

Iveta SKOTNICOVÁ¹, Miloslav ŘEZÁČ²

**VLIV ZMĚNY ABSORPČNÍCH VLASTNOSTÍ POVRCHU ZÁDLAŽBOVÉHO PANELU
NA ÚTLUM HLUKU Z TRAMVAJOVÉ DOPRAVY**

**INFLUENCE OF CHANGE OF SOUND ABSORPTION PROPERTIES OF TRAMWAY LINE
SURFACE ON TRAFFIC NOISE ATTENUATION**

Abstrakt

Příspěvek popisuje průběh a výsledky experimentu, při kterém byl ověřován vliv změny akustických pohltivých vlastností betonového krytu tramvajové tratě na hluk z tramvajové dopravy. Celý experiment proběhl ve spolupráci Fakulty stavební VŠB-TU Ostrava s podniky: Dopravní podnik Ostrava, a.s., ODS – Dopravní stavby Ostrava, a.s., INTERTECH plus, s.r.o. a s Fakultou strojní VŠB-TU Ostrava [1].

Klíčová slova

Činitel akustické pohltivosti, betonový zádlážbový panel, dopravní hluk

Abstract

The article describes course and results of experiment, which provided influence of change of acoustic absorption properties of concrete tramway line surface on traffic noise attenuation.

Keywords

Sound absorption coefficient, concrete tramway panel, traffic noise

1 ÚVOD

Dopravní podnik Ostrava v posledních letech aplikuje řadu odhlučňovacích prvků, které prokazatelně snižují hluk i vibrace od tramvajové dopravy. Dosud se však nenašel vhodný prvek, který by znatelně snižoval hladinu hluku v konstrukcích tramvajové tratě s krytem (s betonovými zádlážbovými panely). Proto vznikla potřeba vyvinout a ověřit takový kryt tratě, který by oproti dosud stávajícím krytům (ze železobetonových panelů, z asfaltobetonu) vykazoval lepší absorpční vlastnosti a vyšší útlum emisí vyzařovaného hluku. Na základě požadavku Dopravního podniku byl Fakultou stavební VŠB-TU Ostrava proveden dvouletý experiment, při kterém byl ověřován vliv změny akustických pohltivých vlastností betonového krytu tramvajové tratě na hluk z tramvajové dopravy [1].

2 NÁVRH ÚPRAVY ZÁDLAŽBOVÉHO PANELU

Betonový zádlážbový panel patří k materiálům zvukově odrazivým. Jednou z možností, jak ověřit vliv odrazivého povrchu tramvajové tratě na hlukovou zátěž od tramvajové dopravy, je změnit

¹ Ing. Iveta Skotnicová, Ph.D., Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 957, e-mail: iveta.skotnicova@vsb.cz.

² Doc. Ing. Miloslav Řezáč, Ph.D., Katedra dopravního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 313, e-mail: milos.rezac@vsb.cz.

absorpční vlastnosti povrchu betonového panelu. Na základě požadavků Dopravního podniku Ostrava byla prověřována možnost zlepšení pohltivých vlastností povrchu záďlažbového panelu pomocí vrstvy z recyklované pryže.

2.1 Vlastnosti betonového záďlažbového panelu

Výrobce betonových záďlažbových panelů jsou ODS - Dopravní stavby Ostrava, a.s. Záďlažbové panely jsou obďelníkoveho půdorysu 1240 x 1980 mm (typ B - mezikolejnicový) a 1430 x 1980 mm (typ C - mezikolejový). Hrany delších stran jsou zkoseny tak, aby panel sledoval hrany uložení kolejnic. Stávající výška panelu je 170 mm. Panely jsou vyrobeny z betonu C-/40 sap3b a vyztuženy svařovanými sítěmi z výztuže 10 505 (R), při dolním povrchu $\varnothing 8/\varnothing 8 - 150/100$ s roztečí 100 mm pro podélné vložky. Krytí u obou povrchů je 45 mm. Panely jsou v tramvajových tratích uloženy na pražce v roztečích 600 mm a mohou být zatěžovány i silniční dopravou (obr.1).

