

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

PROBLÉMY HLUKU ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY

NOISE CONTROL OF THE RAILWAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN WINKLER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. RNDR. KAREL PELLANT, CSC.

BRNO 2010

Zadání závěrečné práce

(na místo tohoto listu vložte originál a nebo kopii zadání Vaší práce)

Abstrakt

Analýza hluku železniční dopravy a posouzení účinnosti protihlukových bariér různého typu.

Abstract

Analysis of the railway noise control. The discussion of the effectiveness of different acoustic barrier types.

Klíčová slova

hluk, zvukové vlny, bariéry, železnice, difrakce

Keywords

noise control, barriers, diffraction, railway, sound waves

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího bakalářské práce doc. RNDr. Karla Pellanta, CSc. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Brně dne 12.05. 2010

.....

Martin Winkler

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce panu doc. RNDr. Karlu Pellantovi za cenné rady, připomínky, čas a trpělivost, kterou mi věnoval v průběhu vzniku této práce. Rád bych také poděkoval svým rodičům, kteří mi studium umožnili a podporovali mě v něm.

Obsah

Obsah	11
1. Formulace problému a cíle řešení	12
2. Úvod	13
2.1 Zvuk a jeho vlastnosti	13
2.2 Základní veličiny v akustice	14
2.2.1 Akustický tlak	14
2.2.2 Akustický výkon	14
2.2.3 Akustická intenzita	14
2.3 Odraz, ohyb a průchod zvuku	15
2.3.1 Odraz zvuku	15
2.3.2 Ohyb zvuku	15
2.3.3 Součinitel stěnové absorpce	16
2.4 Veličiny charakterizující hluk	17
2.5 Útlum šíření zvuku ve venkovním prostoru	19
2.5.1 Absorpce ve vzduchu	19
2.5.2 Útlum vlivem mlhy, deště a sněhu	19
2.5.3 Útlum způsobený stěnami a stromy	19
2.5.4 Útlum způsobený gradienty větru a teploty	19
3. Snižování hluku od železniční dopravy pomocí protihlukových bariér	20
3.1 Používané materiály protihlukových stěn	20
3.2 Akustické vlastnosti protihlukových stěn - kategorizace	21
3.2.1 Zvuková pohltivost	21
3.2.2 Vzduchová neprůzvučnost	21
3.3 Materiály vybraných společností - porovnání akustických parametrů	22
3.3.1 Panely z recyklovaného plastu „TRAPLAST“	22
3.3.2 Izolační desky „ORSIL“	22
3.3.3 Protihlukové desky „VELOX“	23
3.3.4 Cemento-dřevěné tvárnice „DURISOL“	23
3.3.5 Panel z recyklované gumy "PHS2"	23
3.4 Vliv tvaru hran protihlukových stěn na jejich účinnost	24
3.4.1 Metodika měření používaná při sledování vlivu hran bariér na vložný útlum	25
3.4.2 Hodnoty útlumu bariér s různým tvarem difrakční hrany	28
3.5 Naměřené hodnoty vložného útlumu pro jednoduchou dřevěnou bariéru	30
4. Výpočetní systémy používané pro matematické modelování šíření hluku	32
4.1 Geometrická akustika	32
4.1.1 Metoda zrcadlových zdrojů	32
4.1.2 Ray-Tracing	33
4.1.3 Cone-Tracing	33
4.2 Současné používané výpočetní systémy pro matematické modelování šíření hluku	33
Závěr	35
Seznam použité literatury	36

1. Formulace problému a cíle řešení

Zvuky zpravidla přináší člověku uspokojení ve formě hudby, ptačího zpěvu či šumění moře. Zvuk je však také prostředkem dorozumívání, výstrahy i varování. Umožňuje nám ohodnotit sluchový vjem či stanovit diagnózu ať už při skřípění brzd či srdečních šelestech. Zvuk je běžnou součástí každodenního života s tím, že si moderní člověk ani často neuvědomuje všechny jeho funkce a účinky.

V moderní době zvuk často bývá nepříjemný a rušivý. Řadu takovýchto zvuků pak můžeme označit jako nežádoucí zvuky nebo obecně hluk. Je nutné zmínit, že nezáleží nejen na standardních hodnotách akustických veličin charakterizujících hluk (intenzita, hladina apod.), ale také na subjektivním hodnocení hluku individuálního posluchače. Hluk nemusí být totiž ani příliš silný a přesto může působit značně nepříjemně či rušivě. Nejhorší vlastností zvuku a hluku je však jeho potenciální nebezpečnost, která spočívá v možnosti způsobení dočasných či trvalých zdravotních následků nebo i materiálních škod. Např. aerodynamický třesk, který můžeme pozorovat u objektů pohybujících se nadzvukovou rychlostí, dokáže poškodit omítku či okna budovy. Dopravní hluk takového riziko přímo nepředstavuje, nicméně i bez podrobných studií je zřejmé, že hluk má i v tomto případě negativní dopad na zdraví člověka a jeho pohodlí.

Železniční hluk, na který je zaměřena i tato práce, dosahuje jednu z nejvyšších dopravních hlukových hladin. Např. hlučnost vlaků tažených motorovou lokomotivou, dosahuje v blízkosti soupravy (tj. ve vzdálenosti cca 1 m) více jak 110 dB a ještě 50 m od kolejiště může dosáhnout až 90 dB. Proto je zřejmé, že aplikace protihlukových opatření je v mnoha případech nezbytností.

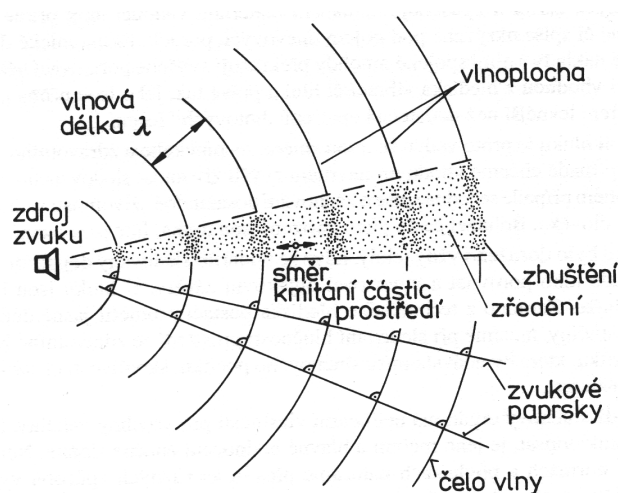
Cílem této práce je hlavně diskuse možností snižování železničního hluku pomocí akustických bariér. Kromě absorpčních vlastností materiálů používaných pro konstrukci bariér je předmětem práce i rozbor vlivu samotného tvaru bariéry na dosažený vložný útlum, zejména vliv tvaru difrakčních hran používaných bariér. Dále je v práci provedena diskuse možností využití matematického modelování pro účely zjištění optimální polohy a výšky bariéry z hlediska její účinnosti v dané lokalitě.

2. Úvod

2.1 Zvuk a jeho vlastnosti

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí v kmitočtovém rozsahu vnímané lidským uchem, což je přibližně 16 – 20 000 Hz. Vlnění s nižší frekvencí než 16 Hz se nazývá infrazvuk, vlnění o frekvencích vyšší než 20 kHz je ultrazvuk.

Pomocí pružných vazeb sousedících částic prostředí se zvuk přenáší dále ve formě zvukových vln. Každé mechanické vlnění se šíří konečnou rychlostí, které je dáno materiálovými vlastnostmi prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Vlnění od zdroje postupuje ve vlnoplochách rychlostí zvuku. Vlnoplochy jsou plochy v prostoru na kterých částice kmitají se stejnou fází. Částice prostředí se přitom nepohybují se šířící se vlnou, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Podle toho, zda částice kmitají ve směru vlnění nebo kolmo k němu, rozlišujeme vlnění podélné a příčné. V pevných látkách vznikají oba základní typy vlnění včetně jejich kombinace tj. vlnění ohybového [1]. V případě fluidních prostředí se šíří jen podélné vlny tlakové (akustické), s postupující akustickou vlnou přitom dochází ke zhušťování a zředování částic.



