

Zadání

Poděkování

Děkuji vedoucí mojí práce Lence Lomoz za podporu při studiu a odborné vedení při psaní této práce.

Děkuji mým rodičům za životní nasměrování a za podporu při studiu.

Děkuji mému zaměstnavateli za možnost studovat při práci.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně za použití citovaných zdrojů.

Dále prohlašuji, že nemám námitky proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 13. 12. 2019

Jan Vedral

**POSOUZENÍ PROTIHLUKOVÝCH STĚN MĚŘENÍM IN-SITU
POMOCÍ AKUSTICKÉ KAMERY**

**ASSESSMENT OF NOISE BARRIERS BY IN-SITU
MEASUREMENT USING AN ACOUSTIC CAMERA**

Abstrakt

Tato práce posuzuje z hlediska hluku vybrané protihlukové stěny na IV. železničním koridoru v Česku. Vstupem je in-situ měření akustickou kamerou Bionic L-112 Array. Následuje analýza v programu Noise Inspector.

Základem pro zpracování je základní znalost akustiky, znalost konstrukce a funkce protihlukových stěn a práce s akustickou kamerou.

Klíčová slova

Zvuk, hluk, protihlukové stěny, akustická kamera, železniční dopravní cesta.

Abstract

This thesis evaluates selected noise barriers in terms of noise. Selected noise barriers are located in IV. railway corridor in Czechia. Input data are measured by acoustic camera Bionic L-112 Array. Post processing is done by Noise Inspector software.

The assumption for elaboration of this work is a general knowledge of acoustics, knowledge of the design and function of noise barriers and work with an acoustic camera.

Keywords

Sound, noise, noise barrier, acoustic camera, railway.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce.....	9
3	Zvuk a hluk.....	10
3.1	Zvuk.....	10
3.2	Akustické veličiny	10
3.2.1	Kmitočet	10
3.2.2	Vlnová délka	11
3.2.3	Akustická rychlost.....	11
3.2.4	Akustický tlak.....	11
3.2.5	Energie	11
3.2.6	Hladiny	11
3.3	Hluk	13
3.3.1	Definice	13
3.3.2	Metody snižování hluku	13
3.3.3	Hluk ze železniční dopravy.....	13
3.3.4	Hluk jízdní.....	14
3.3.5	Hluk valivý	14
3.3.6	Hluk aerodynamický	14
4	Protihluková opatření podél železniční trati.....	16
4.1	Protihlukové stěny	17
4.2	Akustické parametry PHS.....	18
4.2.1	Zvuková pohltivost.....	18
4.2.2	Zvuková neprůzvučnost.....	18
4.3	Technické požadavky PHS.....	19
4.4	Typy PHS v Česku	22
4.4.1	Beton	22
4.4.2	Dřevocement	23
4.4.3	Cihla	23
4.4.4	Kov	24
4.4.5	Transparentní materiál	24
4.4.6	Recyklovaný materiál	24
5	Akustická kamera.....	27
5.1	Všeobecný popis	27
5.2	Využití v praxi	28
5.3	Princip akustické kamery	29
5.3.1	Požadavek.....	29
5.3.2	Vstupní podmínky.....	30
5.3.3	Lokalizace zdroje.....	31
5.3.4	Metody výpočtu	31
6	Měření v terénu	32

6.1	Měřicí přístroje	32
6.2	Lokalita	32
6.3	Měřené PHS	35
6.3.1	Faseton Welle	35
6.3.2	Liadur 8	36
6.4	Měřicí kampaň 1	38
6.4.1	Stanoviště I	39
6.4.2	Stanoviště II	41
6.5	Měřicí kampaň 2	42
6.5.1	Stanoviště I	44
6.5.2	Stanoviště II	44
6.5.3	Stanoviště III	44
7	Analýza dat	47
7.1	Všeobecné zásady	47
7.2	Analýza dat z měřicí kampaně 2	49
7.2.1	Stanoviště I	49
7.2.2	Stanoviště II	53
7.2.3	Stanoviště III	59
7.2.4	Shrnutí	61
7.3	Analýza dat z měřicí kampaně 1	61
7.3.1	Stanoviště I	62
7.3.2	Stanoviště II	66
7.3.3	Shrnutí	73
8	Závěr	74
	Literatura	76
	Seznam použitých zkratk a symbolů	78

1 Úvod

Tato práce je postavena na třech základních pilířích. Prvním z nich je obor železniční stavitelství, který jsem vystudoval. Druhým je akustika a její fyzikální zákonitosti. Třetím pilířem je akustická kamera, se kterou jsem měl příležitost pracovat během mého studia.

Železniční doprava je z environmentálního hlediska šetrná doprava v porovnání s ostatními druhy dopravy. V rámci kontinentální dopravy směle konkuruje ostatní dopravě i z hlediska efektivní logistické rychlosti o čemž se můžeme přesvědčit ve vyspělých státech s rozvinutou infrastrukturou.

Nicméně doprovodným jevem je hluk, který tato doprava způsobuje. S rostoucím množstvím populace souvisí růst zástavby, jak obytné, tak průmyslové. Tím se dostáváme do situace, kdy není možné vést vlakovou dopravu mimo chráněné prostory staveb a plnit tak hygienické limity hluku.

Tato situace vyžaduje řešit hluk z dopravy a izolovat jej od obytných budov, pracovních a ostatních prostor občanské vybavenosti. Jednou z možností je výstavba protihlukových clon.

Realizace protihlukových stěn je dnes časté řešení při eliminaci hluku. Je ovšem prokázáno, že toto řešení je přitom méně ekonomicky výhodné než eliminace hluku přímo u zdroje. Prokázáno studií „STAIRRS“, která je zmíněna v další části této práce. Je zde riziko i bezpečnostní, protože v případě havárie nebo jiné nestandardní situace je vozidlo uzavřeno mezi stěnami. V neposlední řadě, protihlukové stěny většinou nejsou estetické prvky, ani ve městech, ani ve volné krajině a rozhodně nezlepšují psychickou pohodu obyvatel. Nicméně správně konstruované protihlukové stěny často vycházejí jako nejvhodnější řešení, které dokáže účinně eliminovat nežádoucí zvuk.

Tématem této práce je posouzení vybraných existujících protihlukových stěn realizovaných podél železniční dopravní cesty z hlediska správné funkce, tedy snižování emise škodlivého hluku z dopravy do okolí. Pro posouzení je použita akustická kamera, která dokáže snímat obraz dané scény a zároveň na dané scéně lokalizovat zvuk a měřit jeho parametry, například frekvenci a hladinu akustického tlaku.

2 Cíl práce

Cílem práce je zhodnotit správnou akustickou funkci vybrané protihlukové stěny, tzn.:

- vybrat existující protihlukovou stěnu podél železniční cesty,
- pomocí akustické kamery změřit zvuk procházející skrz stěnu při průjezdu vlaku,
- naměřené vzorky analyzovat v programu,
- na základě výstupů z programu posoudit funkci stěny,
- zhodnotit konstrukci a technický stav stěny.

Je třeba zdůraznit, že tato práce se nezabývá měřením hluku a posuzováním zvukové neprůzvučnosti nebo zvukové pohltivosti stěny, ale posouzením správné funkce protihlukové stěny a případného úniku škodlivého hluku konstrukcí stěny.

3 Zvuk a hluk

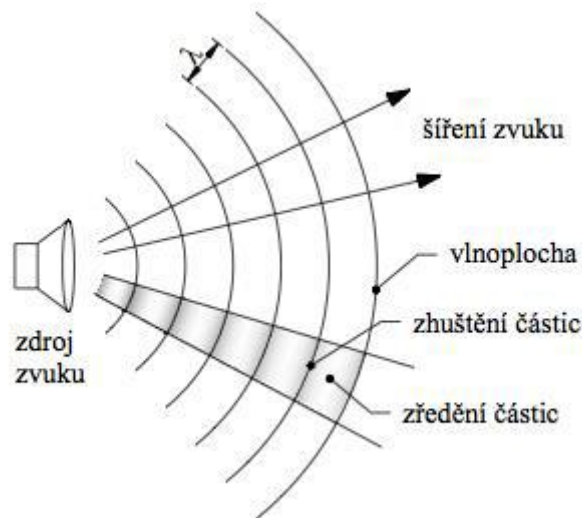
3.1 Zvuk

Zvuk je kmitání částic prostředí, tedy mechanické vlnění v prostředí. Prostředím se šíří formou akustických vln. Každým prostředím se šíří jinou rychlostí zvuku c [m/s]. Například ve vzduchu je rychlost 340 m/s. Ve vodě je mechanické kmitání rychlejší a rychlost zvuku je 1440 m/s.

Akustika se zabývá mechanickými kmity v širokém frekvenčním pásmu, jedná se o infrazvuk, slyšitelné pásmo a ultrazvuk. Slyšitelné pásmo se pohybuje v rozmezí zhruba 20 – 20 000 kmitů za sekundu.

Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh a šíření akustického vlnění je spojeno s přenosem energie. Při šíření se zvuku se uplatňují základní fyzikální zákony jako např. zákon o zachování hmoty a energie.

Zvuk se šíří od zdroje ve vlnoplochách. Ve všech bodech vlnoplochy jsou v danou dobu stejné akustické parametry. [24] Viz obr. 1.



Obr. 1: Šíření zvukových vln [4]

3.2 Akustické veličiny

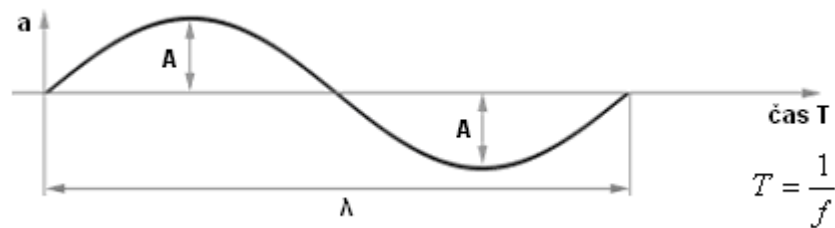
Zde jsou uvedeny základní akustické veličiny, které úzce souvisí s problematikou řešenou v této práci.

3.2.1 Kmitočet

Kmitočet (frekvence) f [Hz] určuje počet kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. [1]

3.2.2 Vlnová délka

Vlnová délka λ [m] je vzdálenost kterou vlna urazí za jeden kmit, jde o spojnicí dvou nejbližších bodů, které mají stejné akustické parametry. Jedná se o vzdálenost dvou maxim kmitů vlny. [19] Viz obr. 2.



Obr. 2: Perioda, vlnová délka [1]

3.2.3 Akustická rychlost

Akustická rychlost v [m/s] je rychlost kmitání částic prostředí, kterým se šíří zvuková vlna. [19]

3.2.4 Akustický tlak

Atmosférický (barometrický) tlak je 101 325 Pa. Akustický tlak p [Pa] je o mnoho řádů nižší. Člověk (resp. lidské ucho) je schopen vnímat tlak o hodnotě $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Akustický tlak je v podstatě odchylka od statického tlaku. [1], [19]

3.2.5 Energie

Bavíme-li se o energii, musím rozlišovat energii kmitajícího bodu a energii, která je přenášena prostorem postupující akustickou vlnou.

Mechanická energie kmitajícího bodu E se skládá z energie potenciální E_p a energie kinetické E_k .

Energii procházející za jednotku času prostorem nazýváme akustický výkon W [W]. [19]

3.2.6 Hladiny

V běžné praxi se výše uvedené veličiny mění o mnoho řádů. Např. slabý šepot má akustický výkon cca $1 \cdot 10^{-9}$ W, oproti tomu orchestr může mít až 20 W. [19]

Z tohoto důvodu byl v technické praxi zaveden pojem decibel [dB]. Vlivem zavedení decibelu bylo potřeba stanovit referenční hodnotu. Dle ČSN EN ISO 80000-8 je referenční hodnota akustického výkonu je 10^{-12} W. [1], [11], [19]

Hladinu akustického výkonu L_w lze definovat ve tvaru:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (1)$$

kde W je sledovaný akustický výkon [W] a W_0 je referenční hodnota akustického výkonu. [24]

V tab. 1 je názorně vidět přínos zavedení jednotky decibel. Každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického výkonu o 10 dB. [19]

Tab. 1: Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon [19]

Vyzařovaný akustický výkon W [W]		Hladina akustického výkonu L_W [dB]	
Normální zápis	Ekvivalentní exponenciální notace	vzhledem k $W_0 = 1 \text{ W}$	vzhledem k $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$
100 000	10^5	50	170
10 000	10^4	40	160
1 000	10^3	30	150
100	10^2	20	140
10	10^1	10	130
1	10^0	0	120
0,1	10^{-1}	-10	110
0,01	10^{-2}	-20	100
0,001	10^{-3}	-30	90
0,0001	10^{-4}	-40	80
0,00001	10^{-5}	-50	70
0,000001	10^{-6}	-60	60
0,0000001	10^{-7}	-70	50
0,00000001	10^{-8}	-80	40
0,000000001	10^{-9}	-90	30

Hladinu akustického tlaku L_p lze zapsat pomocí vztahu:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (2)$$

kde p je sledovaný akustický tlak [Pa] a p_0 referenční hodnota akustického tlaku ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$). Každému zdesetinásobenému zvětšení akustického tlaku v [Pa] odpovídá zvýšení hladině akustického tlaku o 20 dB v decibelové stupnici. [19], [24]

3.3 Hluk

3.3.1 Definice

Hluk se dá obecně definovat jako nežádoucí zvuk. Hluk je v podstatě ekvivalent k výrazu zvuk, pro někoho může být určitý zvuk příjemný (např. hlasitá hudba) a pro někoho naopak nepříjemný až obtěžující. Jde o subjektivní vnímání. Je prokázáno, že nadměrná dlouhodobá expozice hluku může být škodlivá a způsobovat dlouhodobé zdravotní komplikace až trvalé poškození sluchu a nervové soustavy. Problémem vlivu hluku na zdraví se zabývá např. WHO v dokumentu Environmental Noise Guidelines for the European Region. [26]

Hygienické limity hluku jsou stanoveny legislativou. [14], [25] Tato práce se hlukovými limity a jejich stanovením nezabývá.

3.3.2 Metody snižování hluku

Metody snižování hluku jsou děleny následovně:

- redukce hluku u zdroje – jedná se o snižování hluku přímo na zdroji za použití nové technologie, materiálu, tlumičů apod. Jedná se o efektivnější a ekonomičtější metodu než dodatečná opatření. V železniční dopravě může být příkladem redukce hluku u zdroje např. inovativní řešení brzdového systému,
- dispozice – tato metoda funguje na plánování umístění zdroje do vhodné lokality nebo části objektu tak aby zdroj nešířil škodlivý hluk do chráněných prostor. V rámci návrhu dopravní infrastruktury se doprava může umisťovat do dopravních koridorů s využitím protihlukových stěn, valů a clon,
- izolace – tato metoda spočívá v dodatečné izolaci zdroje. Jedná se o různé izolační přičky, kryty, protihlukové clony,
- aplikace poznatků akustiky – tato metoda využívá poznatků prostorové akustiky a využívá především dobré zvukové pohltivosti některých materiálů. Například využití zvukové pohltivosti některých materiálů na protihlukových stěnách a tvarování povrchu těchto stěn,
- ochranné pomůcky – tato metoda vyžaduje aktivní a správné používání ochranných pomůcek a jejich kombinaci. [24]

3.3.3 Hluk ze železniční dopravy

V železniční dopravě rozlišujeme zdroje hluku a dělíme je na hluk sběrače, hluk aerodynamický, hluk jízdní, hluk valivý.

Dominující hluk v závislosti na rychlosti je následující:

- hluk jízdní <60 km/h,
- hluk valivý 60-200 km/h,
- hluk aerodynamický >200 km/h. [15]

Výše definované hluky jsou při uvedených rychlostech převažující, současně se na celkové vyzařované hlučnosti podílejí i ostatní, ale už ne v tak velké míře. Zdroje hluku jsou ovlivněny více faktory. Jedná se rychlost vlaku, druh trakce, vedení trasy, stav železničního svršku, stav vozidel, klimatické podmínky, terén apod.

Lze konstatovat, že zatímco hluk jízdní je stejně jako hluk aerodynamický pro daný typ vlaku konstantní, hluk valivý nezávisí jen na vozidle, ale také na stavu kolejnice a jízdní plochy kola. [15]

3.3.4 Hluk jízdní

Hluk jízdní je dominující do cca 60 km/h. Je způsoben pohonem vozidla a závisí na:

- trakci, pokud se jedná o motorovou trakci lze předpokládat vyšší hluk než v případě trakce elektrické, aktivním řešením může být elektrifikace trasy a modernizace vozidel,
- řešení klimatizací, sání,
- řešení pomocných agregátů apod.

3.3.5 Hluk valivý

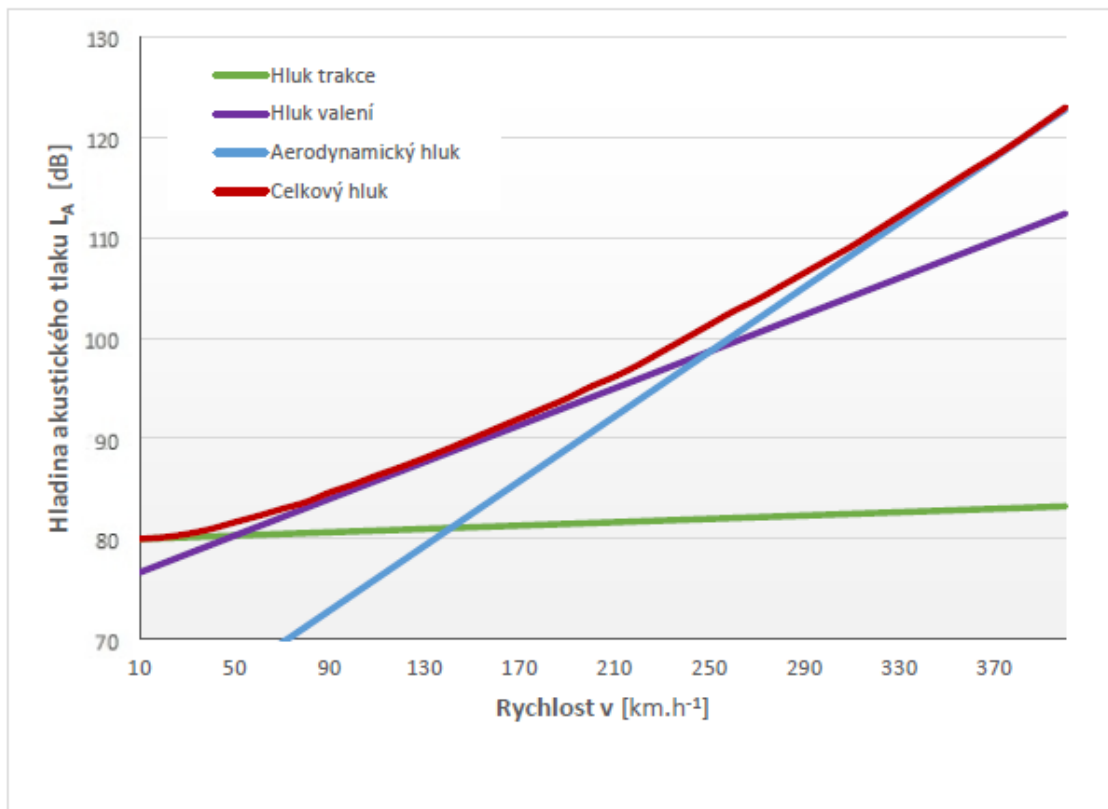
Hluk valivý je dominující mezi 60 a 200 km/h. Jedná se o hlavní zdroj hluku na tratích v Česku. [15] Vzniká na kontaktu kola a kolejnice. Do okolí se šíří nejen vzduchem jako zvuk, ale také přes kolo a kolejnici do terénu jako vibrace. Závisí na:

- technickém stavu kolejnice, typu upevnění. Při špatném tvaru temene kolejnice, vlnkovitosti nebo jiné poruše kolejnice dochází ke zvýšení tření a hluku, aktivním opatřením je pravidelná údržba tratě a včasné řešení závad,
- technickém stavu vozidla. Při nesprávných parametrech okolku a celého podvozku dochází ke zvýšení hluku, je potřeba pravidelná kontrola a servis,
- vedení trasy. Například v oblouku dochází ke zvýšení tření, je potřeba postupovat podle zásad navrhování trasy a následně správně navrhnout konstrukci oblouku.

3.3.6 Hluk aerodynamický

Hluk aerodynamický je dominující nad 160-200 km/h. [15] Vzniká prouděním a turbulencí vzduchu kolem vozidla, mezi vozidly, kolem sběrače a podvozku. U vysokorychlostních souprav je vhodné správně navrhnout aerodynamickou konstrukci a kapotáž podvozku.

Na obr. 3 je znázorněna závislost zdroje hluku na rychlosti.



Obr. 3: Graf závislosti zdroje hluku na rychlosti

4 Protihluková opatření podél železniční trati

Se zvyšující se intenzitou dopravy a současně se vzrůstajícím procentem zastavěnosti území, nejen ve městech, stoupá požadavek na ochranu obyvatel před hlukem z dopravních cest.

Od 20. století patří tato problematika mezi zásadní body, které se řeší při výstavbě. Řešení hluku z dopravy má rovněž oporu v právních předpisech, kde jsou jasně definované požadavky.

V případě, že je v platné územně plánovací dokumentaci uveden záměr, u kterého lze důvodně předpokládat, že bude po uvedení do provozu zdrojem hluku nebo vibrací, zejména z provozu na pozemních komunikacích nebo železničních drahách, nelze ke stavbě, která by mohla být tímto hlukem či vibracemi dotčena, vydat kladné stanovisko orgánu ochrany veřejného zdraví, aniž by u ní byla přijata opatření k ochraně před hlukem nebo vibracemi. [14]

U takovýchto stavebních záměrů se vždy, v rámci předprojektové přípravy, definují požadavky na protihluková řešení a opatření.

Dále je potřeba připomenout, že protihluková opatření se primárně dělí na aktivní a pasivní.

Aktivní opatření řeší hluk přímo u zdroje, tzn. opatření přímo na vozidle, železniční cestě, resp. na kontaktu podvozku a kolejnice. Na vozidlech se jedná o řešení brzd, kapotáže, řešení a uložení motorů, konstrukce podvozku atd. V konstrukci koleje se jedná o bokovnice (tlumící profily na kolejnici), různé absorbéry a pohltivé desky. V neposlední řadě sem patří správná a pravidelná údržba, jak vozů, tak železniční cesty.

Pasivní opatření jsou veškerá řešení, která eliminují již vzniklý hluk, např. protihlukové clony umístěné podél dopravní cesty. Sem patří veškeré protihlukové stěny (klasické PHS, nízké PHS, městské clony), zemní valy a jejich kombinace. Dále se může jednat o individuální protihluková opatření, např. výměna oken (okna s nuceným větráním apod.).

Z hlediska poměru cena/výkon je celkově výhodnější aplikovat aktivní opatření. Toto bylo prokázáno studií „STAIRRS“, která byla zpracována pro území EU. [18] Tato studie byla koordinovaná organizací European Rail Research Institute, vypracovaná v letech 2000 – 2003.

Výsledky studie mimo jiné uvádí, že kompozitní brzdové bloky mají nejlepší výsledky v poměru efektivita/cena. Nejefektivnější je kombinace řešení aktivních opatření. Protihlukové stěny do 4 m mají špatné výsledky v poměru efektivita/cena. Rovněž tak instalace nových oken v budovách podél železniční cesty.

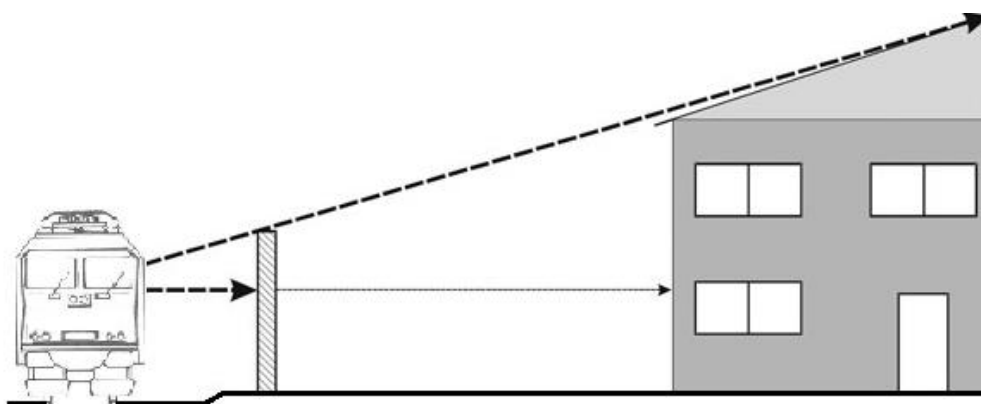
Tato práce se dále zabývá pouze klasickými protihlukovými stěnami.

4.1 Protihlukové stěny

Protihlukové stěny (PHS) jsou pasivní protihluková opatření (obr. 4). Jedná se o liniové stavby podél železniční cesty, postavené za účelem snížení šíření hluku, způsobeného železniční dopravou, do okolí.