Vzhledem k průřeznímu profilu tramvajového vozu nebylo možné libovolně navýšovat výšku stávajícího panelu o další vrstvu. Předpokladem pro provedení úpravy byla možnost snížení výšky stávajícího betonového panelu a jeho následné doplnění o navrženou tloušťku pryžové vrstvy. Jako maximální tloušťka pryžové vrstvy byla navržena tloušťka 40 mm. Vzhledem k tomu, že záďlažbový panel je dimenzován i pro možné zatížení silniční dopravou, bylo nutné nejdříve ověřit změnu výšky panelu statickým výpočtem.

V rámci úpravy záďlažbového panelu bylo řešeno i vzájemné spojení pryžové vrstvy s betonovým panelem. Byla vyloučena varianta přilepení, která se běžně využívá např. u protihlukových betonových stěn s pohltivou povrchovou úpravou z recyklované pryže. Vzhledem k možnému smykovému namáhání panelu od brzdných a rozjezdových sil vozidel, byla pro zajištění lepší přidrženosti pryžové vrstvy k podkladu navržena varianta úpravy stykové plochy obou materiálů. Také tato úprava byla rovněž ověřena statickým výpočtem.

Statickým posouzením bylo prokázáno, že oslabení průřezu panelu nebude mít vliv na jeho mechanické vlastnosti. Je třeba ovšem uvážit možnost poškození panelu během transportu a montáže.



Obr.1: Tramvajová trať s krytem z betonových záďlažbových panelů (foto: Ing.L.Hudeček, Ph.D.)

2.1 Akustické vlastnosti desek z recyklované pryže

Recyklovaná pryž patří mezi porézní materiály, které jsou schopny ve své porézní struktuře absorbovat (pohlcovat) dopadající akustickou energii. Pohltivost vyjadřuje poměr zvukové energie, která se při dopadu absorbuje a nevratně přemění v teplo, k celkově dopadající zvukové energii. K absorpci akustické energie dochází:

- násobnými odrazy zvukového paprsku v pórech materiálu,
- třením vzduchu přenášejícího akustickou energii o stěny pórů,
- přeměnou akustické energie na expanzní práci periodicky stlačovaného vzduchu v pórech.

Veličinou, která vyjadřuje schopnost konstrukce pohlcovat část akustického výkonu dopadající zvukové vlny je činitel zvukové pohltivosti α [-] v kmitočtovém pásmu, definovaný jako:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (1)$$

kde W_a je akustický výkon pohlcený materiálem [W],

W_i celkový akustický výkon dopadající na materiál [W].

Hodnota činitele zvukové pohltivosti materiálu je závislá na vztahu jeho tloušťky d a frekvenci f dopadajícího zvuku a na velikosti pórů materiálu. Obecně platí, že v oblasti nízkých frekvencí se hodnota činitele zvukové pohltivosti zvětšuje s rostoucí tloušťkou materiálu. Svého maxima dosáhne při tloušťce d právě tehdy:

$$d = \frac{c}{4f} \quad (2)$$

kde c je rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s],

f frekvence dopadajícího zvuku [Hz].

Cílem experimentu bylo ověřit optimální tloušťku a tvar povrchu, který by zajišťoval, co největší pohlcení akustické energie a zároveň dostatečnou odolnost a trvanlivost materiálu v daných podmínkách.

Tvar a velikost prostorového členění povrchu pryžové desky jsou limitovány možnostmi výroby. Tloušťka pryžové vrstvy je limitována průjezdním profilem tramvajového vozu.