Obr. 1 Šíření zvukové vlny v elastickém prostředí [1]

2.2 Základní veličiny v akustice

2.2.1 Akustický tlak

Při šíření vlnění celkový tlak v daném prostředí kolísá okolo statického (atmosférického) tlaku v ovzduší. Odchylka od statického tlaku při vlnění se nazývá akustický tlak. Akustický tlak je tedy nasuperponován na barometrický tlak p_b . Závislost akustického tlaku $p(t)$ pro vlnění o frekvenci f a fázovém posuvu φ má tvar harmonické funkce

$$p_c = p_b + p_{(t)} \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

kde

$$p_{(t)} = p_0 \cos(\omega t + \varphi) = p_0 \cos(2\pi f t + \varphi)$$

kde jsou: p_0 – amplituda akustického tlaku

φ – fázový posun

2.2.2 Akustický výkon

Ve vzduchu se mechanická energie kmitajících částic od zdroje přenáší kmity pružného prostředí ve formě akustických vln. Všechny zdroje hluku se definují akustickým výkonem, jakožto základním parametrem akustického výstupu. Pokud uvažujeme, že ve vzduchu v okolí zdroje nedochází k žádným ztrátám, pak všechny vyzařovaný akustický výkon prochází myšlenou prostorovou plochou obklopující tento zdroj. S přibývajícím vzdáleností plochy od zdroje dochází k poklesu výkonu na jednotku plochy v dané okamžité poloze, protože vyzařovaný akustický výkon se rozkládá na stále větší plochu. Akustický výkon je definován vztahem [1]

$$P = F v = p v S \quad [\text{W}] \quad (2.2)$$

kde jsou: p – akustický tlak [Pa]

v – rychlost kmitání částic [m.s^{-1}]

S – plocha [m^2]

2.2.3 Akustická intenzita

Akustický výkon procházející jednotkovou plochou se nazývá intenzita. Je to vektorová veličina, popisuje množství a směr toku akustické energie a určuje směr šíření akustického vlnění. Pro rovinné vlny existuje mezi akustickým tlakem a intenzitou vztah

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} \text{ [W.m}^{-2}\text{]} \quad (2.3)$$

kde jsou: p_{ef}^2 – efektivní akustický tlak (časová střední hodnota čtverců okamžitých akustických tlaků)
 ρ – měrná hmotnost vzduchu [kg.m⁻³]
 c – rychlost zvuku ve vzduchu [m.s⁻¹]

2.3 Odraz, ohyb a průchod zvuku

2.3.1 Odraz zvuku

Paprsky akustické vlny se při dopadu na rovinnou plochu s ideální odrazivostí odrážejí podobně jako světelné paprsky od zrcadla, platí pro ně zákon odrazu – úhel odrazu se rovná úhlu dopadu, odražený paprsek leží v rovině paprsku dopadajícího. Pokud rovinná akustická vlna, která se pohybuje v homogenním prostředí dopadne na rovinné rozhraní s jiným médiem, tak se část vlnění odrazí zpět do prostoru a část prochází druhým médiem. Podíl takto odraženého a procházejícího vlnění závisí na úhlu dopadu, objemové hustotě a rychlostech zvuků v obou médiích.

Lom mechanického vlnění pro daná dvě prostředí popisuje Snellův zákon. Uvažujme dvě různá prostředí, jenž mají rovinná rozhraní. Podle Snellova zákona platí

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \quad (2.4)$$

kde jsou: α, β – úhel dopadu, úhel lomu měřené od normály
 v_1, v_2 – rychlosti šíření vlnění v daném prostředí
 n – index lomu

2.3.2 Ohyb zvuku

Pokud akustická vlna narazí na překážku, která je rozměrově malá oproti délce šířící se vlny, dochází k šíření vlnění i do zóny za překážkou v důsledku difrakce. Podle Huygensova principu se každý bod vlny nebo vlnoplochy dá považovat za nový zdroj vlnění, vyzařující zvuk do všech směrů.

Nízkofrekvenční vlny se šíří za překážkou snadněji než vlny vysokofrekvenční. Vysokofrekvenční vlnění tedy vytváří za překážkou výraznější

akustický stín než nízkofrekvenční vlnění. Útlum hluku za bariérou je přitom tím větší, čím je úhel mezi dvěma paprsky (spojnice mezi chráněným místem a horní hranou bariéry a spojnice této hrany se zdrojem hluku) menší. Jinými slovy, protihluková stěna by měla být umístěna co nejbližší zdroji hluku a měla by být pokud možno co nejvyšší.

2.3.3 Součinitel stěnové absorpce

Pokud akustická vlna dopadne na překážku, dochází k přeměně energie vlnění na jiný druh energie, nejčastěji tepelný. Podíl energie, které povrch absorbuje a energie, které na rozhraní daného média dopadá, pak definuje stěnovou absorpci, kterou reprezentuje součinitel absorpce α . Součinitel absorpce stěn se pohybuje v rozsahu od 0 (úplný odraz) do 1 (úplné pohlcení).

$$\alpha = \frac{\text{pohlčená energie}}{\text{dopadající energie}} \quad (2.5)$$

Absorpce je pak ovlivněna různými faktory, jako jsou drsnost či poréznost povrchu, na něž akustická vlna dopadá, ale mění se i s frekvencí vlnění – pro nižší frekvence je součinitel pohltivosti menší a naopak. Koeficient pohltivosti je zpravidla vyšší u pórovitých látek (koberce, závěsy), u hladkých materiálů jako jsou kovy, dlaždice či sklo je velmi malý. Koeficienty některých pevných materiálů pro zvuk s frekvencí 512 Hz popisuje tab. 1.

Materiál	Koef. absorpce	Materiál	Koef. absorpce
Mramor	0,010	Dřevěná podlaha	0,10
Beton	0,015	Linoleum	0,12
Sklo	0,027	Obrazy	0,28
Omítnutá stěna	0,025	Koberce	0,29
Neomítnutá stěna	0,032	Plyš	0,59
Stěna obložená dřevem	0,10	Celotex	0,64

Tab. 1 Koeficienty absorpce pro frekvenci 512 Hz [8]

2.4 Veličiny charakterizující hluk

Jako základní deskriptor pro charakterizování hluku slouží hladina akustického tlaku L_p [dB], která je vztažena k referenčnímu akustickému tlaku 20 μPa . Ten odpovídá prahu slyšení na kmitočtu 1 kHz. Hladina akustického tlaku je dána vztahem:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \text{ [dB]} \quad (2.6)$$

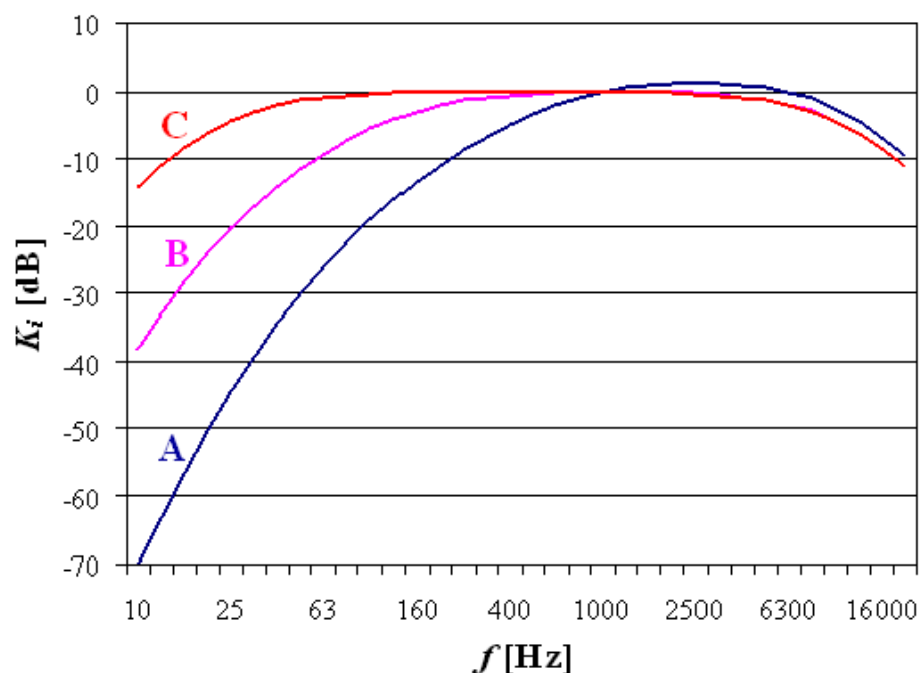
kde jsou: p – akustický tlak v daném bodě akustického prostoru [Pa]

p_0 – referenční akustický tlak ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)

Vyjádření míry hluku v decibelech umožňuje přehlednější třídění hlukových údajů a vystihuje fyziologii sluchu (lineární přírůstek sluchového vjemu odpovídá logaritmu změny podnětu). Dynamický rozsah akustického tlaku se pohybuje od prahu slyšení 20 μPa do prahu bolesti 200 Pa což odpovídá rozsahu 140 dB. Lineární přírůstky hladin odpovídají kvadratickému nárůstu hodnot akustického tlaku. Například těsně nad prahem slyšení je nárůst hladiny akustického tlaku o 2 dB nevýznamný, na 100 dB však stejný nárůst znamená podstatný nárůst hluku.