Při projektování PHS je třeba splnit funkčnost řešení, tzn. minimalizovat škodlivý účinek hluku z dopravy a zároveň je třeba splnit následující faktory:

- minimalizovat vliv na okolní krajinu a prostředí,
- statické a stavebně-architektonické řešení,
- požadovanou plošnou hmotnost,
- uzavřenost plochy bez větších otvorů a mezer,
- únikové otvory,
- přejezdy, stanice, inženýrské sítě.



Obr. 4: Princip PHS

V Česku nejvíce používané typy jsou stěny betonové s vysokou objemovou hmotností, svislé konstrukce, s lehkou absorpční vrstvou na lícové straně, kompletně zakrývající vozidla. V posledních letech se s rozvojem nových technologií více uplatňují syntetické materiály, dále odpadní pryž, sklo, kov a mix těchto materiálů.

Na základě použitých materiálů lze v dnešní době rozdělit PHS na dvě základní skupiny, a to stěny pohltivé a odrazivé. Těžké stěny s absorpční vrstvou a také stěny ze syntetických materiálů patří do kategorie stěn pohltivých, které pohlcují zvuk. Stěny ze skla a lehkých desek patří do kategorie stěn odrazivých, od kterých se zvuk hlavně odráží. [10], [15].

V následujících kapitolách jsou uvedeny akustické a technické parametry PHS.

4.2 Akustické parametry PHS

Při navrhování protihlukových stěn jde primárně o to, aby se za stěnu dostalo co nejméně škodlivého hluku z projíždějícího vlaku. V tomto případě se jedná o všesměrový dopad zvukových vln a zvuková izolace, což je snížení přenosu zvuku mezi dvěma prostory, je ovlivněna více parametry.

Zvuková vlna, tedy akustická energie, dopadající na stěnu má následující složky intenzity zvuku I [W/m^2]: [19]

- I_1 zvuk odražený,
- I_2 zvuk pohlcený,
- I_3 zvuk vyzářená za stěnu celkem,
- I_4 zvuk prošlý za stěnu otvory,
- I_5 zvuk vyzářený v důsledku ohybového kmitání,
- I_6 zvuk vedený ve formě chvění do ostatních konstrukcí,
- I_7 zvuk přeměněný ve stěně na teplo.

4.2.1 Zvuková pohltivost

Zvuková pohltivost znamená z fyzikálního hlediska schopnost materiálu měnit energii zvukovou na energii jinou, obvykle tepelnou.

Schopnost stěny pohlcovat zvuk se vyjadřuje hodnotou činitele zvukové pohltivosti α [-], tato schopnost je definována poměrem zvuku pohlceného a dopadajícího.

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (3)$$

V souvislosti se zvukovou pohltivostí je rovněž definována zvuková odrazivost daná hodnotou činitele zvukové odrazivosti β [-]. Jedná se o poměr zvuku odraženého a dopadajícího.

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (4)$$

Pokud se všechen zvuk odrazí je α rovno nule. Pokud dojde k úplnému pohlcení je α rovno jedné. [1, 19]

Činitel zvukové pohltivosti α je kmitočtově závislý, měření se obvykle provádí v 1/3 oktavových pásmech v rozsahu 100–6300 Hz. [1]

4.2.2 Zvuková neprůzvučnost

Zvukovou neprůzvučností se rozumí schopnost stěny nepropouštět zvukové vlny do prostoru za stěnou.

Stejně jako jsou definované hodnoty pro pohltivost a odrazivost, je definována hodnota činitele průzvučnosti τ [-]. Jedná se o poměr zvuku prošlého konstrukcí a dopadajícího na konstrukci.

$$\tau = \frac{I_3}{I_n} = \frac{I_4}{I_n} + \frac{I_5}{I_n} \quad (5)$$

Celkovou průzvučnost je možno vyjádřit, když se tento činitel vynásobí plochou stěny. [19]

Měření se provádí v rozsahu kmitočtů pro stavební akustiku 100–3150 Hz. [1]

V praxi rozlišujeme dva typy zvukové neprůzvučnosti:

- vzduchová neprůzvučnost – jedná se o šíření zvuku vzduchem skrz konstrukci,
- kročejová neprůzvučnost – jedná se o chvění, které prochází konstrukcí vlivem jejího rozkmitání vyvolanými kroky, používá se pouze v oboru stavebnictví.

Akustická kvalita stěny se vyjadřuje vzduchovou neprůzvučností R [dB], která je vyjádřena vztahem:

$$R = 10 * \log * \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

4.3 Technické požadavky PHS

Požadavky na konstrukci a řešení pasivních protihlukových opatření na železnici jsou stanoveny v technických kvalitativních podmínkách staveb státních drah, zpracovanými správou železniční dopravní cesty. Současně stavba PHS musí být v souladu s následujícími předpisy:

- předpis SŽDC S4 Železniční spodek,
- předpis SŽDC (ČD) S5/4 Protikorozní ochrana ocelových konstrukcí,
- směrnice GŘ SŽDC č. 11/2006,
- obecné technické podmínky – Protihlukové stěny, č. j. 60 650 – O13,
- metodický pokyn – Protihlukové stěny a valy, č. j. 58 604/00 – O13,
- systém (typ) protihlukové clony musí splnit parametry určené ČSN EN 14 388 ed. 2 – Zařízení pro snížení hluku silničního provozu a příslušných souvisejících norem. [3, 10]

Minimální akustické požadavky na protihlukové stěny podél železničních tratí jsou dány předpisem SŽDC a jsou uvedeny v tab. 2. [3]

Tab. 2: Minimální akustické požadavky SŽDC [3]

Typ protihlukové clony		KATEGORIE DL _α	KATEGORIE DL _R
Protihlukové stěny	Odraživé	A0	B1
	Pohltivé (stěny se zvukově pohltivou vrstvou)	A2	
Protihlukové valy	Zemní valy	-	B3
	Gabiony (s rubovým zásypem)	-	
	Opěrné zdi se zvukově pohltivou vrstvou	A2	
	Polovegetační stěny	-	

Další všeobecné požadavky na protihlukové stěny podél železničních tratí jsou dány obecně technickými podmínkami ČD, stručný přehled je uveden zde: [32]

- nejslabší místo musí mít plošnou hmotnost 10 kg/m²,
- požadované vlastnosti materiálů se prokazují zkouškami podle příslušných norem a dokládají se atestem akreditované zkušebny,
- PHS musí mít snadno vyměnitelné stěnové prvky,
- PHS jsou tvořeny základy, podezdívkami, stěnovými prvky, sloupky, stříškami a únikovými dveřmi,
- standardní základy jsou piloty nebo základové patky,
- tlumící materiál musí mít daný odstup z důvodu odvětrávání
- doporučený modul vzdálenosti sloupů je 4,0 m

Podle normy ČSN EN 1793-1 [26] se určuje:

- DL_α – jednočíselné hodnocení zvukové pohltivosti, stanovené jako rozdíl vážených hladin (akustického tlaku A) v dB. [3]

Tab. 3: Kategorizace zvukové pohltivosti, ČSN EN 1793-1 [26]

KATEGORIE	DL _α [Db]
A0	neurčeno
A1	< 4
A2	4 až 7
A3	8 až 11
A4	12 až 15
A5	> 15

Podle normy ČSN EN 1793-2 [27] se určuje:

- DL_R – jednočíselné hodnocení vzduchové neprůzvučnosti, stanovené jako rozdíl vážených hladin (akustického tlaku A) v dB. [4]

Tab. 4: Kategorizace vzduchové neprůzvučnosti, ČSN EN 1793-2 [27]

KATEGORIE	DL_R [Db]
B0	neurčeno
B1	< 15
B2	15 až 24
B3	25 až 34
B4	> 34

Základní platné předpisy ošetřující problematiku hluku a hygienické limity v Česku jsou:

- zákon 258/2000 Sb. – Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů,
- nařízení vlády č. 272/2011 Sb. – Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů,

Další předpisy, které souvisí s návrhem protihlukových opatření v okolí dopravních cest jsou:

- zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí),
- zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu.

Tato práce se stanovením hygienických limitů ani posuzování vlivů na ŽP nezabývá.

4.4 Typy PHS v Česku

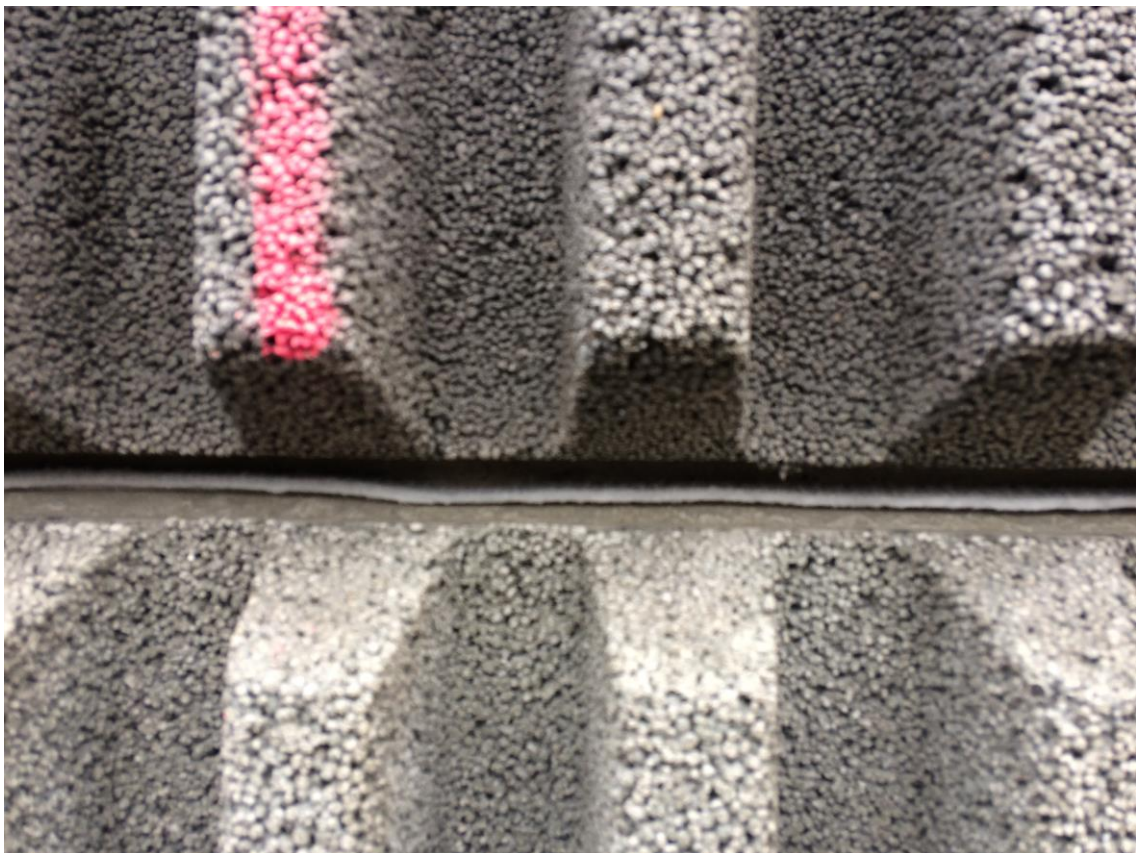
Veškeré PHS umístěné podél železničních cest musí splnit parametry dle ČSN EN 14388 [3]. Tato shoda je prokázána protokolem o počáteční zkoušce typu výrobku, který vydává akreditovaná zkušební laboratoř.

Na základě deklarovaných hodnot touto normou jsou v Česku používané různé systémy PHS.

V následujícím textu je uveden přehled nejčastěji používaných typů PHS v Česku. U jednotlivých typů je uvedeno základní systém konstrukce, kategorizace zvukové pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti, obvyklé rozměry a příklad výrobce.

4.4.1 Beton

- Statickou funkci stěny plní železobetonové sloupy,
- mezi tyto sloupy jsou vloženy železobetonové panely s pohltivou vrstvou na lícové straně – směrem do kolejiště,
- pohltivá vrstva je mezerovitý, lehčený beton (např. panely Liadur, výrobce Liadur, s.r.o.), obr. č. 5,
- rozměry panelů se liší dle výrobce, výška od 500 do 2000 mm, délka od 3000 do 6000 mm,
- běžná výška stěn je 2500 mm nad TK,
- zvuková pohltivost A3,
- vzduchová neprůzvučnost B4.



Obr. 5: Panely z mezerovitého betonu (Strančice 2019/10)

4.4.2 Dřevocement

- Statickou funkci stěny plní železobetonové sloupy,
- nosná vrstva panelů je železobeton, pohltivá vrstva jsou dřevocementové profily (např. panely Faseton, výrobce Rieder Beton, spol. s r.o.), obr. č. 6,
- rozměry panelů se liší dle výrobce, výška od 500 do 2000 mm, délka od 3000 do 6000 mm,
- běžná výška stěn je 2500 mm nad TK,
- zvuková pohltivost A3
- vzduchová neprůzvučnost B4.



Obr. 6: Dřevocementové pohltivé panely (Strančice 2019/10)

4.4.3 Cihla

- Statickou funkci stěny plní železobetonové sloupy,
- nosná vrstva je železobeton, pohltivá vrstva jsou děrované cihly, obr. č. 7,
- zvuková pohltivost A3,
- vzduchová neprůzvučnost B3,
- již se nevyrábí.



Obr. 7: Děrované cihly v betonovém rámu [9]

4.4.4 Kov

- Statickou konstrukci tvoří většinou ocelové nebo hliníkové sloupy,
- nosné panely tvoří hliník, pozink, nerez nebo corten, vnitřní část tvoří minerální vata nebo polyester. (např. výrobce ROMAn s.r.o.), obr. 8,
- zvuková pohltivost A4, A5
- vzduchová neprůzvučnost B3.

4.4.5 Transparentní materiál

- Nosnou konstrukci tvoří většinou ocelové, hliníkové sloupy nebo rámy, výplň tvoří různé typy skla (např. sodno-vápeno-křemičité sklo, výrobce AEROLUX s.r.o.) nebo různé typy plastu a desky z extrudovaného plexiskla (např. výrobce TITAN - Multiplast s.r.o.),
- jedná se o odrazivé PHS.

4.4.6 Recyklovaný materiál

- Nosné panely tvoří železobeton, sendvičový panel, trapézový plech nebo panely z tvrdého plastu. Další variantou je hliníkový nebo ocelový rám. Pohltivou vrstvu tvoří např. recyklovaná PET pěna, pryžový granulát (např. panel noba plus, výrobce mmcité+ a.s.) nebo plast (např. výrobce INPROKOM s.r.o., obr. 9)
- zvuková pohltivost A3 - A4,
- vzduchová neprůzvučnost B3.



Obr. 8: Kovové panely [28]



Obr. 9: Plastové panely, odrazivá PHS [9]

Veškeré materiály se samozřejmě různě kombinují. Transparentní materiály se používají jako doplněk k různým typům pohltivých či odrazivých stěn. Na obr. 10 je uvedena kombinace transparentního panelu s betonovým panelem s porézní líčovou stranou.

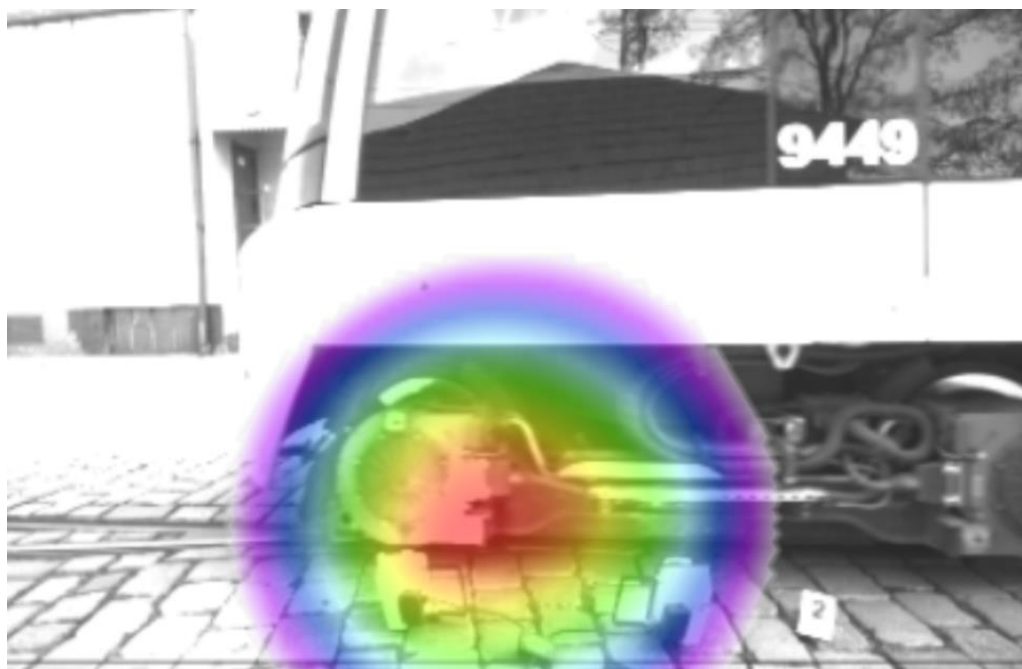


Obr. 10: Transparentní PHS v kombinaci s porézním betonem [9]

5 Akustická kamera

5.1 Všeobecný popis

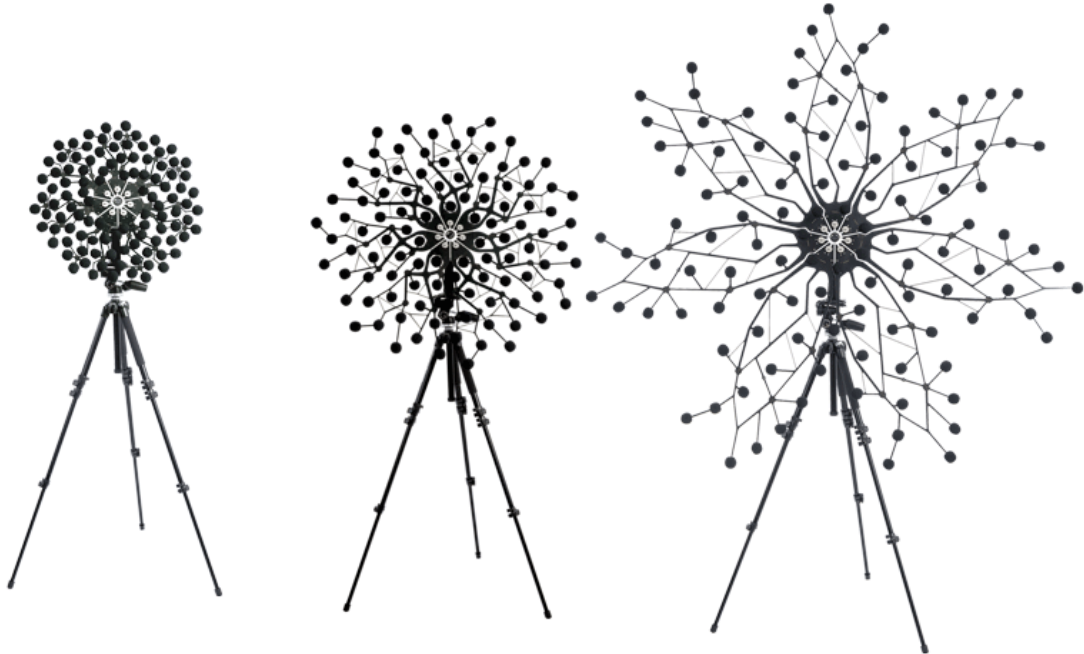
Akustická kamera je zařízení složené z mikrofonní antény (tzv. mikrofonního pole) nebo více antén a videokamery. Dále je součástí počítač s příslušným programem na záznam a vyhodnocování dat. Program pomocí kamery lokalizuje místo zdroje hluku a analyzuje jeho parametry. On-line výstupem systému se stává hluková mapa, viz obr. 11, obdobná svým provedením záznamů teploty pořízených termo kamerou. Na zvukové mapě odpovídá barevná posloupnost izofon od červené přes žlutou a zelenou k fialové úrovni hluku od nejvyšší k nejnižší.



Obr. 11: Hluková mapa izofon při průjezdu tramvajového kola přes výhybku [6]

Mikrofonní pole sestává z velkého počtu mikrofonů, v současné době nejčastěji od 36 do 120, které jsou různě uspořádané v prostoru, viz obr. 12. Ve středu tohoto mikrofonního pole umístěná videokamera s vysokým rozlišením opticky zaznamenává scénu, díky níž lze pak do záznamu promítnout výsledek akustického výpočtu, tedy onu akustickou mapu. Na základě počtu mikrofonů a jejich umístění je dán frekvenční rozsah měření akustické kamery. Pokud je menší počet mikrofonů umístěných blíže u sebe, je použití akustické kamery vhodné pro střední a vyšší frekvence. Taková kamera je vhodná pro měření z menší vzdálenosti například při lokalizaci hluku u motoru aut. Naopak čím vyšší je počet mikrofonů a celkové rozpětí mikrofonního pole, tím lépe dokáže lokalizovat střední až nižší frekvence. V takovém případě akustická kamera může být vzdálená od zdroje hluku několik desítek centimetrů až stovky metrů.

Dále je součástí měřicí jednotky převodník, který „sbírá“ signály z jednotlivých mikrofonů a převádí je do formátu, s nímž si posléze pracuje počítač, resp. software. Používá se řada různých výpočtových algoritmů vhodných pro různé účely měření a nasazení akustické kamery v terénu. [21]



Obr. 12: Příklady uspořádání mikrofonů v akustické kameře [21]

5.2 Využití v praxi

V praxi vypadá použití akustické kamery následovně. Postaví se před měřené zařízení – v případě budov nebo areálů podniků tak, aby v zorném poli pod určitým úhlem byly snímány všechny zdroje hluku. Zdroj hluku může být vzdálen až stovky metrů. Pokud se měří strojní zařízení, pak se kamera naopak umísťuje co nejbliž.

Po nastavení vstupních parametrů se akustická kamera spustí a většinou během krátkého časového úseku se zaznamená jak zvuk ze všech mikrofonů, tak obraz z videokamery. Výhodou je samozřejmě vedle možnosti zachycení a zobrazení různých úrovní hluku také schopnost analyzovat pohyblivé zdroje a vytvořit časový záznam zvuků u velice rychlých dějů. U celé řady měření je totiž podstatná nejen úroveň hluku, ale také to, jak se mění v prostoru a čase.

Akustické kamery mají široké spektrum použití, například v průmyslu, dopravě a službách tam, kde správná funkce různých zařízení je spojena s určitým zvukovým doprovodem, jehož změna může signalizovat poruchu.

Akustická kamera je ideální pro zjišťování zdrojů hluku například v areálech podniků (zjistíme, kde jsou zdroje hluku, jako vzduchotechnika, dopravníky či trubky), u hlučných strojů, dopravních prostředků, u nichž nevíme, odkud hluk pochází, nebo k identifikování jejich částí, které chybně pracují.

Využit je lze také k detekci akusticky slabých míst na fasádách budov, v okolí oken a dveří nebo u protihlukových stěn.

Dalším použitím je měření akustických vlastností při vibrační zátěži. Běžně se stává, že jednotlivé díly smontované na vozidle způsobují hluk při provozu.

Jádro analýzy spočívá ve vhodném výběru a vyhodnocení časové a frekvenční oblasti. Jde tedy o to vybrat v čase měřené signály, a stejně tak vybrat požadované frekvence ve spektru. Pak se nastaví vzdálenost zdroje k akustické kameře a zvolí se příslušný algoritmus.

Jakmile všechny výpočty proběhnou, lze zobrazit jednotlivé hladiny akustického tlaku – tedy úroveň hluku – do obrazu z videokamery. Na něm je pak vidět, jak se v čase a v jednotlivých oblastech snímané scény hluku mění.

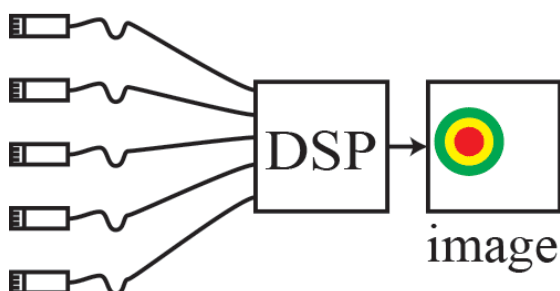
Akustická kamera naopak není vhodná pro snímání hlubokých tónů, tedy nízkých frekvencí. Podle velikosti mikrofonního pole a použitého algoritmu analýzy dokáže zařízení rozlišit frekvence zhruba od 40 Hz. Akustická kamera neobstojí ani tam, kde měřený signál splývá s akustickým pozadím, nebo tehdy, když v měřeném signálu nejsou dominantní frekvence a jejich hladiny jsou podobné jako v pozadí.