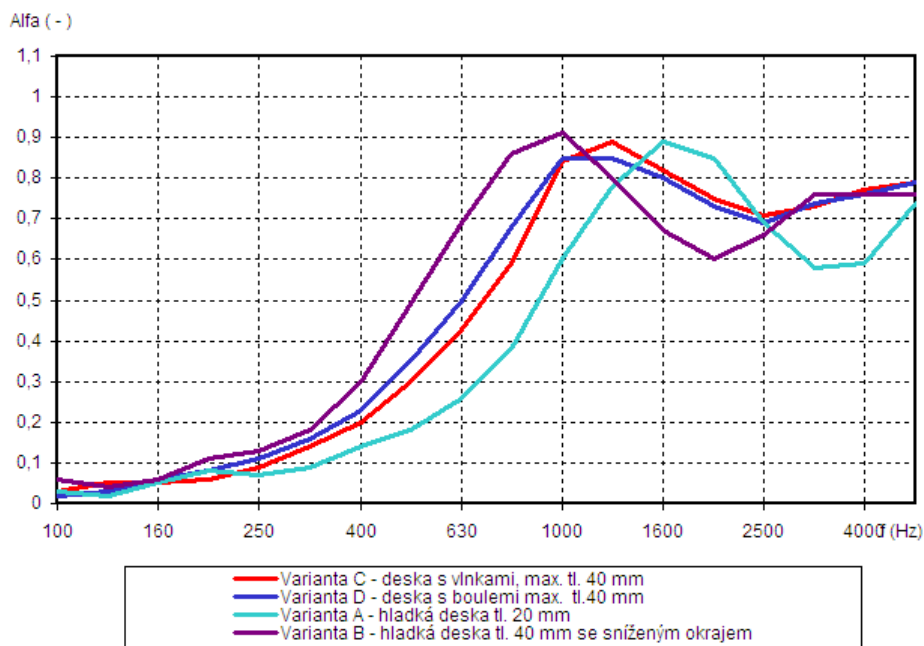
Pro dosažení možného srovnání akustických vlastností různých tlouštěk a tvarů horního povrchu vrstvy z recyklované pryže byly posuzovány celkem čtyři varianty návrhu:

- varianta A – vrstva pryže s hladkým povrchem tl. 20 mm,
- varianta B – vrstva pryže s hladkým povrchem tl. 40 mm se sníženými okraji tl. 20 mm,
- varianta C – vrstva pryže s tvarovaným povrchem - příčnými vlnami, max. tl. 40 mm,
- varianta D – vrstva pryže s tvarovaným povrchem - prostorovými boulemi, max. tl. 40 mm.

U desky s hladkým povrchem se předpokládá větší trvanlivost, u desek s tvarovaným povrchem větší zvuková absorpce.

Akustické vlastnosti všech posuzovaných variant tvarů povrchu pryžových vrstev byly ověřovány stanovením činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře. Zkouška byla provedena akreditovanou zkušební laboratoří CSI, a.s. Zlín. Hodnocení absorpčních účinků se podle ČSN EN 1793-1:1998 provádí na základě měření činitele zvukové pohltivosti v laboratorních podmínkách podle normy ČSN ISO 354. Absorpční účinky protihlukových stěn charakterizuje jednočíselná veličina DL_α [dB], která je uvedena pro porovnání vlastností jednotlivých variant řešení.

Na obr. 2 jsou uvedeny výsledky měření činitele zvukové pohltivosti pro všechny posuzované varianty tvaru pryžových vrstev.



Obr.2: Naměřené hodnoty činitele zvukové pohltivosti všech posuzovaných variant pryžových desek

Na základě zhodnocení akustických vlastností všech variant pryžových desek lze konstatovat, že optimálním řešením se jeví varianta C – deska s vlhkami, max. tl. 40 mm a varianta D – deska s boulemi o max. tloušťce 40 mm, která pohlcuje zvuk i v oblasti vyšších kmitočtů (kolem 1600 Hz). Snížení hladin hluku vyšších frekvencí je pro lidský organizmus příznivější, neboť tyto hluky jsou vnímány jako rušivější. Varianta D byla z navržených typů desek vybrána pro úpravu betonového zádlážbového panelu a jeho realizaci ve zkušebním úseku.

3 REALIZACE ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

Jako zkušební úsek pro ověření vlastností navržené úpravy betonového zádlážbového panelu, byl vybrán přímý úsek dvojkolejně tramvajové tratě na ulici Závodní v Ostravě-Hrabůvce (viz obr. 3). Úsek je z obou stran lemovaný jednoproudou silnicí, travnatými pruhy a ploty zahrad rodinných domů na jedné straně a plotem městského hřbitova na straně druhé. Celková délka zkušebního úseku je 50 m.