Citlivost lidského sluchu není v závislosti na kmitočtu slyšitelného rozsahu zvuku konstantní. Nejvyšší citlivost se pohybuje v rozsahu kmitočtů 1 – 4 KHz. Směrem k obou krajním mezím slyšitelného rozsahu pak citlivost sluchu výrazně klesá. Aby bylo možné jednoduše určit hlukovou expozici, které jsou lidé vystaveni, zavádějí se do měřicího řetězce zvukoměru tzv. váhové filtry. V dnešní době uvažujeme hlavně váhový filtr A, filtr B již ztratil svůj význam. V některých případech se uplatňují ještě také filtry C a D (letecká doprava).

U váhových filtrů jsou zavedeny tzv. korekce K_i , kterými jsou hlukoměry běžně vybaveny. Ke každé skutečně změřené hladině zvuku přičte příslušnou korekci a přepočte hladinu zvuku tak, jak ji vnímá lidský sluch. Závislost korekce K_i na frekvenci pro váhové filtry A, B, C je zobrazena na obr. 2.



Obr. 2 Průběhy váhových křivek filtrů typů A, B a C

Odečítání okamžitých hladin akustického tlaku p_A a jejich průměrování v čase není v reálných podmínkách příliš vhodné, pro hodnocení hluku v životním prostředí se proto zavedlo praktičtější vyjádření pomocí ekvivalentní hladiny akustického tlaku L_{AeqT} . Ekvivalentní hladina akustického tlaku L_{AeqT} odpovídá energeticky stejné hladině akustického tlaku, která by byla konstantní po celou dobu trvání expozice T tj.

$$L_{AeqT} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2(t)} dt \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.7)$$

kde jsou: T – stanovený časový interval [s]
 $p_A(t)$ – akustický tlak A v čase t [Pa]
 p_0 – referenční akustický tlak ($=20 \cdot 10^{-6}$ Pa)

Měření hluku železnice popisuje norma ČSN EN ISO 3095 železniční aplikace – Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly. Rozsah frekvencí, ve kterých se měří a vyhodnocuje stanovuje ČSN EN ISO 266 (Vyvolené kmitočty) a udává rozsah měření minimálně v třetino-oktávových pásmech od 31,5 Hz do 8 KHz.

2.5 Útlum šíření zvuku ve venkovním prostoru

2.5.1 Absorpce ve vzduchu

Zvukové vlny postupující homogenním prostředím ve vzduchu ztrácí svoji energii vlivem viskozity a difúze a tento jev se nazývá „klasická absorpce“. Je úměrná čtverci frekvence zvuku a nezávisí na vlhkosti zvuku. Proces, při kterém zvuková vlna ztrácí energii závisící na vlhkosti vzduchu souvisí s uvolňováním kyslíku ve vzduchu. Ve většině případů je tato „molekulární absorpce“ vyšší než absorpce klasická [2].

2.5.2 Útlum vlivem mlhy, deště a sněhu

Zvukové vlny mají v mlhavých dnech, či dnech, kdy lehce padá sníh delší dosah i když absorpce je zvýšená. Za těchto meteorologických podmínek je slunce zakryto a teplotní gradienty jsou malé a malé jsou také gradienty větru [2]. Z tohoto vyplývá, že přídatný útlum způsobený gradienty větru a gradienty teplotními je malý. Šíří-li se zvuk venkovním prostorem při dešti, je nutno počítat se změnou hlukového pozadí způsobeného vodními srážkami. Hladina takového hlukového pozadí může pak být velmi vysoká. A naopak, pokud leží na zemi vrstva sněhu, hluková pozadí jsou značně ztlumena a za těchto podmínek se neměří.

2.5.3 Útlum způsobený stěnami a stromy

Budovy a jiné tuhé překážky mají za následek značný tzv. přídatný útlum, způsobený hlavně akustickým stíněním. S rostoucím kmitočtem přídatný útlum roste, protože zvukové vlny se s rostoucí frekvencí kolem překážek méně ohýbají.

2.5.4 Útlum způsobený gradienty větru a teploty

Ve venkovním prostoru se často setkáváme se značnými gradienty teplot a rychlosti větru s výškou. Tyto gradienty pak způsobují refrakci zvukových vln v důsledku změny hodnoty rychlosti zvuku s výškou. Při těchto podmínkách pak může vzniknout akustický stín, tj. vzniká oblast kam energie přímé vlny neproniká. S oblastí stínu se můžeme setkat v místech, která leží od zdroje ve směru proti větru, kde gradient větru ohýbá zvukové vlny vzhůru [2]. Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly se proto mají provádět při rychlosti větru menší než 5 m/s (měřeno ve výšce mikrofону) a neprší-li nebo nesněží. Teplota, vlhkost, barometrický tlak, rychlost a směr větru musí být popsány v protokolu o zkoušce.

3. Snižování hluku od železniční dopravy pomocí protihlukových bariér

Protihlukové stěny jsou nejčastěji používaná, nejnákladnější a mnohdy jediná možná protihluková opatření. Pro porovnání účinnosti protihlukových stěn se zavádí tzv. vložný útlum

$$D_{IL} = (L_{ref,A} - L_{ref,B}) - (L_{r,A} - L_{r,B}) \quad [\text{dB}] \quad (2.8)$$

kde jsou: $L_{ref,B}$ – hl. ak. tlaku na referenčním místě pro situaci „před“

$L_{r,B}$ – hl. ak. tlaku v místě příjmu pro situaci „před“

$L_{ref,B}$ – hl. ak. tlaku na referenčním místě pro situaci „po“

$L_{r,A}$ – hl. ak. tlaku v místě příjmu pro situaci „po“

Norma ČSN ISO 9613-2 uvádí, že vložný útlum bariéry v libovolném oktávovém pásmu, který je větší než 20 dB pro jednoduchou difrakci (tj. pro tenké bariéry) nebo větší než 25 dB pro dvojnásobnou difrakci (tj. pro silné bariéry) by neměl být uvažován. V praxi běžně používanými protihlukovými stěnami a valy nelze vyšších útlumů dosáhnout. Pokud vyžadujeme vyšší útlum, je třeba učinit příslušná opatření již na samotném zdroji hluku – optimalizovat povrch a nerovnosti kolejnic a kol, zvážit možnosti kapotáže podvozku vagónů, aerodynamické tvarování a další.

3.1 Používané materiály protihlukových stěn

Důležitým parametrem materiálů protihlukových stěn je závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci vlnění. Pohltivost je zejména důležitá z důvodu potlačení vzniku stojatých vln při konstrukci oboustranných bariér. Mezi takové materiály, které výrazně pohlcují zvuk patří porézní materiály. Používají se ve formě rohoží, koberců, desek či různě tvarově předlisovaných elementů.

Protihlukové stěny se nejčastěji vyrábějí z recyklovaného plastu, dřeva, polymethylmetakrylátu, lehkých kovů a betonu. Cenově nejvýhodnější a v současné době nejrozšířenější jsou protihlukové stěny z recyklovaného plastu a dřeva (60 % ceny betonových panelů). Při vyšších nárocích na estetiku a přírodní vzhled jsou zajímavým řešením gabionové stěny, jejichž porézní struktura je tvořena lomovým kamenem (různé frakce), který je umístěný v drátěných koších.

3.2 Akustické vlastnosti protihlukových stěn - kategorizace

Základní rozdělení je na stěny s reflexním povrchem a stěny s absorpčním povrchem. V praxi se k hodnocení akustických vlastností používá kategorií zvukové pohltivosti DL_α a vzduchové neprůzvučnosti DL_R uvedených v ČSN EN 1793–1,2.

3.2.1 Zvuková pohltivost

Zvuková pohltivost DL_α je určována podle ČSN EN 1793–1 podle vztahu

$$DL_\alpha = -10 \log \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} \alpha_{Si} 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1L_i}} \right) [\text{dB}] \quad (2.9)$$

kde α_{Si} – činitel zvukové pohltivosti pro každé 1/3 oktávové pásmo v rozsahu 100 Hz až 5 kHz
 L_i – je hladina akustického tlaku normalizovaného spektra hluku pro každé 1/3 oktávové pásmo v rozsahu 100 Hz až 5 kHz

Je-li u pozemní komunikace odrazivý povrch, potom k efektivnímu snížení hluku odraženého od tohoto povrchu je doporučeno použít na straně bariéry přivrácené k pozemní komunikaci materiál pohlcující zvuk. Podle hodnoty DL_α jsou protihlukové stěny rozčleněny do pěti kategorií dle tab. 2:

Kategorie	A0	A1	A2	A3	A4
DL_α [dB]	neurčeno	< 4	4 – 7	8 – 11	> 11
Charakteristika	-	nízkopohltivé stěny	částečně pohltivé	pohltivé stěny	vysoce pohltivé stěny

Tab. 2 Kategorizace PHS podle zvukové pohltivosti

3.2.2 Vzduchová neprůzvučnost

Vzduchová neprůzvučnost DL_R je určována dle ČSN EN 1793-2 je dána vztahem

$$DL_R = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1L_i} 10^{-0,1R_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{10L_i}} \right) [\text{dB}] \quad (2.10)$$

kde R_i – vzduchová neprůzvučnost v i -tém třetinooktávovém pásmu.

Protihlukové clony u pozemních komunikací musí poskytovat dostatečnou zvukovou izolaci tak, aby zvuk procházející clonou přímo byl nevýznamný v porovnání se zvukem šířícím se přes vrchol clony. Podle hodnoty DL_R jsou protihlukové stěny rozděleny do čtyř typů dle tab. 3

Kategorie	B0	B1	B2	B3
DL_R [dB]	neurčeno	< 15	15 – 24	> 24
Charakteristika	-	neprůzvučné stěny	průměrně neprůzvučné stěny	dokonale neprůzvučné stěny

Tab. 3 Kategorizace PHS podle vzduchové neprůzvučnosti

Obecně platí, že čím je plošná hustota stěny vyšší, tím je vyšší i stupeň vzduchové neprůzvučnosti. Výhodou protihlukových stěn tvořených lomovým kamenem je tedy to, že je jejich plošná hustota vysoká a tím je vysoká i jejich vzduchová neprůzvučnost.

3.3 Materiály vybraných společností - porovnání akustických parametrů

3.3.1 Panely z recyklovaného plastu „TRAPLAST“

Panel TRAPLAST je vyrobený ze 100% plastového odpadu, opětovně plně recyklovatelný, mrazuvzdorný, nevyžadující žádnou údržbu, určený pro použití ve venkovním prostoru. Vyznačuje se výbornými akustickými parametry se zvukovou pohltivostí $DL_\alpha = 10$ dB (kategorie A3).

3.3.2 Izolační desky „ORSIL“

Tepelně izolační a zvuko-pohltivé desky z čedičových vláken se používají pro zlepšení vzduchové neprůzvučnosti zejména stavebních příček a v kombinaci s perforovanými materiály (plech), laťovými obklady nebo sítěmi zajišťujícími mechanickou odolnost jako pohltivé plochy protihlukových stěn. Tyto desky jsou ekologické a zdravotně nezávadné pro lidský organismus, protože čedičová vlákna se

vyrábí z přírodních a biologicky rozpusťitelných vláken. Zvuková pohltivost DL_{α} desek ORSIL je 14,9 dB při tloušťce 60 mm. Zvuková neprůzvučnost DL_R závisí na použité skladbě materiálu (plech, dřevo, plast) protihlukové stěny.

3.3.3 Protihlukové desky „VELOX“

Desky VELOX jsou vyrobené ze směsi dřevoštěpky, cementu a vodního skla. Jsou odolné proti vodě, soli, mrazu, hnilobě a mechanickému poškození. Porézní povrch zajišťuje vynikající tlumící vlastnosti a pohlcování zvuku. Vzduchová neprůzvučnost této desky je $DL_R = 25$ dB (kategorie B3). Zvuková pohltivost DL_{α} se pohybuje v rozmezí od 8 do 13 dB (kategorie A3, A4).

3.3.4 Cemento-dřevěné tvárnice „DURISOL“

Jsou tvárnice tvořené z jedné středové nosné konstrukční strany z betonu obložené minerálním vláknem. Minerální dřevité vlákno se pokládá na nosnou část v okamžiku lití betonu. Díky členitému a pórovitému povrchu mají výborné zvukopohltivé vlastnosti a řadí se tak do kategorie A3 zvukové pohltivosti a B3 vzduchové neprůzvučnosti. Beton, kterým se tvarovky vyplňují má pozitivní dopad na vzduchovou neprůzvučnost. Příklad tvárnice hlukového absorbéru Durisol znázorňuje obr. 3.



Obr. 3 Tvárnice Durisol

3.3.5 Panel z recyklované gumy "PHS2"

Snahou při vývoji a výrobě protihlukových stěn je využívání recyklovaných materiálů. Jako vhodný zdroj se nabízejí použité pneumatiky z automobilů, které automobilový průmysl generuje ve velkém množství. Základním produktem je lisovaná deska z gumového granulátu s vynikajícími akustickými parametry, kterou je možné připevnit na podložku z recyklovaného plastu, dřeva či betonu. Zvuková pohltivost DL_{α} je přibližně 9 dB a vzduchová neprůzvučnost $DL_R = 37$ dB. Příklad použití desek z gumového granulátu je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4 Sendvičový protihlukový systém s deskami z recyklované gumy

Vhodným řešením je používání dřeva v kombinaci s kamennou vlnou anebo s recyklovanými materiály, jako je recyklát z gumy [5]. Snižování cen granulátu z gumy a pneumatik na trhu v poslední době značně zvyšuje atraktivitu používání tohoto materiálu s tím, že odpad se tak stává hodnotnou surovinou či polotovarem pro výrobu dalších produktů.

3.4 Vliv tvaru hran protihlukových stěn na jejich účinnost

Kromě akustických vlastností je účinnost bariér ovlivněna dalšími faktory – zejména jejím tvarem a polohou umístění bariéry vzhledem ke zdroji hluku a chráněnému místu. Důležité také je, aby zástěna při průjezdu vlaku či vozidel nebyla sama zdrojem hluku, např. se nerozkmitala a následně nevyzařovala. Jednou z možností potlačení tohoto efektu je potažení zástěn gumou.

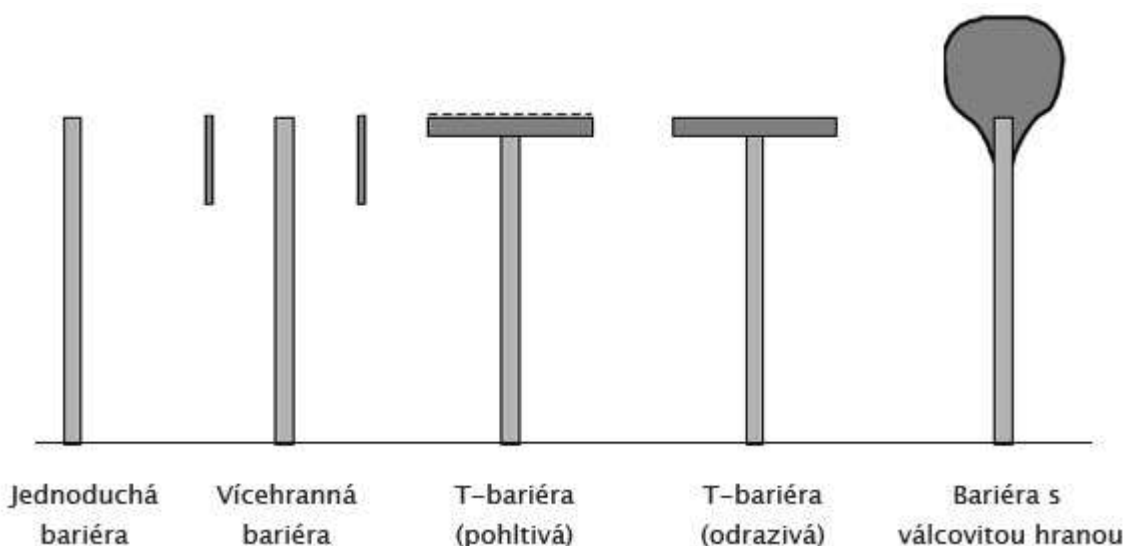
Mnohem významnější je však vznik difragovaných vln na hranách bariéry. Tento efekt je značně závislý na tvaru hran, proto si tyto efekty rozebereme podrobněji s tím, že pro diskusi použijeme výsledky měření provedených „in situ“ tj. na místě. Technická specifikace způsobu měření přitom specifikuje předběžná norma ČSN P CEN/TS 1793-4: "Zařízení pro snížení hluku silničního provozu - Zkušební metoda pro stanovení akustických vlastností - Část 4: Vnitřní charakteristiky - Určení hodnot difrakce in situ". Tato technická specifikace popisuje zkušební metodu pro stanovení akustických vlastností zařízení pro snížení hluku silničního provozu. Metoda se používá pro stanovení vnitřních charakteristik a k určení hodnot difrakce „in situ“. Jedná se o místa kde jsou podél komunikace instalována zařízení pro snížení hluku silničního provozu opatřená na vrchní části přídatným akustickým prvkem, který má zvýšit útlum zvuku především v difrakčním zvukovém poli.

3.4.1 Metodika měření používaná při sledování vlivu hran bariér na vložný útlum

Pro měření byly vybrány profily stěn, které jsou zobrazeny na obr. 5. Všechny bariéry měly základní výšku 2 m, 5 m, šířku 0,12 m a jsou postaveny na 0,5 m vysokém betonovém základu.

Horizontální hranu bariér profilu T tvořily hliníkové panely, umístěné kolmo na bariéru pomocí lehkých hliníkových nosných rámců se zanedbatelnou hmotností. T-bariéra označená jako pohltivá, měla na horní ploše vrstvu z kamenné vlny, zaručující povrch s vysokou absorpcí. T-bariéra označená jako odrazivá má na horní ploše hladký hliník a její povrch je reflexní. Vícehranná bariéra je jednoduchá bariéra doplněná o dva dodatečné rovnoběžné tenkostěnné ocelové panely souběžné s horní hranou základního tvaru bariéry.

Válcovitá hrana v případě poslední bariéry má dutý profil, vnější povrch je perforovaný, potažený vrstvou minerální vlny o tloušťce 50 mm.

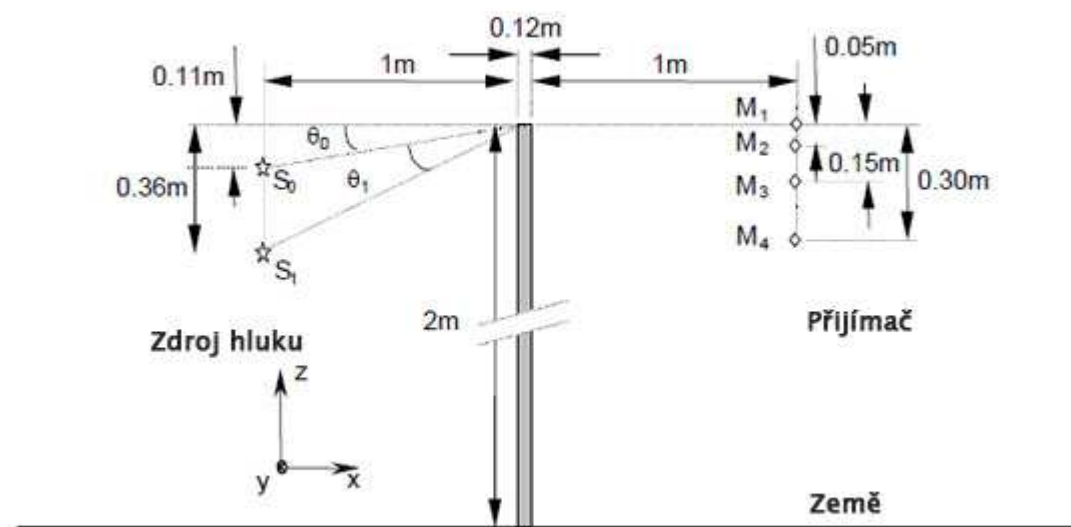


Obr. 5 Geometrie bariér

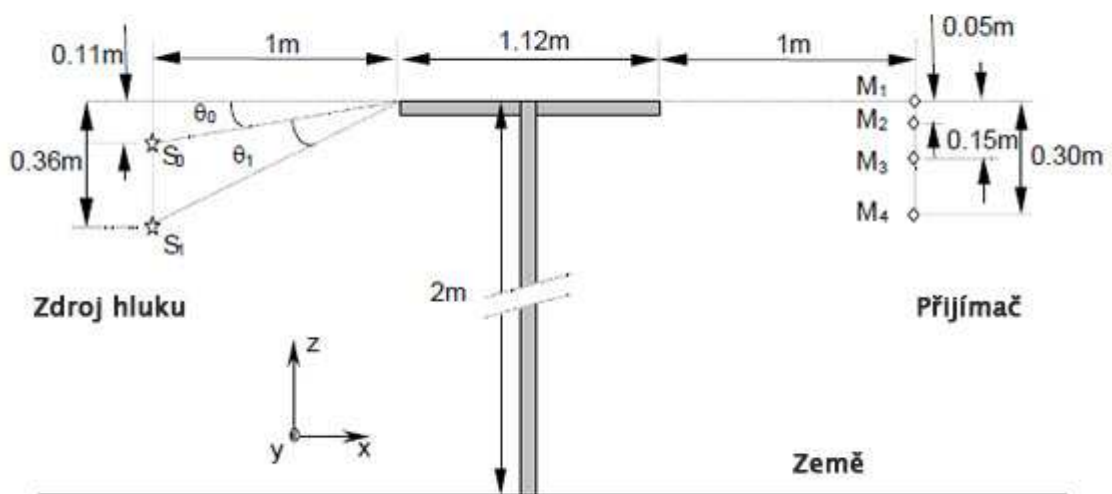
Zdroj hluku a přijímač byly umístěny na opačných stranách bariéry v různých výškách a směřovaly k horní hraně bariéry. Jejich vzdálenost od nejzazšího bodu hrany bariéry byla 1 m. Použitý zdroj hluku byl 20W reproduktor. Měření bylo provedeno pomocí impulsní měřicí metody MLS. U každé bariéry vystřídal zdroj hluku dvě různé pozice a přijímač byl umístěn na čtyřech pozicích. Jednotlivé polohy vysílače S_i a přijímače M_i (viz obr. 6 - 9) jsou uvedeny v tabulce 5.

		Výška pod vrcholem bariéry [m]	Sklon [°]
Pozice zdroje	S_0	0,11	6,3
	S_1	0,36	19,8
Pozice přijímače	M_1	0	0
	M_2	0,05	2,9
	M_3	0,15	8,5
	M_4	0,3	16,7

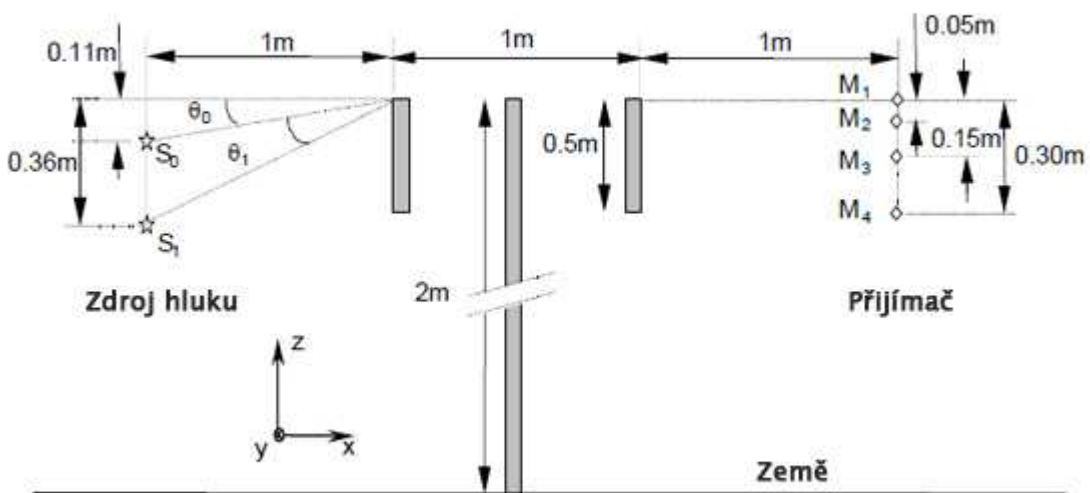
Tab. 5 Výška zdroje hluku a jeho přijímače



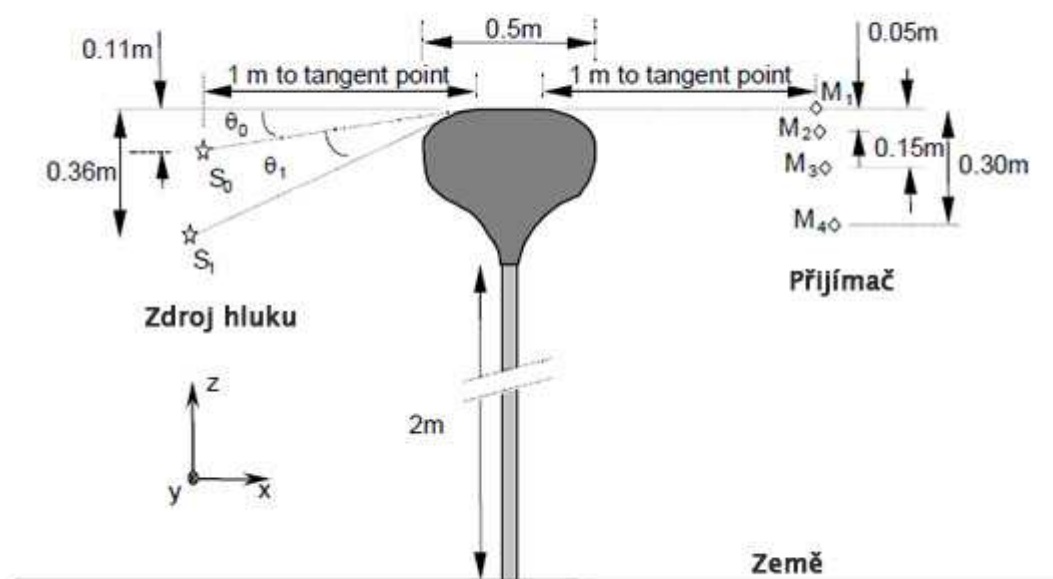
Obr. 6 Jednoduchá bariéra



Obr. 7 Bariéra profilu „T“



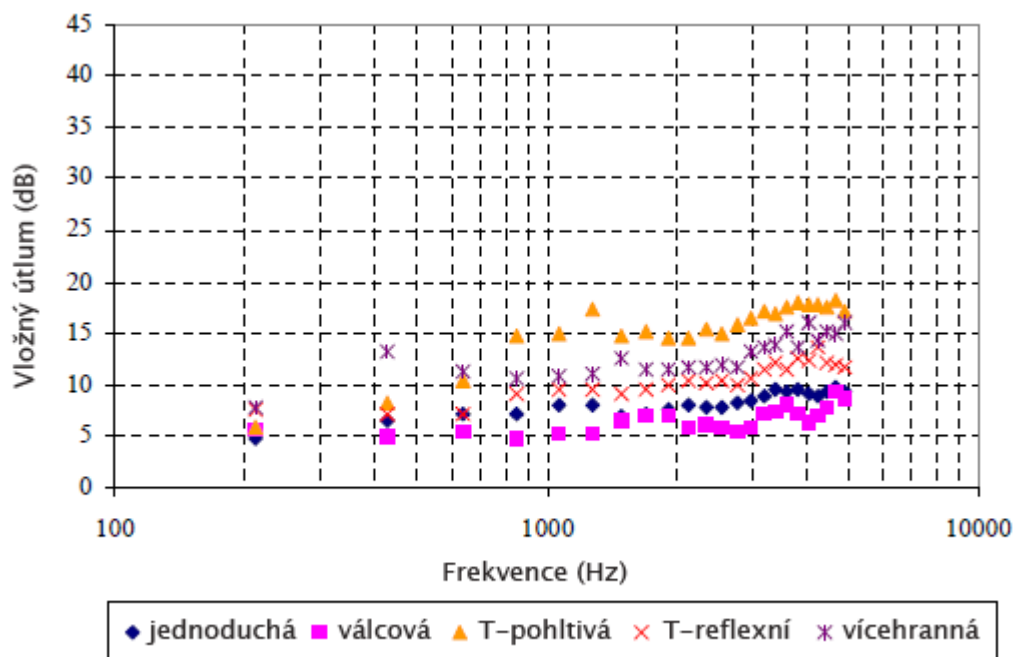
Obr. 8 Vícehranná bariéra



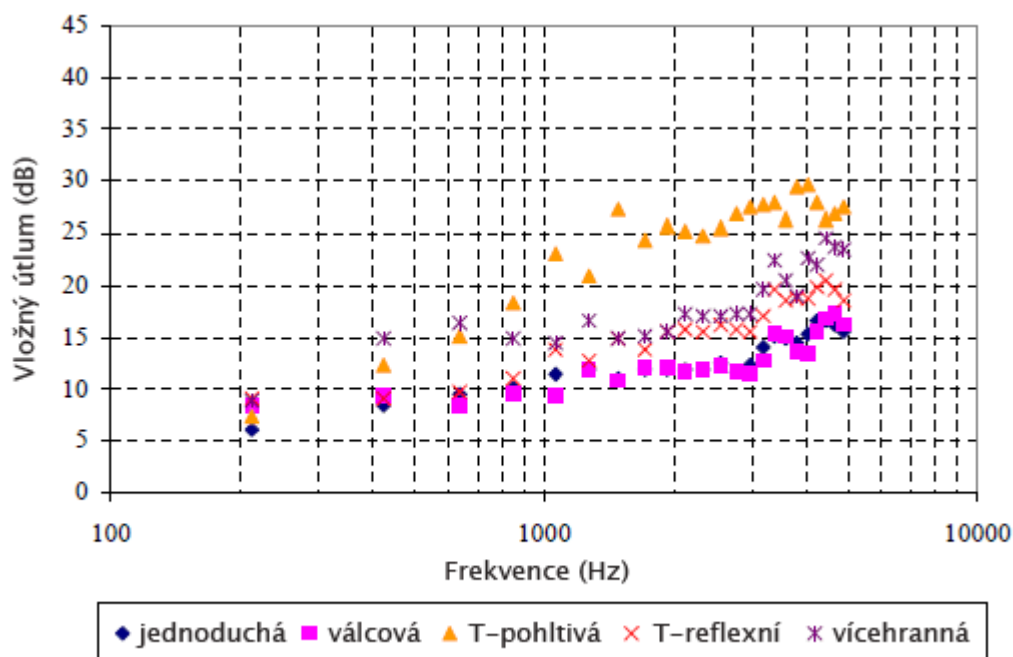
Obr. 9 Válcová bariéra

3.4.2 Hodnoty útlumu bariér s různým tvarem difrakční hrany

Z hlediska určování vložného útlumu bariér byla použita metodika popsaná v práci [7]. Vložný útlum bariéry obecně pro všechny konfigurace tvaru bariéry s rostoucí frekvencí vzrůstá. V oblasti nízkých kmitočtů (100 Hz) byly vložné útlumy testovaných bariér srovnatelné, neboť pro tyto frekvence je vlnová délka šířících se akustických vln srovnatelná s celkovým rozměrem jednotlivých hran. Jak je zřejmé z obr. 10 a obr. 11, tvarování horní hrany však již v oblasti středních a vyšších kmitočtů (řádově kHz) výsledný vložný útlum protihlukové stěny značně ovlivňuje. Bariéra profilu „T“ s pohltivým povrchem vychází z pohledu vložného útlumu nejpříznivěji, naopak jednoduchá a válcová bariéra dosáhly nejmenšího vložného útlumu, pouze přibližně 5 – 10 dB. Na vysokých frekvencích (5 kHz) rozdíl vložného útlumu mezi bariérou profilu "T" s pohltivým povrchem a jednoduchou bariérou dosáhl až 15 dB. Proto pro vysokofrekvenční zdroje hluku (jako jsou pískání brzd vlakových souprav při zastávce ve vlakových stanicích nebo nákladních souprav na rozřadovacích nádražích) lze zástěny s upravenou horní hranou doporučit, neboť zde lze významně zvýšit dosažený vložný útlum.



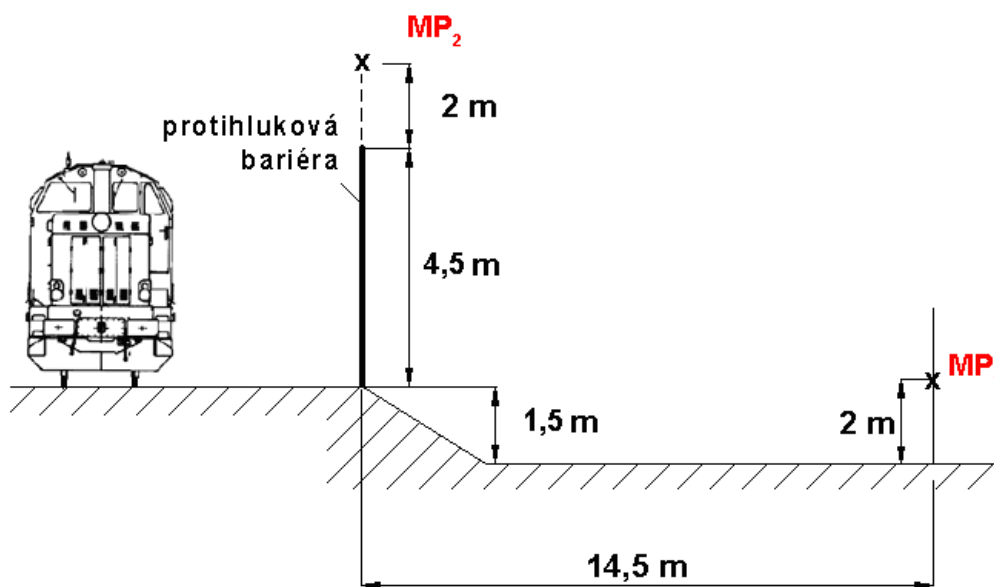
Obr. 10 Spektrum vložného útlumu pro přijímač ve výšce vrcholu bariéry a zdroj hluku ve výšce 11 cm pod hranou bariér [7]



Obr. 11 Spektrum vložného útlumu pro přijímač ve výšce vrcholu bariéry a zdroj hluku ve výšce 36 cm pod hranou bariér [7]

3.5 Naměřené hodnoty vložného útlumu pro jednoduchou dřevěnou bariéru

Při zpracování této práce jsem využil praktických zkušeností, které jsem získal při měření hladiny hluku vlakových souprav v terénu. Cílem bylo monitorovat a posoudit snížení hladiny hluku z provozu železnice pro terénní konfiguraci zobrazenou na obr. 13.



Obr. 12 Schématické znázornění situace

Pro měření byly použity hlukoměry SVAN 959 a RION NA-28. Průměrné naměřené hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku při průjezdu vlakových souprav v místě příjmu MP_1 byly pro situaci před stavbou protihlukové bariéry $L_{MP1,B} = 68,9$ dB a v místě příjmu MP_2 byla naměřena hodnota $L_{MP2,B} = 73,5$ dB. Průměrné naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku při průjezdu vlakových souprav byly v místě příjmu MP_1 pro situaci po stavbě protihlukové bariéry $L_{MP1,A} = 60,4$ dB a na referenčním místě MP_2 $L_{MP2,A} = 73,0$ dB. Hladina akustického tlaku pozadí se při měření pohybovala od 43,8 dB do 50,1 dB. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.

	Místo příjmu MP ₁	Místo příjmu MP ₂
Situace před stavbou bariéry	$L_{MP1,B} = 68,9 \text{ dB}$	$L_{MP2,B} = 73,5 \text{ dB}$
Situace po stavbě bariéry	$L_{MP1,A} = 60,4 \text{ dB}$	$L_{MP2,A} = 73,0 \text{ dB}$

Tab. 6 Naměřené hodnoty v referenčním místě a místě příjmu v situaci před a po stavbě bariéry

Měřená protihluková bariéra byla jednoduchá a byla zhotovena ze dřeva. Základ tvořil dřevěný panel z desek tloušťky 1,7 cm, desky byly vyztuženy půlkruhovými latěmi. Desky byly obaleny z obou stran minerální vatou tloušťky 5 cm, vata byla chráněna netkanou (průzvučnou) textilií a pevnou síťovinou. Délka stěny byla 100 m, výška 4,5 m. Dle údajů výrobce zvuková pohltivost bariéry měla dosahovat hodnoty $DL_{\alpha} = 10 \text{ dB}$ (tj. kategorie A3) a vzduchová neprůzvučnost měla být vyšší než $DL_R > 24 \text{ dB}$ (kategorie B3).

Hodnota vložného útlumu protihlukové stěny D_{IL} v dB byla určena dle vztahu (viz. norma ČSN ISO 10847)

$$D_{IL} = (L_{MP2,A} - L_{MP2,B}) - (L_{MP1,A} - L_{MP1,B})$$

$$D_{IL} = (73,0 - 73,5) - (60,4 - 68,9) = 8,0 \text{ dB}$$

Tato hodnota vložného útlumu je poměrně nízká z toho důvodu, že bariéra zřejmě odstínila hlavně hluk podvozku vlakových souprav, který je však jen dílčím zdrojem hluku. V další fázi akustických úprav je proto plánováno s akustickými úpravami výfuku dieselové lokomotivy (tlumič výfuku) a tlumičů žaluzií chlazení a kompresoru. Tyto zdroje hluku jsou totiž jednak umístěny ve vyšších výškách (od 3,1 do 4,0 m nad úrovní kolejí) a jednak vyzařují převážně hluk na nízkých kmitočtech, který akustická bariéra účinně neodstiňuje.

4. Výpočetní systémy používané pro matematické modelování šíření hluku

Účinnost protihlukových stěn by se měla ověřovat již ve fázi jejich návrhu pomocí matematického modelování. Tyto predikce se přitom provádějí buď aplikací empirických vztahů (např. Hluk+) nebo na základě výpočtu vlnového pole. Platnost empirických vztahů však bývá omezena na případ rovinného terénu a jednoduché typy bariér. Aby se tyto empirické modelové výsledky co nejvíce přiblížily reálným hodnotám, do vztahů se zavádějí korekce na mechanismy, které mohou případně ovlivnit šíření hluku od zdroje směrem k přijímači jako je např. tvar bariéry, vliv prostředí v okolí bariéry, atmosférické podmínky apod. Pro komplikovanější reliéfy terénu a tvary bariér by proto měly být aplikovány algoritmy popisující šíření hluku od jeho zdroje k vyšetřovanému místu na základě řešení elastodynamických rovnic, vzhledem k rozměru studovaných lokalit (ve srovnání s vlnovou délkou šířících se vln) přitom jsou zpravidla aplikovány procedury založené na geometrické akustice.

4.1 Geometrická akustika

Programové systémy založené na geometrické akustice simulují šíření hluku ve venkovním prostředí na základě vysokofrekvenční aproximace řešení elastodynamických rovnic. Výpočty jsou přitom poměrně rychlé, přesnější varianty paprskových metod (pracující i s členy vyšších řádů vysokofrekvenčního řešení vlnové rovnice) umožňují zahrnout i vliv vícenásobných odrazů, různé typy difrakce apod.

4.1.1 Metoda zrcadlových zdrojů

Princip metody vychází z rovnosti úhlu dopadu a odrazu na rovinných rozhraních. Pak příjem zvuku odraženého od překážky můžeme nahradit signálem od zdroje nacházejícího se za překážkou tj. předpokládá se vytvoření virtuálních zdrojů zvuku za všemi odraznými stěnami. Je možné vyšetřovat odrazy i vyšších řádů, ale jejich počet exponenciálně narůstá s požadovaným řádem. Výhodou metody je vysoká přesnost výpočtu a fakt, že polohy obrazů zdrojů nezáleží na poloze přijímače. Nevýhodou jsou vysoké nároky na výpočetní prostředky a čas, proto musíme volit řád odrazů s ohledem na výpočetní kapacitu. Nevýhodou je neschopnost zahrnout do výpočtů i vlnové jevy tj. difrakci paprsků okolo překážek srovnatelných s vlnovou délkou studovaných vln.

4.1.2 Ray-Tracing

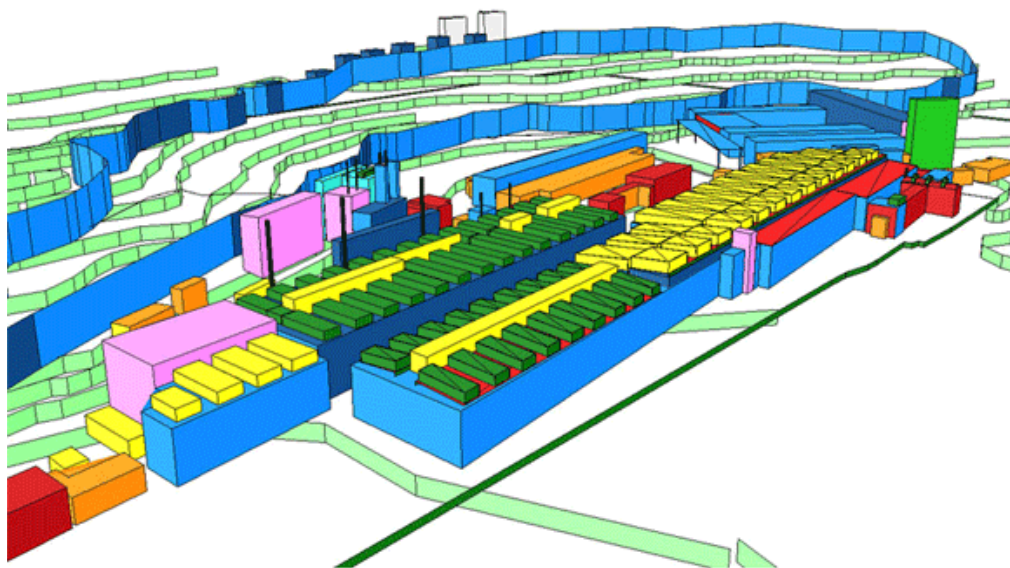
Princip metody spočívá ve vysílání paprsků ze zdroje, přitom se uvažuje pokles energie vlnění podél paprsku se vzrůstající vzdáleností jak geometrickým rozšiřováním vlnové fronty tak i ztráty odrazem na površích. Historie zvukového paprsku se přitom zaznamenává od okamžiku jeho vygenerování do jeho zániku pod určitou limitní hodnotu. Přehled „navštívených“ stěn, jejich indexy odrazu, čas a energie se přitom během výpočtu ukládají (tzv. Ray-Tracing). Zpravidla je možné uvažovat dva typy odrazu, a to sekulární a difúzní. Sekulární odraz je zrcadlový odraz paprsku, který se řídí zákony geometrické akustiky, difúzní odraz zohledňuje drobné nerovnosti či členitosti povrchu překážky. Výhoda této metody spočívá v její jednoduchosti, výpočty jsou zpravidla velmi rychlé. Nevýhodou je, stejně jako u metody zrcadlových zdrojů, že není možné zároveň uvažovat vlny difragované a vlny násobně odražené.

4.1.3 Cone-Tracing

Jisté zlepšení oproti jednoduchému Ray-Tracingu přináší metoda Gaussových svazků (Cone-Tracing) tj. trasování šíření vlnění v okolí kužele, v jehož ose je zvukový paprsek. Při kolizi s překážkou je uvažována změna amplitudy vlnění na podstavě kužele tj. ve výpočtu je částečně simulován i ohyb zvuku na překážkách.

4.2 Současně používané výpočetní systémy pro matematické modelování šíření hluku

Ze současných u nás nejrozšířenějších programů lze zmínit software CadnaA, LimA, Raynoise, Soundplan. Tyto programy používají k výpočtu šíření zvuku ve venkovním prostoru mezinárodní metodiku ISO 9613-2, která zohledňuje mimo jiné i vliv difrakční hrany, násobných odrazů apod. Zásadní význam pro správnost predikce výpočtů v různých programech je nastavení počátečních podmínek výpočtu a správnost vstupních podkladů (tj. údaje o poloze zdrojů, frekvenčním složení zdrojů hluku v dané lokalitě, geometrii terénu pomocí vrstevnic, údaje o pohltivých a odrazných plochách apod.). V programu LimA (viz obr. 13) je možné použít k modelacím hlukové situace i složitější tvar zástěn (např. šikmé, lomené, konzolové, galériové a tunelové).



Obr. 13 Hlukový model areálu válcoven vytvořený v programu LimA, ArcelorMittal Frýdek – Místek
 [http://www.akson.cz]

Dle zkušeností akustiků se však v praxi výsledky měření v terénu a výsledky matematického modelování v některých případech liší. To je způsobeno celou řadou faktorů, které mohou výsledek výpočtů ovlivnit a které je obtížné při simulaci přesně zohlednit. Jedná se hlavně o počet odrazů, velikost oblasti, ve které je s odrazy počítáno, pohltivost terénu, segmentace plošných a liniových zdrojů hluku, klimatické podmínky atp. Jako základní prostředek jsou tyto hlukové softwary dostačující a dávají dobré výsledky pro základní geometrické tvary stěn a jednoduché konfigurace terénu.

Pro přesnější zkoumání jevů difrakce na hraně složitých protihlukových stěn a složité konfigurace terénu by zřejmě bylo nutné použít komplikovanější výpočetní procedury (např. Sysnoise) s tím, že jejich použití je však omezeno velikostí studovaných objektů. Nejpřesnější výsledky modelování by poskytovala metoda konečných prvků, jejich aplikace však z důvodu nároků na rozsáhlost studovaných objektů v praxi není možná, její použití proto připadá v úvahu jen pro detailní studium difrakčních jevů tj. stanovování frekvenčních a směrových závislostí difrakčních koeficientů apod.

Závěr

V práci je provedena diskuse šíření zvuku v otevřeném prostoru se zaměřením na stínění železničního hluku pomocí akustických bariér. Je popsáno rozdělení protihlukových bariér podle materiálů při jejich konstruování a podle geometrie tvaru difrakčních hran. Jsou uvedeny konkrétní příklady konstrukcí protihlukových bariér současně vyráběných na našem a slovenském trhu.

Na základě výsledků hlukových měření uvedených v literatuře pro různé typy bariér je kvantitativně rozebrán možný vliv difrakce na horní hraně bariér různých typů. Na základě provedené analýzy je ukázáno, že vzhledem k vysokofrekvenčnímu charakteru železničního hluku je tvar difrakční hrany významným faktorem ovlivňujícím efektivitu clonění hluku. Je ukázáno, že z 6 bariér s různými tvary horní hrany vykazuje nejvyšší vložný útlum na všech frekvencích bariéra tvaru T s tím, že pro zvýšení její účinnosti je vhodné opatřit její povrch materiálem se zvýšenou absorpcí.

Na základě výsledků měření firmy Akson, s.r.o (kde jsem se účastnil praktického měření hladiny hluku projíždějících vlakových souprav) prováděných poblíž areálu firmy ArcelorMittal Ostrava, a.s. je ukázáno, že z hlediska vložného útlumu použité bariéry je zřejmě podstatná i výška a frekvence zdroje. Z tohoto důvodu by zřejmě prováděná protihluková opatření pomocí bariér měla být doprovázena i opatřeními zaměřenými na potlačení hluku hned u zdroje tj. v daném případě odhlučnění dieselových agregátů a tlumičů žaluzií chlazení a kompresoru.

Z hlediska matematického modelování je zdůrazněn význam paprskových metod pro predikci šíření hluku na větší vzdálenosti. Je zároveň zdůrazněno, že při aplikaci metod matematického modelování šíření hluku by měla být prováděna verifikace výsledků modelování pomocí kontrolních akustických měření.

Seznam použité literatury

- [1] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. PC-DIR Real 1998 Brno, 180 s.
- [2] BERANEK, L.L. *Snižování hluku*. Praha 1965
- [3] ŘÍMAN, P; PELLANT K. *Modelování vlivu geometrie a akustických vlastností povrchu na účinnost protihlukových bariér*. Ve sb. VI. konference „Nové stavební hmoty a výrobky“, Eds. J. Ledererová, J. Knězek. s. 132-135, VUSTAH, Brno 2002
- [4] JANDÁK, Z. *Hluk v pracovním prostředí* [online]. 13.7. 2007, [cit. 2010-21-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/hluk-v-pracovnim-prostredi>>
- [5] LIPTAI, P; MORAVEC, M; FRIMER, R. *Analýza súčasných trendov využívania materiálov v protihlukových stenách pri pozemných komunikáciách*. Novus Scientia 2007
- [6] HASSALL; ZAVERI. *Akoustic Noise Measurements*. Dánsko: Bruel&Kjaer, 1960. 42 s. ISBN neuvedeno.
- [7] WATTS, G; SURGAND, M; MORGAN, P. *Transport Research Foundation* [online]. [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <[http://www.transportresearchfoundation.co.uk/PDF/Watts%20et%20al%20\(2002\)%20MLS%20Barriers%20\(IOA%20SC02\).pdf](http://www.transportresearchfoundation.co.uk/PDF/Watts%20et%20al%20(2002)%20MLS%20Barriers%20(IOA%20SC02).pdf)>
- [8] STEINER, D. *Akustika* [online]. [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.steiner.cz/david/akustika>>