Toto ale platí především pro měření ve volném prostředí se zatíženým i okolním hlukovým pozadím. V některých případech je ale možné testované objekty umístit do samostatné tiché komory (bezodrazová, dozvuková) včetně akustické kamery a tam poté provádět měření. Problém ale často bývá v zavedení reálných zátěžových podmínek (pohony, navazující komponenty a podobně). [20]

5.3 Princip akustické kamery

5.3.1 Požadavek

Je připraven set mikrofonů, který nahrává měnící se akustický tlak v prostředí a tuto informaci je nutno převést do obrázku, resp. videa. Na to je použit tzv. „digital signal processing – DSP“. Jedná se o číslicové zpracování signálu. DSP odlišuje od jiných oblastí počítačové vědy unikátní typ dat, která používá – signály. Ve většině případů tyto signály vznikají jako data od senzorů z reálného světa. DSP je matematika, algoritmy a techniky k úpravě těchto signálů poté, co jsou převedeny do digitální (číslicové) podoby. Základní schéma akustické kamery je vidět na obr. 13. [20]



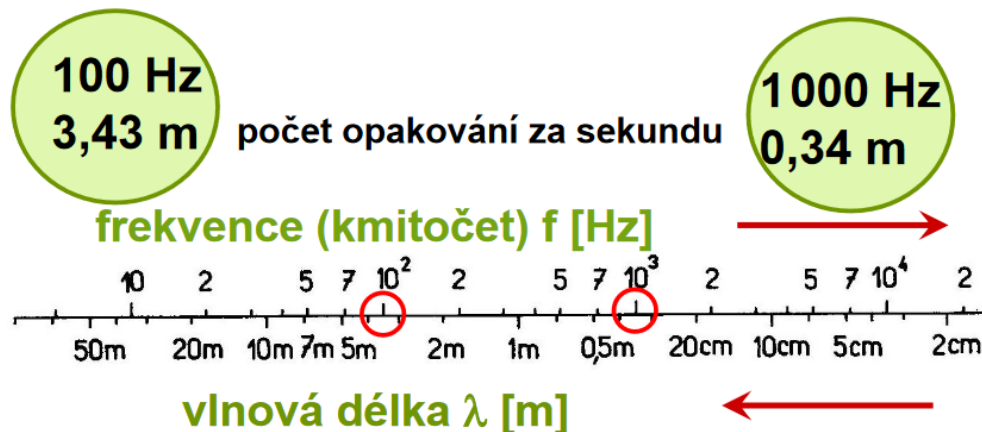
Obr. 13: Základní schéma akustické kamery [20]

5.3.2 Vstupní podmínky

Pro základní pochopení funkce akustické kamery je předpokládáno, že se jedná o jeden zdroj zvuku, který je relativně vzdálený od setu mikrofonů.

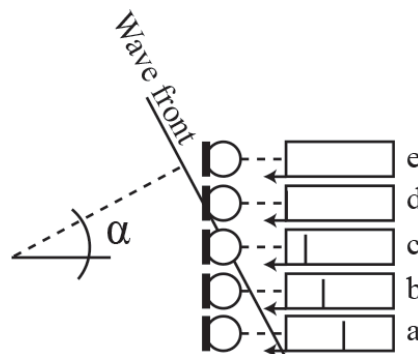
Dále je pro jednoduchost uvažováno, že zdroj vysílá ideální impuls a akustický tlak je roven nule kromě momentu kdy mikrofony zachytí ideální impuls.

Je potřeba si uvědomit, že mikrofon zaznamená něco pouze v případě, že zvuková vlna míří přímo na něj. Každá vlnová délka zvuku λ pro střední hodnotu různého frekvenčního pásma má jinou délku (př. $f = 31,5$ Hz odpovídá $\lambda = 10,9$ m). Na základě této vlastnosti se mikrofonní pole akustické kamery umísťuje do takové dostatečné vzdálenosti od zdroje zvuku, aby vlnová délka zvuku měla možnost aspoň během jedné periody urazit vzdálenost mezi mikrofony a zdrojem zvuku. Z toho vyplývá, že je nutné přibližně vědět v jakém rozsahu frekvenčního pásma je hledán zdroj zvuku. Vztah vlnové délky a frekvence vidíme na obr. 14.



Obr. 14: Vztah vlnové délky a frekvence [24]

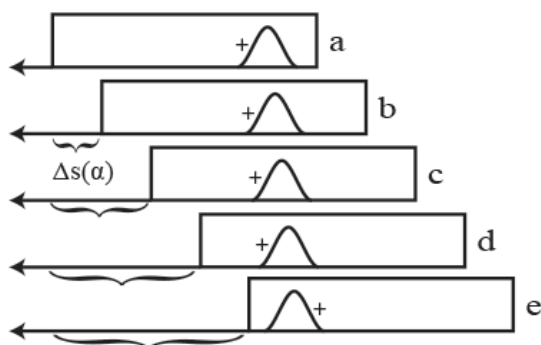
Na obrázku č. 15 je znázorněna zvuková vlna přicházející k mikrofonu pod úhlem alfa. Zpoždění mezi mikrofony jsou různá, podle vzdálenosti, kterou zvuková vlna urazí. Dle typu akustické kamery jsou mikrofony od sebe vzdáleny stejně nebo pokaždé v jiné vzdálenosti.



Obr. 15: Zvuková vlna přicházející k mikrofonům [20]

5.3.3 Lokalizace zdroje

Na základě předpokladů zmíněných výše budou mikrofony nahrávat zvuk s různým zpožděním a vzhledem k časovým rozdílům, dokáže software lokalizovat místo zdroje zvuku. Samozřejmě tato lokalizace funguje pouze v některých frekvenčních pásmech. Rozsah bude mít dolní a horní mez. Na obr. 16 je vidět časově posunutý signál na každém mikrofonu. [20]



Obr. 16: Časově posunutý signál [20]

5.3.4 Metody výpočtu

Základní metoda používaná pro měření ve vzdáleném poli (farfield) je „Beamforming“. Principem je vyhodnocení velkého množství dat, získaných z jednotlivých mikrofonů daného uspořádání v daném čase, která dohromady dávají informaci o tom, z jakého směru se zvuk šíří. Jedná se o algoritmus, který z velkého počtu vstupních hodnot vypracuje jednu hodnotu výstupní. Z toho plyne, že není vhodný pro úlohy, ve kterých chceme detailně zkoumat zvukové pole ve všech jeho bodech a získat informaci o jeho akustických veličinách, jako je například intenzita zvuku, akustický tlak a další.

Je zřejmé, že přesnost výsledku bude závislá na množství naměřených vstupních dat a zařízení je tedy náročné na požadovaný počet mikrofonů. Omezujícím kritériem je také požadavek na největší možnou vzdálenost dvou mikrofonů. Vzhledem k tomu, že pořizují nespojitě záznam spojitého, navíc periodického, děje, nesmí být od sebe dál než o polovinu vlnové délky měřeného signálu, aby se zabránilo chybě, tzv. aliasing. Oblast frekvencí, pro kterou je beamforming vhodný je 500 Hz až 20kHz. [22]

Metody používané pro měření v blízkém poli (nearfield) se značí „NAH“ (nearfield acoustical holography) akustická holografie blízkého pole.

Algoritmy patřící do této skupiny umožňují oproti algoritmům pro vzdálené pole, zvukové pole měřené prostřednictvím hodnot akustického tlaku přesně rekonstruovat. Vhodné algoritmy jsou např. „Music“ nebo „Sonah“. Jejich princip je následující. Jedná se o systém, kdy je snímáno trojrozměrné zvukové pole a informace o něm jsou ukládány jako dvourozměrná data, z kterých je pak možné opět obnovit trojrozměrný obraz včetně údajů o veličinách akustický tlak, rychlost, intenzita a energie. Akustickou holografii lze s kamerou provádět při umístění kamery od zdroje ve vzdálenosti v řádů desítek centimetrů až metru. [6]

6 Měření v terénu

6.1 Měřicí přístroje

Pro zpracování této práce byla použita tato měřící sestava:

- akustická kamera Bionic L-112 Array,
- počítač s instalovaným programem Noise Inspector,
- záložní napájecí zdroj,
- laserový dálkoměr Leica (vzdálenost kamery od stěny [m]),
- teploměr/vlhkoměr (teplota [°C] a relativní vlhkost vzduchu [%]),
- ruční radar Buchnell (rychlost vlaku [km/h]),
- anemometr (rychlost větru [m/s]),
- barometr (měření tlaku [hPa]).

Hlavním měřícím přístrojem byla Akustická kamera německého výrobce CAE Software und Systems GmbH, Bionic L-112 Array, která má 7 ramen se 16 mikrofony, které dohromady tvoří různici mikrofonní soustavy o průměru 1,7 m o 112 mikrofonech. Zařízení má frekvenční rozsah záznamu přibližně 10 Hz – 24 kHz. Zpracování dat již od 350 Hz s metodou Beamforming. Uprostřed mikrofonního pole je umístěná optická kamera, která snímá a zaznamenává měřený obraz v čase 120 snímků za sekundu.

Měřená data se zpracovávají pomocí programu CAE Noise Inspector v připojeném počítači. Software umožňuje online sledování akustické situace. Zároveň se data ukládají pro pozdější offline analýzu.

Pro správné nastavení měření, práci s kamerou a validní výsledky je nutné před samotným měřením změřit vzdálenost kamery od měřeného objektu a rychlost větru. Pro kontrolu standardního prostředí se dále měří teplota vzduchu, tlak, vlhkost.

V některých případech je potřeba změřit i rychlost pohybujícího se zdroje hluku, což ale není náš případ, kdy je měřena stěna.

6.2 Lokalita

Pro měření byl vybrán úsek na jedné z nejdůležitějších tratí v České republice a to IV. tranzitní železniční koridor Děčín – Horní Dvořiště, konkrétně trať číslo 220, Praha – České Budějovice. Provoz na trati České Budějovice – Praha byl zahájen v roce 1871. Celá trasa IV. železničního koridoru byla kompletně elektrifikována v roce 2001.

Měření v terénu pomocí akustické kamery proběhlo dvakrát na různých stanovištích (stanoviště I, II, III) poblíž železniční stanice Strančice ve stejnojmenné obci. Jedná se trať č. 220, v úseku staničení 157,3 – 157,5 km. Obec Strančice leží 25 km jihovýchodně od Prahy. Stanoviště se nachází uprostřed obce u přejezdu pro automobilovou dopravu, poblíž železniční stanice, obr. 17 a 18.

Jedná se o dvoukolejnou trať ve zhlaví železniční stanice, která má standardní rozchod 1435 mm. Koleje jsou uloženy ve šterkovém loži. Širokopatní kolejnice jsou upevněny na betonových pražcích pomocí pružných svěrek a žebrových podkladnic.

Pro měření byly vytipovány protihlukové stěny realizované v roce 2008, aby se dal posoudit technický stav vlivem působení času na konstrukci a tím pádem na její funkci.

V této lokalitě byly vybrány dva typy protihlukových stěn vhodných pro tuto práci, protože splňují následující parametry:

- jedná se o nejvíce používané typy na železničních koridorech,
- jsou realizované v roce 2008, tudíž existují již více let,
- vykazují vizuální prvky opotřebení,
- v určitých místech jsou hustě porostlé popínavou zelení, která může mít vliv na technický stav,
- jsou dobře dostupné a měřitelné pomocí akustické kamery.

Na základě výše uvedeného bylo možno tedy objektivně změřit a posoudit existující protihlukové opatření (PHS) na dané železniční trati.



Obr. 17: Lokalita Strančice [29]



Obr. 18: Lokalita Strančice, měřená stanoviště I, II, III [29]

6.3 Měření PHS

V této práci byly podrobeny akustickému měření a rozboru stěny typu Faseton a Liadur. Technické parametry jsou uvedeny v následujících kapitolách.

6.3.1 Faseton Welle

Protihlukové stěny Faseton Welle, obr. 19, výrobce Rieder Beton, spol. s r.o., jsou tvořeny železobetonovými panely o následujících parametrech:

- tloušťka 110 mm,
- výška 1500 mm,
- modulová délka 6000 mm.

Panely jsou z lícové strany opatřené profilovanou absorpční vrstvou z dřevocementové vrstvy o objemové hmotnosti 650 kg/m^3 . Absorpční vrstva je profilovaná ve tvaru vlny s roztečí 82,8 mm a výškou vlny 70 mm.

Profil může být proveden i v dalších dvou variantách. Block – pásy o šířce 255 mm střídavé tloušťky 70 a 90 mm. Hohlwelle – absorpční vrstva hříbovitého tvaru. Rovněž výšky se dodávají ve více variantách, 500, 1000, 1500, 2000 mm. Celková tloušťka stěny je 215 až 235 (dle varianty absorbéru). V měřeném úseku se tyto typy nenacházely.

Panely se vsazují shora do železobetonových sloupů tvaru H o průřezu 250/350 mm. Tyto sloupy jsou kotvené do pilot.

Celková výška stěny v měřicím místě je 3,0 m, výška nad TK je 2,5 m.

Akustické vlastnosti dle protokolu o určení typu výrobku [30]:

- zvuková pohltivost – kategorie A3, $8 \leq DL_{\alpha} \leq 11 \text{ dB}$,
- vzduchová neprůzvučnost – kategorie B4, $DL_R > 34 \text{ dB}$. [7]



Obr. 19: PHS Faseton Welle (Strančice 2019/10)

6.3.2 Liadur 8

Protihlukové stěny Liadur, typ 8, obr. 20, výrobce Liadur, s.r.o., jsou tvořeny prefabrikovanými železobetonovými dílci z betonu C30/37 o následujících parametrech:

- tloušťka 110 mm,
- výška 500 mm,
- modulová délka 3000 mm.

Dílce mají na lícové straně 110 mm tlustou vrstvu mezerovitého lehkého betonu s trapézovými žebry, která jsou široké v líci 40 mm a u kořene 60 mm, osová vzdálenost žeber je 100 mm a hloubka 70 mm.

Deska spolu s absorpční vrstvou z mezerovitého lehkého betonu z kameniva Liapor tvoří monolitický celek.

Dílce mohou být dodávány variabilně do max. délky 6000 m a výšky do 3500 mm, ve 12 různých typových variacích.

Celková výška stěny v měřicím místě je 3,0 m, výška nad TK je 2,5 m.

Akustické vlastnosti dle protokolu o počáteční zkoušce typu výrobku [31]:

- zvuková pohltivost – kategorie A3, $8 \leq DL_{\alpha} \leq 11$ dB,
- vzduchová neprůzvučnost – kategorie B4, $DL_R = 45$ dB. [8]

Vzduchová neprůzvučnost 45 dB je stanovena za předpokladu, že zadní vrstva hutného betonu je tlustá min 110 mm a je z betonu s objemovou hmotností 2400 kg/m^3 , mezerovitý beton pohltivé vrstvy má objemovou hmotnost 700 kg/m^3 . [8]



Obr. 20: PHS Liadur typ 8 (Strančice 2019/10)

6.4 Měřicí kampaň 1

Při tomto měření probíhalo měření zvuku z vlaku projíždějícího za protihlukovou stěnou. Jednalo se o dominantní zvuk.

Datum a čas měření: 25. 10. 2019, 9:00 – 12:00.

Předmět měření: provedení terénní zkoušky – měření PHS v terénu pomocí akustické kamery při průjezdu vlakové soupravy.

Podmínky měření: měření proběhlo za příznivých klimatických podmínek,

- rychlost větru 0 – 0,2 m/s,
- teplota vzduchu okolo 10 °C,
- relativní vlhkost okolo 60 %,
- barometrický tlak okolo 1010,0 hPa.

Místo měření:

Během měření byly zvoleny dvě měřicí stanoviště. Kamera byla na všech stanovištích postavena na terénu vně protihlukové stěny (mimo kolejiště), tedy na odvrácené (rubové) straně PHS. Akustická kamera snímala povrch protihlukové stěny včetně spár napojení jednotlivých panelů PHS na sebe a napojení panelů na nosné železobetonové sloupy tvaru H, obr. 21.



Obr. 21: Umístění akustické kamery na stanovišti

6.4.1 Stanoviště I

Stanoviště I se nachází v úseku km 157,4. Zde je postavena protihluková stěna Faseton, detailní popis konstrukce je uveden v kapitole 6.3

Nejdříve byla provedena fyzická obhlídka stěny s těmito výsledky, viz obr. 22 a 23:

- byla objevena opakující se horizontální spára mezi panely o tloušťce několik milimetrů,
- ze strany k trati je vidět ze spáry vystupující těsnicí tkanina,
- stěna je místy porostlá břečťanem po obou stranách.

Sestavená akustická kamera byla umístěna 3,3 m od stěny, mikrofonní růžice byla rovnoběžně se stěnou. V programu byly nastaveny základní vstupní parametry měření (teplota vzduchu, rychlost větru a vzdálenost od PHS). Pro každý přejezd vlaku byl akustickou kamerou nahrán 15 vteřin dlouhý záznam. Takto byly změřeny čtyři vlakové soupravy při různých rychlostech:

- Dvoupodlažní CityElefant, 64 km/h, směr Budějovice
- Osobní rychlík, 100 km/h, směr Praha
- Osobní rychlík, 86 km/h, směr Praha
- Osobní rychlík, 113 km/h, směr Praha

Tímto byly připraveny čtyři vzorky pro offline analýzu v programu systému Noise Inspector.

Při měření je rovněž možno využít tzv. online analýzu kde můžeme díky kameře pozorovat v tomto případě stěnu přímo v terénu a na monitoru počítače se zobrazuje hluková mapa. Tento výstup slouží pro orientační přehled zdroje hluku nebo prostup hluku, který se později vyhodnotí v offline analýze.



Obr. 22: Stanoviště I – tkanina ve spáře mezi dvěma panely PHS



Obr. 23: Stanoviště I – mezera spáry mezi dvěma panely PHS

6.4.2 Stanoviště II

Stanoviště II se nachází na km 157,3. Zde je rovněž postavena protihluková stěna Faseton, detailní popis konstrukce najdeme v kapitole 6.3.

Toto stanoviště bylo zvoleno z důvodu většího prostoru na vnější straně stěny a bylo možné kameru umístit ve větší vzdálenosti od stěny.

Fyzická obhlídka stěny ukázala následující:

- mezi panely je patrná milimetrová spára,
- stěna je porostlá popínavými křovinami.

Akustická kamera byla umístěna 11,2 m od stěny a byly změřeny dva průjezdy vlakové soupravy při různých rychlostech.

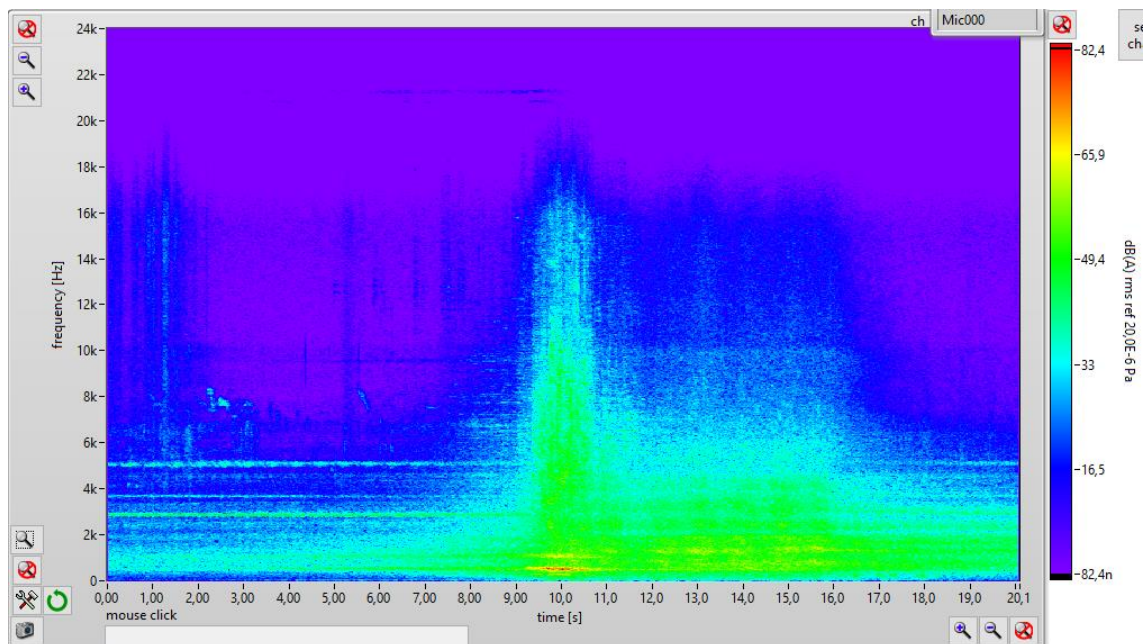
- Dvoupodlažní CityElefant, 71 km/h, směr Praha
- Osobní rychlík, 98 km/h, směr Praha

Pro porovnání výsledků byla kamera umístěna na stejném stanovišti 3,3 m od stěny a byly změřeny další dva průjezdy.

- Nákladní vlak, 40 km/h, směr Praha
- Podbíječka, 58 km/h, směr Praha

Pro každý přejezd byl akustickou kamerou nahrán záznam. Byly nahrány vzorky o délce 15 vteřin.

Na obr. 24 je vidět typický záznam průjezdu vlaku za protihlukovou stěnou. Vidíme nerovnoměrné spektrum. Decibely se mění v čase v závislosti na frekvenci. Jedná se o výstup z programu Noise Inspector pro analýzu dat.



Obr. 24: Typický záznam průjezdu vlaku v programu Noise Inspector 6

6.5 Měřicí kampaň 2

Při tomto měření probíhalo měření zvuku ze zdroje umístěného v kolejišti. Jednalo se o dominantní zvuk.

Datum a čas měření: 5. 11. 2019, 9:00 – 11:30.

Předmět měření: provedení terénní zkoušky – měření PHS v terénu pomocí akustické kamery při zapnutém konstantním zdroji zvuku.

Podmínky měření: měření proběhlo za příznivých klimatických podmínek,

- rychlost větru 0 – 0,2 m/s,
- teplota vzduchu okolo 9 °C,
- relativní vlhkost okolo 50 %,
- barometrický tlak okolo 1010,0 hPa.

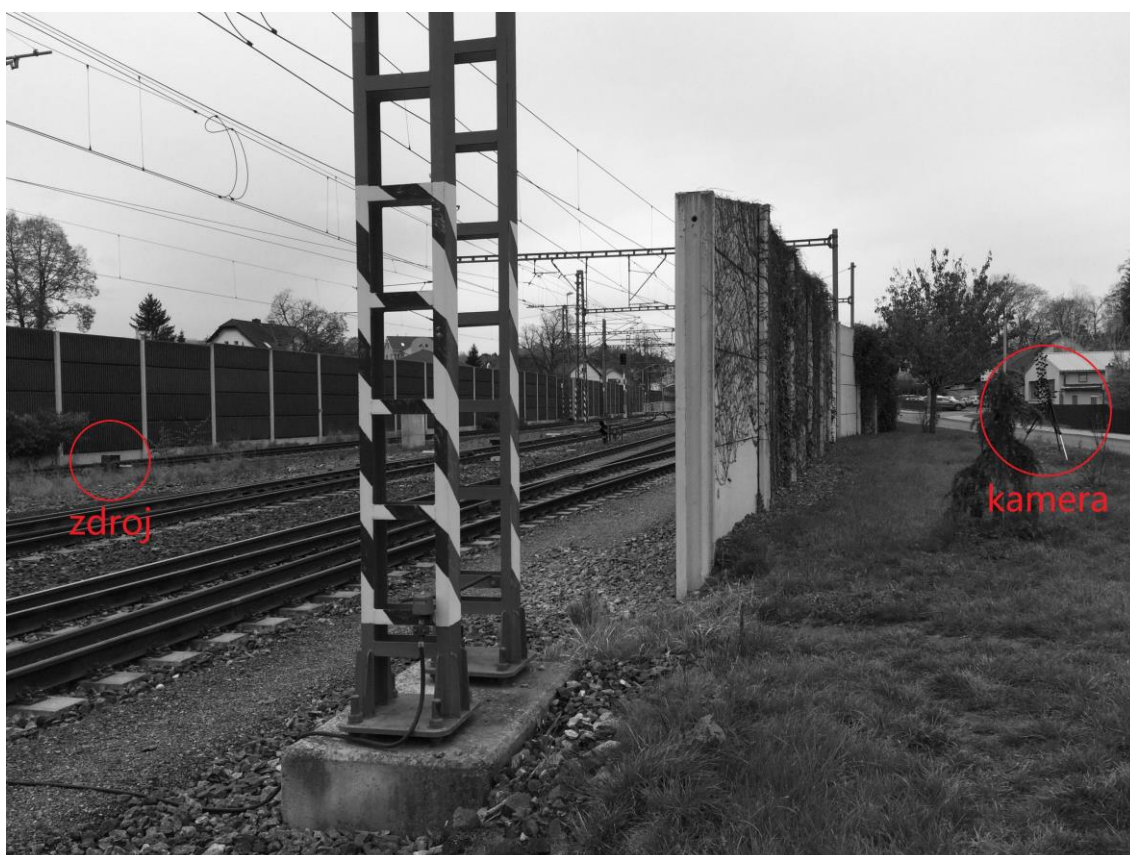
Místo měření:

Během měření byly zvoleny tři měřicí stanoviště. Oproti měřicí kampani 1 bylo přidáno další stanoviště (III), viz níže. Kamera byla na všech stanovištích postavena na terénu vně protihlukové stěny (mimo kolejiště), tedy na odvrácené (rubové) straně PHS. Akustická kamera snímala povrch protihlukové stěny včetně spár napojení jednotlivých panelů PHS na sebe a napojení panelů na nosné železobetonové sloupy tvaru H.