Výměna zádlážbových panelů proběhla v září 2008. Výměnu tramvajového svršku provedl DPO, a.s. Základním předpokladem pro výsledné posouzení vlivu změny povrchu zádlážbového panelu na hladinu hluku bylo provedení pouze výměny panelů bez dalších odhlučňovacích prvků.

Stávající zádlážbové panely byly vytaženy, původní podsyp byl vybrán až na pražce a štěrkové lože. Nově byla položena separační vrstva geotextilie a na ní podsyp z kameniva frakce 0-4. Následně byly do lože položeny nové panely. Zálivka z cementové malty byla pokládána s použitím čerpadla, aby se minimalizovalo zanesení cementové malty do porézní struktury povrchu panelu.



Obr. 3: Realizace zkušebního úseku tramvajové tratě (foto: archiv autora)

4 MĚŘENÍ HLUKU Z TRAMVAJOVÉ DOPRAVY NA ZKUŠEBNÍM ÚSEKU

Měření hluku na zkušebním úseku na ulici Závodní v Ostravě-Hrabůvce proběhlo ve dnech 28. srpna a 8. října 2008. První měření bylo provedeno pro původní stav tramvajové tratě, druhé měření proběhlo po výměně původních zádlážbových panelů za upravené panely s pryžovou vrstvou (varianta D).

Cílem měření bylo ověření vlivu změny absorpčních vlastností povrchu zádlážbových panelů (s povrchovou úpravou z recyklované pryže) na hladinu hluku od tramvajové dopravy.

4.1 Princip měření hluku z tramvajové dopravy

Měření hluku provedla Katedra částí a mechanismů strojů, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava [2]. K měření hluku byl použit zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer, kterým byly snímány a zaznamenávány okamžité hodnoty akustického tlaku p_A [Pa] s frekvenčním vážením A po celou dobu průjezdu referenční tramvaje měřeným úsekem. Délka časového záznamu akustického tlaku byla $T = 8$ s. Záznamy jednotlivých jízd byly uloženy do paměti počítače se vzorkovací frekvencí 10 kHz.

Během měření byl zvukoměr umístěn na stativu v horizontální poloze ve výšce 1,1 m nad vozovkou a okolním terénem, tak, aby se mezi referenční tramvají a zvukoměrem nenacházela žádná překážka. Jednalo se o měření hluku ve volném hlukovém poli. Na mikrofonu zvukoměru byla nasazena větrná clona z měkčeného PUR.

Pro dvě různé rychlosti průjezdu (40 a $50 \text{ km.h}^{-1} \pm 2 \text{ km.h}^{-1}$) a dvě různé vzdálenosti zvukoměru od osy pojezděné koleje ($7,5$ a 15 metrů) bylo měřeno vždy 5 průjezdů referenční tramvaje (obr.4) měřeným úsekem. Tramvaj projížděla měřeným úsekem setrvačností, bez sešlápnutého pedálu akcelerace.

V klidovém stavu před a po měření byl zaznamenán také hladina hluku pozadí. Jeho hodnota byla vždy o více než 10 dB nižší, v souladu s požadavky nařízení vlády č. 148 „o ochraně osob před nepříznivými účinky hluku a vibrací“ z 15. března 2006.

Měření probíhalo vždy v nočních hodinách, od cca 23.30 hodin, provoz na okolních komunikacích byl velmi malý. Měřeny byly pouze ty průjezdy referenční tramvaje, které nebyly rušeny jinou dopravou v měřeném úseku na ulici Závodní.



