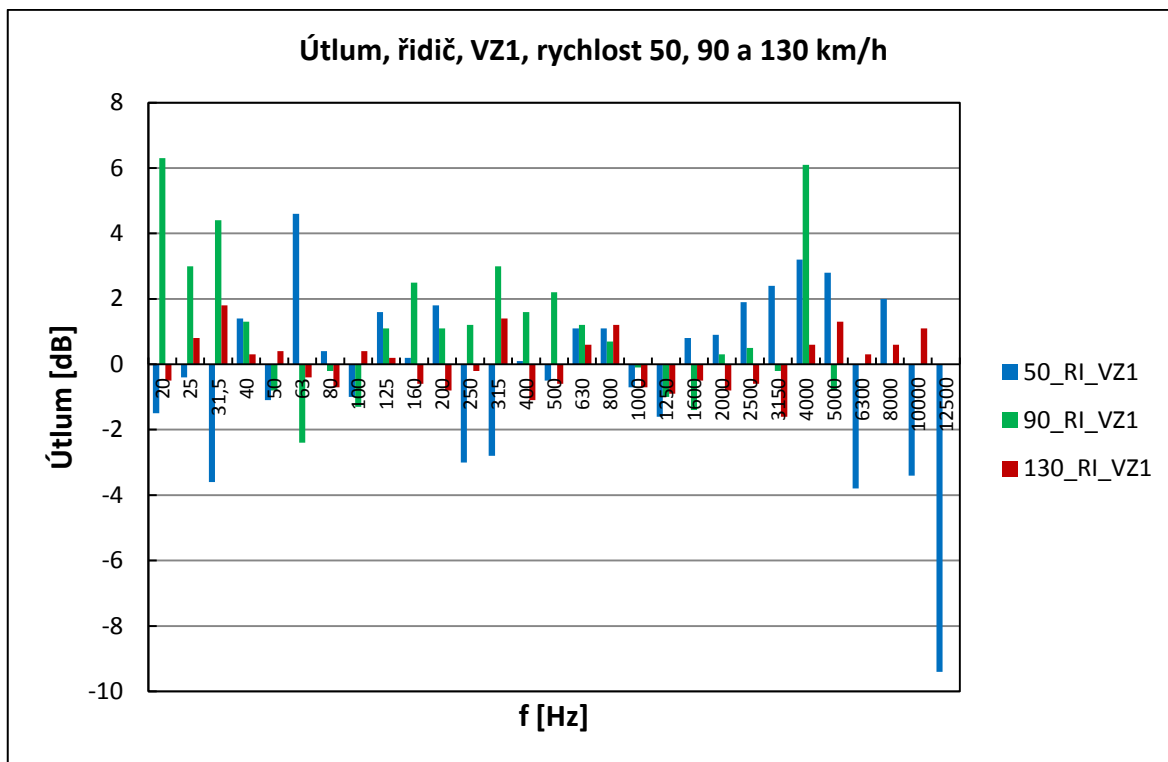
Obr. 118. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřící zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 119. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



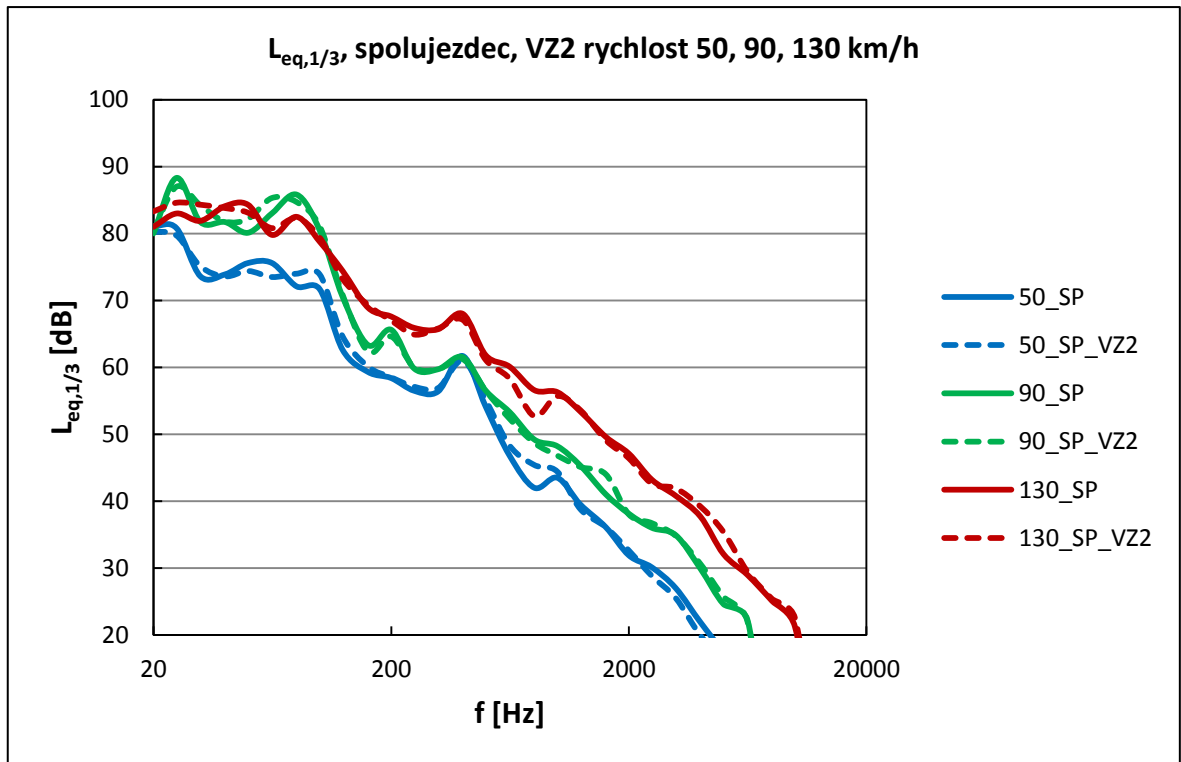
Obr. 120. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče



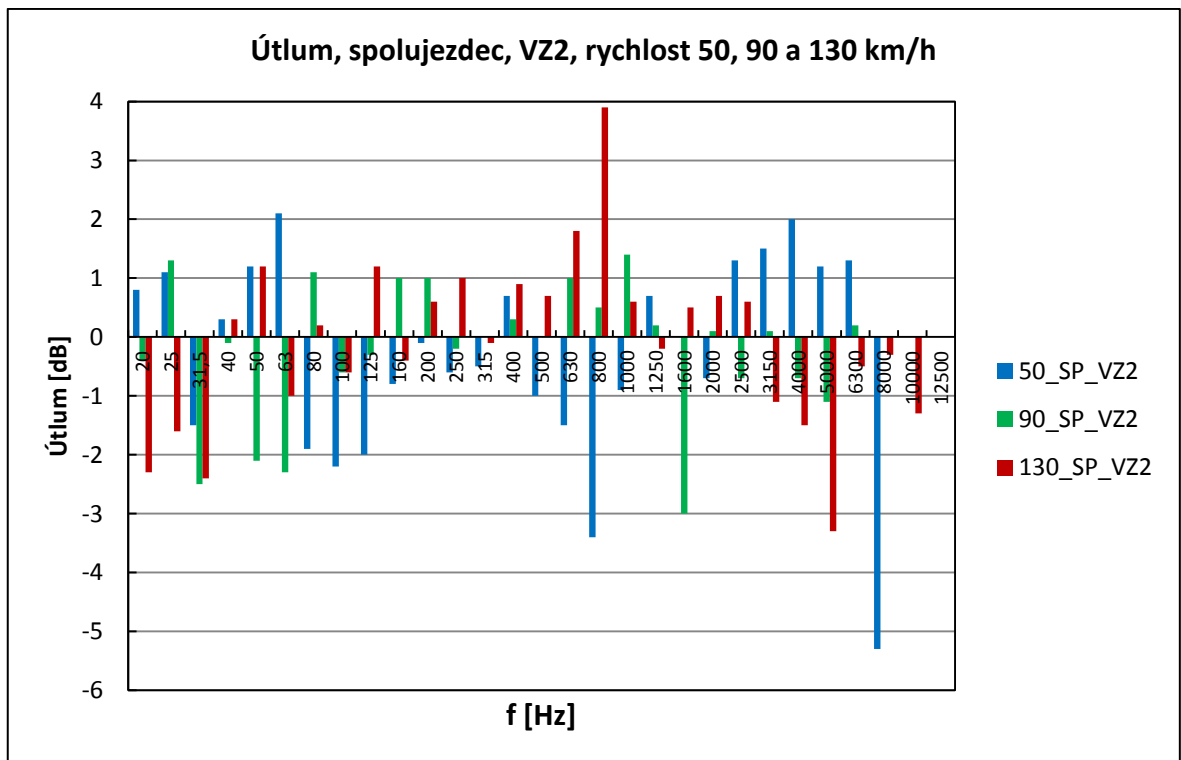
Obr. 121. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřící zařízení na místě řidiče

V rámci měření na letních pneumatikách je nutné konstatovat fakt, že měřené letní pneumatiky byly použity v teplotním režimu, pro který byly určeny. Toto je velmi zásadní pro eliminaci hluku vznikajícího při rychlostním valivém pohybu pneumatiky po vozovce. Téměř všechny grafy v kapitole 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3 a 6.5.4, které vykazují útlumové charakteristiky, mají jedno společné a to je zjištění, že hodnoty akustického útlumu jsou převážně v plusových (pozitivních) hodnotách. Takovéto zjištění je dáno zejména minimálním ovlivněním okolních vlivů na použitou tlumící vrstvu. Přesto jsou jisté oblasti, které jsou popisovány minusovými hodnotami, což je způsobeno rezonancí nebo náhodnými vlivy při měření, které nebylo možné ovlivnit.

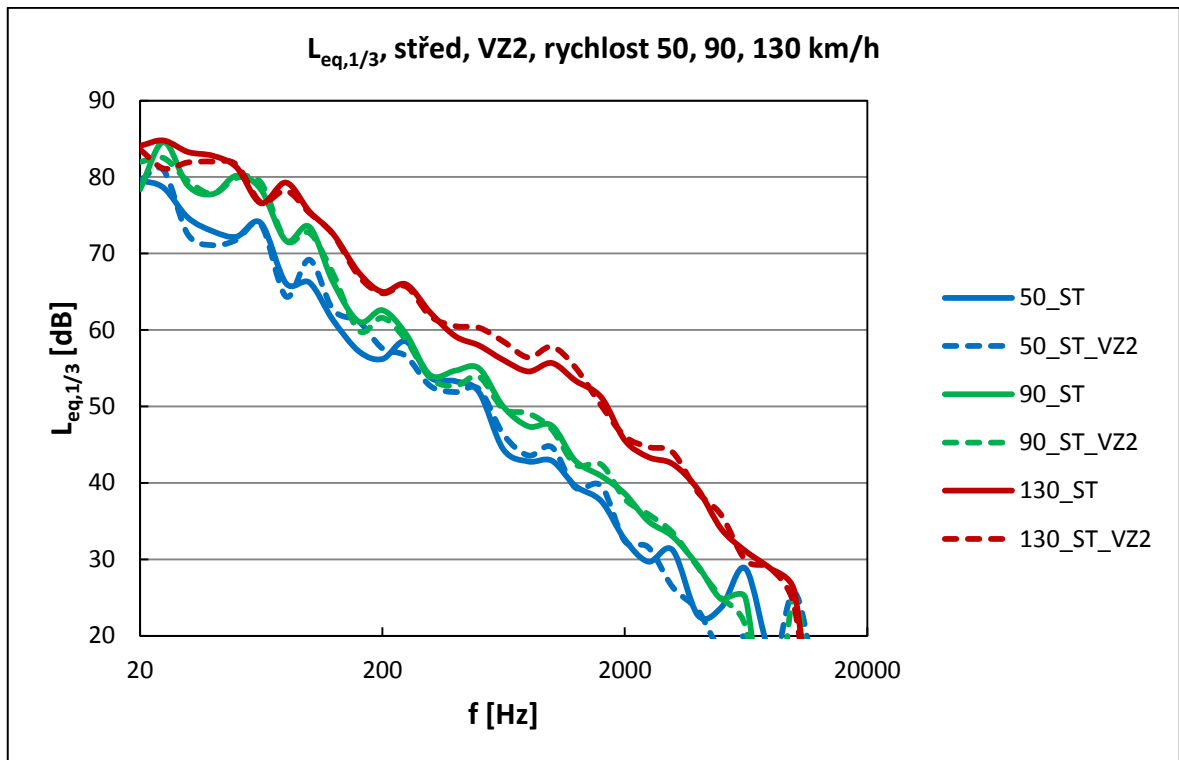
6.5.2 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ2



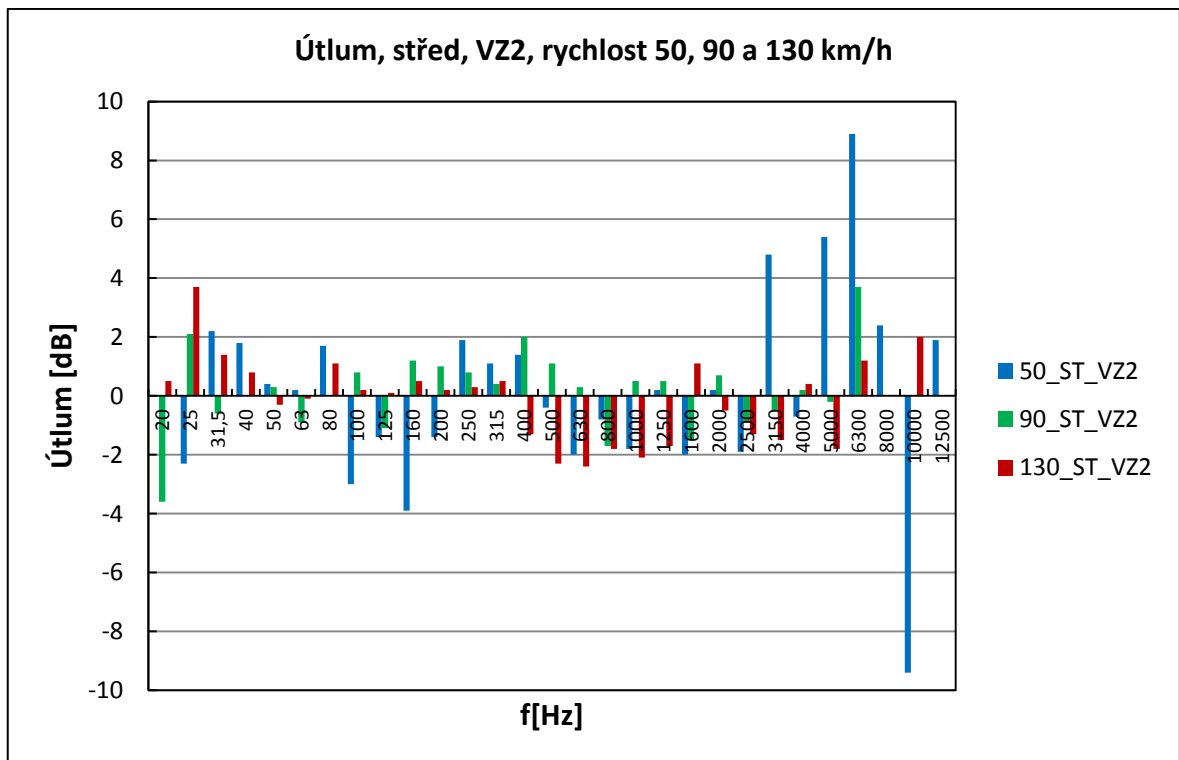
Obr. 122. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce



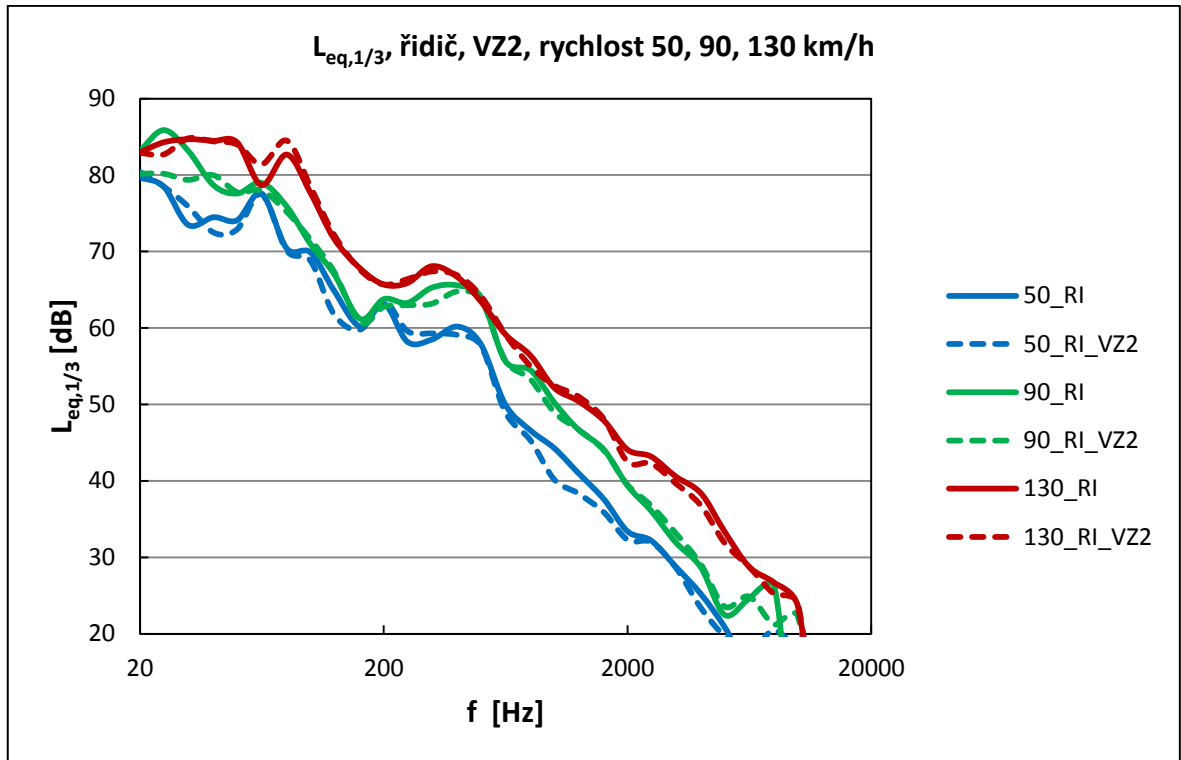
Obr. 123. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce



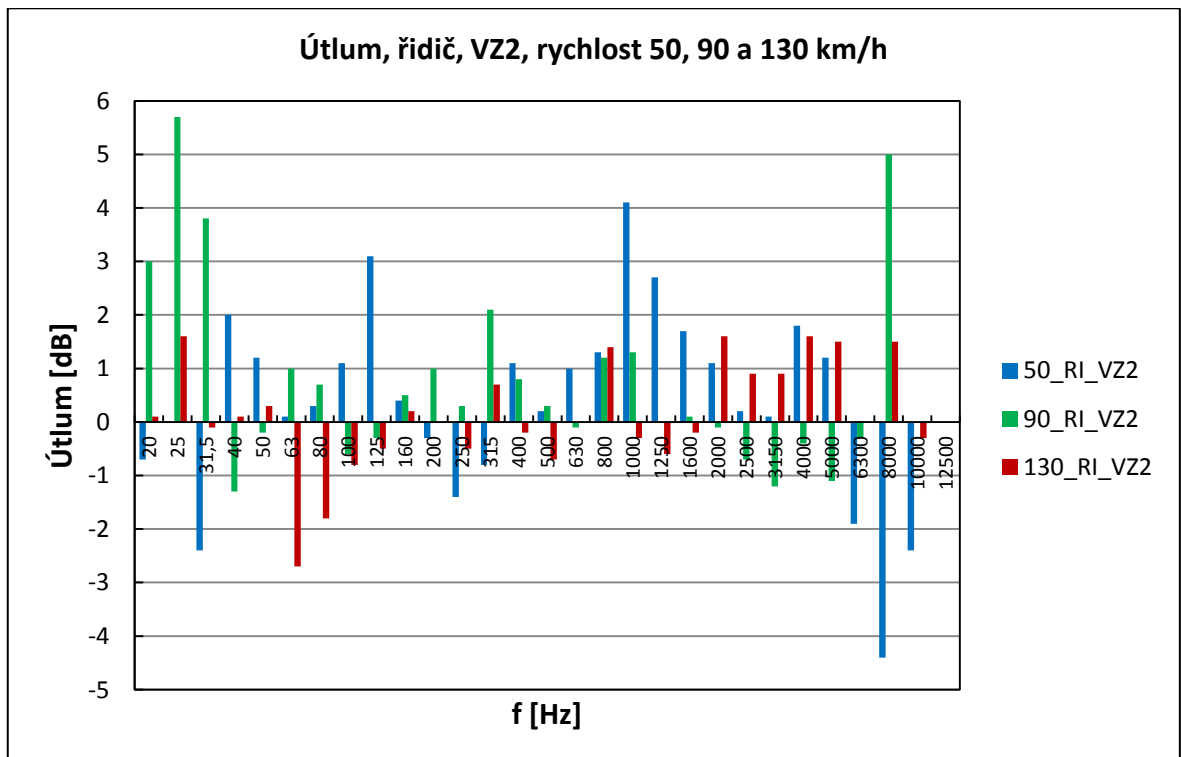
Obr. 124. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 125. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem

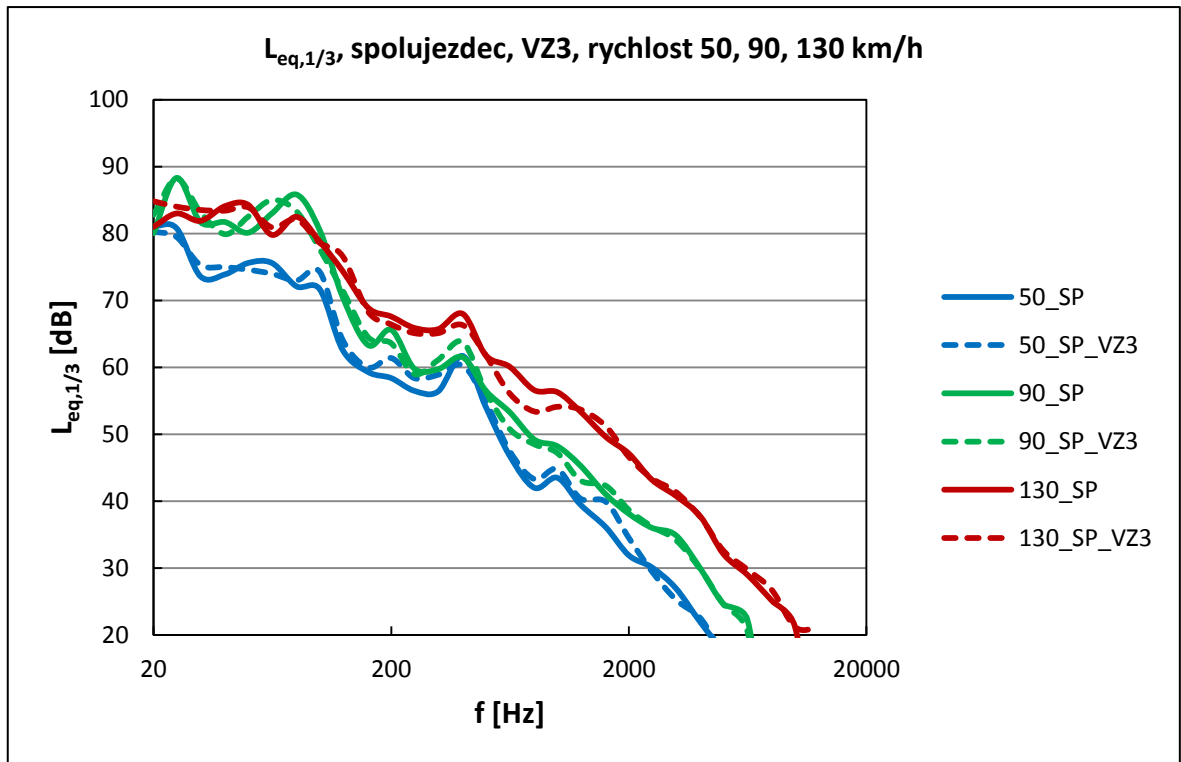


Obr. 126. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče

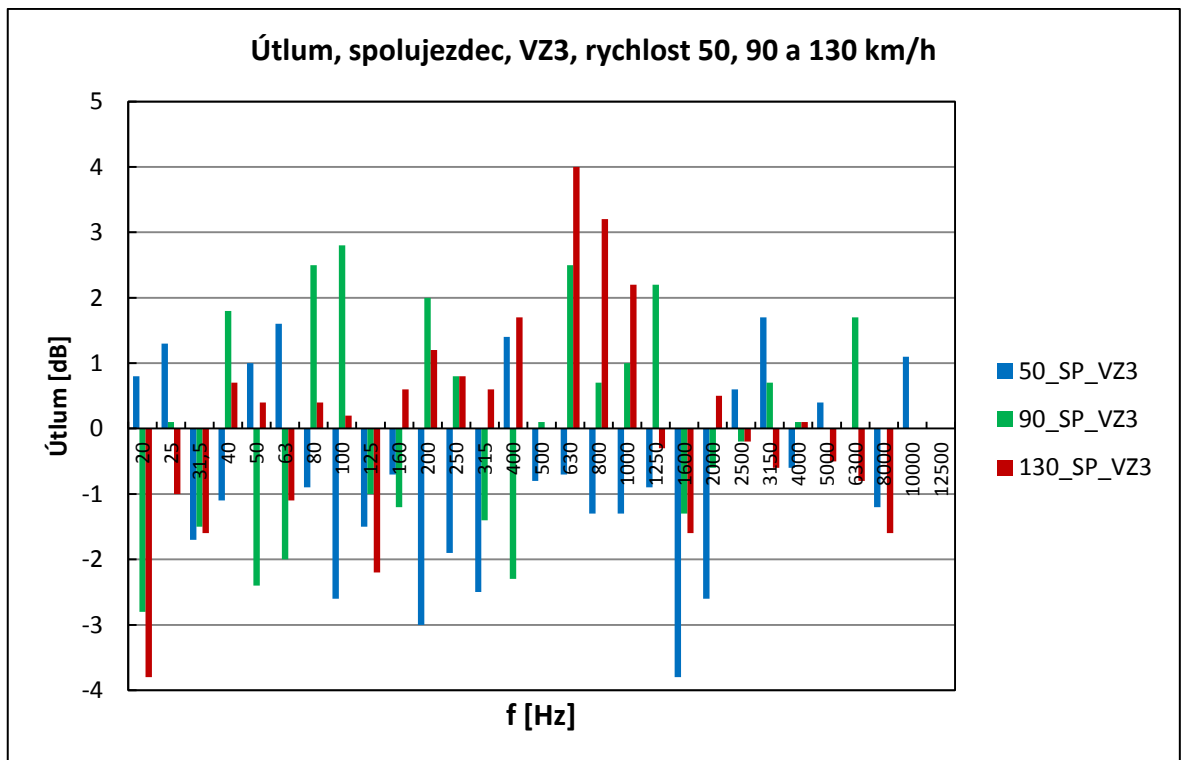


Obr. 127. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče

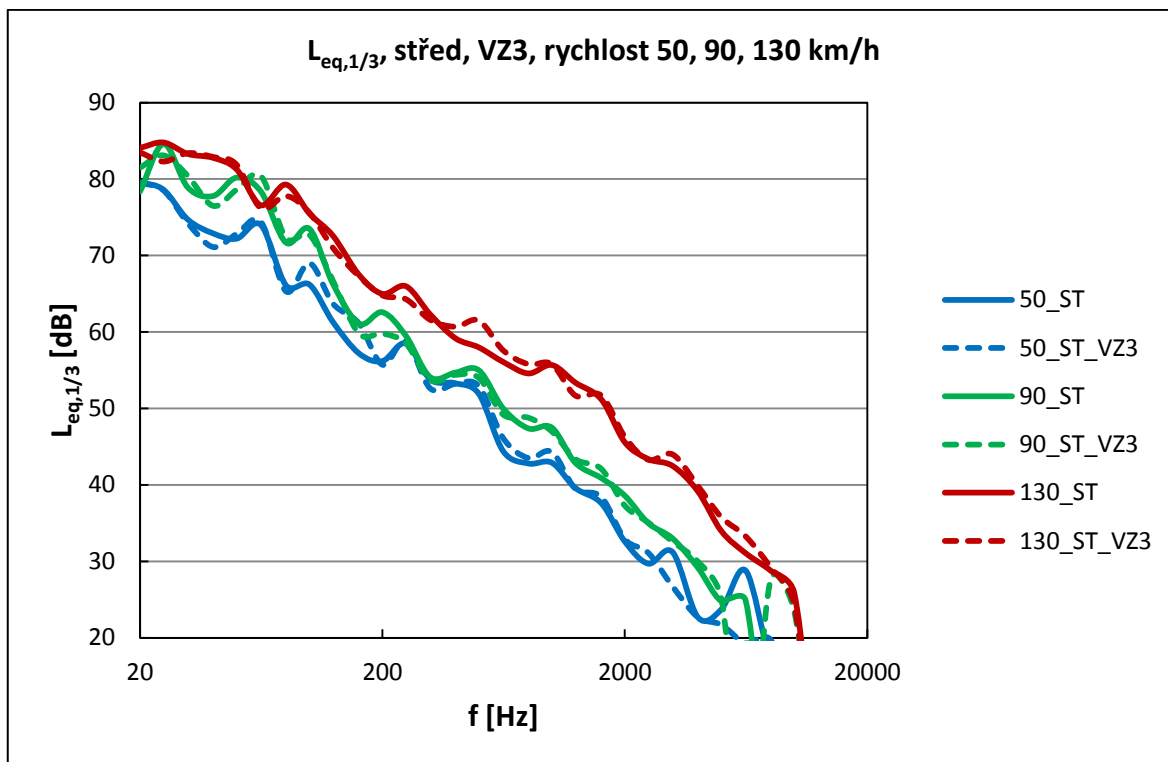
6.5.3 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ3