Vzhledem k proměnnému charakteru zvuku vyzařovaného při průjezdu vlaku se v této měřicí kampani přistoupilo k měření konstantního zdroje hluku v kolejišti. Jako zdroj byl použit mnoho frekvenční zvuk, který překrývá nežádoucí hluk z okolního prostředí rušením vlastním zvukem na stejné frekvenci. Signál má stejný výkon v jakémkoli pásmu shodné šířky. Jedná se o tzv. bílý šum. Budíci aparatura byla umístěna na stezce orientovaná směrem na stěnu, obr. 25. Takto vznikl záznam pro pozdější analýzu, obr. 26.



Obr. 25: Budící aparatura, zdroj zvuku, 110 dB



Obr. 26: Umístění zdroje zvuku a akustické kamery na stanovišti III

6.5.1 Stanoviště I

Jedná se o stejné stanoviště jako v měřicí kampani 1. Stanoviště je popsáno v předchozích kapitolách. Umístění na stanovišti bylo provedeno ve dvou měřících polohách.

Akustická kamera byla umístěna 3,3 m od stěny a byly nahrány dva záznamy o délce 10 vteřin (při pohledu zabírala spáru mezi panely PHS).

V druhé poloze byla akustická kamera umístěna 3,3 m od stěny a posunuta tak, aby zabírala i nosný sloup konstrukce. Byly nahrány dva záznamy o délce 10 vteřin.

6.5.2 Stanoviště II

Jedná se o stejné stanoviště jako v měřicí kampani 1. Stanoviště je popsáno v předchozích kapitolách.

Akustická kamera byla umístěna 11,2 m od stěny a byly nahrány dva záznamy o délce 10 vteřin.

Pro porovnání výsledků byla kamera umístěna 3,3 m od stěny a byly nahrány dva záznamy o délce 10 vteřin.

6.5.3 Stanoviště III

Stanoviště III se nachází v úseku km 157,5. Zde je postavena protihluková stěna Liadur, detailní popis konstrukce je uveden v kapitole 6.3.

Byla provedena fyzická obhlídka stěny s těmito výsledky, viz obr. 27 a 28:

- stěna nejeví viditelné poškození,
- nejsou zde žádné viditelné spáry,
- místy je porostlá křovinami, které prorůstají mezi panely a sloupy.

Sestavená akustická kamera byla umístěna 5 m od stěny a byly nahrány čtyři záznamy o délce 10 vteřin. Poté byla kamera přesunuta blíže ke stěně do vzdálenosti 3 m od stěny a opět byly pořízeny čtyři záznamy o délce 10 vteřin.

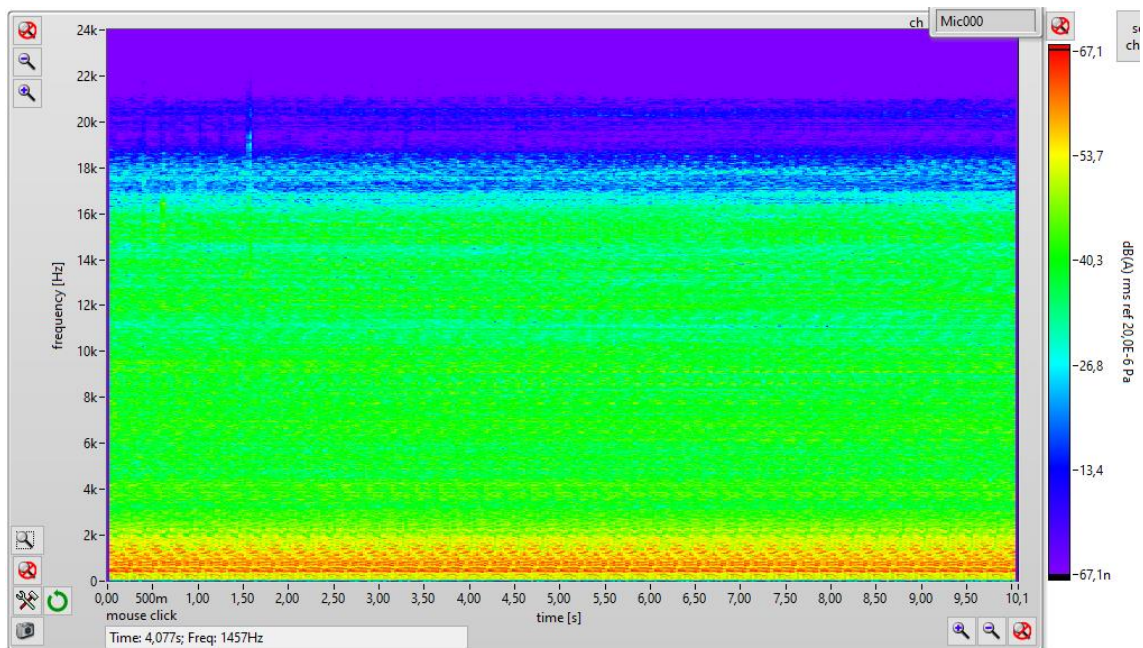


Obr. 27: Detail prorůstání PHS dřevinami



Obr. 28: Stav PHS na stanovišti III a umístění kamery

Na obr. 29 je vidět typický záznam konstantního zvuku v programu pro analýzu dat. Na rozdíl od průjezdu vlaku uvedeného na obr. 24, se jedná o rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotu.



Obr. 29: Typický záznam bílého šumu v programu Noise Inspector 6

V následující analýze naměřených dat budou analyzovány a porovnány data z měření vlaku a data z měření zdroje zvuku. Díky dvěma různým zdrojům zvuku bude stěna posouzena objektivně.

7 Analýza dat

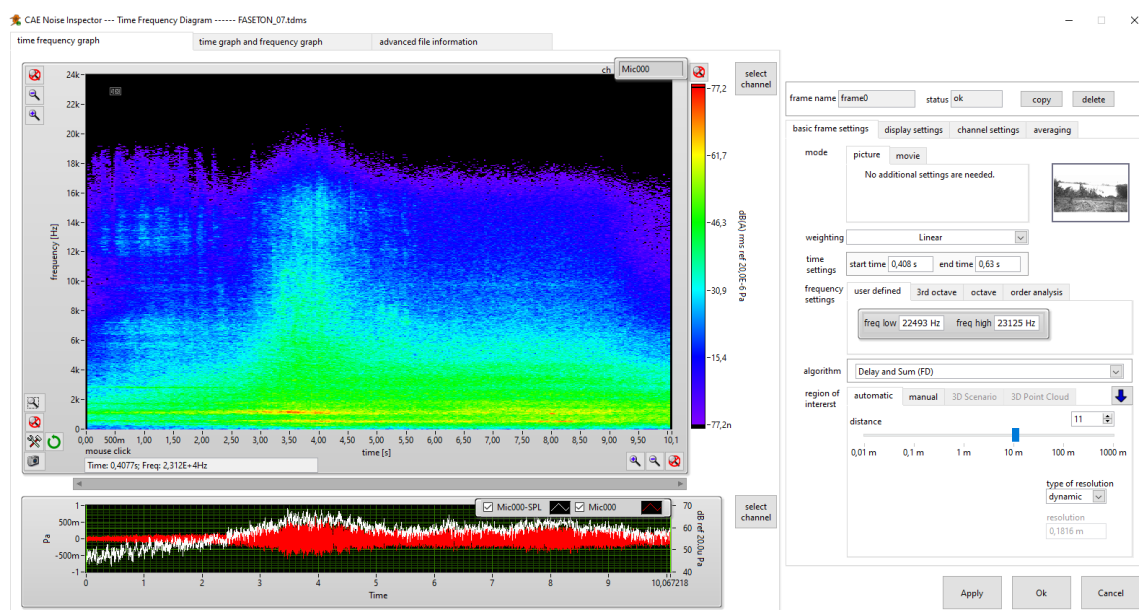
7.1 Všeobecné zásady

Zpracování dat probíhá offline v, již výše zmíněném, programu CAE Noise Inspector 6. Naměřené záznamy, uložené během práce v terénu byly nahrány do programu, kde se nám graficky zobrazí, obr. 30.

Výpočty jsou relativně náročné na čas, resp. výkon počítače. Např. analýza záznamu o délce jedné vteřiny může trvat v řádech minut až desítek minut. Záleží na zvoleném algoritmu a frekvenčním rozsahu.

Tato analýza probíhala na zařízení s těmito parametry:

- procesor: i3-6100 CPU 3,7 GHz,
- RAM: 8,00 GB,
- systém: 64 bit Win 10.



Obr. 30: Grafické prostředí programu Noise Inspector 6

Po nahrání naměřených dat do programu se zobrazí veškeré informace zadané při samotném měření, dále naměřená data v podobě měřeného signálu a spektra při průběhu zvuku. Podrobně se jedná o frekvence v závislosti na čase, akustický tlak v závislosti na čase, hladiny akustického tlaku v závislosti na čase, dále hladiny v závislosti na frekvenci. Akustická energie je zobrazena pomocí barevné stupnice, kde červená znamená největší hladinu akustického tlaku. Tento první grafický výstup nám přinese první informaci o zvuku. V programu si dle požadavků navolíme úseky, které dále analyzujeme.

Postup zpracování je následující:

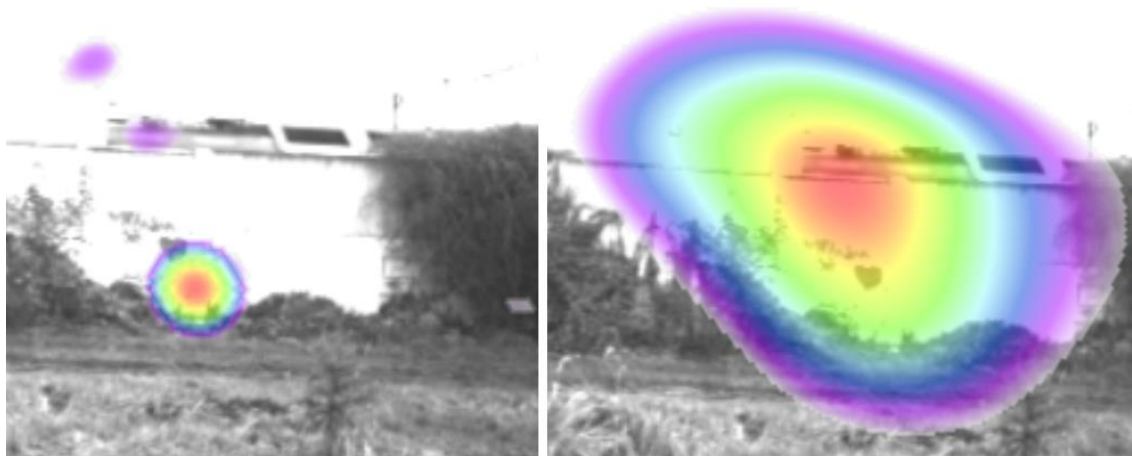
- výběr časového úseku (snažíme se o co nejkratší časový úsek, který má vypovídající hodnotu, kvůli časové náročnosti výpočtu),
- výběr frekvenčního rozsahu v rozmezí pro člověka slyšitelném spektru (opět je důležitá šířka pásma, která má vliv na trvání výpočtu),
- výpočet v programu dle zadaného algoritmu (různé algoritmy jsou vhodné pro analýzu různých událostí).

Obecně řečeno je potřeba analyzovat vše. Při výběru časového úseku je tedy potřeba zohlednit celý zdroj zvuku. V našem případě je to celý průjezd vlaku za protihlukovou stěnou. V praxi můžeme zvolit výpočet pouze pro jeden obrázek, k dispozici je 120 snímků za sekundu, nebo celou sekvenci. Program analyzuje každý obrázek zvlášť a je možné si později prohlížet každý samostatně. Je možné také nastavit, že se analyzuje např. každý desátý obrázek apod.

Frekvenční rozsah je vhodné vybírat co nejkratší, ale zároveň musí být vzorek vypovídající. Proto je potřeba postupně analyzovat celé slyšitelné spektrum, tedy zhruba 20 – 20.000 Hz. Čím širší rozsah je, tím delší čas trvá výpočet a také může být výsledek zkreslený. Pokud například počítáme rozsah v celém, pro člověka slyšitelném pásmu, dojde vlivem širokého spektra ke zprůměrování výsledku a nedokážeme na měřené stěně lokalizovat zvukový prostup. Velmi často se stává, že uvidíme zvukovou mapu pouze nad stěnou. V praxi to tedy znamená, že rozdělíme úsek například po 1000 Hz (nebo méně) a každý úsek počítáme zvlášť.

Jakmile zvolíme úsek pro výpočet a vhodný algoritmus, necháme program analyzovat daný vzorek. Výstupem je obrázek nebo video pořízené kamerou v terénu s detailní zvukovou mapou.

Na obr. 31 je vidět průjezd vlaku za protihlukovou stěnou, můžeme porovnat výstupy výpočtů pro stejný časový úsek, stejným algoritmem, ale pro jiný rozsah frekvencí. Vpravo je díky příliš širokému pásmu výsledek nepřesný, proto je potřeba řídit se výše zmíněnými zásadami.



Obr. 31: Srovnání výstupu výpočtů, vlevo rozsah 2 – 3 kHz, vpravo 0,5 – 6 kHz

Analýza vzorků naměřených při použití konstantního mnoho frekvenčního zdroje zvuku s rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotou má jednu výhodu. Při této analýze se nemusí řešit časový úsek, v kterém bude analyzován vzorek dat v programu. Toto je potřeba řešit při proměnném charakteru zvuku jako je vlaková doprava. Při analýze vzorků se zdrojem zvuku, řešíme pouze frekvenční rozsah, protože hladina akustického tlaku je po celou dobu stejná.

Z toho důvodu a pro zjednodušení procesu se nejdříve analyzují data z druhé měřicí kampaně, což jsou vzorky nahrané se zdrojem zvuku v kolejišti. Tímto způsobem se snadněji určí šíře frekvenčního pásma zvuku, který prostupuje protihlukovou stěnou. Toto se pak prověří analýzou vzorků z první měřicí kampaně, což jsou vzorky nahrané při průjezdu vlaku.

7.2 Analýza dat z měřicí kampaně 2

V prvním kroku se celý záznam rozdělí v určitém časovém úseku po 1000 Hz v rozsahu slyšitelného spektra. Tímto vznikne 20 úseků, které v druhém kroku program analyzuje pomocí algoritmu „Beamforming – Delay and Sum“. Tento algoritmus je vhodný pro lokalizaci vzdáleného zdroje hluku, což je případ této úlohy.

7.2.1 Stanoviště I

Po aplikaci výše jmenovaného postupu bylo tedy pro stanoviště I definováno 20 úseků, po 1000 Hz (0 – 20.000) a zadáno k výpočtu.

Na následujících výstupech z programu, obr. 32 až 38, vidíme zvukovou mapu aplikovanou na výstup z kamery, v tomto případě na jeden obrázek. Výstupy jsou rozděleny po 1000 Hz, to znamená, že každý výstup zobrazuje zvukovou mapu pro rozsah 1000 Hz.

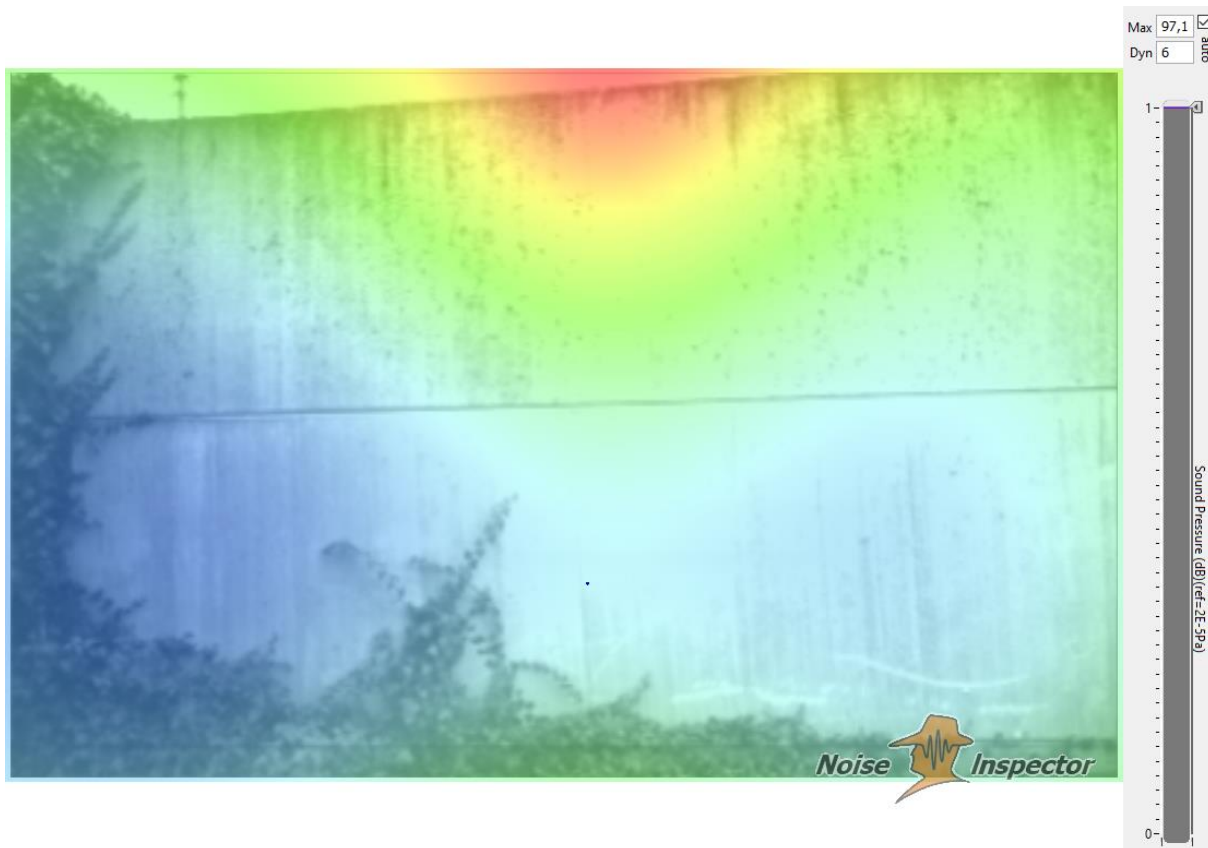
Maximální hladina akustického tlaku je na barevné mapě izofon značena červeně.

Jak je patrné z obrázků, je nejvyšší hladina akustického tlaku při frekvencích v rozsahu 0 – 1kHz. V tomto rozsahu není patrný prostup zvuku stěnou, protože energie je tak vysoká, že se převalí přes stěnu, obr. 32.

V rozsahu frekvencí 1 – 5 kHz, obr. 33 až 38, jsou patrné prostupy zvuku spárami mezi panely a při uložení panelů do sloupu tvaru H.

Kolem frekvence 5 kHz a vyšších už nebyl zaznamenán průkazný prostup spárami mezi panely ani při uložení panelů do sloupu.

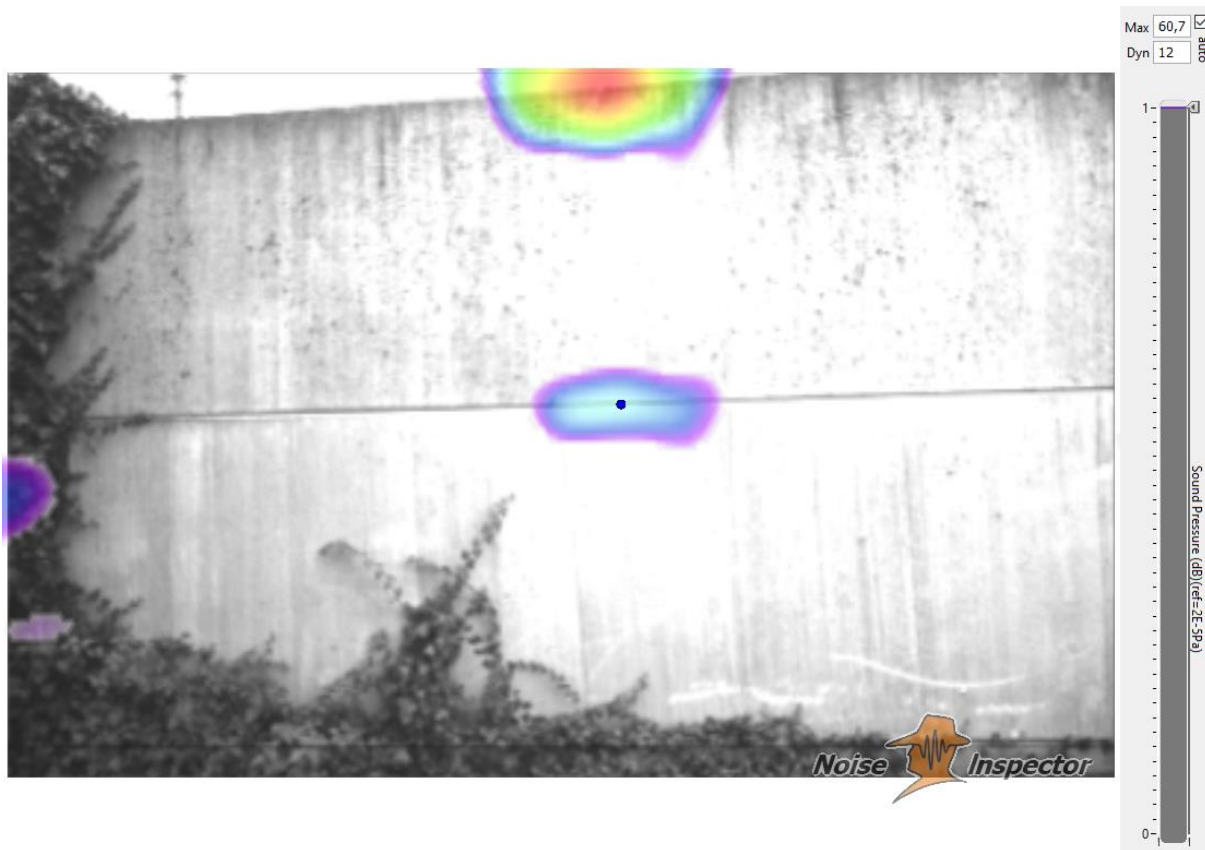
Lze předpokládat, že na vyšších frekvencích hladina akustického tlaku klesá.