Obr. 4: Referenční tramvaj (foto: archiv autora)

4.2 Vyhodnocení výsledků měření

Z naměřeného záznamu okamžité hodnoty akustického tlaku $p_{A, 8s}$ byla následně vyhodnocena hladina akustického tlaku L_{Afast} [dB] a z 15 nejvyšších hodnot (v časovém úseku 4 s) byla vypočtena ekvivalentní hladina akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ [dB]. Následně byla vyhodnocena výsledná ekvivalentní hladina akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ [dB] jako střední hodnota z pěti záznamů. Referenční hodnota akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Dále byla vyhodnocena amplitudová spektra (FFT) reprezentativních záznamů ve frekvenčním pásmu od 0 do 5 000 Hz a z frekvenčního pásma 500 až 5 000 Hz pro posouzení účinků hluku z hlediska ergonomických a hygienických kritérií, kdy hluk ve frekvenčním pásmu okolo 1 000 Hz je lidským uchem vnímán nejvíce. V těchto frekvenčních rozsazích také byly stanoveny ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ a $L_{Aeq,4s,cut}$ (ekvivalentní hladina akustického tlaku ze záznamu akustického tlaku s hornopropustným filtrem 500 Hz).

V tab. 1 a na obr. 5 jsou uvedeny výsledky měření a jejich vyhodnocení dvěma způsoby, pomocí:

- ekvivalentní hladiny hluku,
- spektrální analýzy hladin hluku (případně akustického tlaku).

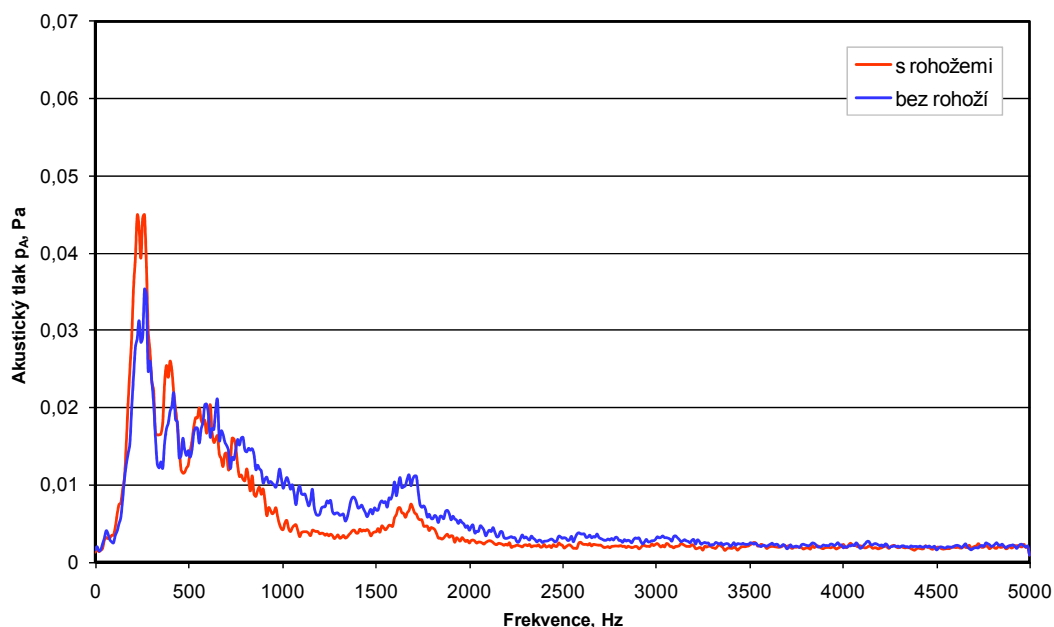
Ekvivalentní hladina hluku - jednočíselné hodnocení hluku, uvádějící ekvivalentní, příp.maximální nebo jinou charakteristickou hladinu hluku pro určitý časový interval. Toto hodnocení je vhodné z hygienického hlediska pro posouzení akustického klimatu životního nebo pracovního prostředí. Ale pro hodnocení akustických vlastností konstrukcí nemá dostatečnou vypovídací schopnost, jako samostatné hodnocení není tedy příliš vhodné.

Spektrální analýza hladin hluku - frekvenční analýza hladin hluku. Je vhodnější pro technické hodnocení konstrukcí (pro určení významných frekvenčních složek a návržení vhodných ochranných opatření). Pomocí spektra hladin hluku je tedy možné, při dostatečném počtu měření, posoudit v jaké frekvenční oblasti se projeví změna konstrukce tramvajové trati, vliv vloženého tlumicího prvku nebo vliv broušení.