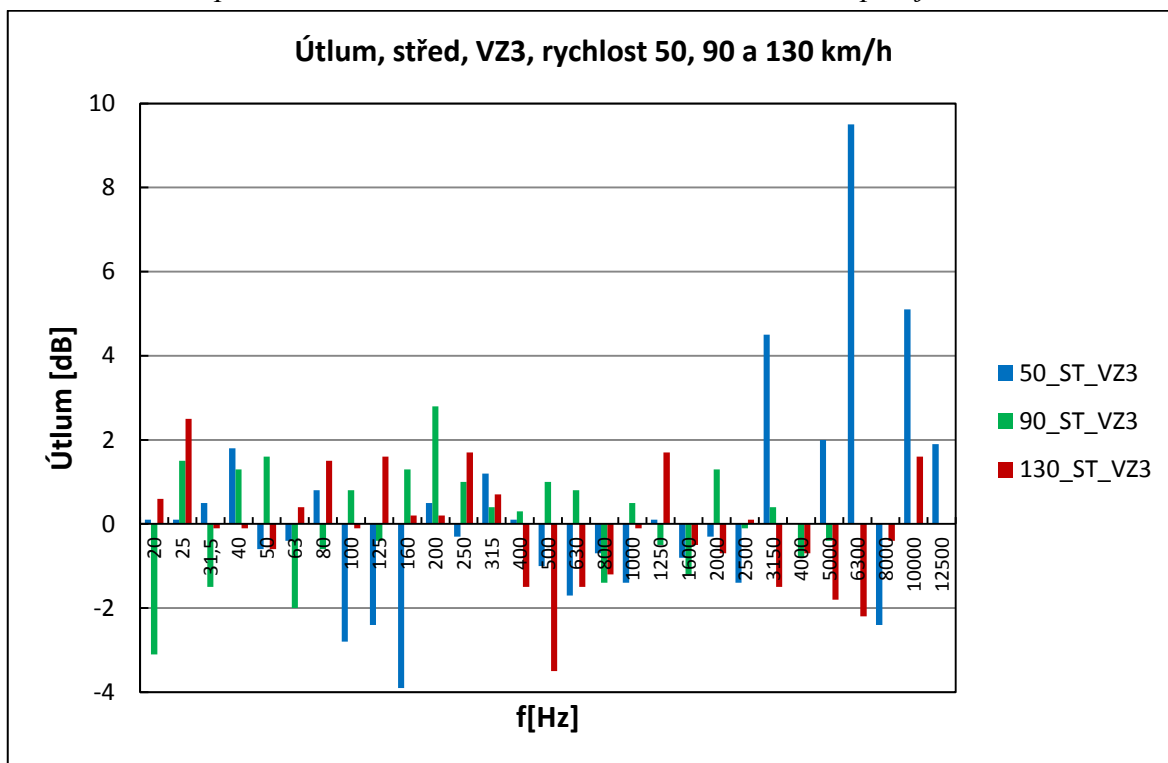
Obr. 128. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřící zařízení na místě spolujezdce



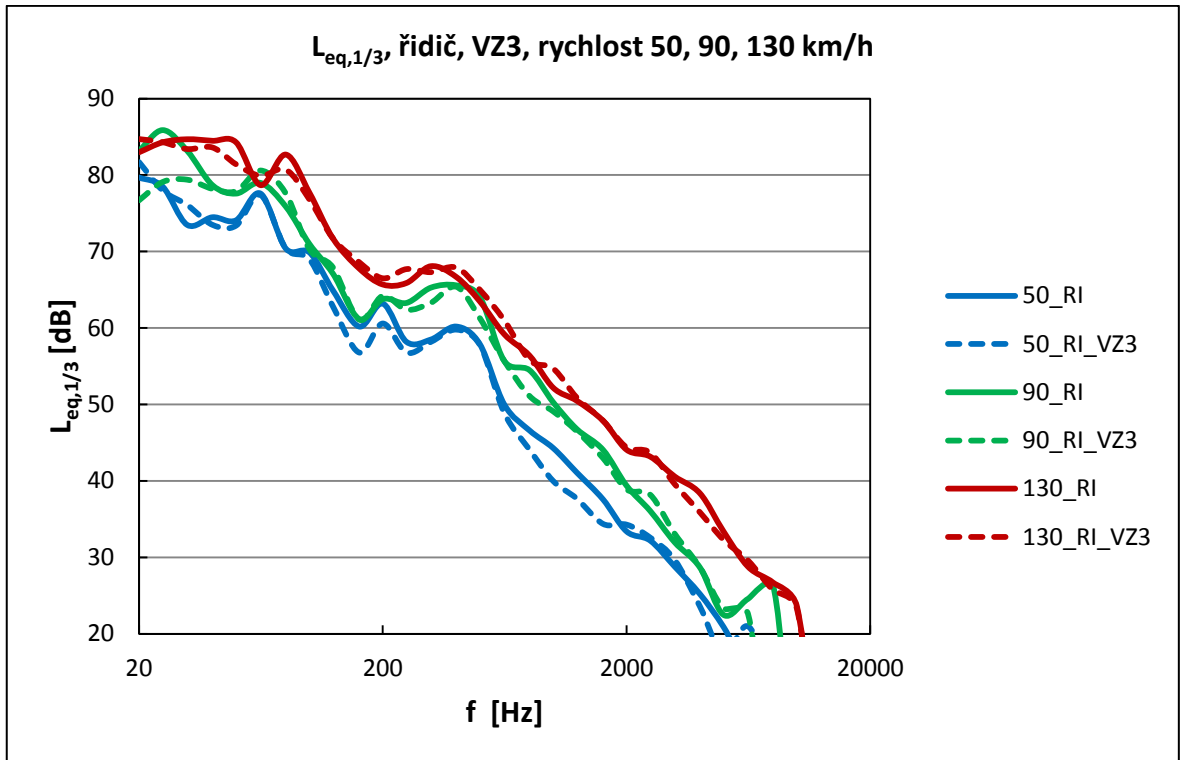
Obr. 129. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřící zařízení na místě spolujezdce



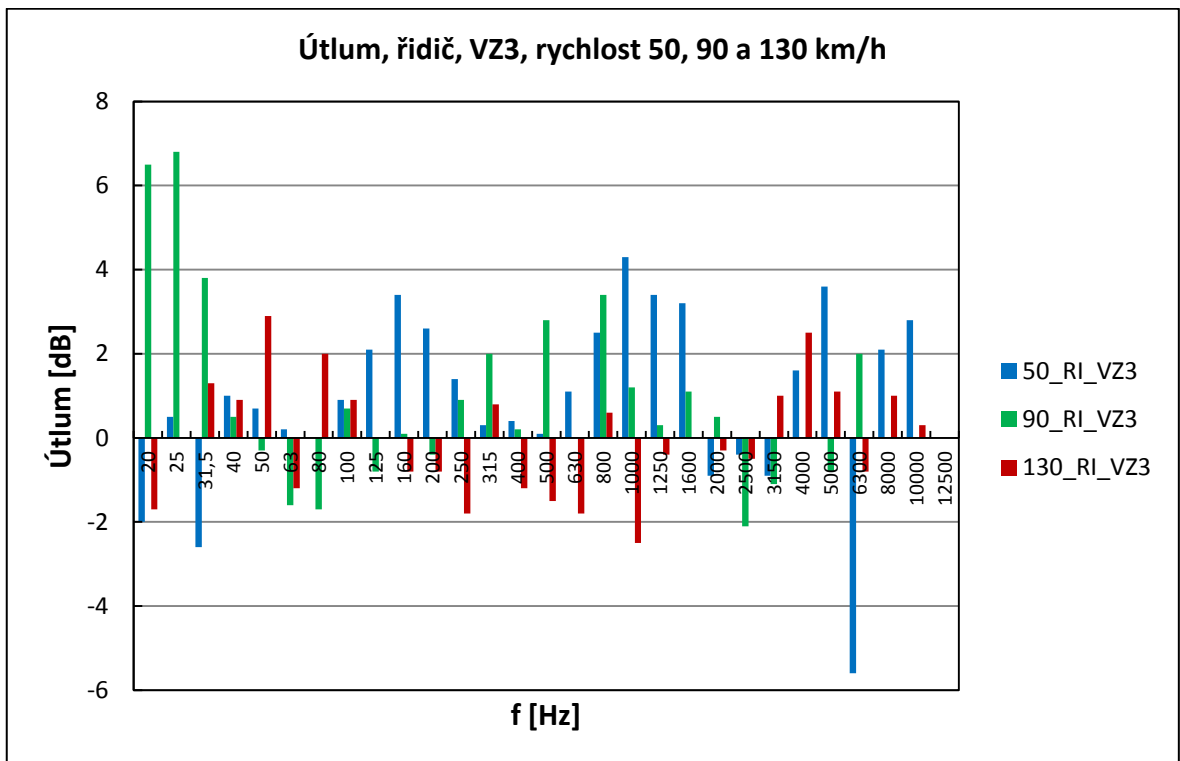
Obr. 130. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 131. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem

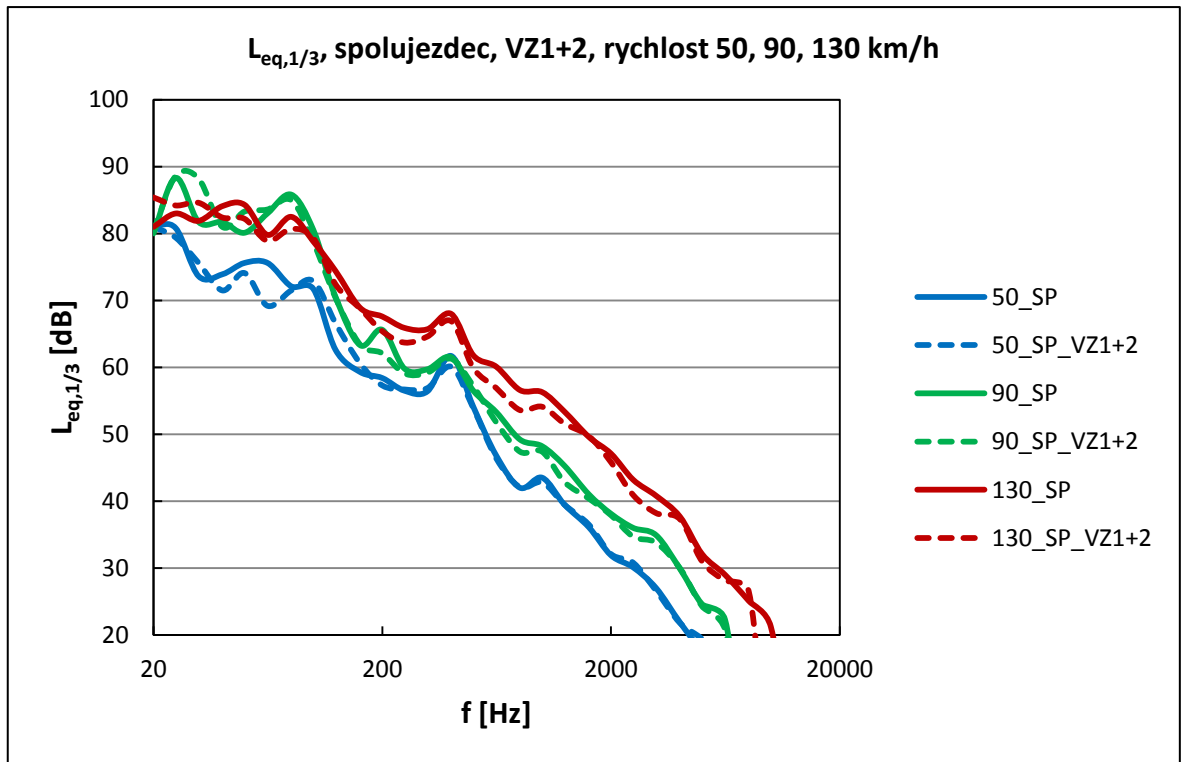


Obr. 132. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče

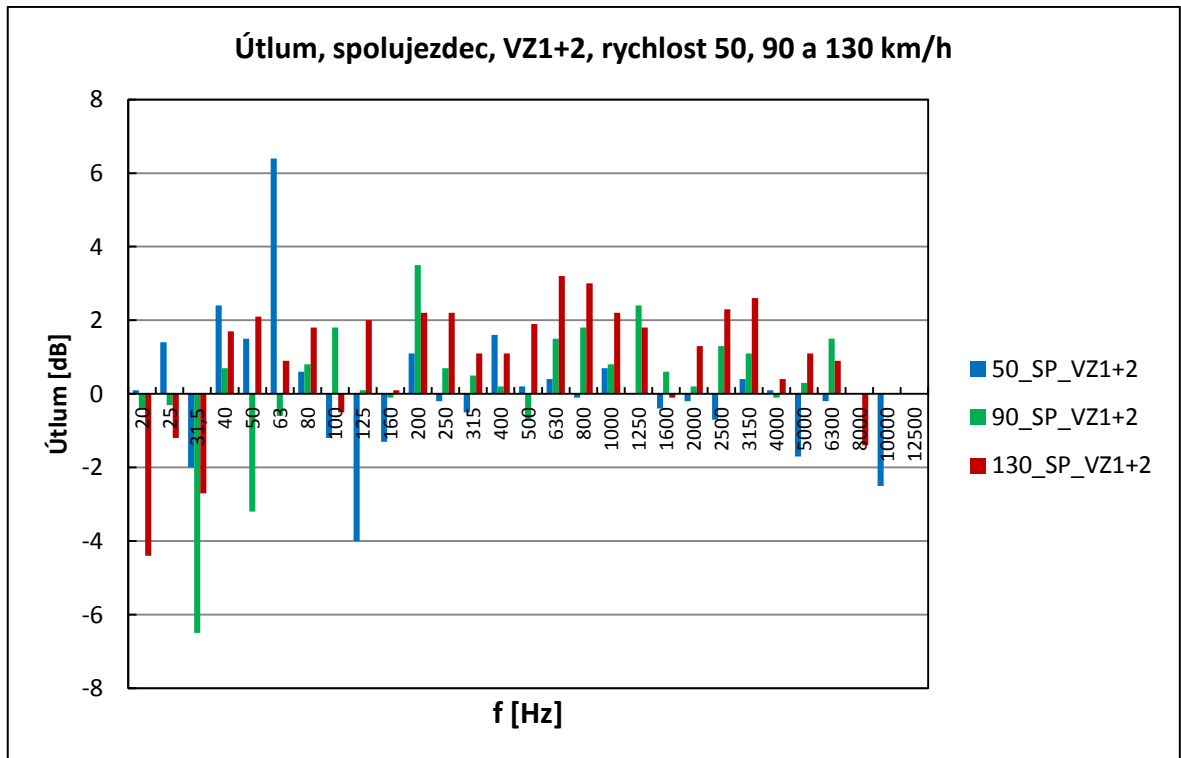


Obr. 133. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče

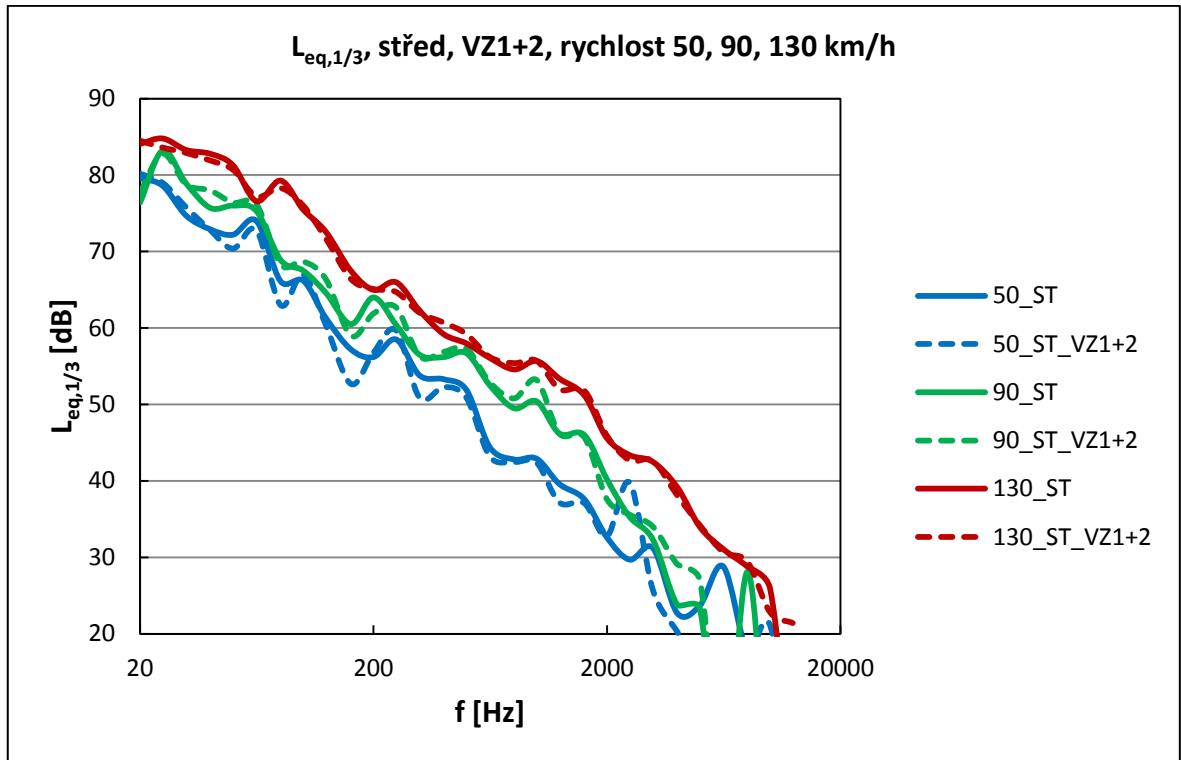
6.5.4 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, VZ1+2