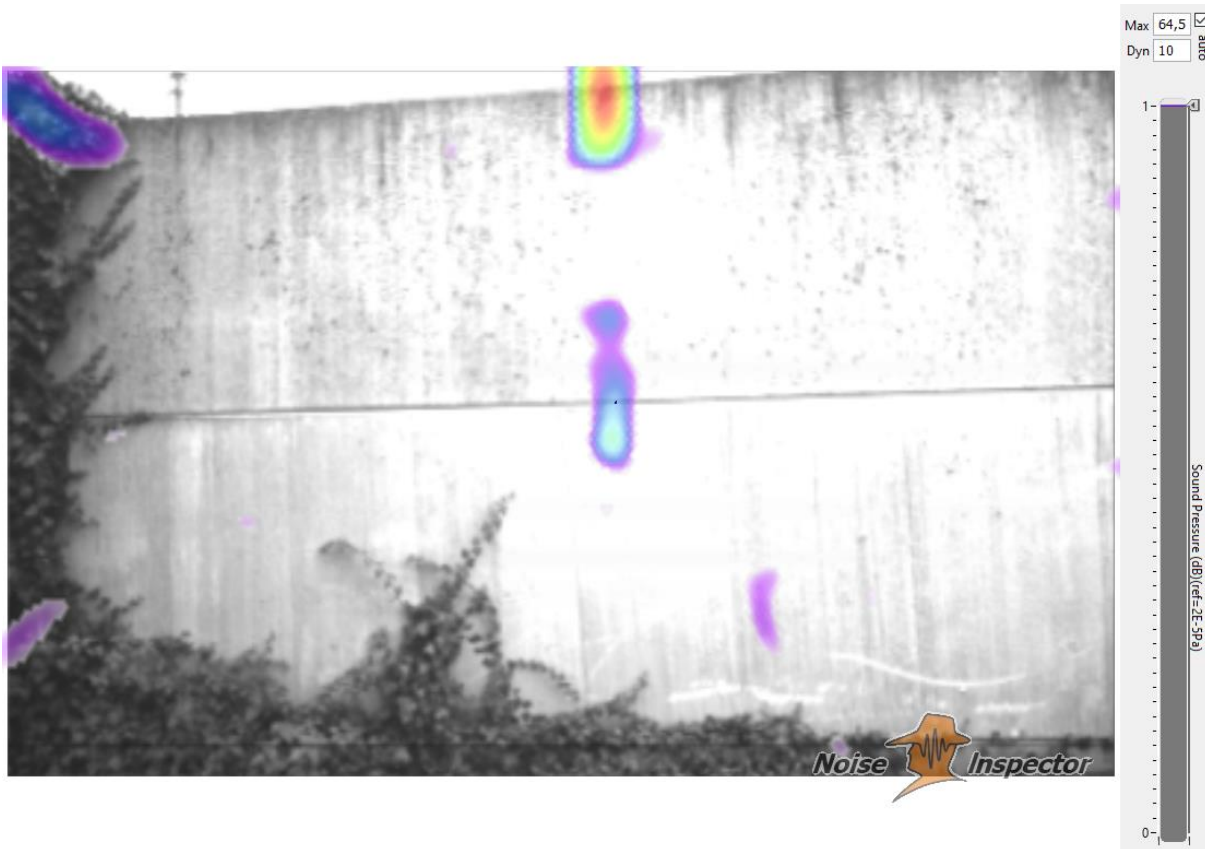
Obr. 32: Zvuk v rozsahu 0 – 1 kHz přichází nad stěnou; nejvyšší hladina akustického tlaku je 97,1 dB



Obr. 33: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 86,1 dB; ve spáře 76,6 dB



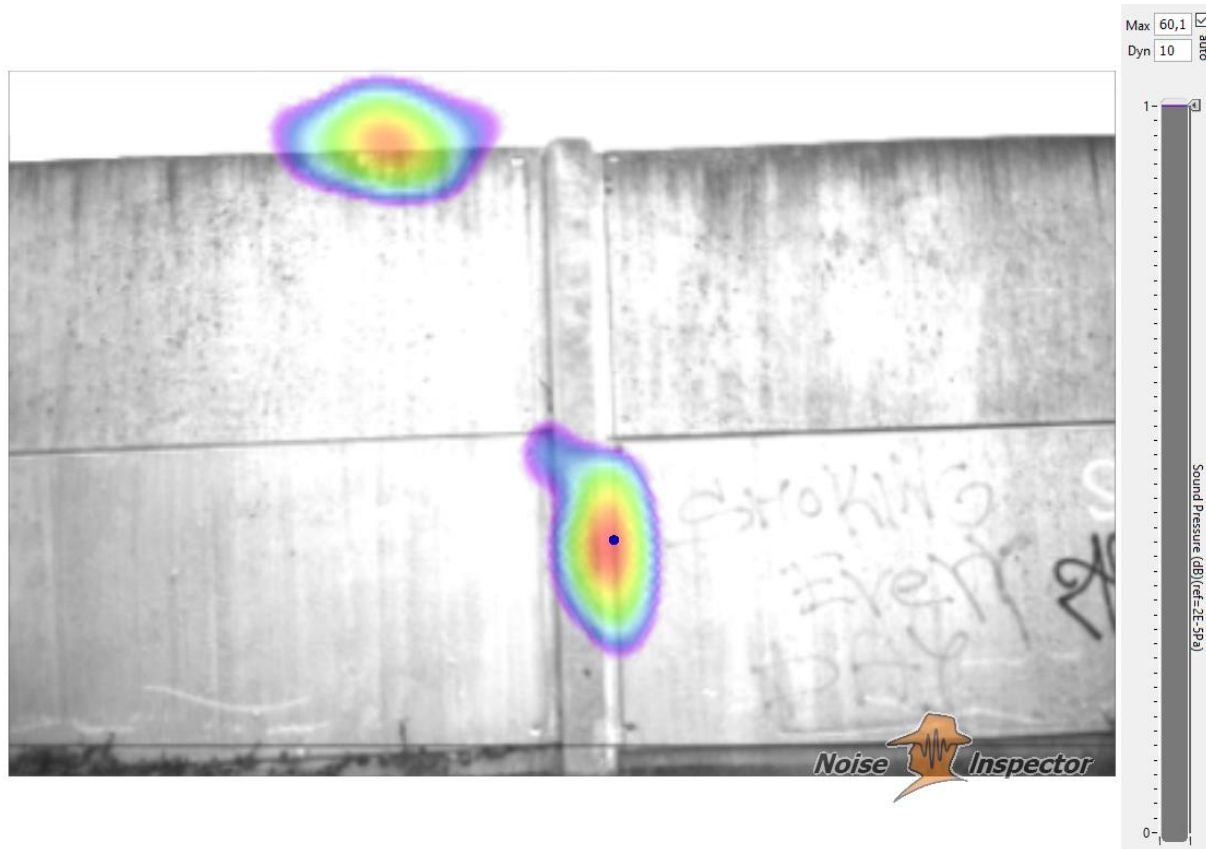
Obr. 34: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina 60,7 dB; ve spáře 54,8 dB



Obr. 35: 3 kHz – 4 kHz; max. hladina 64,5 dB; ve spáře 58 dB



Obr. 36: 4 kHz – 5 kHz; max. hladina 62,9 dB; ve spáře 56,8 dB



Obr. 37: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina 60,1 dB; ve spáře 60,1 dB



Obr. 38: 4 kHz – 5 kHz; max. hladina 52,1 dB; ve spáře 52,1 dB

7.2.2 Stanoviště II

Pro naměřený vzorek bylo opět definováno 20 úseků po 1000 Hz (0 – 20.000) a zadáno k výpočtu.

Na následujících výstupech z programu, obr. 39 až 48, vidíme zvukovou mapu aplikovanou na výstup z kamery, v tomto případě na jeden obrázek. Výstupy jsou rozděleny po 1000 Hz, to znamená, že každý výstup zobrazuje zvukovou mapu pro rozsah 1000 Hz

Maximální hladina akustického tlaku je na barevné mapě izofon značena červeně.

Jak je patrné z obrázků, je opět nejvyšší hladina akustického tlaku při frekvencích v rozsahu 0 – 1kHz. V tomto rozsahu není patrný prostup zvuku stěnou, obr. 39.

V rozsahu frekvencí 1 – 2 kHz je zvuková mapa již čitelnější a lze místy předpokládat prostup stěnou, ale i zvukové odrazy, obr. 40.

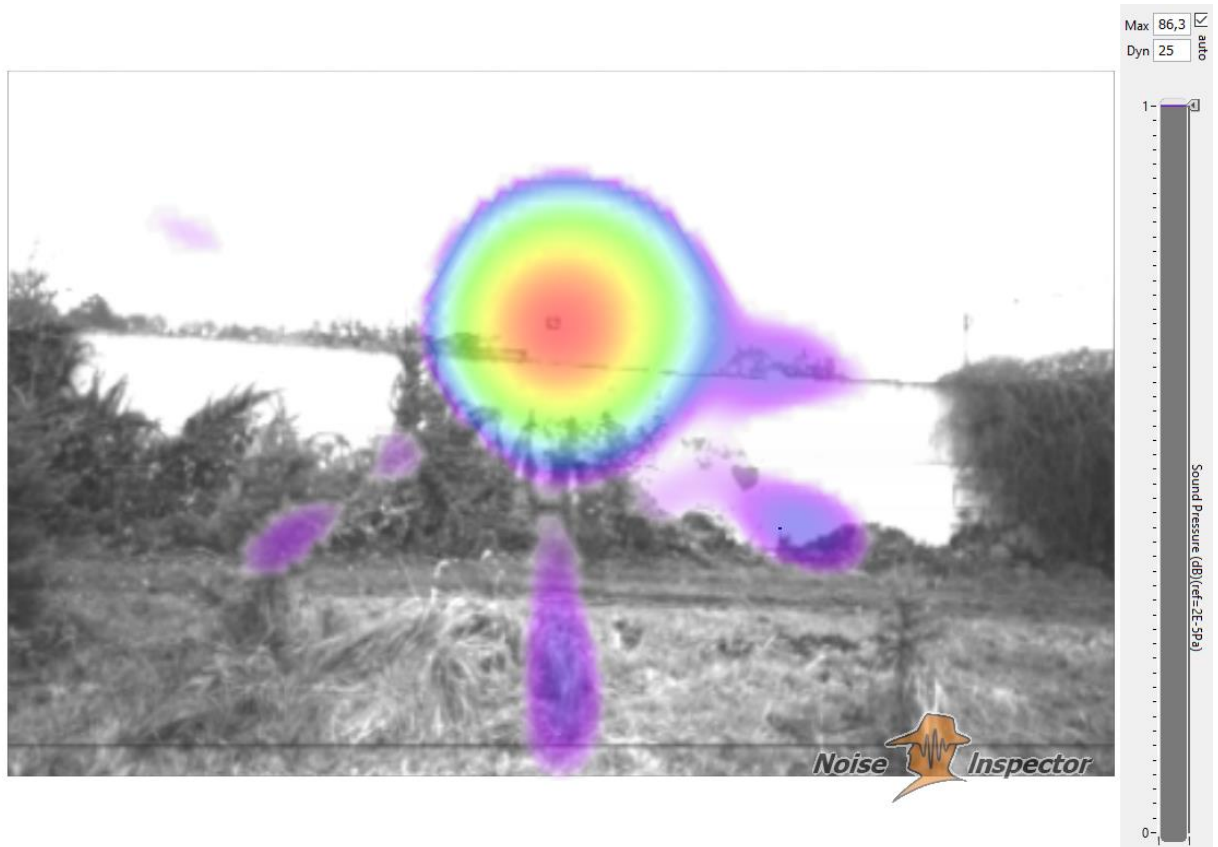
V rozsahu frekvencí 2 – 6 kHz, obr. 41 až 48, jsou patrné prostupy zvuku spárami mezi panely a při uložení panelů do sloupu tvaru H.

Při frekvencích do 6 kHz se zvuk prostupující uložení panelu do sloupu tvaru H pohybuje kolem 50 dB. Při vyšších frekvencích už není prostup detekován.

Lze předpokládat, že na vyšších frekvencích hladina akustického tlaku klesá.



Obr. 39: 0 kHz – 1 kHz; max. hladina 100 dB



Obr. 40: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 86,3 dB



Obr. 41: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina 71,1 dB; ve spáře 62,8 dB



Obr. 42: 3 kHz – 4 kHz; max. hladina 63,4 dB; ve spáře 54,9 dB



Obr. 43: 4 kHz – 5 kHz; max. hladina 61,7 dB; ve spáře 53,6 dB



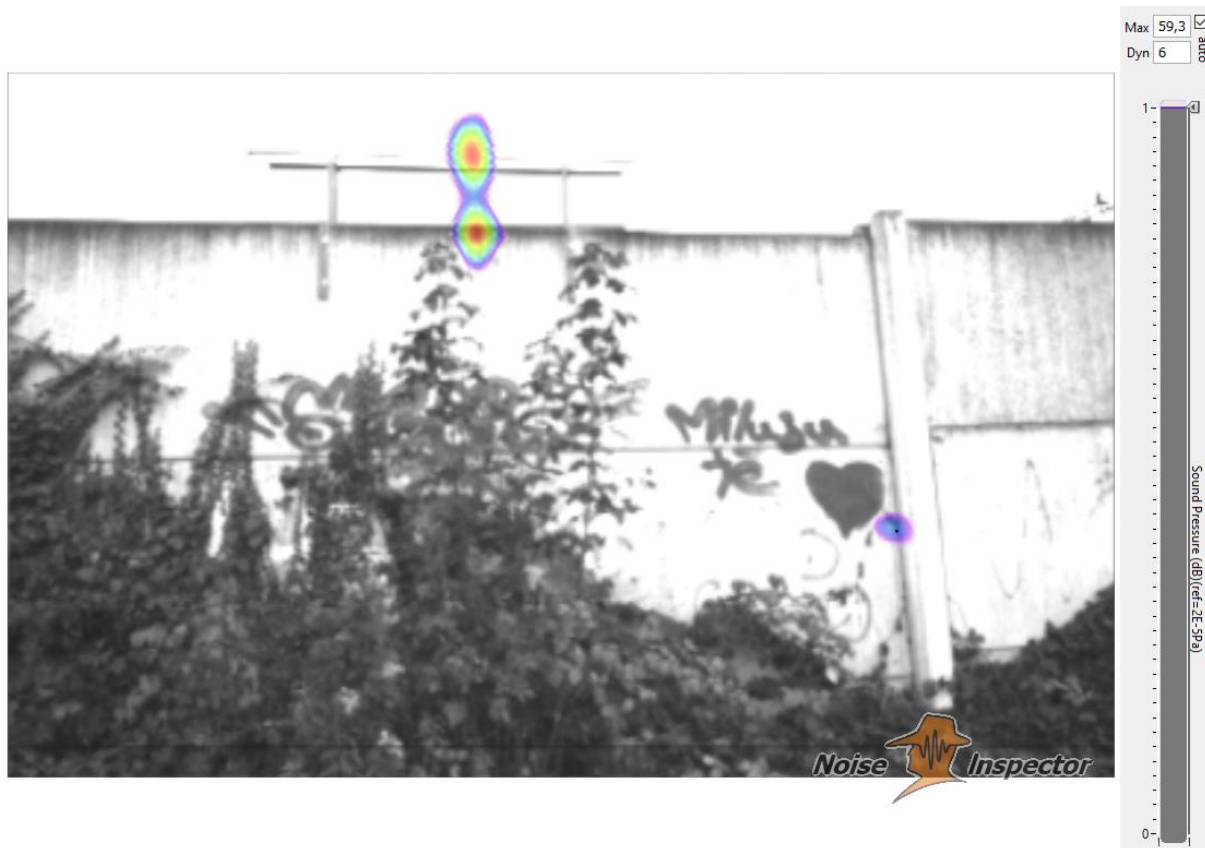
Obr. 44: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 84,5 dB; ve spáře 76,2 dB



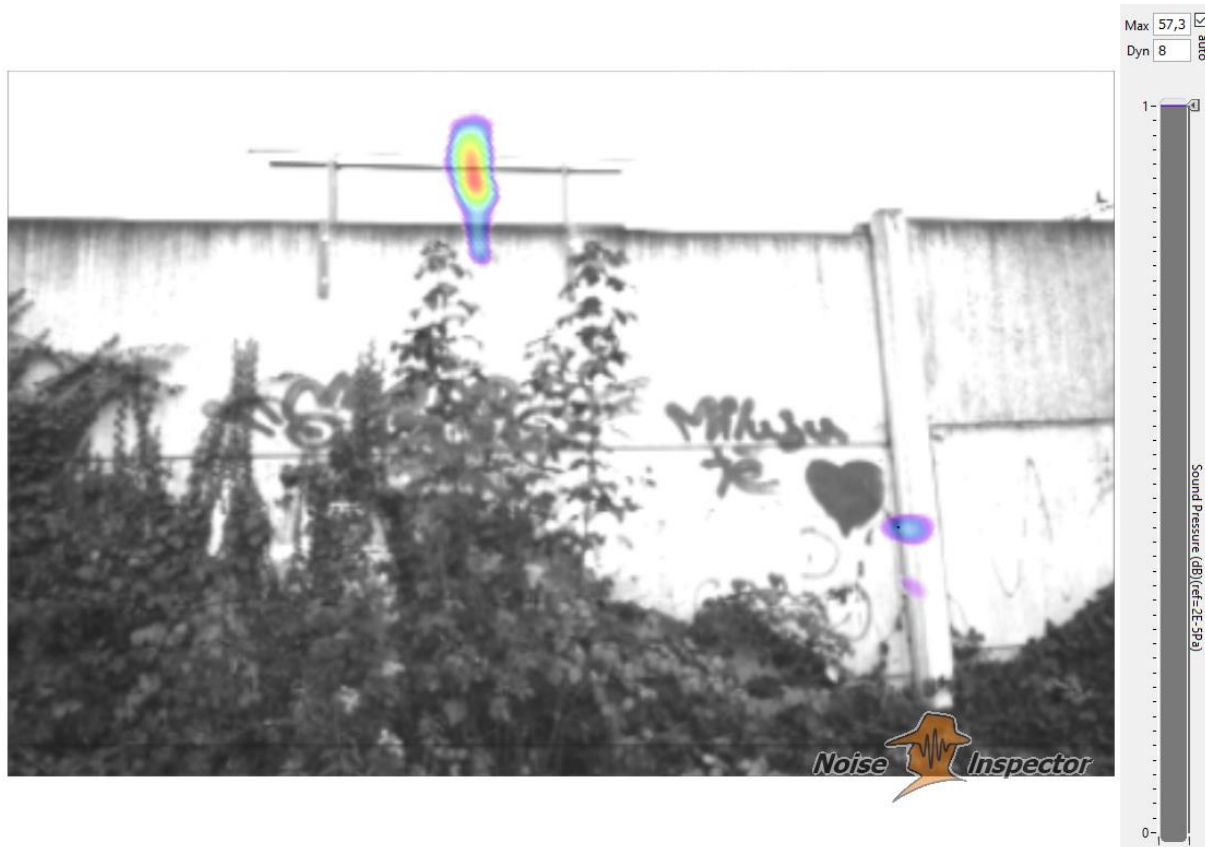
Obr. 45: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina 71,9 dB; ve spáře 68,9 dB



Obr. 46: 3 kHz – 4 kHz; max. hladina 63,1 dB; ve spáře 58,3 dB



Obr. 47: 4 kHz – 5 kHz; max. hladina 59,3 dB; ve spáře 55,5 dB



Obr. 48: 5 kHz – 6 kHz; max. hladina 57,3 dB; ve spáře 53,3 dB

7.2.3 Stanoviště III

Na stanovišti III jsou analyzovány pouze vzorky změřené ze vzdálenosti 3 m od stěny, kdy kamera nezabírá prostor nad stěnou a měření je průkaznější. Vzorky dat ze vzdálenosti 5 m od stěny nebyly analyzovány.

Pro naměřený vzorek bylo opět definováno 20 úseků po 1000 Hz (0 – 20.000) a zadáno k výpočtu.

Na následujících výstupech z programu, obr. 49 až 52, vidíme zvukovou mapu aplikovanou na výstup z kamery, v tomto případě na jeden obrázek. Výstupy jsou rozděleny po 1000 Hz, to znamená, že každý výstup zobrazuje zvukovou mapu pro rozsah 1000 Hz

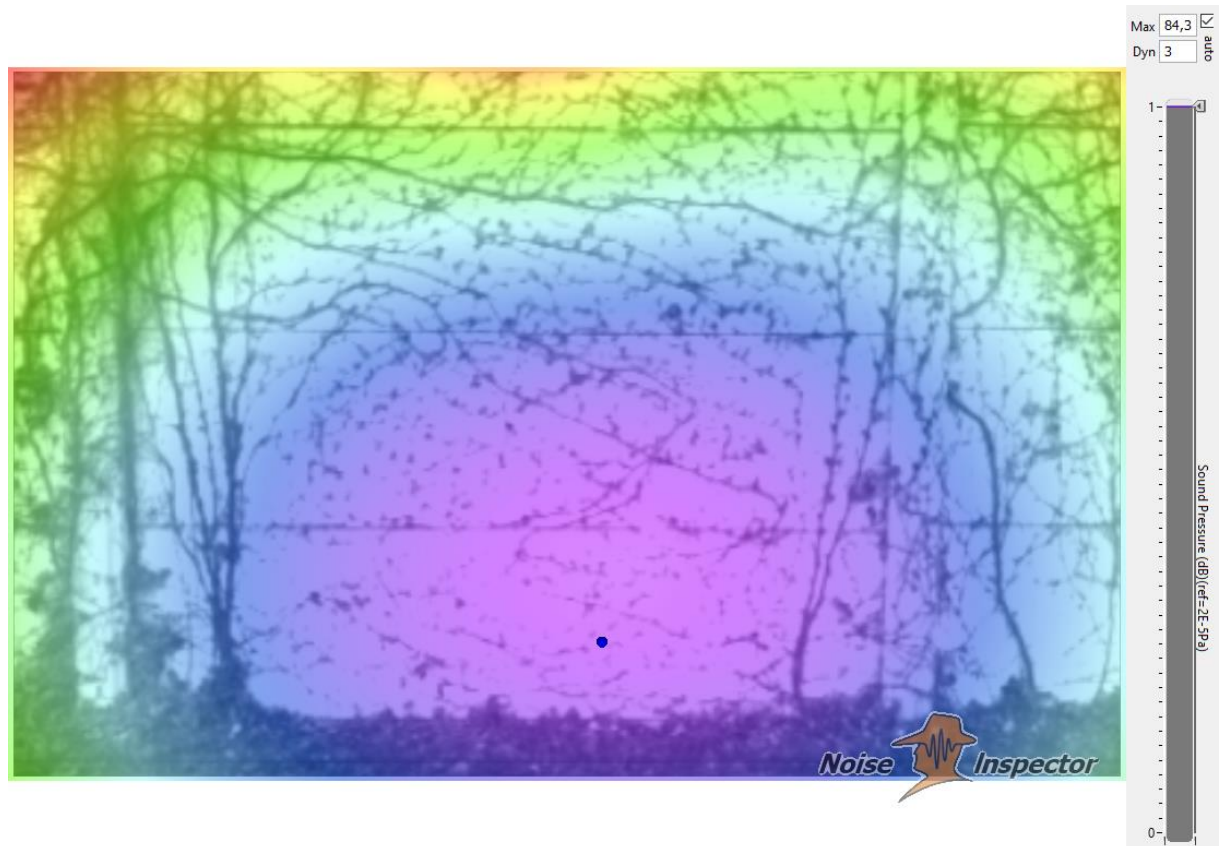
Maximální hladina akustického tlaku je na barevné mapě izofon značena červeně.

Nejvyšší hladina akustického tlaku je opět při frekvencích v rozsahu 0 – 1 kHz. V tomto rozsahu není patrný prostup zvuku stěnou, obr. 49. Je zde dobře viditelný přesah zvuku přes překážku a jeho šíření do okolí.

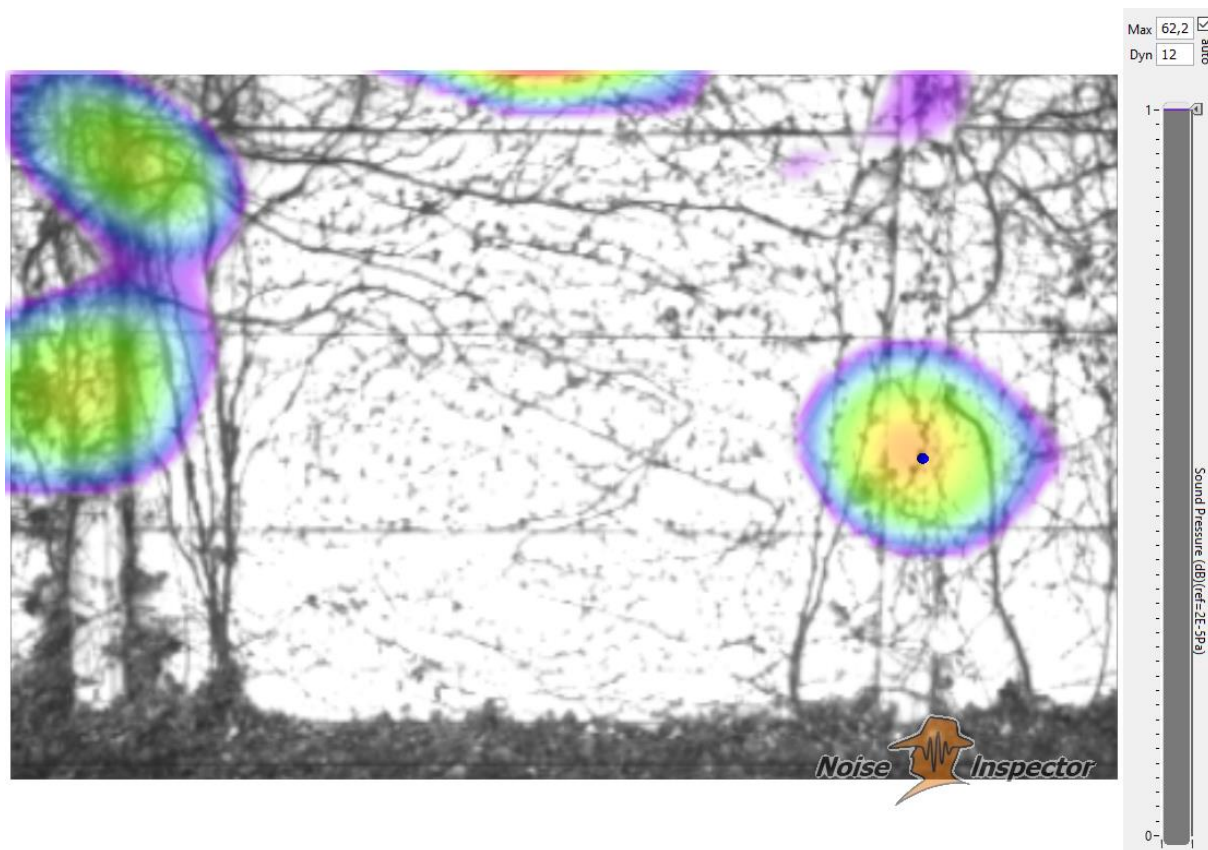
V rozsahu frekvencí 2 – 4 kHz jsou patrné prostupy zvuku při uložení panelů do sloupu tvaru H, obr. č. 49 až 52. Prostupy zvuku mezi spárami jsou minimální, téměř žádné.

Při frekvencích nad 4 kHz se zvuk prostupující uložním panelu do sloupu tvaru H pohybuje kolem 40 dB a postupně detekce mizí. Při vyšších frekvencích už není prostup detekován.