Tab.1: Výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$

Rychlost průjezdu referenční tramvaje [km/hod]	Původní stav tramvajového svršku		Stav po výměně upravených panelů s pryžovou vrstvou	
	$L_{Aeq,4s\ cut}$ [dB]		$L_{Aeq,4s\ cut}$ [dB]	
	7,5 m od osy	15 m od osy	7,5 m od osy	15 m od osy
50	81,34	78,03	81,34	77,98

Při porovnání naměřených jednočíselných hodnot ekvivalentních hladin akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ je vidět pouze nepatrný vliv nových upravených panelů na hladiny hluku, i když při samotném měření byl při poslechu rozeznatelný pokles hluku při průjezdu referenční tramvaje upraveným zkušebním úsekem. Tento jev je způsobený změnou frekvenční skladby hladin hluku v důsledku změny absorpčních vlastností povrchu záďlažbového panelu.



Obr. 5: Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ [2]

Na uvedeném grafu naměřených průměrných spekter akustického tlaku je zřejmý výrazný pokles akustického tlaku v případě položených nových upravených panelů. Pohltivé vlastnosti povrchové pryžové vrstvy se výrazněji projeví zejména ve frekvenčních oblastech 500 až 5000 Hz.

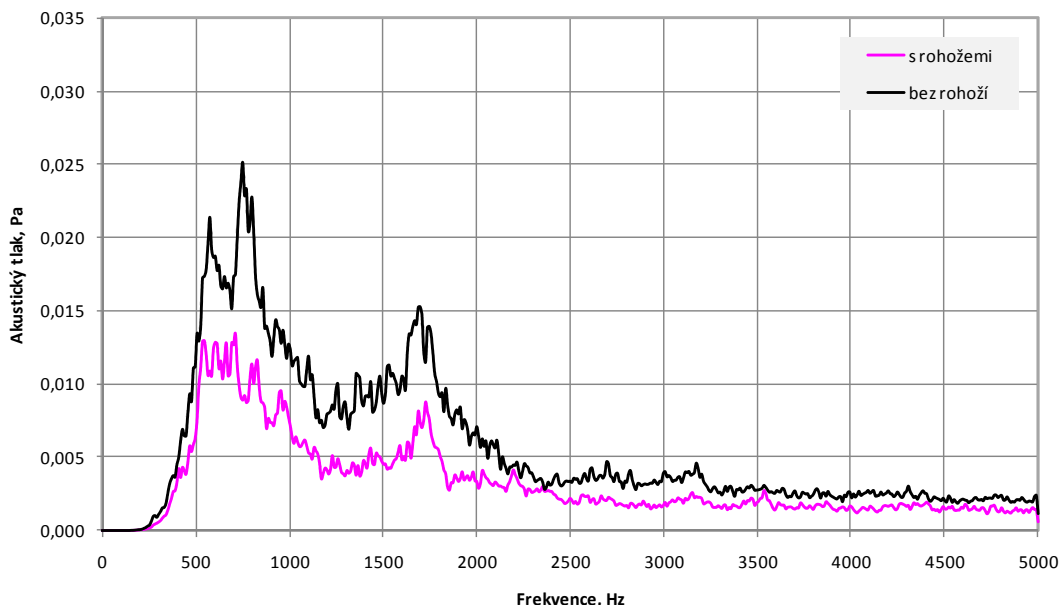
V oblasti nízkých kmitočtů se vliv změny pohltivosti povrchu panelu neprojeví, naopak se může zdát, že hodnoty akustického tlaku jsou dokonce o něco vyšší než pro původní stav. Příčina tohoto jevu pravděpodobně spočívá v tom, že měření nového stavu proběhlo krátce po uložení nových panelů do kolejového lože.

Aby bylo možné přesněji vymežit velikost útlumu hladin hluku v případě nových upravených panelů, byly vyhodnoceny výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s\ cut}$ [dB] pouze pro frekvenční pásmo 500 až 5000 Hz (tab. 2), a dále byla vyhodnocena amplitudová spektra (FFT) akustického tlaku p_{Acut} [Pa] ve frekvenčních pásmech 500 až 5000 Hz pro reprezentativní záznamy průjezdu (obr. 6).