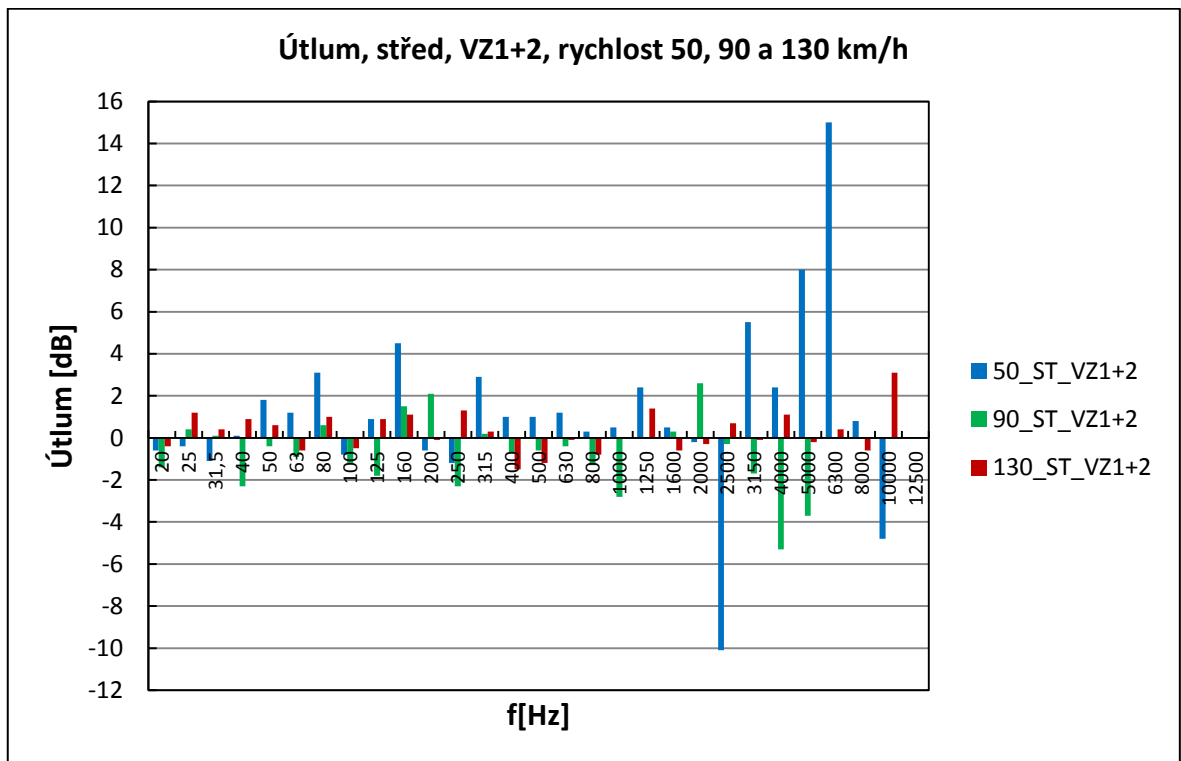
Obr. 134. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě spolujezdce



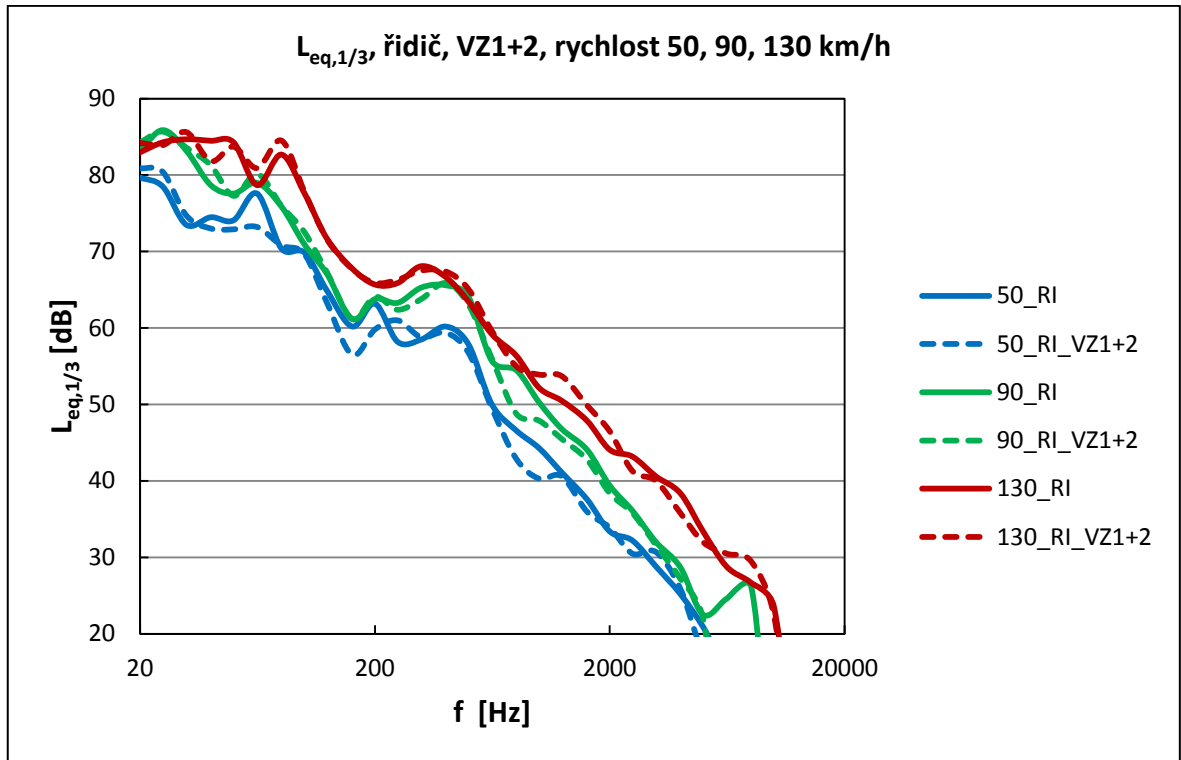
Obr. 135. Útlum při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě spolujezdce



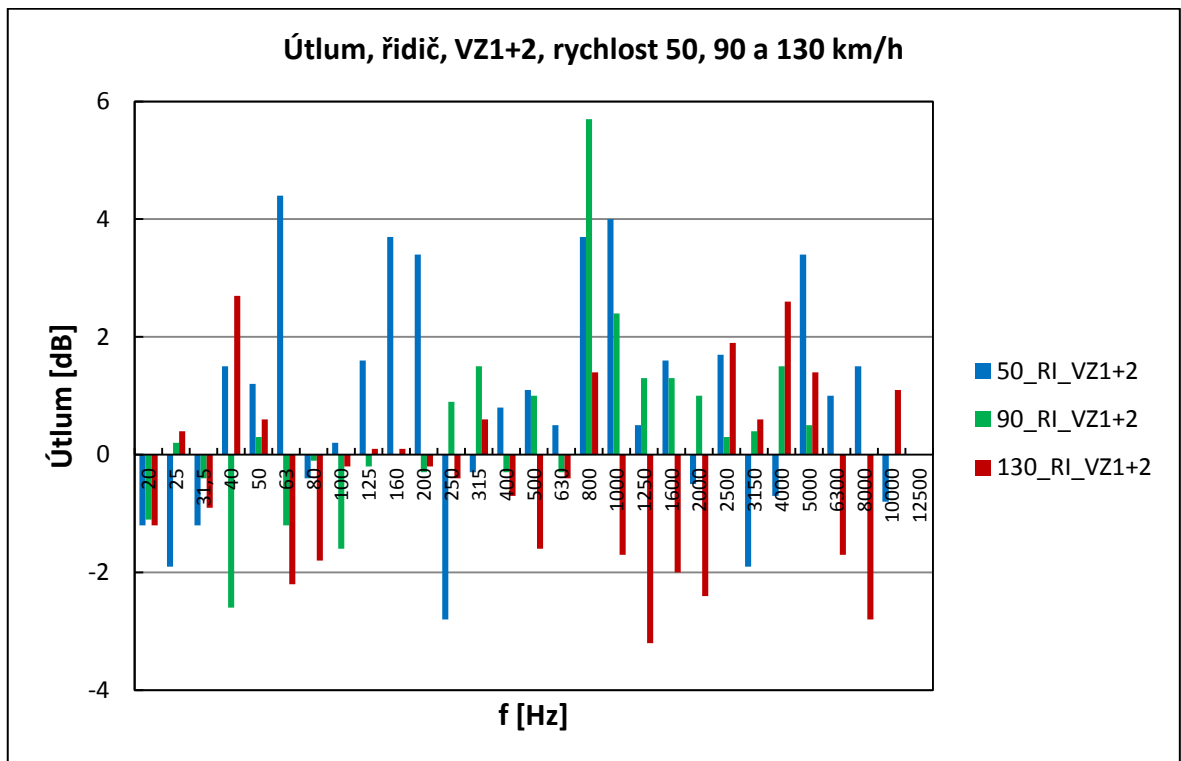
Obr. 136. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1+2, měřící zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 137. Útlum při různých rychlostech pro VZ1+2, měřící zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem

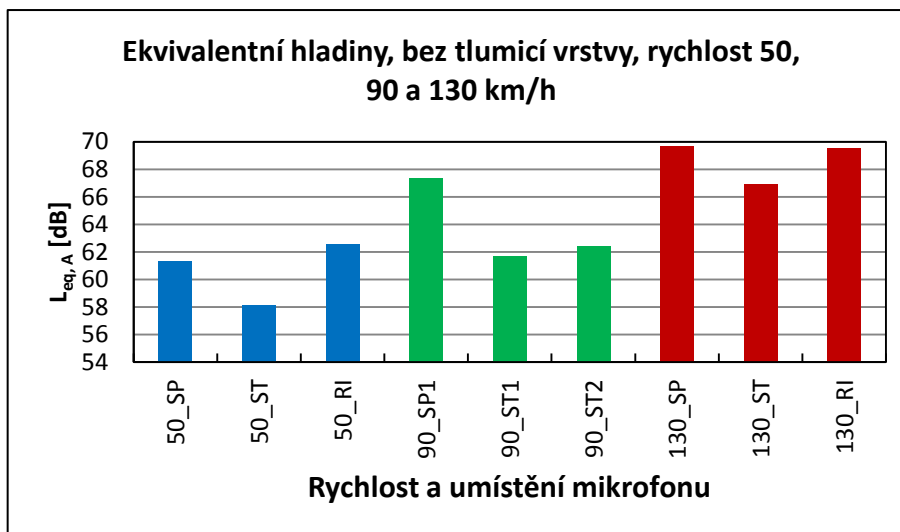


Obr. 138. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě řidiče

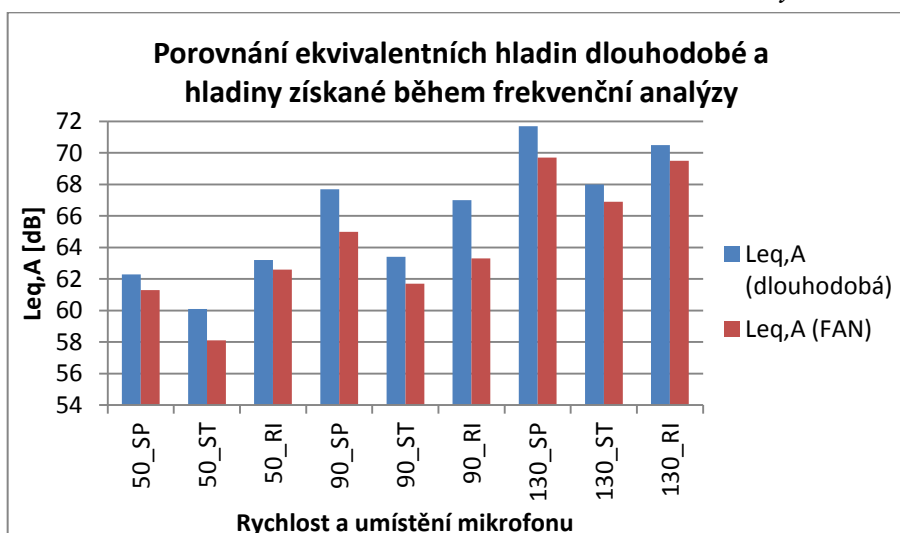


Obr. 139. Útlum při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě řidiče

6.5.5 Ekvivalentní hladina akustického tlaku

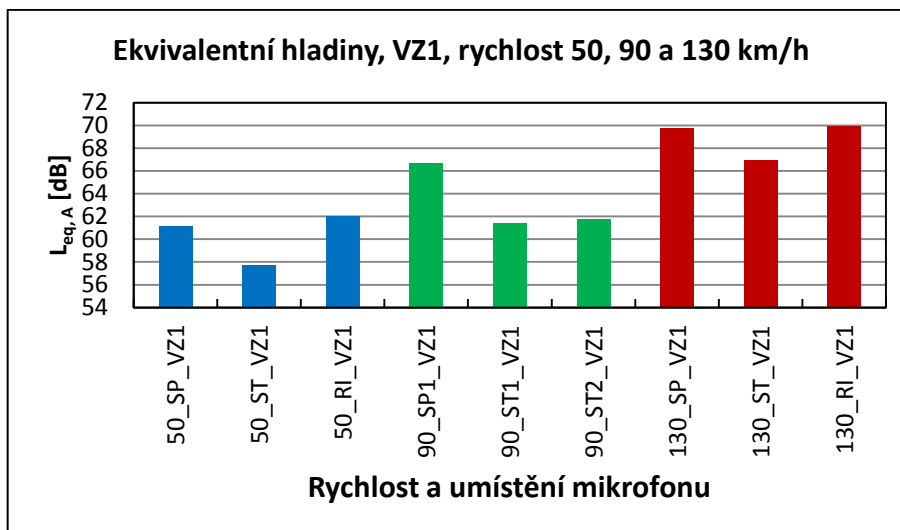


Obr. 140. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení bez tlumicí vrstvy

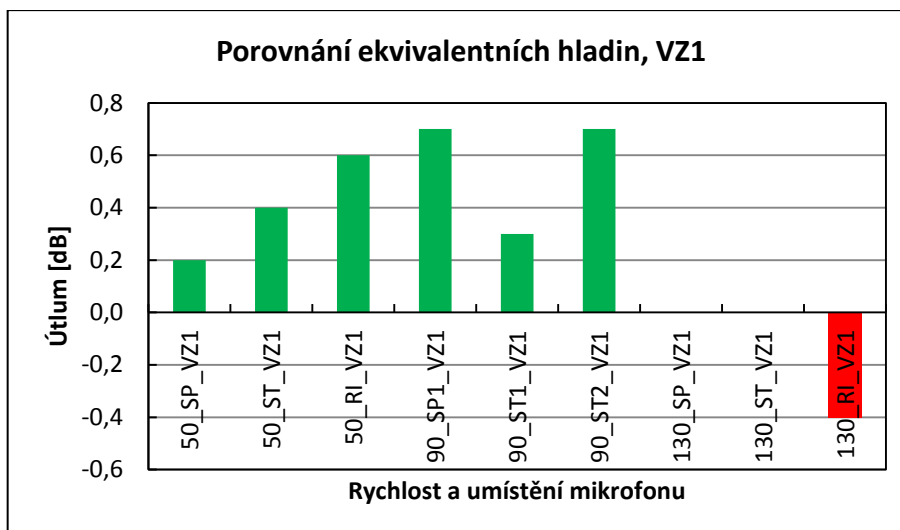


Obr. 141. Porovnání ekvivalentních hladin získaných z dlouhodobého měření a z měření frekvenčních analýz na letních pneumatikách

Průběhy měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku jsou pro letní pneumatiky podobné jako v případě zimních pneu. I tady se potvrzuje, že dlouhodobější měření na stejném úseku vykazuje vyšší hladiny než v rámci měření frekvenční analýzy FAN. Mezi jednotlivými rychlostmi lze pozorovat očekávaný nárůst směrem k vyšším rychlostem, ale také drobné mezirozdíly mezi jednotlivými umístěními mikrofónu.

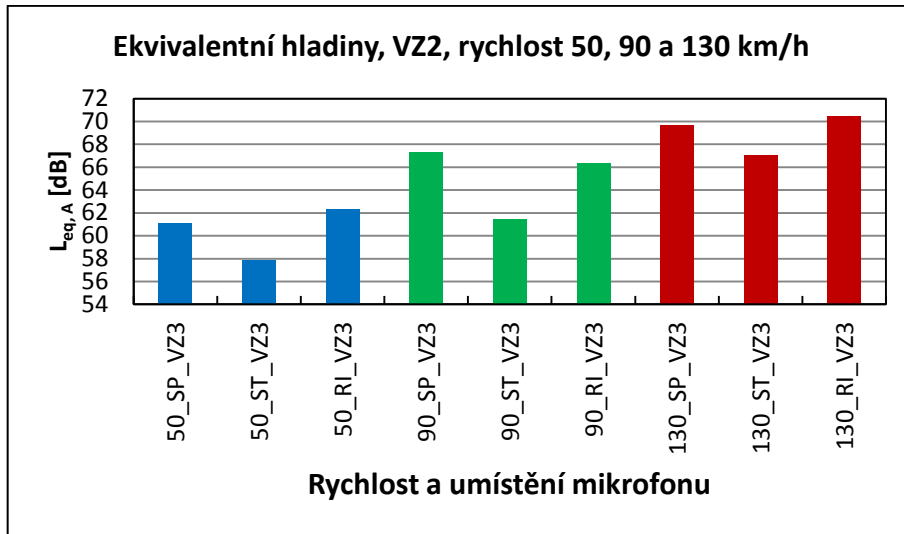


Obr. 142. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1

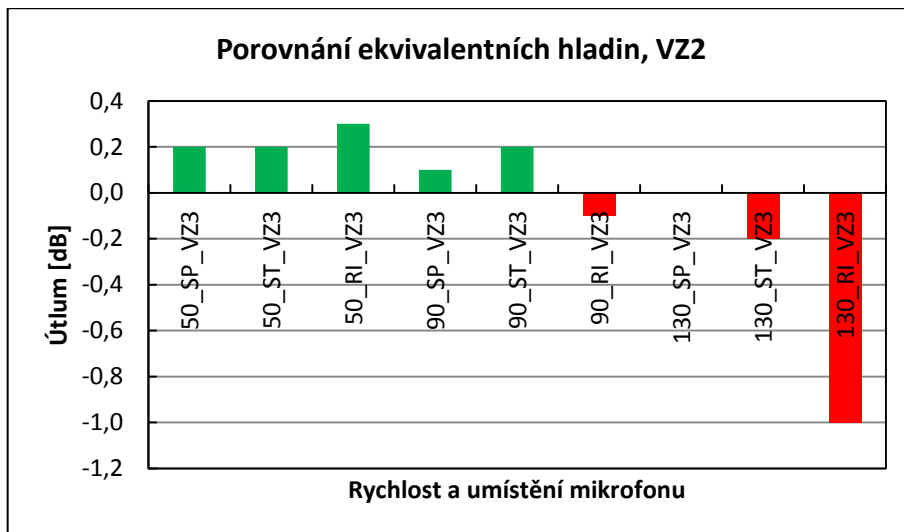


Obr. 143. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1

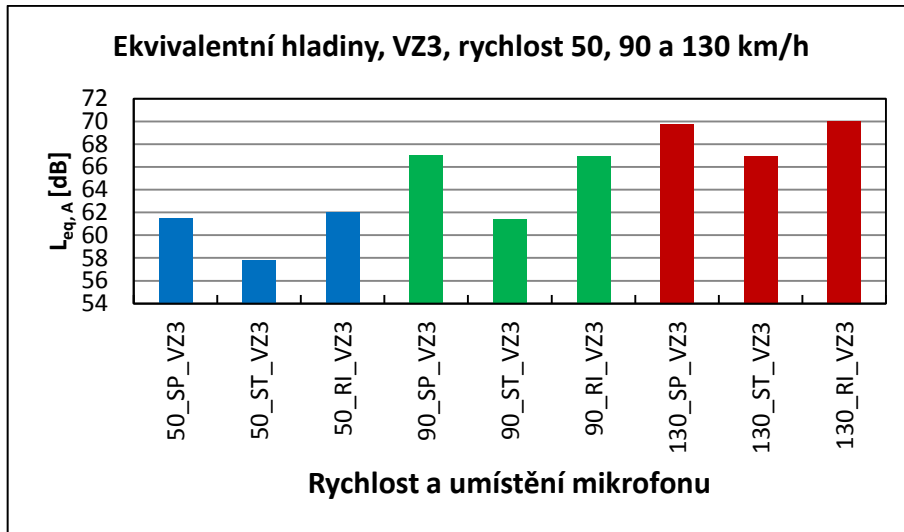
Praktické měření rozdílů mezi základním režimem konstrukce vozidla a přidáním tlumicí vrstvy je zřejmý z výše a níže uvedených grafů této kapitoly. Pro letní pneumatiky jsou tlumicí vrstvy již efektivní z pohledu útlumu. Přestože jsou dosaženy poměrně malé přírůstky hladiny akustického tlaku pro jednotlivé vzorky, útlum jako taký je sledovatelný. Jak již bylo několikrát zmíněno, tak velký podíl na konečné hodnotě má aerodynamická složka.



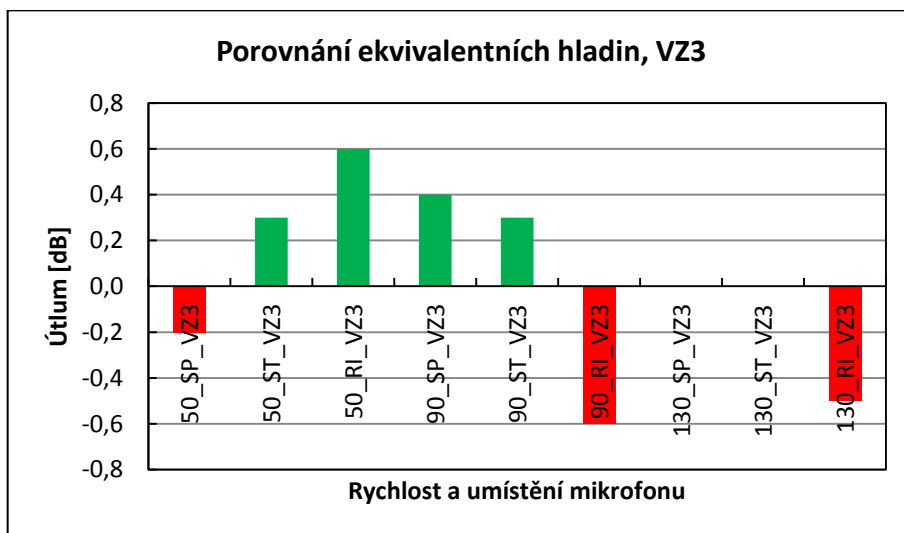
Obr. 144. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2



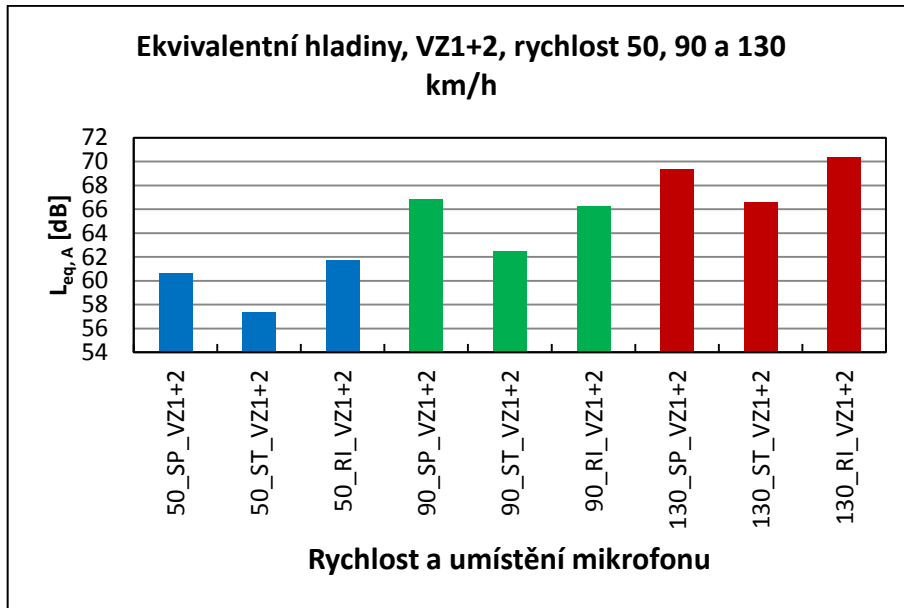
Obr. 145. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2



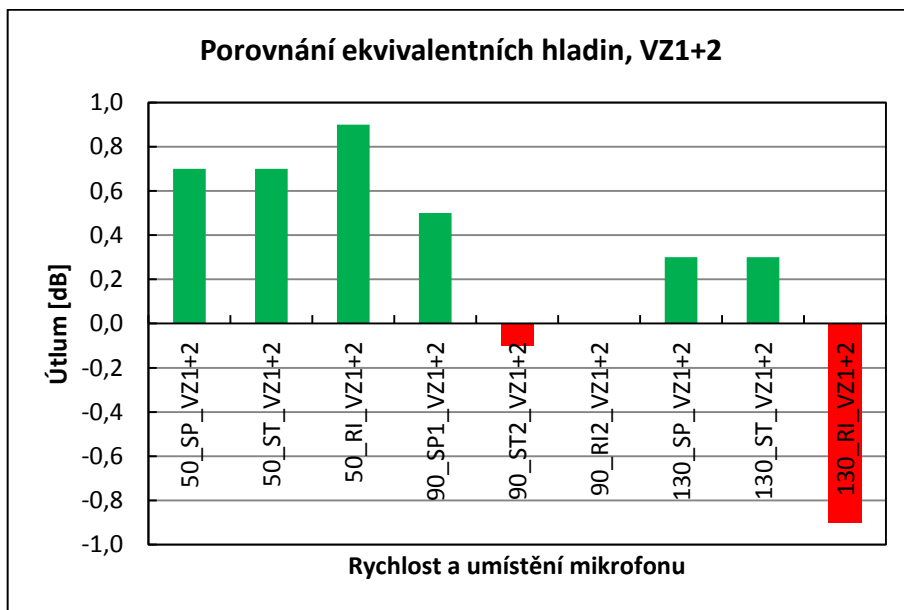
Obr. 146. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3



Obr. 147. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3



Obr. 148. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1+2



Obr. 149. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3

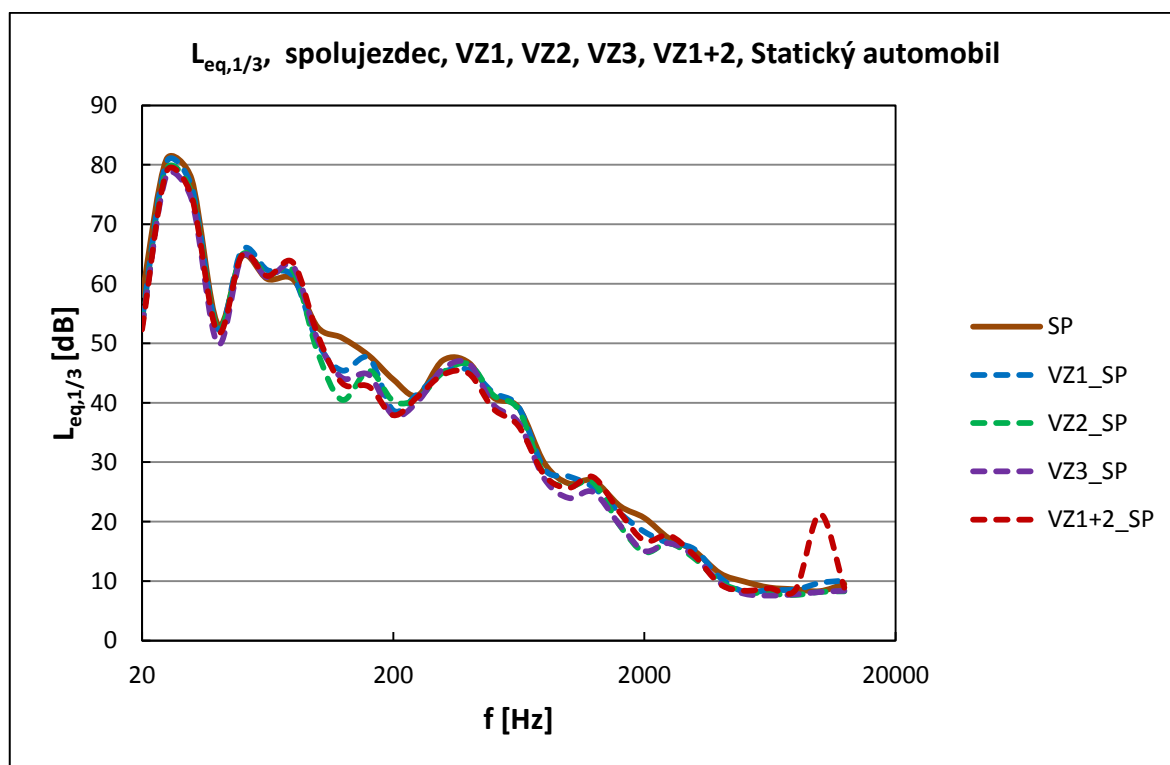
6.6 Výsledky měření na statickém automobilu

Pro zanedbání vlivu hluku pneumatik a aerodynamického hluku během jízdy bylo provedeno měření ve statickém automobilu.

Datum	Čas	Tlumičí vrstva	Teploty	Náraz větru*	Srážky*	Nejvyšší tlak	Nejvyšší vlhkost
22. 5. 2014	20:00 - 21:00	Bez; VZ1, VZ2, VZ3, VZ1+2	20 - 22 °C	46.8 km/h	0 mm	1015.4 hPa	89%

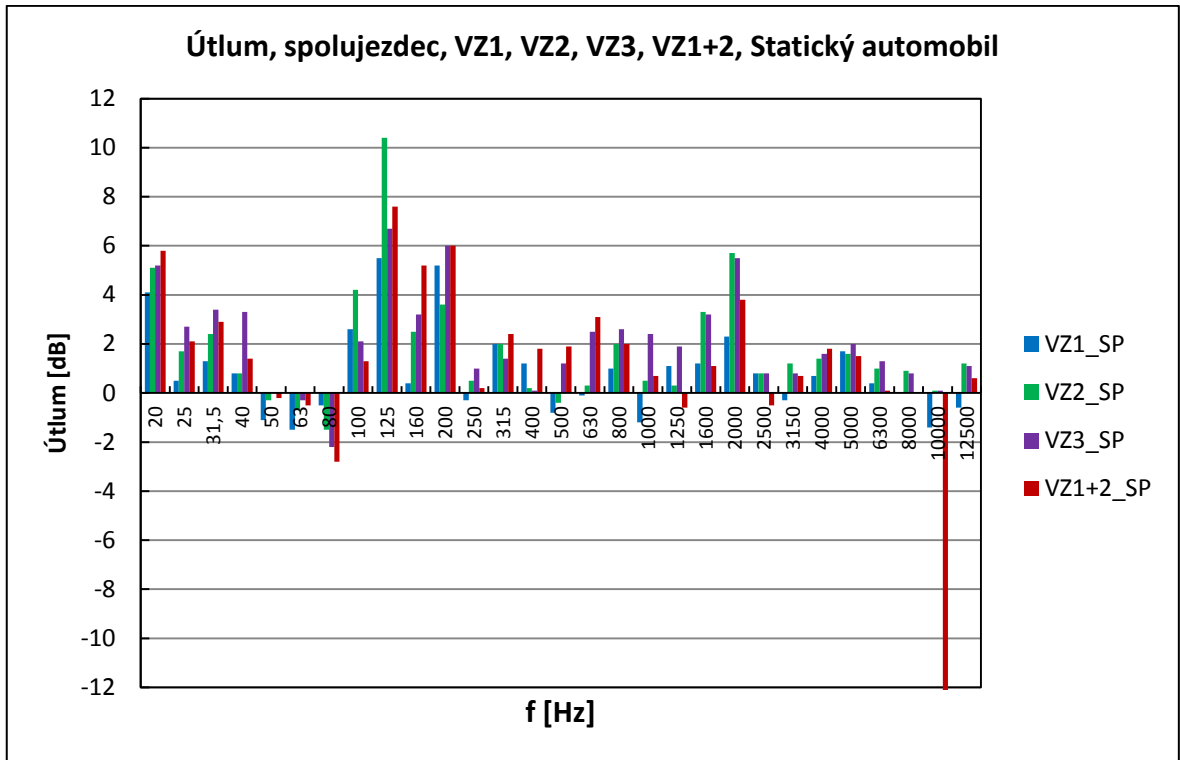
*průměrné hodnoty za celý den – hodnoty získány z meteorologické stanice Zlín

6.6.1 Frekvenční analýza hladiny akustického tlaku, všechny tlumičí vrstvy

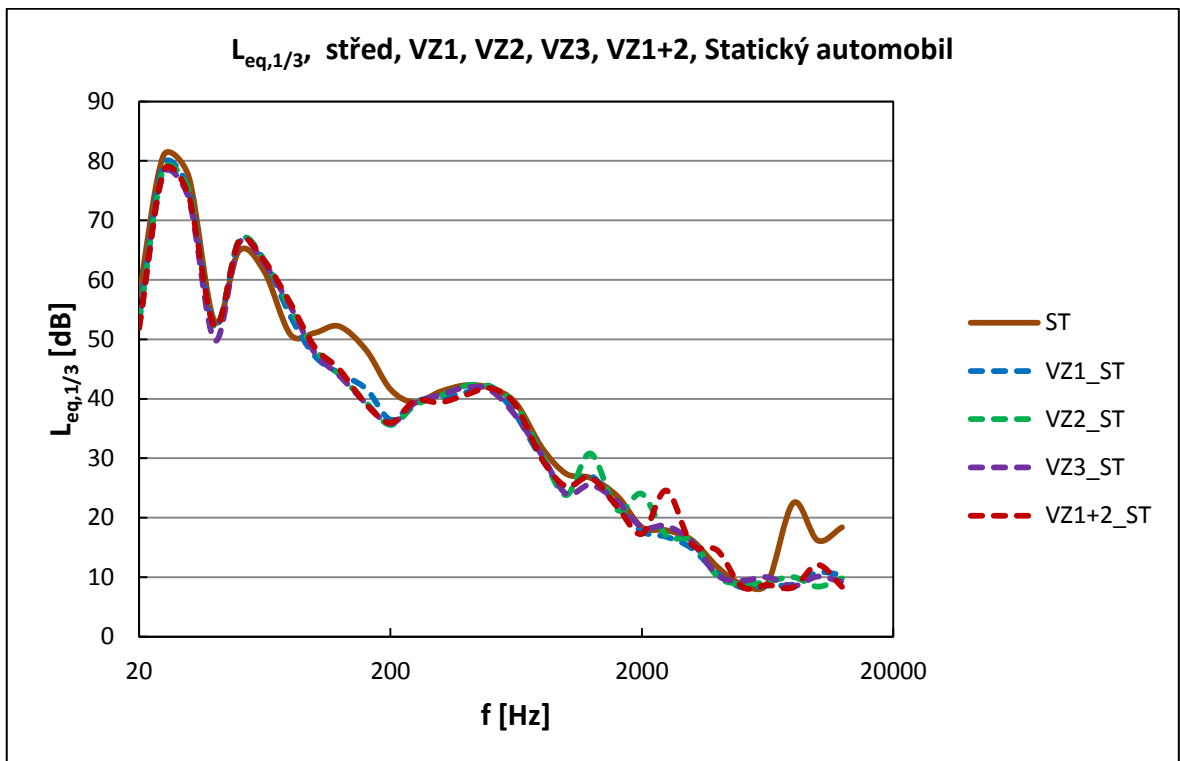


Obr. 150. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku pro všechny tlumičí vrstvy, měřicí zařízení na místě spolujezdce

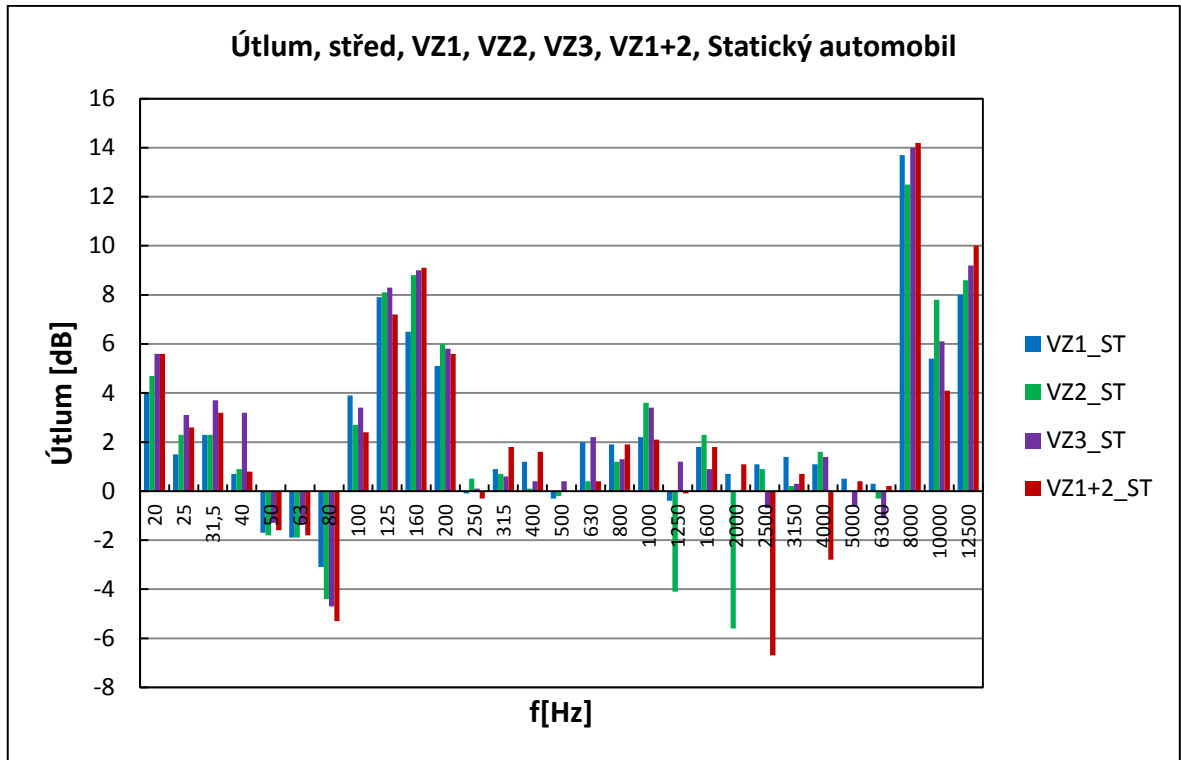
Statické měření režimu motoru bylo zvoleno proto, aby byly zjištěny samostatné frekvenční oblasti, ve kterých motor vykazuje v klidovém režimu maximální hodnoty akustického tlaku. Přestože jsou tyto křivky téměř totožné a to pro různé vzorky, je možno konstatovat, že připravené materiály a jejich umístění ve vybraných místech konstrukce vozidla se chovali v celém frekvenčním spektru prakticky podobně a není pozorována zásadní změna jednoho vzorku vůči jinému.



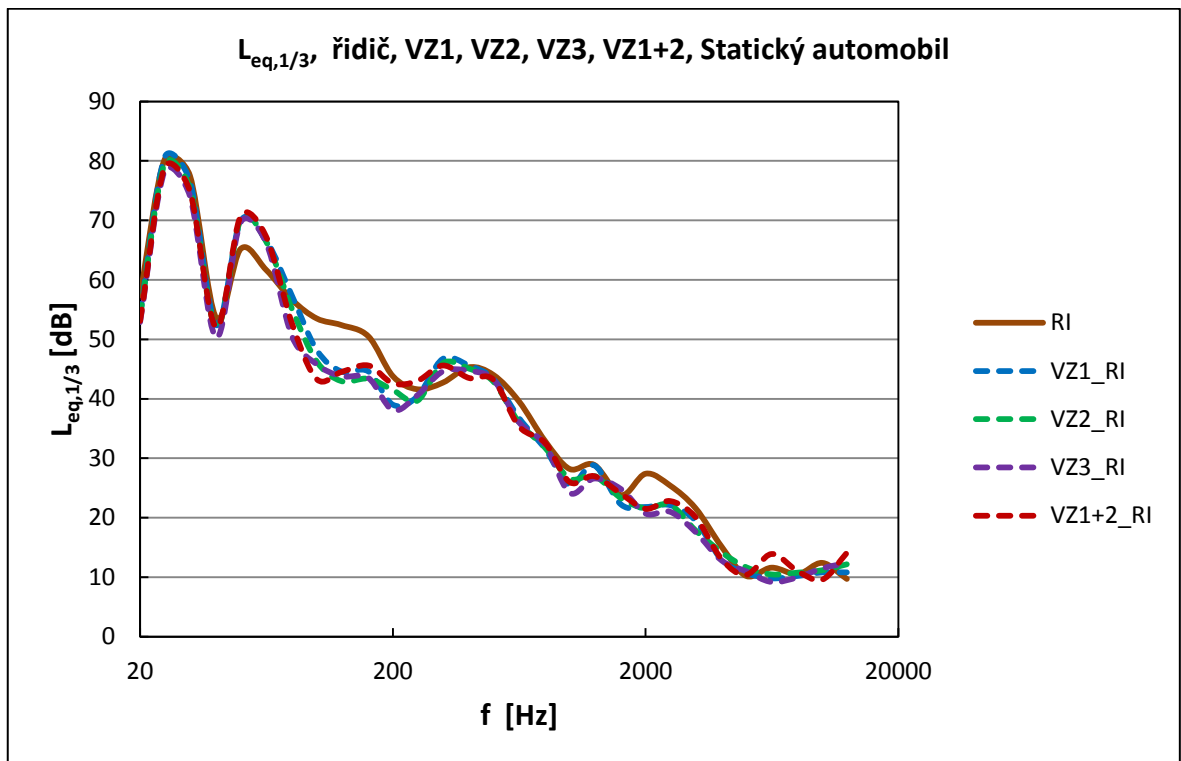
Obr. 151. Útlum všech tlumicích vrstev při stojícím automobilu, měřící zařízení na místě spolujezdce



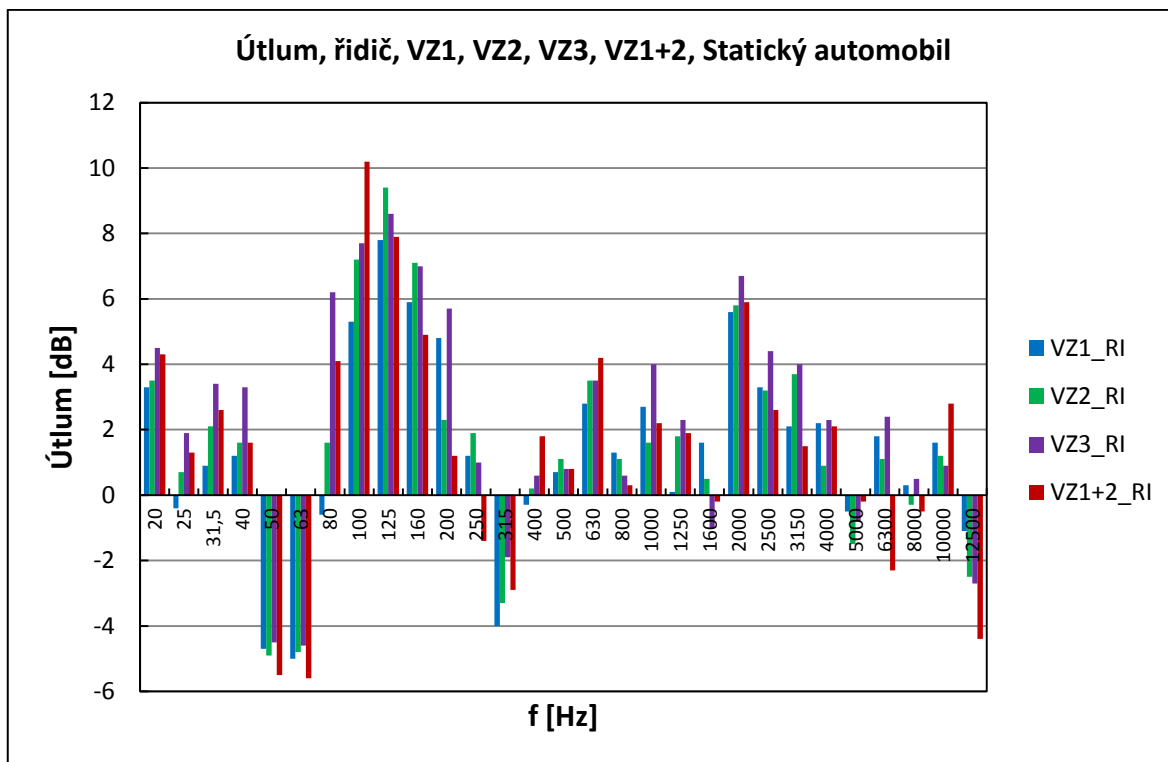
Obr. 152. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku pro všechny tlumicí vrstvy, měřící zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



Obr. 153. Útlum všech tlumicích vrstev při stojícím automobilu, měřící zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem



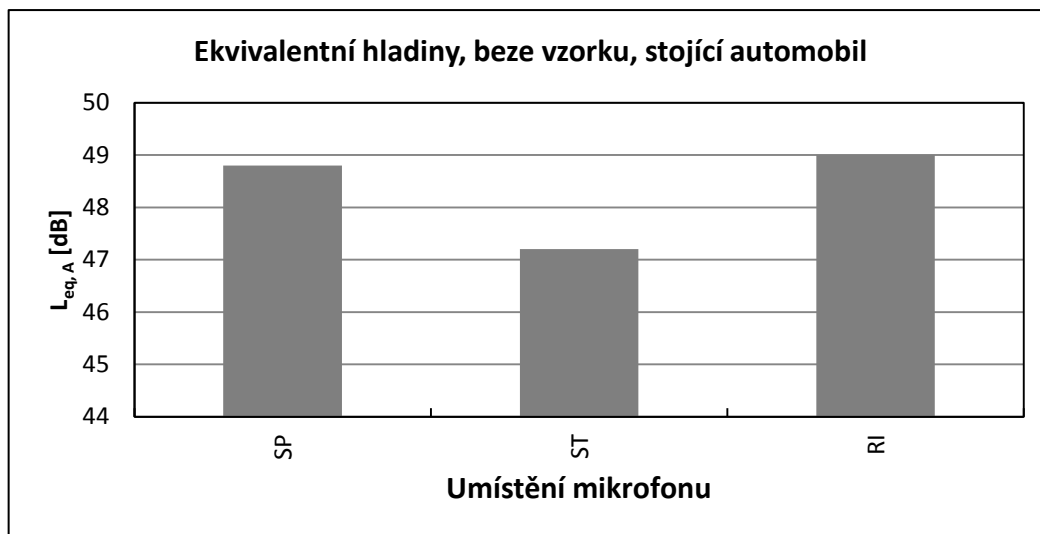
Obr. 154. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku pro všechny tlumicí vrstvy, měřící zařízení na místě řidiče



Obr. 155. Útlum všech tlumicích vrstev při stojícím automobilu, měřící zařízení na místě řidiče

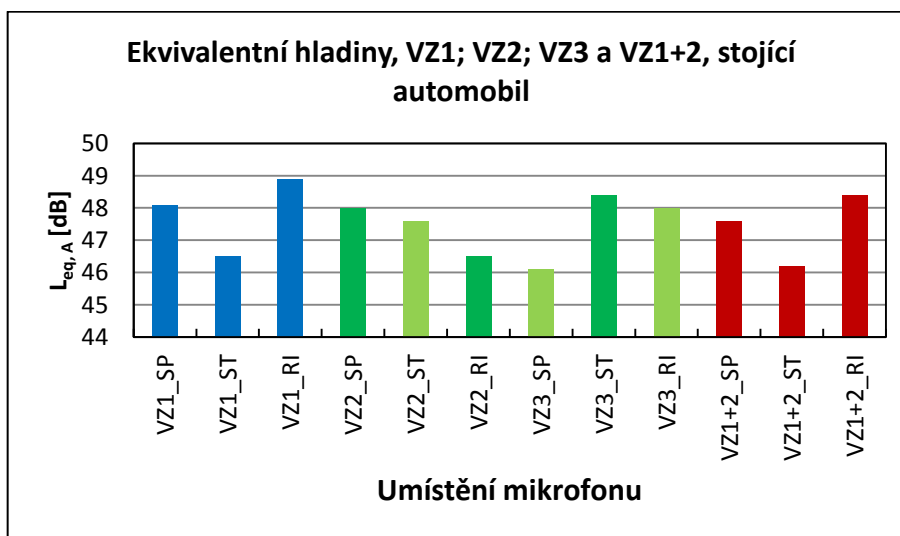
Nejvýraznější část útlumu v oblasti do 1 000 Hz pro vzorky, které byly použity pro měření statického automobilu. Pokud porovnáme režimy rychlostí se statickými režimy, je zřejmé, že vlivy při měření v závislosti na rychlostech, pneumatikách a náhodnými vlivy počasí nebo aerodynamiky jsou poměrně výrazné. Jestliže pro zimní pneumatiky je útlum pasivní (až rezonanční stav), pro letní pneumatiky jsou průběhy frekvenční analýzy a ekvivalentní hladiny akustického tlaku lepší. Nejvýraznější útlum je pak pozorován v rámci statického měření, protože nejsou v této části měření okolní vlivy působící na celkový projev hladiny akustického tlaku.

6.6.2 Ekvivalentní hladina akustického tlaku

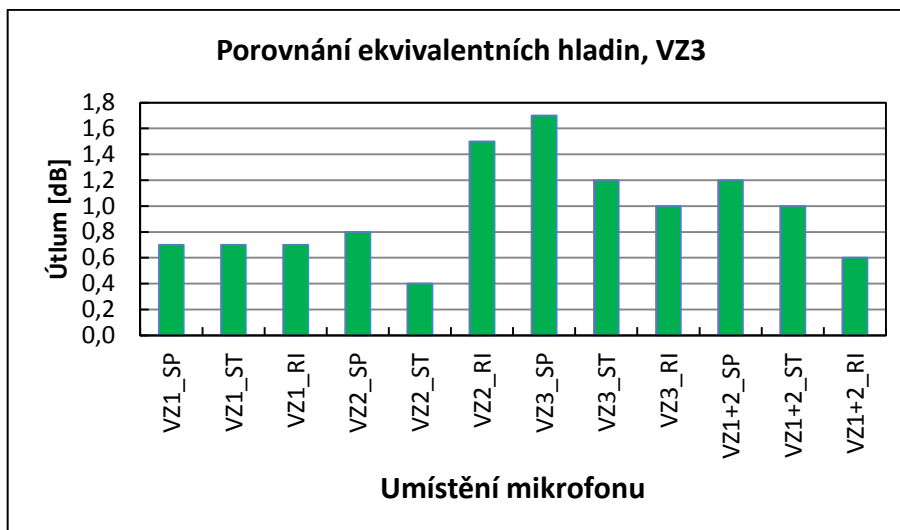


Obr. 156. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro daná umístění měřicího zařízení bez tlumicí vrstvy

Umístění mikrofonů pro měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku je poměrně významné. Nejvyšší hodnoty byly na straně řidiče, což je dáno konstrukcí automobilu. Na straně řidiče je narušena přepážka mezi motorem a interiérem z důvodu pedálů a elektroinstalace. Naproti tomu u spolujezdce tyto vlivy nejsou, proto jsou hodnoty nižší a nejnižší jsou ve středu interiéru, kde je nejširší část konstrukce mezi generovaným hlukem a měřícím mikrofonem.



Obr. 157. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro daná umístění měřicího zařízení a dané tlumicí vrstvy



Obr. 158. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro daná umístění měřicího zařízení a dané tlumicí vrstvy

ZÁVĚR

Celkově lze hodnotit získané výsledky v rámci této DP jako očekávané, ale i do jisté míry překvapující. V laboratorní části byly proměřeny vzorky popsané v tabulce (Tab. 3.), které byly měřeny jednak samostatně, ale také v kombinacích. Vybrané vzorky polyuretanu byly vybrány s ohledem na hustotu, porozitu a v neposlední řadě také samozhášivost. Samozhášivé proto, že byly použity přímo u motoru, ve kterém je vícero tepelných zdrojů. Pro tyto materiály byly provedeny základní charakteristiky akustické pohltivosti, která ukazovala rostoucí hodnoty v závislosti na přidavku polyuretanu do vrstvy nebo změně povrchové geometrie. Velmi dobře v oblasti pohltivosti i koeficientu NRC se jevil perforovaný polyuretan se 17 otvory na plochu průměru 100 mm (Obr. 30.), a nelze ani opominout vliv vzduchové mezery, která má své opodstatnění v jednotlivých umístěních uvnitř karoserie vozidla.

Před začátkem celého měření v rámci vybraného tématu této diplomové práce, nebylo možno pominout základní vliv na hlučnost uvnitř interiéru vozidla v závislosti na několika vlivech (pneumatiky, teplota, tlumicí vrstvy, rychlosti a aerodynamika). Poměrně vysoký vliv byl sledován v oblasti aerodynamického hluku, což nebylo možno v rámci této DP změřit. Bez ohledu na tyto důležité faktory byly zjištěny výsledky, které je nutno rozdělit na dva dosažené cíle. Prvním dosaženým cílem je získání výsledkových dat na zimních pneumatikách a druhým dosaženým cílem bylo získání dat z totožných režimů měření, ale na letních pneumatikách. Vzhledem k letošní poměrně teplé zimě, byly výsledky ze zimních měsíců měřeny ve vyšších teplotách, než je doporučená teplota pro použitelnost zimních pneumatik. Tímto faktem jsou výsledky ovlivněny zásadně, což se potvrzuje v grafech získaných v rámci kapitol popisující výsledné hodnoty pro zimní pneumatiky. V grafech pro akustický útlum byly hodnoty prakticky stále negativní, v celém frekvenčním rozsahu. S tímto faktem byly i ztotožněny výsledky pro ekvivalentní hladinu akustického tlaku z dlouhodobého měření. Bez ohledu na tloušťku nebo geometrii povrchu této vrstvy a její umístění nebyly pozorovány očekávané pozitivní hodnoty pro tlumení v dB.

Naproti tomu měření v jarních měsících, které se vykazovalo teplotami nad 10 °C, což je již okrajová použitelnost pro letní pneumatiky. Tento fakt lze pozorovat v průběhu základního měření na letních pneumatikách, kdy jsou hodnoty ve frekvenčním rozsahu do 20 000Hz nižší než u porovnání základního měření a zimních pneumatik. Přesto lze i u tohoto měření pozorovat odlišnosti, které nebyly očekávány a to zejména v lokálních mís-

tech frekvenčního rozsahu. Celkově jsou hodnoty získané v rámci měření útlumu v kladných číslech a tento fakt je potvrzen jak frekvenční analýzou jednotlivých použitých vrstev uvnitř karoserie, tak i umístěním. Stejného výsledku bylo dosaženo i pro mapování ekvivalentní hladiny akustického tlaku, který vykazoval pozitivní akustický útlum jak vlivem překážky, tak i pro praktické měření.

Poslední měření v praktické části bylo zaměřeno na zjištění základního režimu motorové jednotky vozidla a její akustický projev. Z tohoto měření byl vyvozen fakt, že hodnoty frekvenční analýzy jsou vždy kladné při použití jakékoliv tlumící vrstvy, z čehož lze vyvodit závěr, že okolní vlivy při měření v dynamickém módu vozidla jsou poměrně markantní a nelze je za žádných okolností opomíjet. Zvláště proto, že zvyšování hlučnosti je lineárně spojeno s vyšší činností mechanismů.

Závěrem je nutné dodat, že řešení hlučnosti u jedoucího vozidla není jednoduchou záležitostí. Přesto jsou materiály a varianty jak vozidlo s motorem, který využívá téměř 40 % řidičů v ČR, snížit v oblasti hlučnosti a projevů hlučnosti uvnitř interiéru tohoto vozidla. Jelikož se průměrná životnost automobilů v ČR neustále prodlužuje, je jeden ze zásadních faktů pro vznik hlučnosti uvnitř interiéru. Dalším faktem je to, že vozidlo je v dnešní době každodenním pomocníkem našeho života a lidé v něm tráví více a více času, proto je nutné přistupovat ke snižování hlučnosti a jeho vlivu na člověka jako takového co nejpečlivěji.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-010-2246-3.
- [2] SMETANA, Ctirad. *Měření hluku a chvění*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974, 211 s.
- [3] VAŇKOVÁ, Marie. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí*. 1. vyd. Brno: PC DIR, 1995, 140 s. ISBN 80-214-0695-X.
- [4] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [5] Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. BERNAT, Petr. *Homen.vsb.cz* [online]. 2005 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [6] Loudness Units: Phons and Sones. NAVE, Carl Rod. *HyperPhysics* [online]. 2000 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/phon.html>
- [7] BERÁNEK, Leo L. *Snižování hluku*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965, 740 s.
- [8] *Noise control* /. 2nd ed. Naerum: Brüel, 1986, 156 s. ISBN 87-873-5509-4.
- [9] *Handbook of noise and vibration control*. Editor Malcolm J Crocker. Hoboken: Wiley, c2007, xxiv, 1569 s. ISBN 978-0-471-39599-7.
- [10] VAŠINA, Martin. Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma: Váhové filtry. In: [online]. [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [11] Výroba a odbyt tuzemských výrobců vozidel: Údaje za rok 2012. In: *Autosap* [online]. STATISTIKA AUTOMOBILOVÉHO PRŮMYSLU ČR za rok 2012. [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: <http://www.autosap.cz/zakladni-prehledy-a-udaje/vyroba-a-odbyt-tuzemskych-vyrobcu-vozidel/#koment11>
- [12] Production statistics: World Motor Vehicle Production. In: *OICA* [online]. 2013 [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: <http://www.oica.net/wp-content/uploads/2013/03/total-production-2012.pdf>
- [13] Automobilový průmysl. CZECHINVEST. *Czechinvest* [online]. 2013, 2013 [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: <http://www.czechinvest.org/automobilovy-prumysl>

- [14] Tisková informace č. 3/2014. In: *Autosap* [online]. 2014 [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: www.autosap.cz/sfiles/TI03-2014.docx
- [15] HOLEC, Václav. Český trh v roce 2013: Nejúspěšnější značky a přehled podle segmentů. In: *Autorevue.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/cesky-trh-v-roce-2013-nejuspesnejsi-znacky-a-prehled-podle-segmentu>
- [16] Tuning 101: Základy úprav motoru podle HKS, část 2. In: *Shatsu.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.shatsu.cz/tuning-101-zaklady-uprav-motoru-podle-hks-cast-2/>
- [17] Škoda octavia tour. In: *IHNED.cz* [online]. 2011 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://byznys.ihned.cz/c1-54253200-skoda-vyprazdni-sklady-a-rapidne-snizi-ceny-fabie-a-octavie-jsou-rekordne-levne>
- [18] Rent Ferrari California in Miami. In: *Miamiexoticcarrentals.me* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://miamiexoticcarrentals.me/rent-ferrari-california-miami/>
- [19] TANDON, N. Noise-reducing designs of machines and structures. *Sadhana*. 2000, č. 25, 331 - 339.
- [20] LÓPEZ, Jose Antonio. Hyundai Finally Debuts 2014 i20 World Rally Championship. In: *Thekoreancarblog.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://thekoreancarblog.com/2013/12/10/hyundai-finally-debuts-2014-i20-world-rally-championship/>
- [21] ŠAFRÁNEK, Michal. Stotunový obr v akci: Největší věda je ho ubrzdít. *IDNES.cz* [online]. 2009 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/stotunovy-obr-v-akci-nejvetsi-veda-je-ho-ubrzditi-fuq-/auto_testy.aspx?c=A090918_094520_auto_testy_fdv
- [22] Hasící vozidlo SPOT-55. *Acr.army.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www.acr.army.cz/technika-a-vyzbroj/ostatni/*kopie-1:-hasici-vozdlo-spot-55-93181/
- [23] APETAUR, Milan a Jan RÁFL. *Konstrukce automobilů: určeno pro posl. strojní fak. ČVUT*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-010-1224-7.

- [24] Představujeme: Toyota Prius třetí generace. In: *Zavolantem.cz* [online]. 2009 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.zavolantem.cz/clanky/predstavujeme-toyota-prius-treti-generace>
- [25] Variability of automotive interior noise from engine sources. In: *Noise control engineering journal*. 59. vyd. Washington, DC: Institute of Noise Control Engineering, 2011, 109 - 125. ISSN 0736-2501.
- [26] Noise & Vibrations Mechanics: Review and Diagnostics. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2012, č. 1, 71 - 78.
- [27] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 80-901-5704-1.
- [28] WOODS, George. *Flexible polyurethane foams: chemistry and technology*. Englewood, N.J.: Applied Science Publishers, c1982, xii, 334 p. ISBN 08-533-4981-9.
- [29] MILLS, N. *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*. 1st ed. Boston: Butterworth Heinemann, 2007, xxv, 535 p. ISBN 07-506-8069-5.
- [30] ČSN ISO 10534-2. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubcích: Část 2: Metoda přenosové funkce*. Praha, 2000.
- [31] Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206. In: *Ft.utb.cz: ufmi* [online]. 2011 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.ft.utb.cz/czech/ufmi/vybaveni.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	činitel zvukové pohltivosti; [-]
$\bar{\alpha}_N$	NRC koeficient; [-]
β	činitel zvukové odrazivosti; [-]
c	rychlost šíření akustické vlny; [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_B	rychlost šíření ohybových vln; [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_L	rychlost šíření akustické vlny v podélném směru; [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
E	modul pružnosti v tahu; [Pa]
E_a	akustická energie; [J]
f	frekvence; [Hz]
f_n	okrajové frekvence oktávových pásem; $n = 1, 2, 3, \dots$; [Hz]
G	modul pružnosti ve smyku; [Pa]
γ	činitel zvukové průzvučnosti; [-]
I	moment setrvačnosti průřezu dané tyče; [m^4]
I	intenzita zvuku; [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_0	referenční intenzita zvuku; [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
k	tuhost pružiny; [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
K	modul objemové pružnosti; [Pa]
κ	Poissonova konstanta; [-]
λ	vlnová délka; [m]
$L_{\text{Aeq,T}}$	ekvivalentní hladina akustického tlaku; [dB]
L_I	hladina intenzity zvuku; [dB]
L_N	hladina hlasitosti; [Ph]
L_p	hladina akustického tlaku; [dB]
L_{pA}	hladina akustického tlaku A; [dB]
L_W	hladina akustického výkonu; [dB]
m	hmotnost kmitajícího bodu; [kg]
m'	hmotnost jednotkové délky tyče
N	měrný akustický výkon; [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
N	hlasitost; [son]
p	akustický tlak; [Pa]
P	pórovitost; [-]

p_0	amplituda akustického tlaku; [Pa]
p_0	referenční akustický tlak; [Pa]
$p_A(\tau)$	okamžitý akustický tlak A zvukového signálu; [Pa]
p_b	barometrický tlak; [Pa]
p_{ef}	efektivní hodnota akustického tlaku; [Pa]
p_s	statický tlak; [Pa]
ρ	hustota prostředí; [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
S	plocha; [m^2]
$s(\tau)$	funkce akustické veličiny
$S(\omega)$	spektrum funkce
τ	čas; [s]
T	perioda kmitu; [s]
u	akustická výchylka; [m]
u_0	amplituda akustické výchylky; [m]
v	akustická rychlost; [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_0	amplituda akustické rychlosti; [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
V	objem; [m^3]
v_{ef}	efektivní hodnota akustické rychlosti; [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
ω	úhlová rychlost; [s^{-1}]
W	akustický výkon; [W]
ω_0	vlastní úhlová frekvence; [s^{-1}]
W_0	referenční akustický výkon; [W]
γ	výchylka; [m]
ψ_0	amplituda výchylky; [m]
ϑ	úhel mezi měřicí plochou a dopadajícím paprskem; [$^\circ$]
φ_0	fázový úhel; [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje do volného prostoru.....	17
Obr. 2. Lineární oscilátor	17
Obr. 3. Diskrétní spektrum složeného signálu	23
Obr. 4. Spojité spektrum neperiodického signálu.....	23
Obr. 5. Křivky stejné hlasitosti [5]	24
Obr. 6. Průchod akustické vlny překážkou	29
Obr. 7. Celkový počet vyrobených motorových vozidel od roku 2000 po rok 2012 [13]	34
Obr. 8. Škoda Octavia II	36
Obr. 9. Ferrari California (8V) [18].....	36
Obr. 10. Zleva Hyundai i20 (WRC rally speciál – výkon 300koní) [20], Dampř Caterpillar 775F (100tunové nákladní vozidlo) [21], Spot-55 (hasící vozidlo na pásovém podvozku) [22]	37
Obr. 11. Umístění hlavních zdrojů hluku u automobilu [9].....	37
Obr. 12. Největší zdroje hluku u „běžného“ osobního automobilu	38
Obr. 13 Aerodynamické proudy obtékání vozidla [24]	39
Obr. 14. Blokový diagram vzniku hluku generovaného motorem [9].....	40
Obr. 15. Kondenzátorový mikrofon Brüel & Kjaer typ 4190.....	41
Obr. 16. 2,4- a 2,6-diisokyanatotoulen	44
Obr. 17. 4,4-diisokyanatodifenylmetan	44
Obr. 18. 1,5-Diisokyanatonaftalen.....	44
Obr. 19. 1,6-Diisokyanatohexan.....	45
Obr. 20. Struktura pórů PUR S3535F zleva snímek z optického mikroskopu a snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu	49
Obr. 21. Struktura pórů PUR H3050 zleva snímek z optického mikroskopu a snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu	50
Obr. 22. Dvou-mikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 [31].....	51
Obr. 23. Zapojení aparatury s velkou a malou měřicí trubicí	52
Obr. 24. Vnitřní hlukové uspořádání Kundtovy trubice	52
Obr. 25. Zvukový analyzátor Brüel & Kjaer typ 2146 a tónový kalibrátor Brüel & Kjaer typ 4231	52

Obr. 26. Pracovní prostředí softwaru Pulse LabShop verze 10.2 a multianalyzátor Pulse typ 3506-B-030	53
Obr. 27. Vzorky VZ1 pro měření zvukové pohltivosti PUR S3535F 30 a 100 mm.....	54
Obr. 28. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F VZ1 (lineární zobrazení osy frekvence).....	54
Obr. 29. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F VZ1 (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	55
Obr. 30. Vzorky vz2 (30 mm) a VZ2 (100 mm) a) 5 b) 9 c) 13 d) 17 pro měření zvukové pohltivosti PUR S3535F	57
Obr. 31. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku bez vzduchové mezery (lineární zobrazení osy frekvence)	58
Obr. 32. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku bez vzduchové mezery (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	58
Obr. 33. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 1 cm (lineární zobrazení osy frekvence).....	59
Obr. 34. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 1 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	60
Obr. 35. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 2 cm (lineární zobrazení osy frekvence).....	60
Obr. 36. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 2 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	61
Obr. 37. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 3 cm (lineární zobrazení osy frekvence).....	61
Obr. 38. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku s mezerou za vzorkem 3 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	62

Obr. 39. Průřez profilovaným PUR H3050	62
Obr. 40. Vzorky VZ3 pro měření zvukové pohltivosti PUR H3050 zleva m1V1 a m1V2.....	63
Obr. 41. Vzorky VZ3 pro měření zvukové pohltivosti PUR H3050 zleva m2V1 a m2V2.....	63
Obr. 42. Vzorky VZ3 pro měření zvukové pohltivosti PUR H3050 zleva m3V1 a m3V2.....	63
Obr. 43. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m1V1) a VZ(m1V2) (lineární zobrazení osy frekvence)	64
Obr. 44. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m1V1) a VZ(m1V2) (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	65
Obr. 45. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m2V1) a VZ(m2V2) (lineární zobrazení osy frekvence)	65
Obr. 46. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m2V1) a VZ(m2V2) (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	66
Obr. 47. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m3V1) a VZ(m3V2) (lineární zobrazení osy frekvence)	66
Obr. 48. Frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu H3050 VZ(m3V1) a VZ(m3V2) (logaritmické zobrazení osy frekvence).....	67
Obr. 49. Vzorky VZ1+2_17 pro měření zvukové pohltivosti PUR S3535F zleva 30 a 100 mm.....	68
Obr. 50. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 bez vzduchové mezery (lineární zobrazení osy frekvence).....	68
Obr. 51. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 bez vzduchové mezery (logaritmické zobrazení osy frekvence)	69
Obr. 52. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 1 cm (lineární zobrazení osy frekvence)	69
Obr. 53. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 1 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)	70

Obr. 54. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 2 cm (lineární zobrazení osy frekvence)	70
Obr. 55. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 2 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)	71
Obr. 56. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 3 cm (lineární zobrazení osy frekvence)	71
Obr. 57. Frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vrstvě VZ2 s mezerou za vzorkem 3 cm (logaritmické zobrazení osy frekvence)	72
Obr. 58. NRC koeficient polyuretanu S3030F VZ2 pro různý počet děr ve vzorku a pro vzduchovou mezeru za vzorkem 0, 1, 2 a 3 cm	73
Obr. 59. NRC koeficient polyuretanu H3050 pro různě vyřezané vzorky a pro vzduchovou mezeru 0, 1, 2 a 3 cm	74
Obr. 60. NRC koeficient polyuretanu S3030F VZ1+2 pro různý počet děr ve vzorku a pro vzduchovou mezeru za vzorkem 0, 1, 2 a 3 cm	74
Obr. 61. Uspořádání experimentu pro měření neprůzvučnosti (akustického útlumu).....	76
Obr. 62. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 10 cm	77
Obr. 63. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 10 cm	78
Obr. 64. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 30 cm	78
Obr. 65. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 30 cm	79
Obr. 66. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 50 cm	79
Obr. 67. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1 a VZ2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 50 cm	80
Obr. 68. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofону od tlumicí vrstvy 10 cm	80

Obr. 69. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm	81
Obr. 70. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm	81
Obr. 71. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm	82
Obr. 72. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm	82
Obr. 73. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ3 pro dva různě vyřezané vzorky a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm	83
Obr. 74. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm	83
Obr. 75. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 10 cm	84
Obr. 76. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm	84
Obr. 77. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 30 cm	85
Obr. 78. Závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm	85
Obr. 79. Útlum pro třetinooktávová frekvenční pásma VZ1+2 pro daný počet děr a vzdálenost mikrofonu od tlumicí vrstvy 50 cm	86
Obr. 80. Měřené vozidlo VW Touran 2.0 TDI a motor měřeného vozidla	87
Obr. 81. Pneumatiky měřeného vozidla zleva zimní pneu a letní pneu obě se stejným rozměrem	88
Obr. 82. Měřené úseky frekvenční analýzy a) rychlostní silnice R55 pro rychlosti 130 km/h a 90 km/h a b) silnice první třídy číslo 49 pro rychlost 50 km/h	89
Obr. 83. Měřené úseky ekvivalentní hladiny akustického tlaku na dálnicích D1 a D5 pro rychlosti 130 km/h a 90 km/h	89
Obr. 84. Vnější podmínky na vozovce při měření frekvenční analýzy a ekvivalentní hladiny akustického tlaku; a) 130 km/h, b) 90 km/h, c) 50 km/h d) režim statického vozidla	90
Obr. 85. Umístění analyzátoru během měření v pozicích spolujezdec, střed a řidič	90

Obr. 86. Umístění izolace pod kapotou vozidla a v prostoru pod koberečky uvnitř vozidla	91
Obr. 87. Tlumící vrstva VZ1 umístěná v prostoru za koberečky uvnitř interiéru zleva spolujezdec a řidič	91
Obr. 88. Tlumící vrstva zleva VZ3 a VZ1+2 umístěná pod kapotou vozidla.....	91
Obr. 89. Analyzátor hladiny akustického tlaku Brüel & Kjaer 2238 Mediator.....	92
Obr. 90. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce.....	95
Obr. 91. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce	95
Obr. 92. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	96
Obr. 93. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem	97
Obr. 94. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče	97
Obr. 95. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče	98
Obr. 96. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce.....	98
Obr. 97. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce	99
Obr. 98. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	99
Obr. 99. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem	100
Obr. 100. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče	100
Obr. 101. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče	101
Obr. 102. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě spolujezdce.....	102
Obr. 103. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě spolujezdce	102

Obr. 104. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	103
Obr. 105. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidičem a spolujezdcem.....	103
Obr. 106. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče	104
Obr. 107. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče	104
Obr. 108. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení bez tlumicí vrstvy	105
Obr. 109. Porovnání ekvivalentních hladin získaných z dlouhodobého měření a z měření frekvenčních analýz na zimních pneumatikách.....	106
Obr. 110. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1	106
Obr. 111. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1.....	107
Obr. 112. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2	107
Obr. 113. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2.....	108
Obr. 114. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3	108
Obr. 115. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3.....	109
Obr. 116. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce.....	111
Obr. 117. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě spolujezdce	112
Obr. 118. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	112
Obr. 119. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem	113
Obr. 120. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče	113

Obr. 121. Útlum při různých rychlostech pro VZ1, měřicí zařízení na místě řidiče	114
Obr. 122. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce.....	115
Obr. 123. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě spolujezdce	115
Obr. 124. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	116
Obr. 125. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem	116
Obr. 126. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče	117
Obr. 127. Útlum při různých rychlostech pro VZ2, měřicí zařízení na místě řidiče	117
Obr. 128. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě spolujezdce.....	118
Obr. 129. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě spolujezdce	118
Obr. 130. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	119
Obr. 131. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem	119
Obr. 132. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče	120
Obr. 133. Útlum při různých rychlostech pro VZ3, měřicí zařízení na místě řidiče	120
Obr. 134. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě spolujezdce	121
Obr. 135. Útlum při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě spolujezdce	121
Obr. 136. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem....	122
Obr. 137. Útlum při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem	122
Obr. 138. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě řidiče	123

Obr. 139. Útlum při různých rychlostech pro VZ1+2, měřicí zařízení na místě řidiče	123
Obr. 140. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení bez tlumicí vrstvy	124
Obr. 141. Porovnání ekvivalentních hladin získaných z dlouhodobého měření a z měření frekvenčních analýz na letních pneumatikách.....	124
Obr. 142. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1	125
Obr. 143. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1.....	125
Obr. 144. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2	126
Obr. 145. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ2.....	126
Obr. 146. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3	127
Obr. 147. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3.....	127
Obr. 148. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ1+2.....	128
Obr. 149. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro dané rychlosti a daná umístění měřicího zařízení s tlumicí vrstvou VZ3.....	128
Obr. 150. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku pro všechny tlumicí vrstvy, měřicí zařízení na místě spolujezdce	129
Obr. 151. Útlum všech tlumicích vrstev při stojícím automobilu, měřicí zařízení na místě spolujezdce	130
Obr. 152. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku pro všechny tlumicí vrstvy, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	130
Obr. 153. Útlum všech tlumicích vrstev při stojícím automobilu, měřicí zařízení na místě mezi řidičem a spolujezdcem.....	131
Obr. 154. Porovnání frekvenčních závislostí hladiny akustického tlaku pro všechny tlumicí vrstvy, měřicí zařízení na místě řidiče	131
Obr. 155. Útlum všech tlumicích vrstev při stojícím automobilu, měřicí zařízení na místě řidiče	132

-
- Obr. 156. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro daná umístění měřicího zařízení bez tlumicí vrstvy 133
- Obr. 157. Ekvivalentní hladina akustického tlaku A pro daná umístění měřicího zařízení a dané tlumicí vrstvy..... 133
- Obr. 158. Porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku A pro daná umístění měřicího zařízení a dané tlumicí vrstvy 134

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Rychlost šíření podélných vln vybraných materiálů [1].....	21
Tab. 2. Prodejnost jednotlivých značek nových vozidel v letech 2012 a 2013 [15]	34
Tab. 3. Popis jednotlivých tlumicích vrstev	49
Tab. 4. Vybrané vlastnosti PUR S3535F	50
Tab. 5. Vybrané vlastnosti PUR H3050	50
Tab. 6. Označení vzorků VZ2 pro měření zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F	56
Tab. 7. Označení vzorků VZ3 pro měření zvukové pohltivosti polyuretanu H3050.....	62
Tab. 8. Označení vzorků VZ1+2 pro měření zvukové pohltivosti polyuretanu S3535F	67
Tab. 9. Porovnání NRC koeficientu jednotlivých materiálů pro dané vzduchové mezery (materiály jsou seřazeny podle klesajícího NRC koeficientu)	75
Tab. 10. Parametry měření zvukovým analyzátozem	75
Tab. 11. Údaje z technického popisu vozidla	87
Tab. 12. Rychlostní režimy měření.....	92
Tab. 13. Den, doba měření a meteorologická situace pro měření na zimních pneumatikách.....	94
Tab. 14. Den, doba měření a meteorologická situace pro dlouhodobé měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku na zimních pneumatikách	94
Tab. 15. Den, doba měření a meteorologická situace pro měření na letních pneumatikách.....	110
Tab. 16. Den, doba měření a meteorologická situace pro dlouhodobé měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku A na letních pneumatikách	110