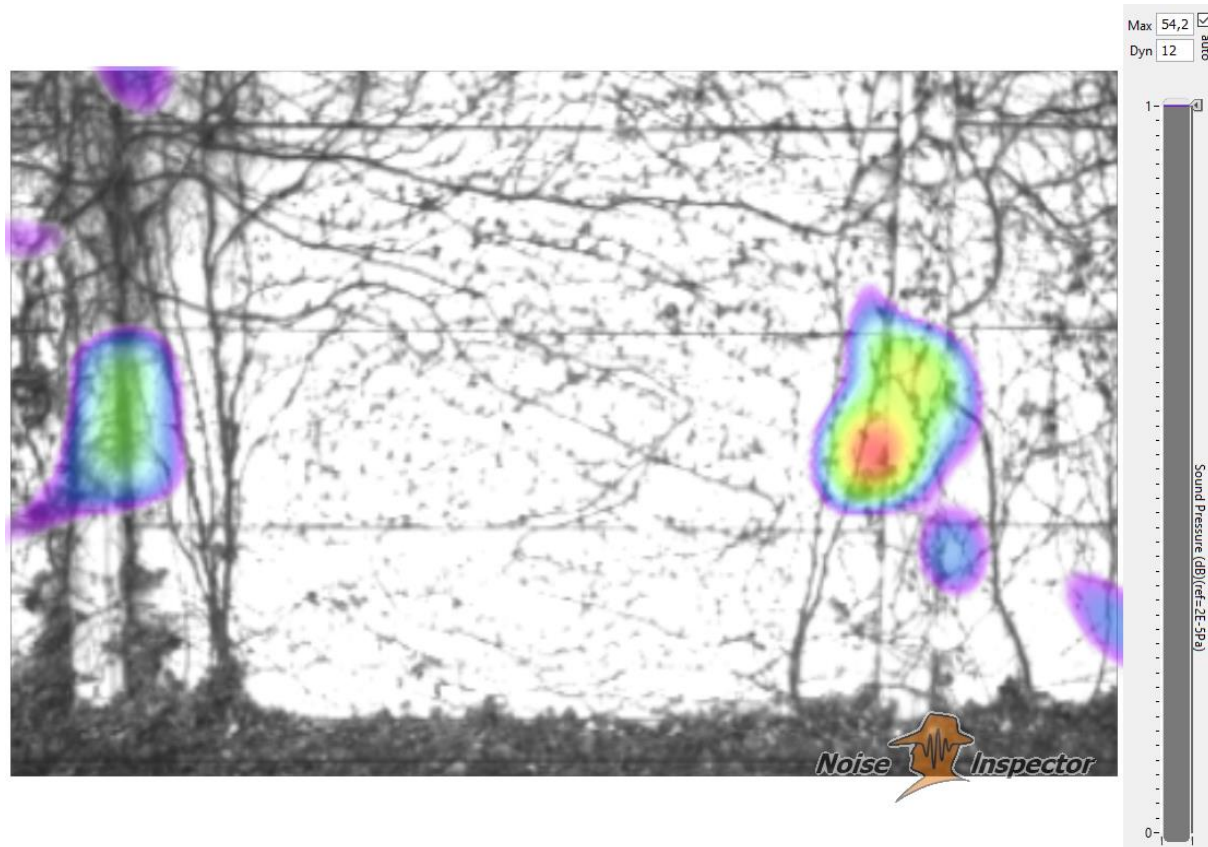
Lze předpokládat, že na vyšších frekvencích hladina akustického tlaku klesá.



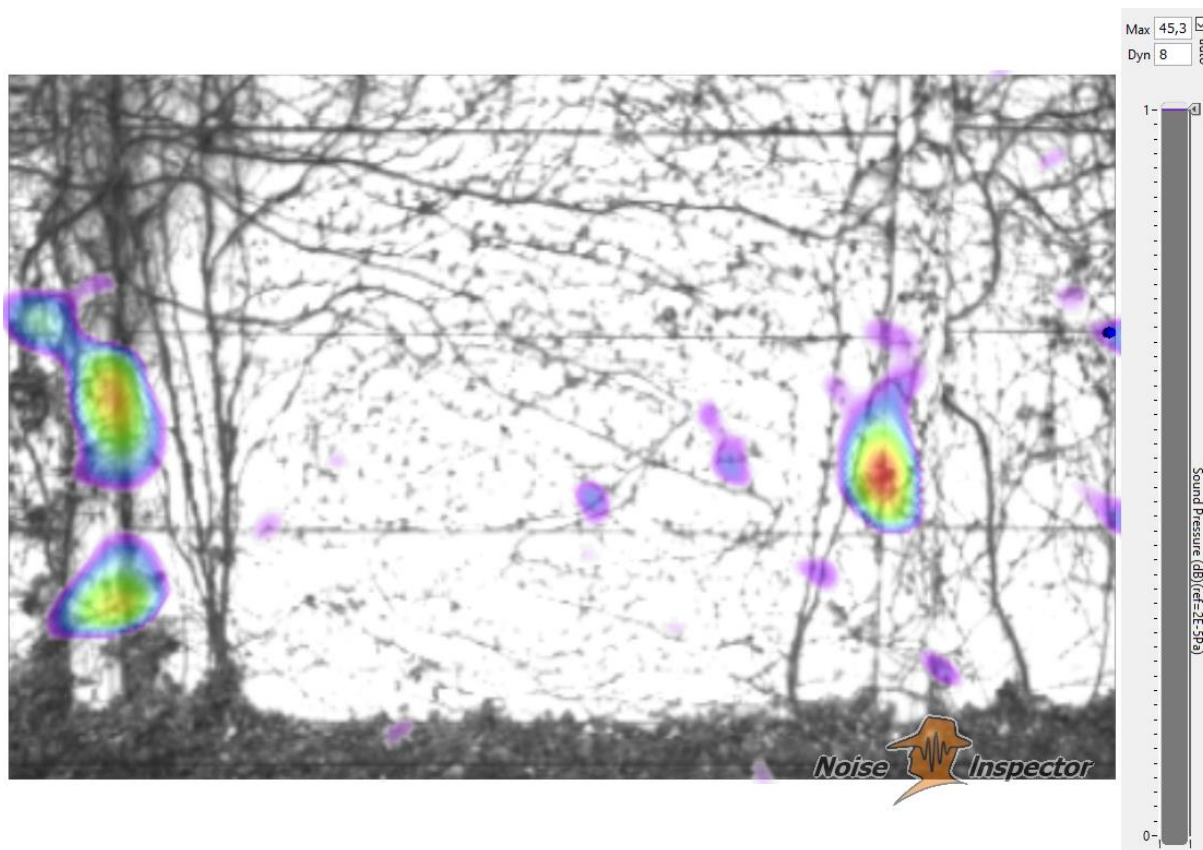
Obr. 49: 0 kHz – 1 kHz; max. hladina 84,3 dB; v místě bodu 81,8 dB



Obr. 50: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 62,2 dB; ve spáře 61,0 dB



Obr. 51: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina 54,2 dB; ve spáře 54,2 dB



Obr. 52: 3 kHz – 4 kHz; max. hladina 45,3 dB; ve spáře 45,3 dB

7.2.4 Shrnutí

Na základě všech výše uvedených analýz, kdy byl použit mnoho frekvenční zdroj zvuku umístěn tak, že zvuk byl kolmo vyslán na pohltivou stranu zkoumané stěny na třech různých stanovištích, můžeme konstatovat následující. Nežádoucí hluk s nejvyšší hladinou akustického tlaku se šíří nad stěnou a místy skrz stěnu v rozsahu do cca 5 kHz. Hladina akustického tlaku s vyššími frekvencemi je už relativně zanedbatelná ve vztahu k životnímu prostředí podél trati, resp. s vyšší frekvencí hladina akustického tlaku klesá.

Na základě těchto poznatků jsou, v další části této práce, analyzovány změřené průjezdy vlaků za protihlukovými stěnami.

7.3 Analýza dat z měřicí kampaně 1

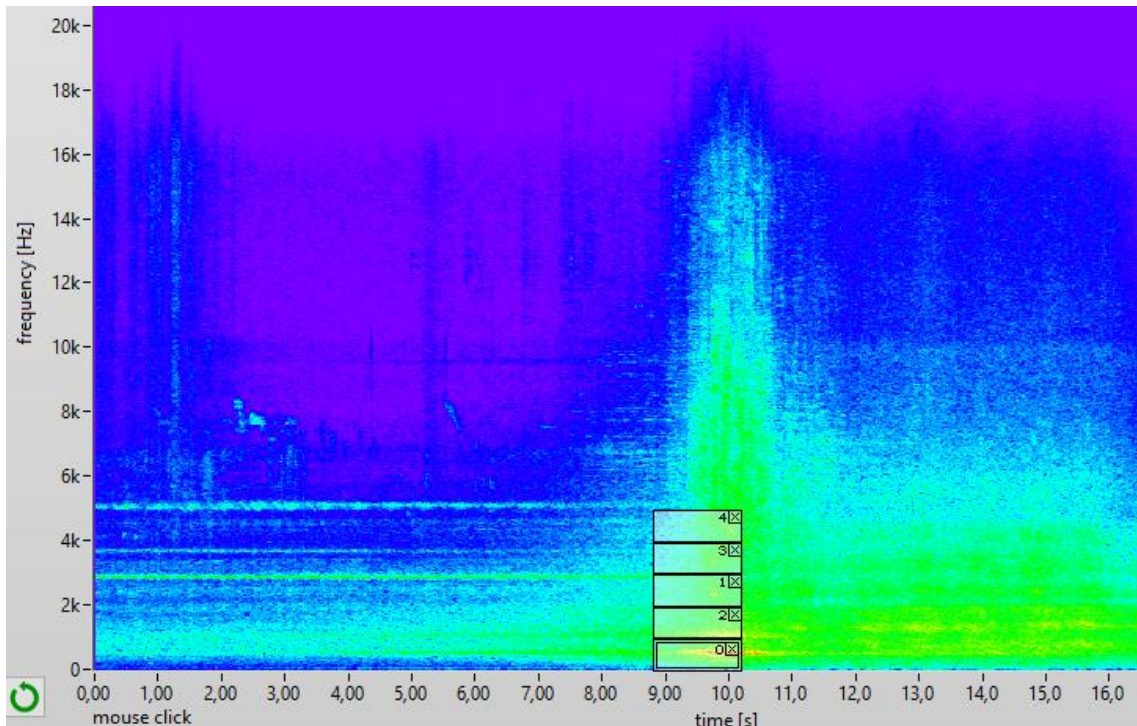
Měření probíhala na stejných stanovištích jako měření se zdrojem zvuku.

Vzorky naměřené při průjezdu vlaku mají, oproti vzorkům měřeným se zdrojem zvuku s rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotou, tu nevýhodu, že hladina akustického tlaku se neustále v čase mění. Typický záznam průjezdu vlaku je vidět na obr. 24 a 53.

Při tomto rozboru jsou využity poznatky z předchozí analýzy, kdy byl použit konstantní zdroj zvuku. Bylo zjištěno, že největší hladina akustického tlaku byla zhruba od 0 do 4 až 5 kHz. Vzorek je rozdělen do úseků v rozsahu 0

– 5 kHz a to po 1000 Hz, pro kontrolu jsou voleny i jiné, menší úseky (např. po 500 Hz), a porovnávány.

Časový úsek je volen mezi 1 – 2 vteřin v místě nejvyššího akustického tlaku, který je definován na barevné zvukové mapě od červené přes žlutou a zelenou k fialové úrovni hluku, od nejvyšší k nejnižší. Viz obr. č. 53.



Obr. 53: Výběr úseků u vzorku projíždějícího vlaku

Tento postup se osvědčil při předchozí analýze. Program počítá každý obrázek ze záznamu zvlášť, a proto je možné analyzovat vše podrobně. Jak již bylo uvedeno na začátku kapitoly, k dispozici je 120 snímků za sekundu.

Postupně jsou všechny vzorky ze všech stanovišť rozděleny na úseky a zadány k výpočtu do programu.

V následujících kapitolách jsou uvedeny významné výstupy z programu, zvukové mapy aplikované na výstupy z kamery.

7.3.1 Stanoviště I

Na následujících výstupech z programu, obr. 54 až 58, vidíme zvukovou mapu aplikovanou na výstup z kamery, v tomto případě na jeden obrázek. Výstupy jsou rozděleny po 1000 Hz, to znamená, že každý výstup zobrazuje zvukovou mapu pro rozsah 1000 Hz.

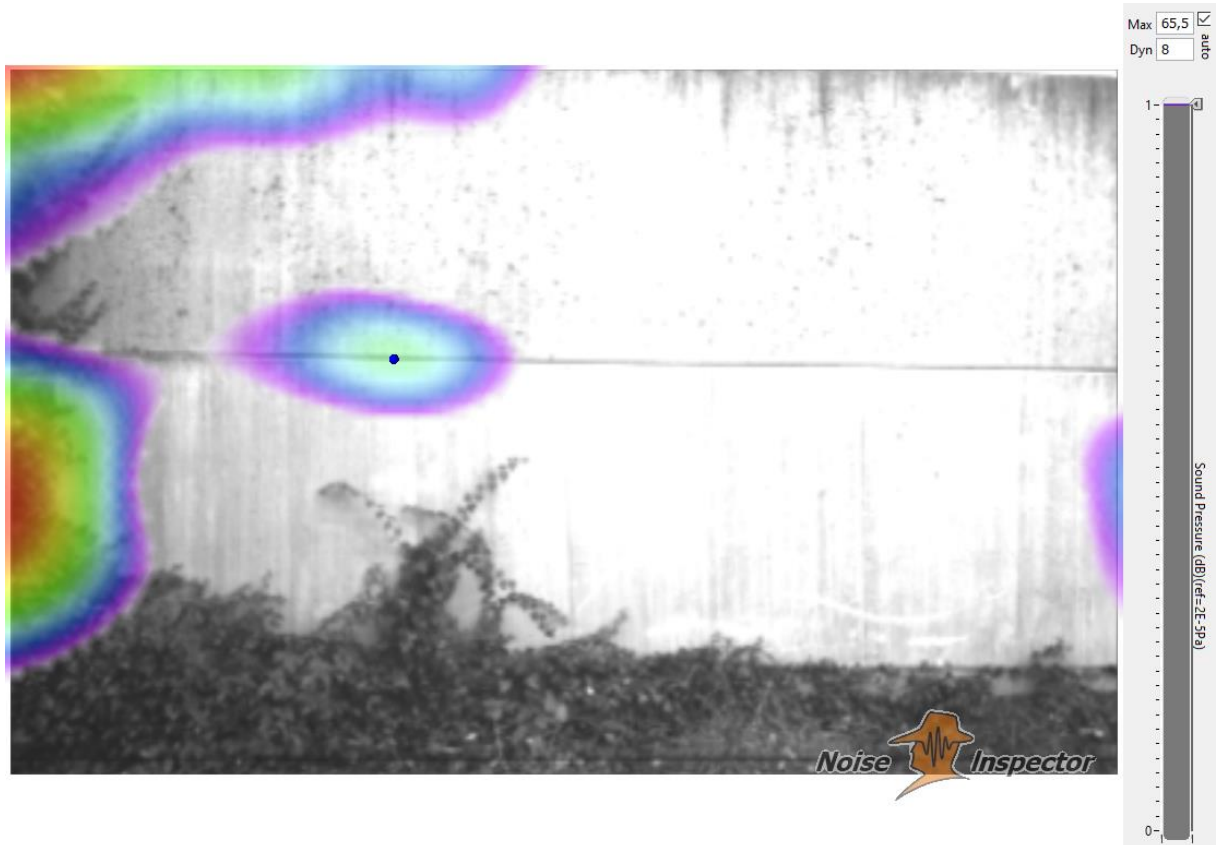
Pro podrobnou analýzu na tomto stanovišti byl vybrán záznam průjezdu osobního rychlíku ve směru Praha, rychlost 100 km/h.

Maximální hladina akustického tlaku je na barevné mapě izofon značena červeně.

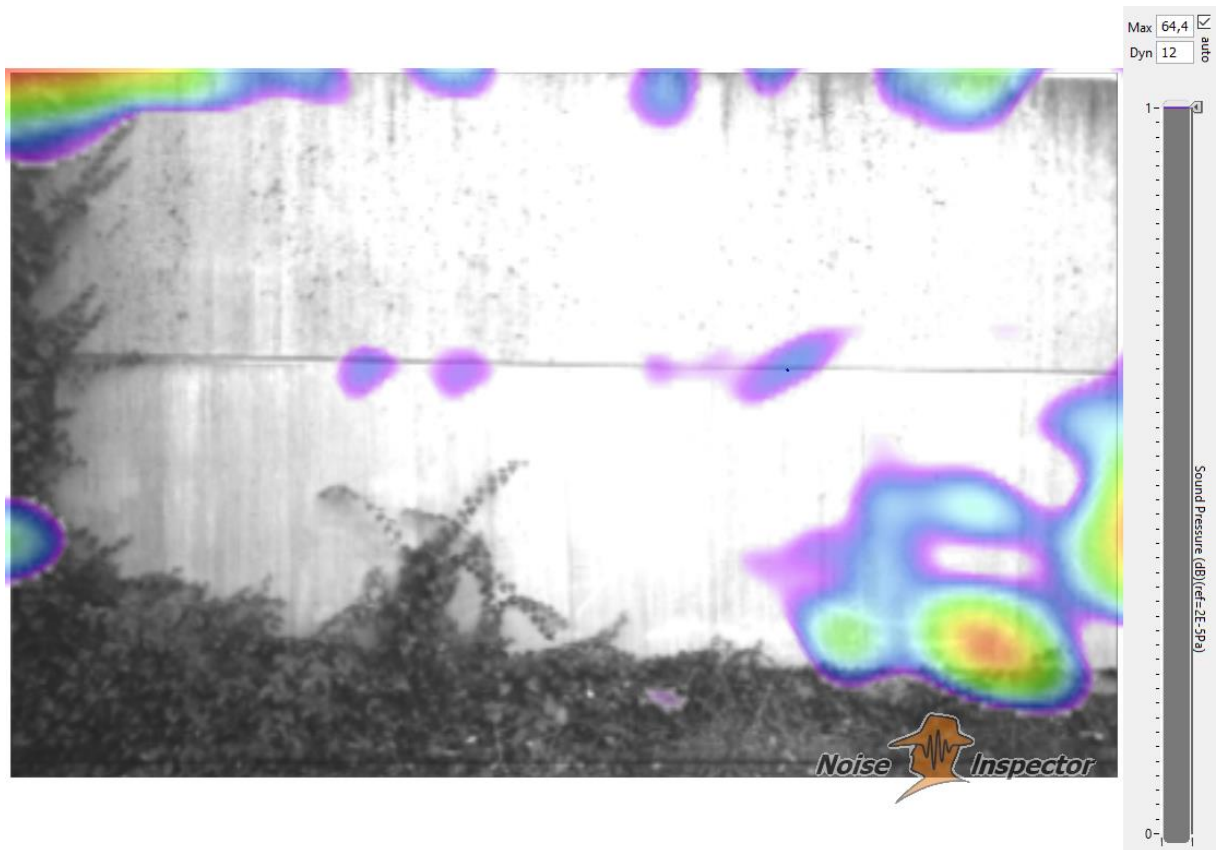
Na obr. 54 a 55 je detekován prostup zvuku skrz spáru mezi panely, naměřená hladina akustického tlaku se pohybuje okolo 60,0 dB při rozsahu frekvencí 1 – 3 kHz.

Na obr. 56 a 57 při rozsahu frekvencí 3 – 5 kHz je detekován zvuk v místě rozhraní panelu a betonového soklu.

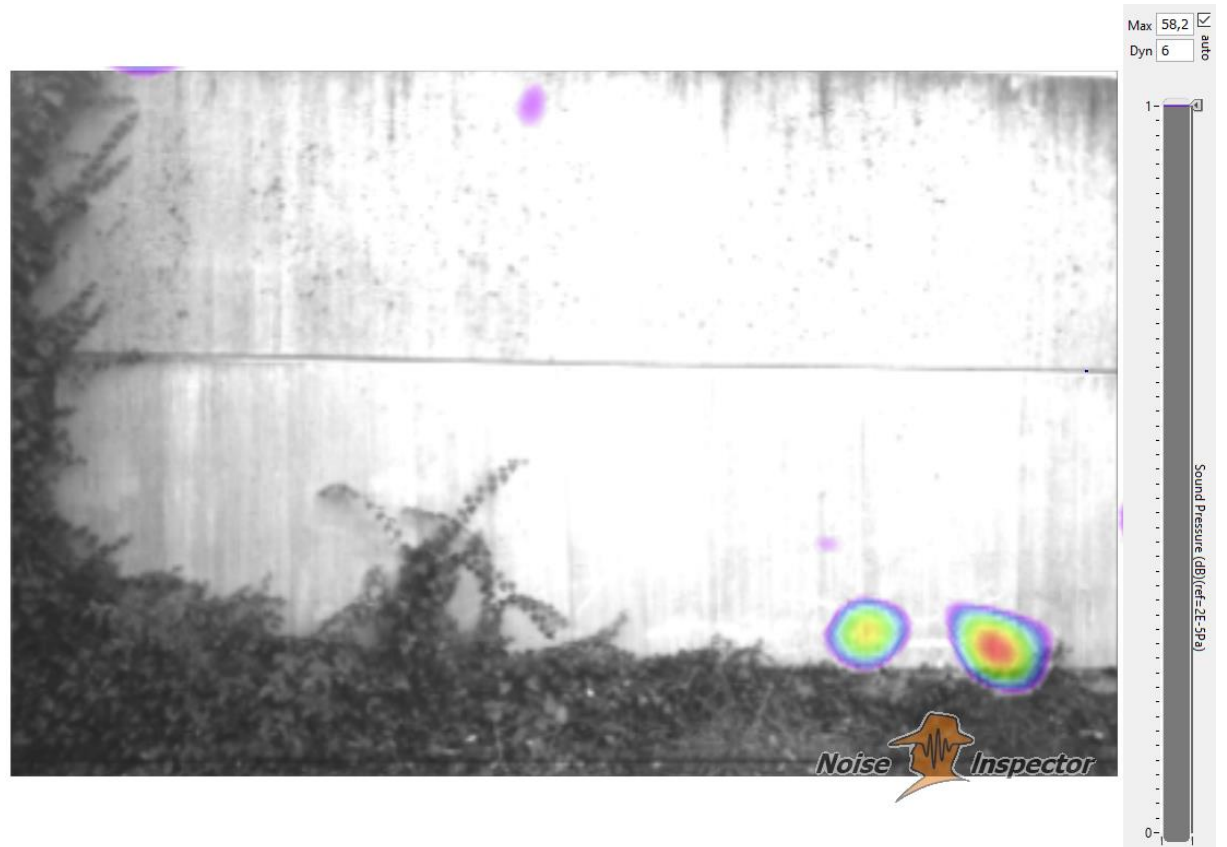
Na obr. 58 při rozsahu frekvencí 5 – 6 kHz jsou detekovány spíše odrazy, nejvyšší hladina akustického tlaku se pohybuje okolo 40 dB.



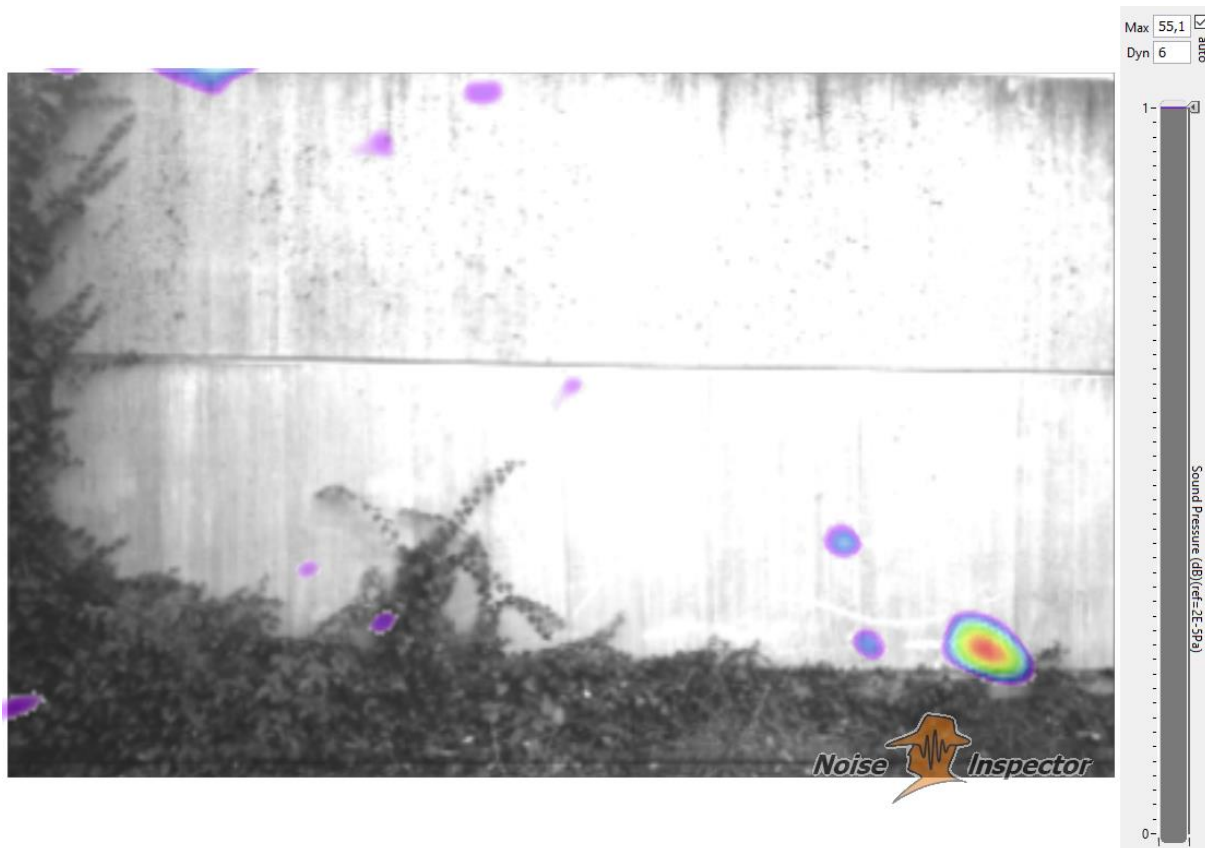
Obr. 54: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 65,5 dB; ve spáře 62,0 dB



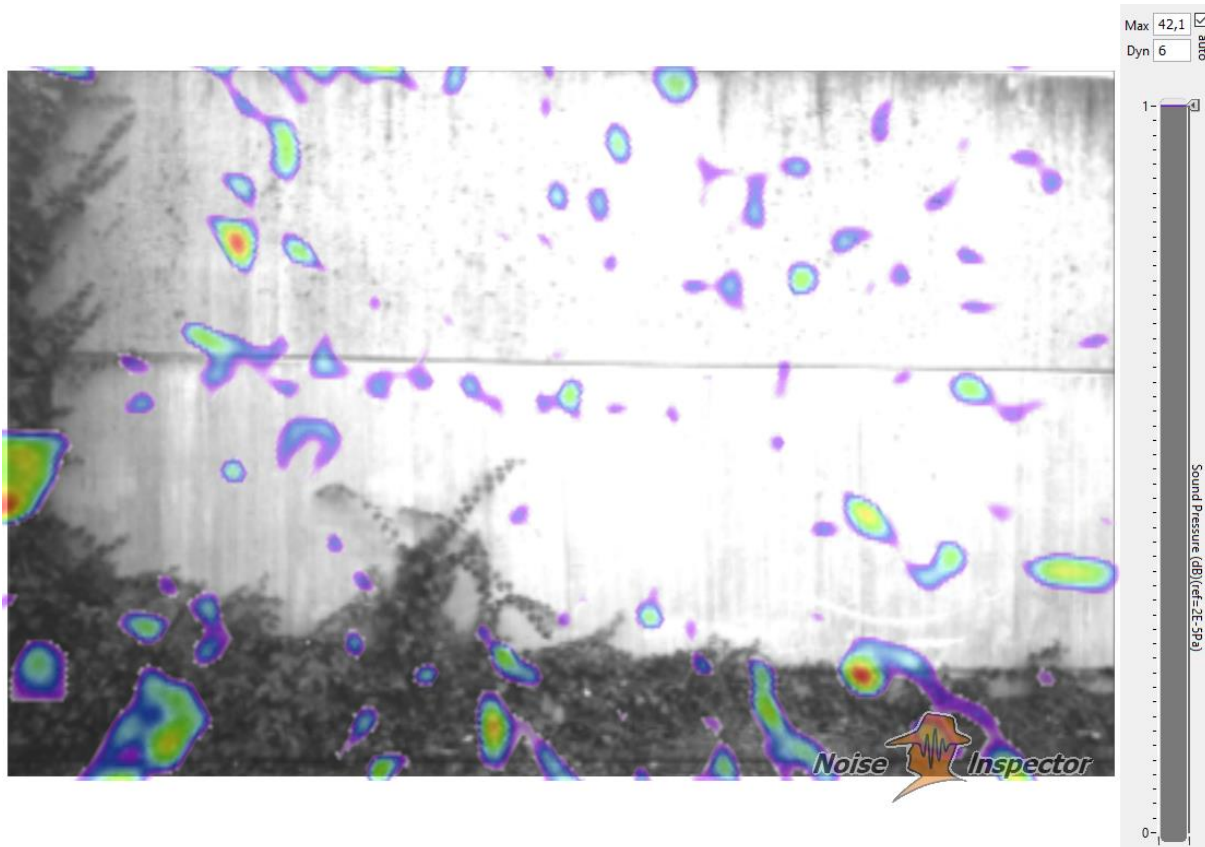
Obr. 55: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina 64,4 dB; ve spáře 56,3 dB



Obr. 56: 3 kHz – 4 kHz; max. hladina 58,2 dB



Obr. 57: 4 kHz – 5 kHz; max. hladina 55,1 dB



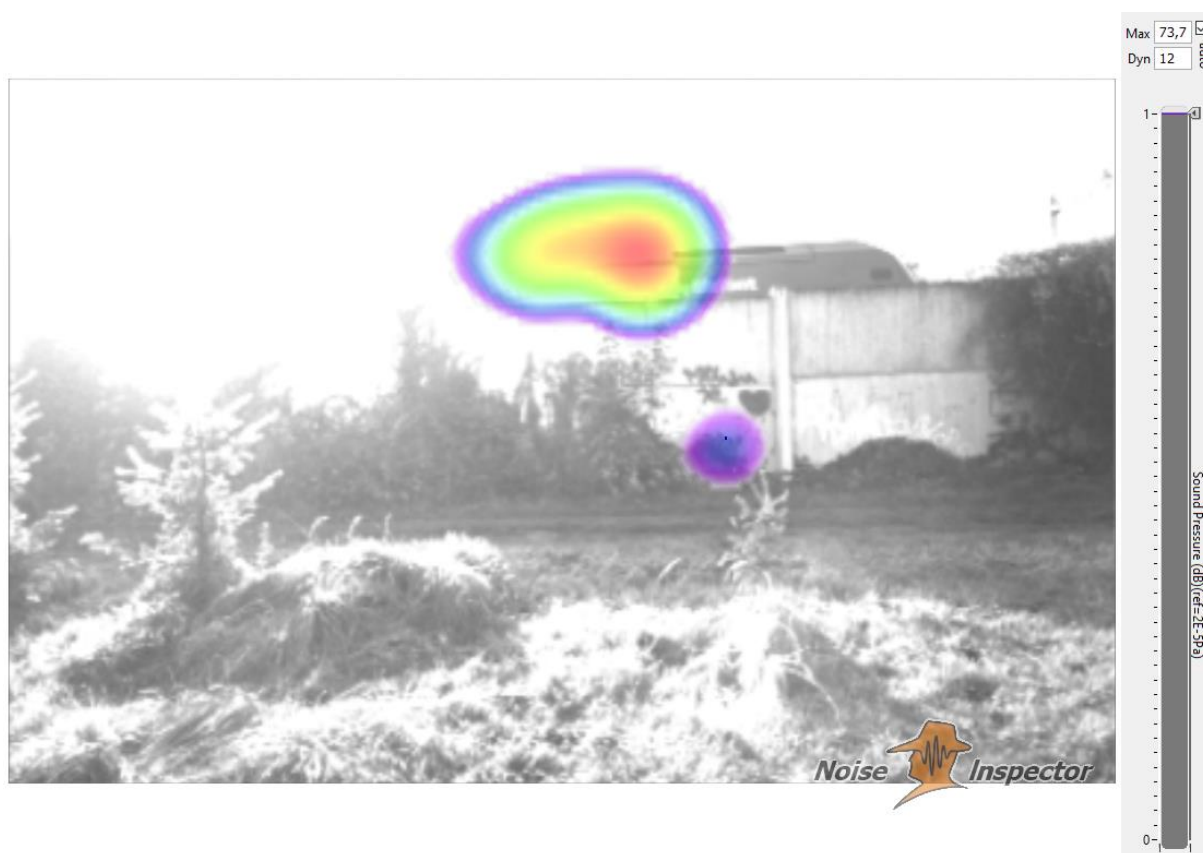
Obr. 58: 5 kHz – 6 kHz; max. hladina 42,1 dB

7.3.2 Stanoviště II

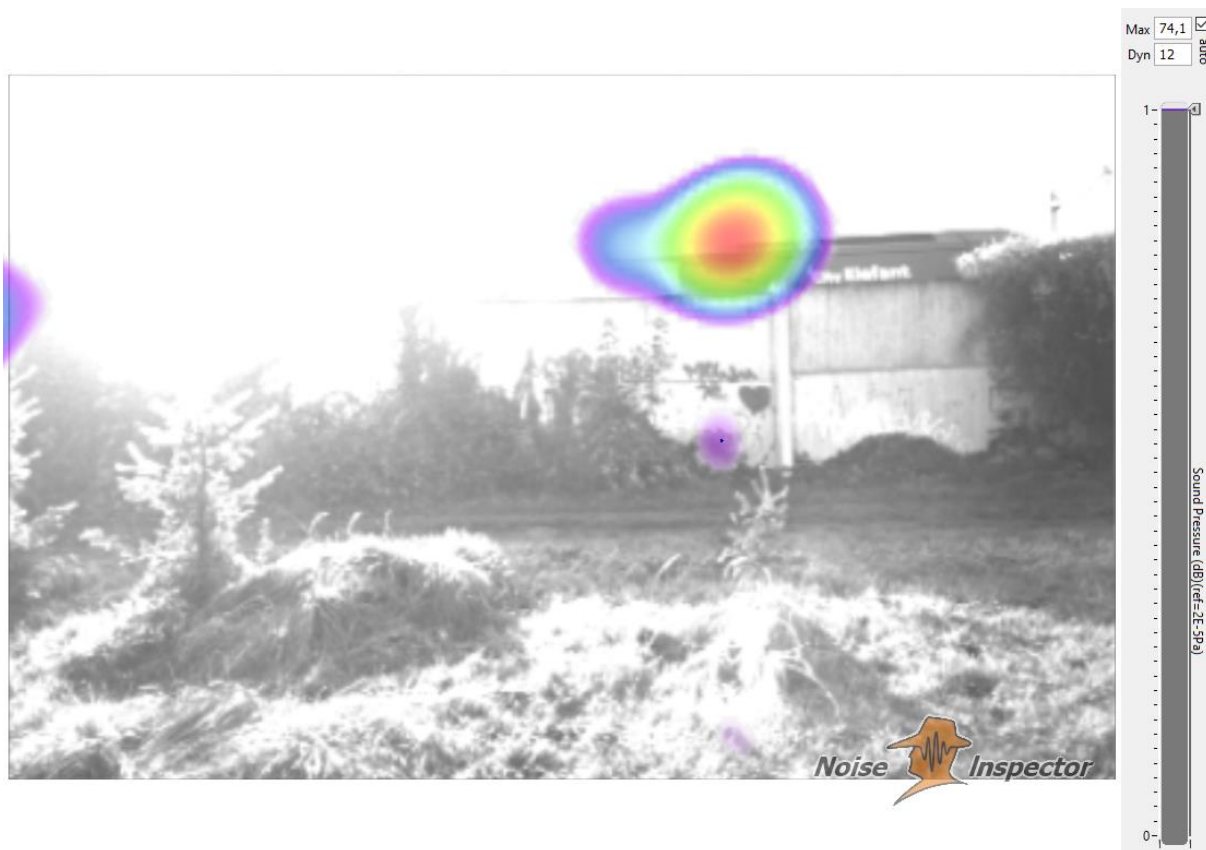
Na následujících výstupech z programu, obr. 59 až 71, vidíme jako v předešlých případech zvukovou mapu aplikovanou na výstup z kamery, na jeden obrázek.

Maximální hladina akustického tlaku je na barevné mapě izofon značena červeně.

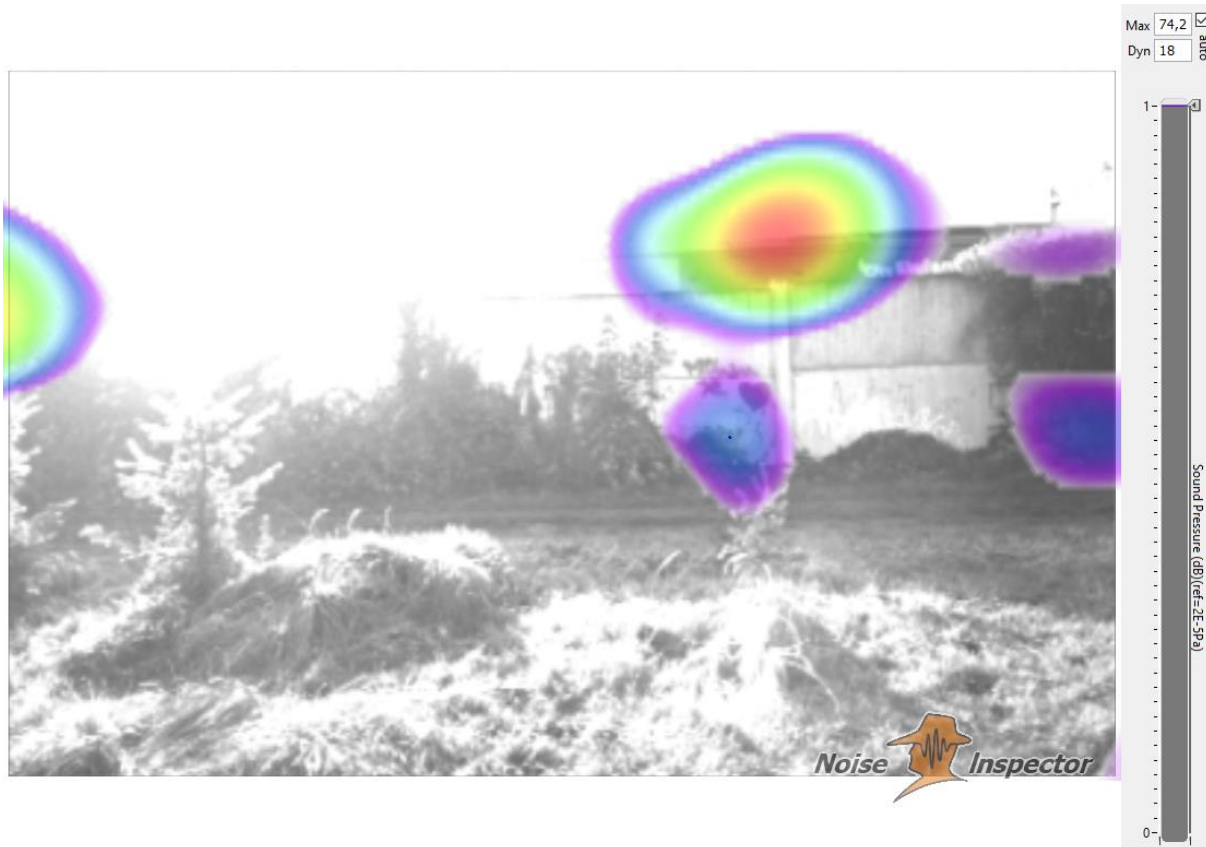
Na obr. 59 až 62 byl analyzován vzorek, kdy kamera měřila průjezd vlaku CityElefant ve směru Praha, rychlost 71 km/h. Kamera byla umístěna ve vzdálenosti 11,2 m od PHS. Jedná se o frekvenční rozsah 1,8 – 3 kHz, časově posunutý. Na každém obrázku je vlak vidět na jiném místě, ve sledu, jak projížděl za stěnou. Jak je patrné z obrázků, jsou lokalizovaná slabá místa PHS.



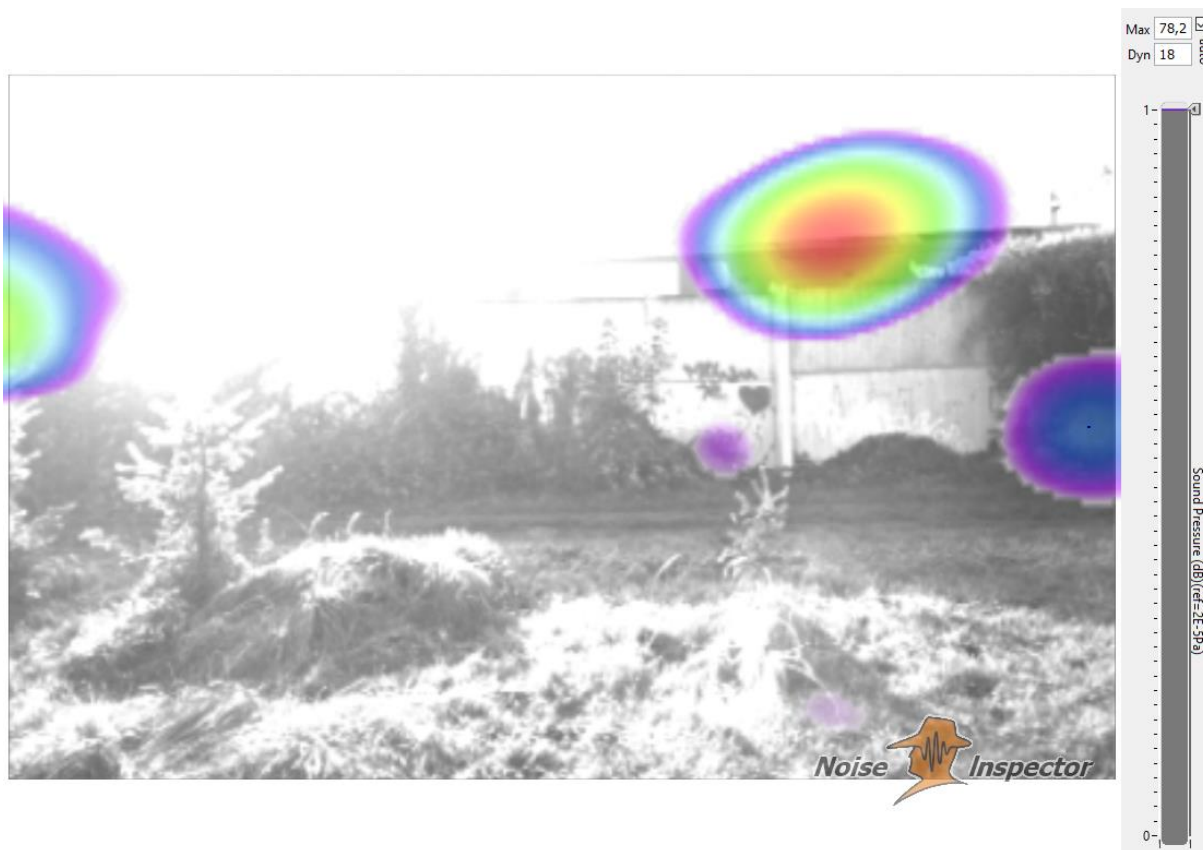
Obr. 59: 1,8 kHz – 3 kHz; Max hladina 73,7 dB; Stěna 65,1 dB



Obr. 60: 1,8 kHz – 3 kHz; max. hladina 74,1 dB; stěna 63,5 dB



Obr. 61: 1,8 kHz – 3 kHz; max. hladina 74,2 dB; stěna 65,0 dB



Obr. 62: 1,8 kHz – 3 kHz; max. hladina 78,2 dB; stěna 66,9 dB

V následující analýze byla podrobena rozboru stejná část stěny změřená ze vzdálenosti 3,3 m

Na obr. 63 až 71 byl analyzován vzorek, kdy kamera měřila průjezd nákladního vlaku ve směru Praha. Kamera byla umístěna ve vzdálenosti 3,3 m od PHS.

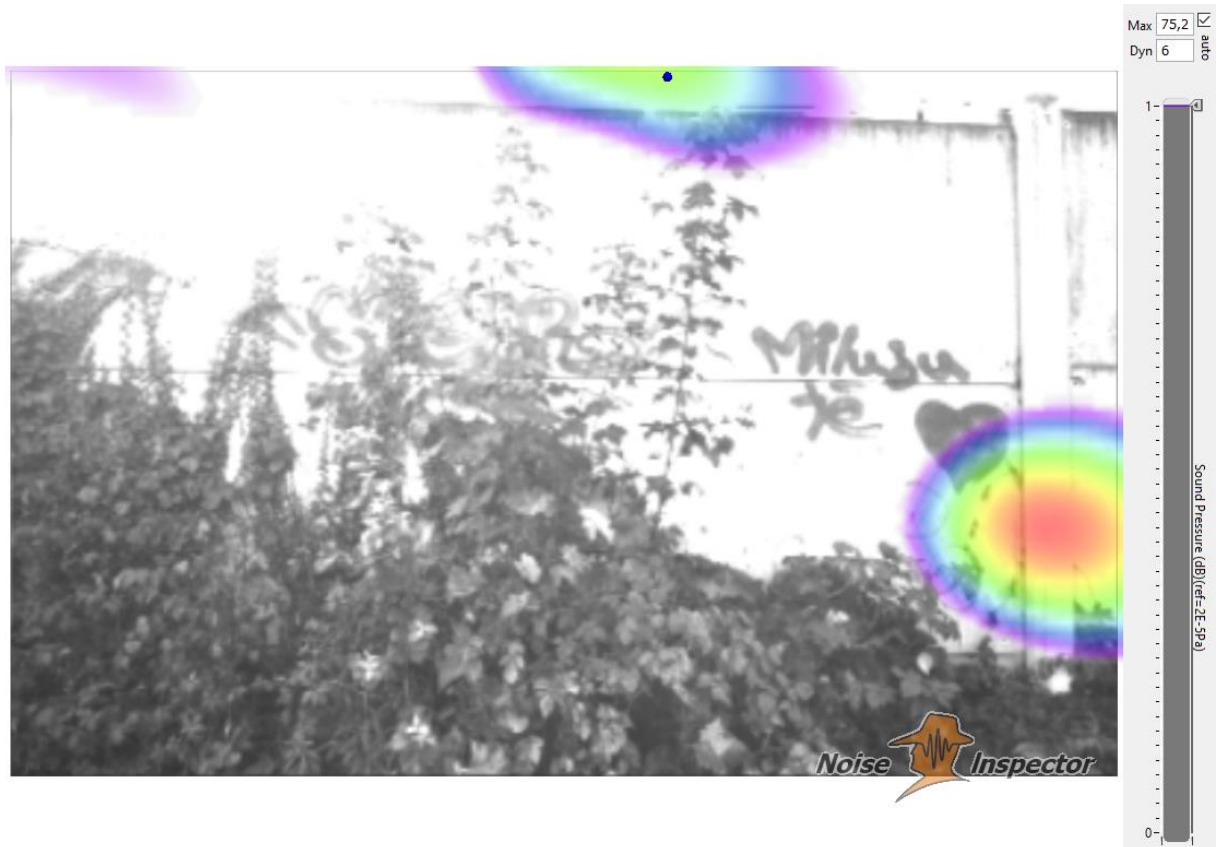
Na obr. 63 se opět potvrzuje, že zvuk o nejvyšší hladině akustického tlaku je při rozsahu frekvencí 0 – cca 1 kHz.

Na obr. 64 až 70 je detekován prostup zvuku skrz spáru mezi panely a při uložení panelů do sloupu. Naměřená hladina akustického tlaku se pohybuje od 50 do 70 dB při rozsahu frekvencí 1 – 4 kHz.

Od frekvencí v rozsahu 4 – 5 kHz již není detekován zvuk prostupující stěnou. I na základě předchozích měření lze předpokládat, že hladina akustického tlaku, prostupující stěnou, klesá se vyššími frekvencemi.



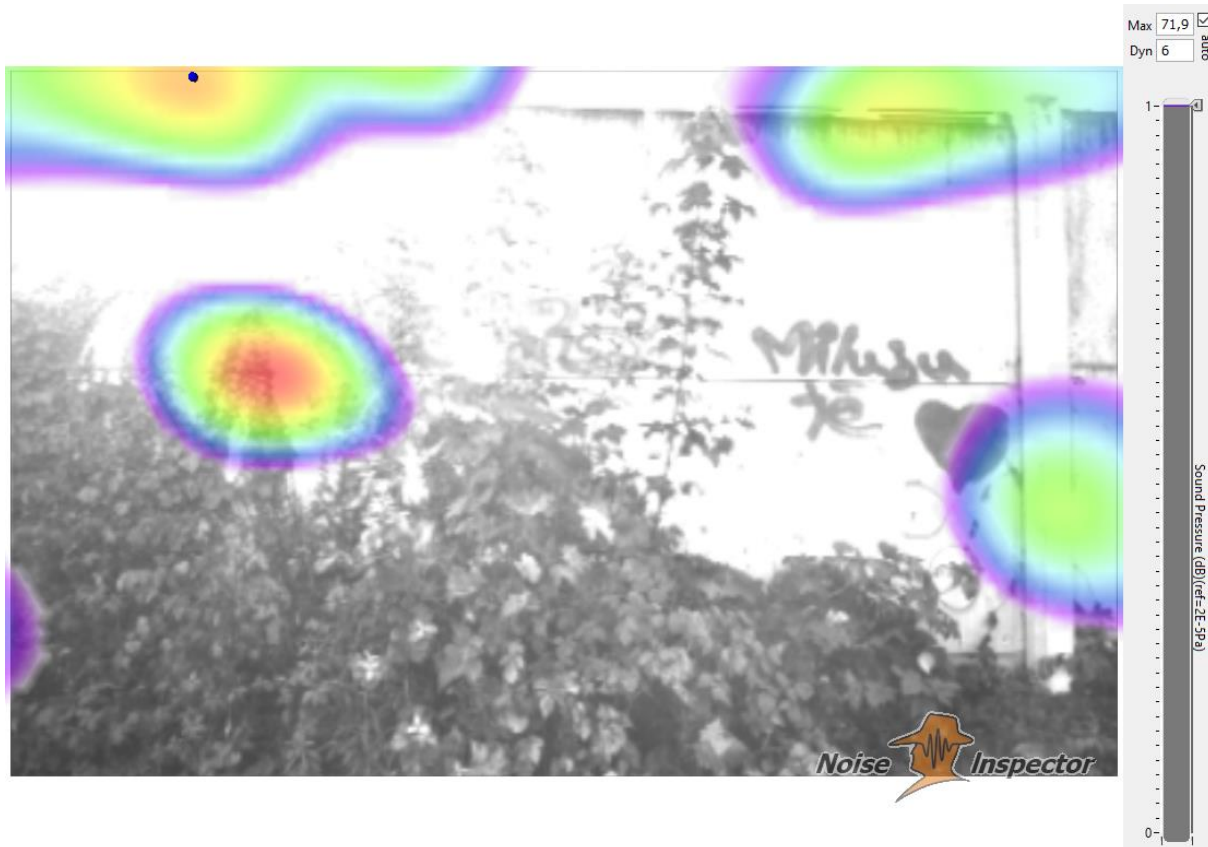
Obr. 63: 0 kHz – 1 kHz; max. hladina 94,1 dB; v místě bodu na stěně 86,2 dB



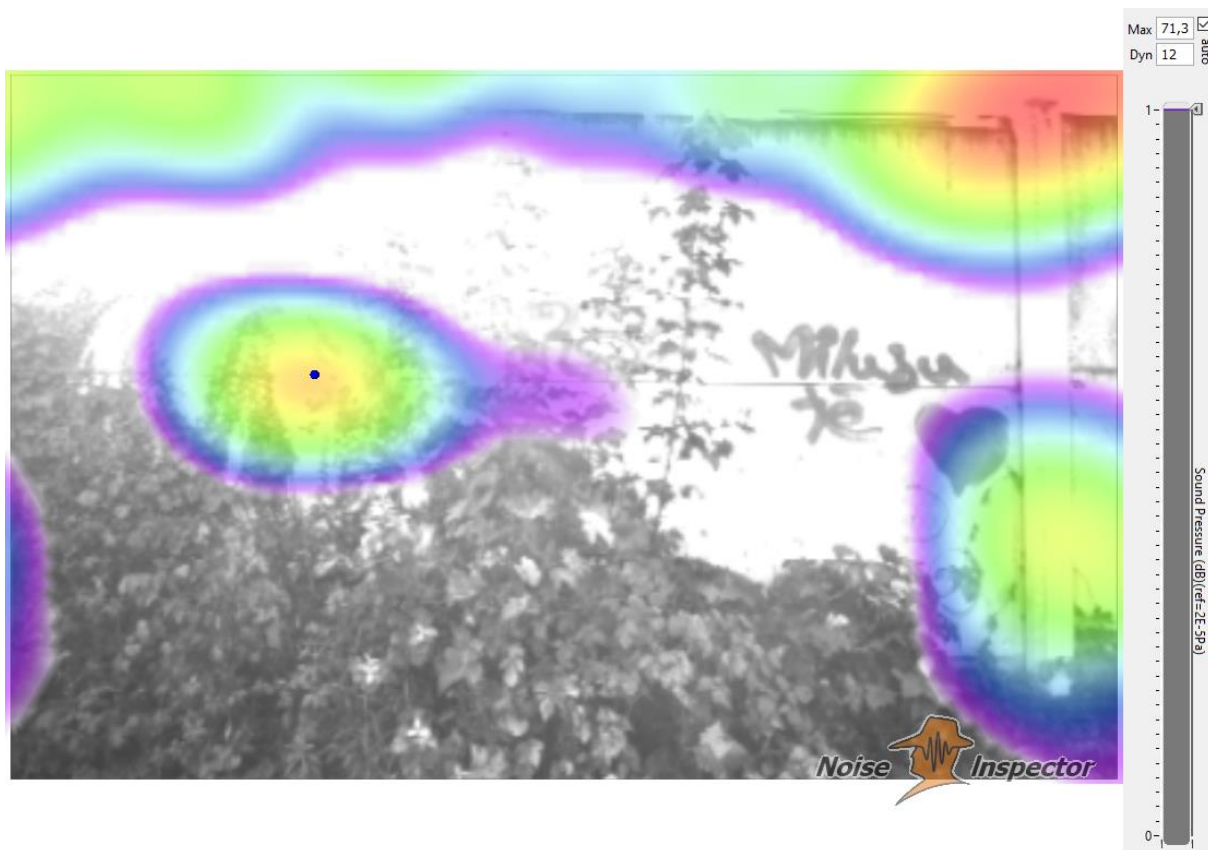
Obr. 64: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina (sloup) 75,2 dB; nad stěnou (bod) 73,3 dB



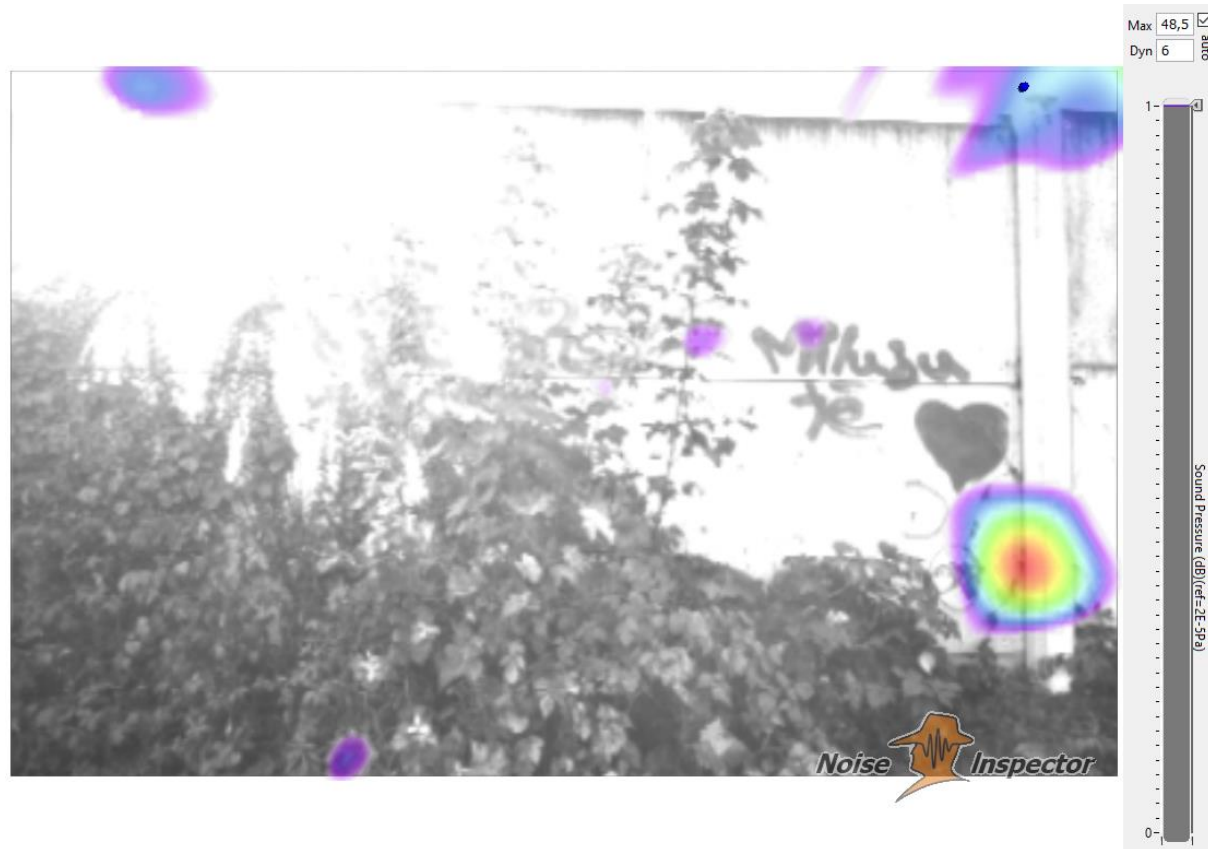
Obr. 65: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 70,4 dB; ve spáře (sloup) 59,8 dB



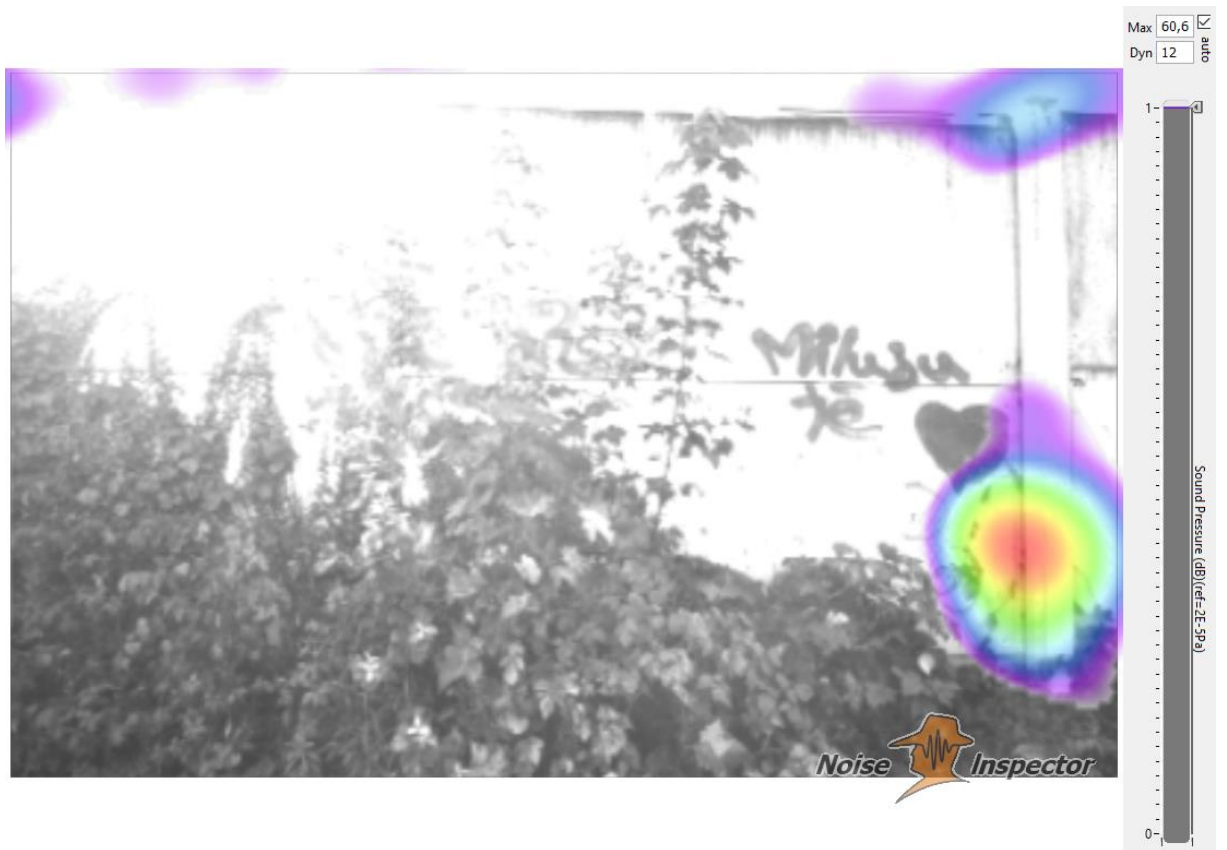
Obr. 66: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina ve spáře 71,9 dB; nad stěnou 71,3 dB



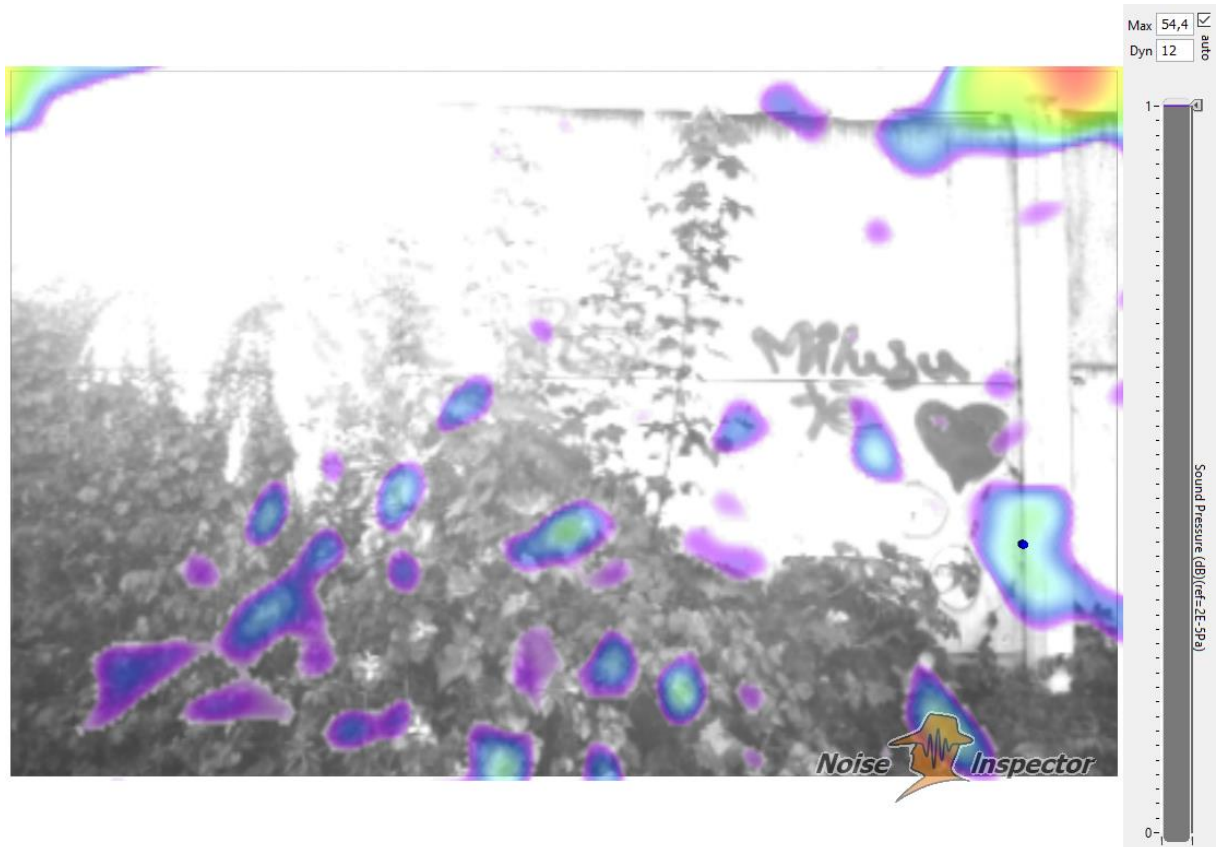
Obr. 67: 1 kHz – 2 kHz; max. hladina 71,3 dB; ve spáře 69,8 dB



Obr. 68: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina (sloup) 48,5 dB; nad stěnou 45,0 dB



Obr. 69: 2 kHz – 3 kHz; max. hladina (sloup) 60,6 dB



Obr. 70: 3 kHz – 4 kHz; max. hladina 54,4 dB; v místě bodu (sloup) 49,0 dB



Obr. 71: 4 kHz – 5 kHz; max. hladina 62,5 dB

7.3.3 Shrnutí

Analýza naměřených průjezdů vlaků za stěnou potvrdila výsledky měření se zdrojem konstantního zvuku. Zvuk od 0 kHz do cca 4 až 5 kHz má nejvyšší hladinu akustického tlaku. Nejvíce při nižších frekvencích, kdy zvukové vlny procházejí nad stěnou. Zvuk od 0 do cca 1 kHz je dominantní přes stěnu a horní hranice naměřena cca 100 dB. Zvukové vlny procházející skrz stěnu mají hladinu akustického tlaku nižší. Horní hranice cca 70 dB. Zvuk od cca 1 do 4 – 5 kHz jsme schopni detekovat ve spáře mezi panely a mezi panely a nosnými sloupy.

8 Závěr

V této práci byly akustickou kamerou změřeny dva druhy zvukově pohltivých protihlukových stěn (Faseton a Liadur) podél IV. železničního koridoru. Jedná se o trať č. 220 v úseku km 157,3 – 157,5. Kamera byla během dvou měřících kampaní umístěna vždy v určité vzdálenosti na vnější (odvrácené) straně stěn. Zdrojem zvuku byla jak projíždějící vlaková doprava, tak konstantní zdroj zvuku. Dvojí měření proběhlo z důvodu objektivity a průkazných výsledků měření.

Tato práce nemá za cíl řešit hlukovou studii, resp. posuzovat míru hluku. Uvedené hodnoty hladin akustického tlaku mají orientační charakter a rozhodně je nelze zaměňovat s výsledky měřeními přesnými zvukoměry třídy 1.

Akustické měření a následná analýza dat prokázala dobré využití akustické kamery v praxi, nejen při lokalizaci zdrojů hluku, ale právě při určování slabých míst v konstrukcích, konkrétně v protihlukových stěnách.

Během práce byla zjištěná tato fakta:

- vybrané PHS místně propouští zvuk, resp. hluk, z projíždějícího vlaku, což potvrdila akustická měření v terénu,
- děje se tak v místech některých napojení jednotlivých prvků PHS,
- u jednotlivých panelů nebyla v jejich ploše prokázána slabá akustická místa,
- ve frekvenčním rozsahu do 1 kHz je dominantní hluk přecházející přes stěnu,
- ve frekvenčním rozsahu 1 – 4 až 5 kHz je detekován zvuk procházející spárami konstrukce,
- ve frekvenčním rozsahu 4 až 5 kHz je rovněž detekován zvuk procházející PHS, ale hladina akustického tlaku klesá na úroveň mluvené řeči.

Z výše uvedeného vyplývá, že celou stěnu nemůžeme hodnotit stejným parametrem zvukové pohltivosti nebo odrazivosti jako jednotlivé panely certifikované výrobcem, protože hluk uniká konstrukčními detaily:

- horizontální spáry mezi panely,
- vertikální spáry při uložení panelů do sloupů.

Při fyzickém ohledání je vidět, že usazení panelů do sloupů profilu H je jištěno pomocí klínek. Toto je patrně nedostatečné řešení z hlediska akustiky, protože zde vzniká netěsnost konstrukce. Rovněž těmito spárami prorůstají kmínky křovin, které brání správnému lícování konstrukce.

Některé vady mohou být způsobeny špatnou realizací nebo pohybem stavby během doby životnosti. Například horizontální spáry mezi panely. Výrobcem udávaná životnost těchto staveb je 40 – 50 let. Měřené stěny jsou staré cca 10 let.

Na základě zjištěných faktů je potřeba zdůraznit, že při posuzování zvukové pohltivosti a neprůzvučnosti protihlukových stěn nestačí pouze

posuzovat jednotlivé panely. Je potřeba komplexně posuzovat celou stěnu včetně konstrukčních napojení jednotlivých částí.

Tato práce definovala postup posuzování funkce protihlukových stěn z hlediska izolace škodlivého hluku z železniční dopravy. Byly nalezeny rozsahy zájmových frekvencí a konstrukční místa, na které je možné se zaměřit v dalším zkoumání a řešení této problematiky.

Literatura

- [1] Vágnerová, M. *Základy akustiky*. Příručka pro začátečníky. Greif-akustika, 2013
- [2] Dejdarová, V. *Protihluková ochrana podél liniových staveb*. Bakalářská práce. ČVUT, 2013
- [3] Král, T. *Kapitola 16, Protihluková opatření*. Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah. SŽDC, 2010
- [4] Zicha, M. *Aplikace akustické kamery*. Bakalářská práce. VUT, 2015
- [5] Volf, J. *Prověření účinnosti nízkých protihlukových clon*. Diplomová práce. ČVUT, 2016
- [6] Vedral, J. *Měření akustickou kamerou*. Studentská vědecká konference. ČVUT 2019
- [7] Rieder, Rieder Beton, spol. s r.o., [online, přístupné dne 9. 11. 2019] dostupné na: www.rieder.cz
- [8] Liadur, Liadur s.r.o., [online, přístupné dne 9. 11. 2019] dostupné na: www.liadur.cz
- [9] CVUT. [fotografie]. Praha: FSV, 2019
- [10] Časopis Stavebnictví, Informační centrum ČKAIT s.r.o. [online, přístupné dne 9. 11. 2019] dostupné na: https://www.casopisstavebnictvi.cz/prehled-vlastnosti-pohltivych-protihlukovych-sten-na-ceskem-trhu_N3475
- [11] ČSN online, Česká agentura pro standardizaci [online, přístupné dne 10. 11. 2019] dostupné na: <https://csnonline.agentura-cas.cz/default.aspx>
- [12] TZB info, Topinfo s.r.o. [online, přístupné dne 10. 11. 2019] dostupné na: www.tzb-info.cz
- [13] Akustický katalog, TZÚS Praha, s.p [online, přístupné dne 10. 11. 2019] dostupné na: <https://www.akustickykatalog.cz>
- [14] Zákon č. 258/2000 Sb., Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů
- [15] Časopis Stavebnictví, Informační centrum ČKAIT s.r.o. [online, přístupné dne 17. 11. 2019] dostupné na: https://www.casopisstavebnictvi.cz/problematika-hluku-z-zeleznicni-dopravy_N4778
- [16] Časopis Silnice železnice, KONSTRUKCE Media, s.r.o. [online, přístupné dne 17. 11. 2019] dostupné na: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/hluk-ze-zeleznicni-dopravy-porovnani-ucinku-pasivnich-protihlukovych-opatreni/>
- [17] OTP ČD DDC č. j. 60 650/99 – O13. Protihlukové stěny. 1. novelizované vydání. Praha: ČD, 1999
- [18] Strategies and Tools to Assess and Implement Noise Reducing Measures for Railway Systems, UIC, the worldwide railway organisation [online, přístupné dne 17. 11. 2019] dostupné na: https://uic.org/IMG/pdf/rapport_final_stairrs.pdf

- [19] Nový, R. *Hluk a chvění*. 4. vydání. Praha: ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06554-9
- [20] Noiseless Acoustics, Kaistale 2015 [online, přístupné dne 5. 10. 2019] dostupné na: <https://blog.kaistale.com>
- [21] CAE Software und Systems 2019 [online, přístupné dne 5. 10. 2019] dostupné na: <https://www.cae-systems.de/en/applications.html>
- [22] Technical review, Beamforming, Brüel & Kjær 2004 [online, přístupné dne 8. 11. 2019] dostupné na: <https://www.bksv.com/media/literature/Technical-Review/bv0056.ashx>
- [23] Environmental noise, Bruel & Kjaer 2001 [online, přístupné dne 8. 11. 2019] dostupné na: <https://www.bksv.com/media/doc/br1626.pdf>
- [24] Smetana, C. *Hluk a vibrace*. Praha: Sdělovací technika 1998. ISBN 80-901936-2-5
- [25] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů
- [26] ČSN EN 1793-1, Zařízení pro snížení hluku silničního provozu - Zkušební metody stanovení akustických vlastností - Část 1: Vnitřní charakteristiky zvukové pohltivosti v podmínkách difuzního zvukového pole
- [27] ČSN EN 1793-2, Zařízení pro snížení hluku silničního provozu - Zkušební metody stanovení akustických vlastností - Část 2: Vnitřní charakteristiky vzduchové neprůzvučnosti v podmínkách difuzního zvukového pole
- [28] ROMAn s.r.o., [online, přístupné dne 9. 11. 2019] dostupné na: <https://www.romansro.cz/silnicni-protihlukove-panely/kovove-protihlukove-panely/>
- [29] Google maps [online, přístupné dne 10. 11. 2019] dostupné na: <https://www.google.cz/maps/>
- [30] Protokol o určení typu výrobku č. 1390-CPR-0036-2014/Z. Protihluková stěna FASETON. Zlín: CSI a.s., 2014
- [31] Protokol o počáteční zkoušce typu výrobku č. 1020-CPD-090-021826. Protihluková clona LIADUR. Praha: TZÚS Praha, s.p., 2009
- [32] Marušičová, D. *Protihlukové stěny*. Obecně technické podmínky. ČD, 2000

Seznam použitých zkratk a symbolů

ČSN		česká technická norma
EN		evropská norma
EU		evropská unie
GŘ		generální ředitelství
IN SITU		na místě, na stanovišti
PHS		protihluková stěna
Sb.		sbírka zákonů
STAIRRS		strategies and tools to assess and implement noise reducing measures for railway systems
SŽDC		správa železniční dopravní cesty
TK		temeno kolejnice
c	[m·s ⁻¹]	rychlost zvuku
DL_α	[dB]	jednočíselní hodnocení zvukové pohltivosti
DL_R	[dB]	jednočíselné hodnocení vzduchové neprůzvučnosti
E_p	[J]	energie potenciální
E_k	[J]	energie kinetická
f	[Hz]	frekvence vlnění
I	[W·m ⁻²]	akustická intenzita
I_0	[W·m ⁻²]	referenční hodnota akustické intenzity
L_I	[dB]	hladina akustické intenzity
L_p	[dB]	hladina akustického tlaku
L_w	[dB]	hladina akustického výkonu
p	[Pa]	akustický tlak
R	[dB]	vzduchová neprůzvučnost
p_0	[Pa]	referenční hodnota akustického tlaku
S	[m ²]	plocha
T	[s]	perioda kmitu
v	[m·s ⁻¹]	rychlost kmitání částic
W	[W]	akustický výkon
W_0	[W]	referenční hodnota akustického výkonu
α	[-]	činitel zvukové pohltivosti
β	[-]	činitel zvukové odrazivosti
τ	[-]	činitel průzvučnosti
λ	[m]	vlnová délka