Tab.2: Výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ pro frekvenční pásmo 500 až 5000 Hz

Rychlost průjezdu referenční tramvaje [km/hod]	Původní stav tramvajového svršku		Stav po výměně upravených panelů s pryžovou vrstvou	
	$L_{Aeq,4s\ cut}$ [dB]		$L_{Aeq,4s\ cut}$ [dB]	
	7,5 m od osy	15 m od osy	7,5 m od osy	15 m od osy
50	78,81	75,56	76,01	73,21

Při porovnání naměřených jednočíselných hodnot ekvivalentních hladin akustického tlaku $L_{Aeq,4s\ cut}$ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5000 Hz (což je rozsah pro lidské ucho nejvíce citlivý) je vidět již znatelný rozdíl naměřených hladin 2,2 až 2,8 dB mezi původním stavem tramvajového svršku a novým stavem po výměně panelů. Takový rozdíl je lidským uchem již vnímatelný.



Obr. 6: Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje $50\ km\cdot h^{-1}$ pro frekvenční rozsah 500 až 5000 Hz [2]

Na uvedeném obrázku naměřených průměrných spekter akustického tlaku je zřejmý výrazný pokles akustického tlaku v případě položených nově upravených panelů, zejména ve frekvenčních oblastech 500 až 5000 Hz

5 ZÁVĚR

Na základě provedeného výzkumu a měření lze konstatovat, že úprava pohltivosti povrchu betonového záložkového panelu pomocí vrstvy z recyklované pryže může být vhodnou cestou k eliminaci hluku z tramvajové dopravy. Ovšem širší uplatnění tohoto systému v praxi, bude vyžadovat ještě další opatření.

Pozitiva, která přinese použití záďlažbového panelu s povrchovou úpravou z recyklované pryže, lze shrnout do následujících bodů:

- výrazné snížení hladiny hluku v oblasti maximální citlivosti lidského sluchu až o cca 2,8 dB,
- snadná konstrukční výměna stávajících panelů za nově upravené panely,
- na upravených panelech zůstává možnost pojíždění tramvajové pásu vozidly s právem přednosti (v nutných případech i ostatními),
- snadná údržba tramvajové tratě (pouze v zimním období je nutná vyšší opatrnost při práci se sněhovou radlicí),
- krátký technologický čas realizace,
- dostupnost dodavatele, dobré dodavatelsko-odběratelské vztahy.

Ale objevují se i negativa pro použití nového záďlažbového panelu s povrchovou úpravou z recyklované pryže:

- nezaznamenán útlum nízkých prahových hodnot hluku (kolem 250 – 300 Hz),
- nutnost další investice pro dořešení útlumu v oblasti nízkých prahových hodnot hluku,
- nedostatek údajů pro stanovení konečné životnosti nového prvku (zatím po dvou letech provozu bez závad),
- odvádění srážkových vod,
- nedostatek údajů pro stanovení pravděpodobnosti poruch nového prvku,
- možné snížení účinnosti pohltivosti panelu při zanesení nečistotami (zatím nepotvrzeno),
- vyšší realizační náklady (momentálně největší překážka pro širší uplatnění).



Obr.7: Zkušební úsek tramvajové tratě s upravenými panely na ul. Závodní v Ostravě-Hrabůvce (foto: archiv autora)

LITERATURA

- [1] SKOTNICOVÁ, I., ŘEZÁČ, M., OŽANOVÁ, E., HUDEČEK, L. *Odhlučnění tramvajové tratě s krytem : závěrečná zpráva HS 229/702*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Stavební fakulta, 2008. 180 s.
- [2] HRUDIČKOVÁ, M. *Zpráva o měření hluku na ulici Závodní : Příloha 1 závěrečné zprávy HS 229/702*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Stavební fakulta, 2008. 12 s.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D., Katedra částí a mechanismů strojů, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba.