

UNIVERZITA PARDUBICE

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Využití akustické kamery pro lokalizaci zdrojů hluku železničních
vozidel

Bc. Jana Pavelková

Diplomová práce

2017

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana Pavelková**
Osobní číslo: **D14614**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury;
Ochrana životního prostředí v dopravě**
Název tématu: **Využití akustické kamery pro lokalizaci zdrojů hluku
železničních vozidel**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Zásady pro vypracování:

1. Definujte zdroje hluků v železniční dopravě se zaměřením na nákladní vozy
2. Specifikujte výhody a nevýhody použití akustické kamery ve srovnání se standardními metodami měření hluku
3. Zjistěte možnosti využití akustické kamery pro lokalizaci zdrojů hluku železničních vozidel
4. Realizujte vyhodnocení a analýzu dat získaných při měření vyzařovaného hluku nákladního vozu s využitím akustické kamery
5. Navrhněte možnosti snížení vyzařovaných hlukových emisí železničních nákladních vozů

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 50-60 stran textu a přílohy

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

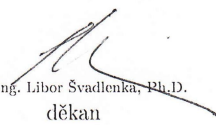
- ČSN EN ISO 3095, Železniční aplikace Akustika - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly. ÚNMZ, 2014.
- Smetana, C. Hluk a vibrace. Praha: MMT, 1998, 1. vydání. 188s. ISBN 80 901936 25.
- NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1304/2014 ze dne 26. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému "kolejová vozidla hluk".
- Úřední věstník Evropské unie, 2014

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Musil, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky


Datum zadání diplomové práce: 15. února 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 26. května 2017


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

I.S.


doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na využití akustické kamery s metodou beamforming pro identifikaci a lokalizaci zdrojů hluku železničních vozidel. Na základě teoretických poznatků jsou identifikovány hlavní zdroje hluku železničních vozidel a příčiny jejich vzniku. Dále jsou prozkoumány metody měření hluku s důrazem na využití akustické kamery. V praktické části práce jsou provedena měření na železniční trati Velim. Poté je provedena důkladná analýza výsledků. Na základě praktických poznatků podepřených teoretickým základem jsou pak navrženy možnosti omezení zdrojů hluku železničních vozidel.

Klíčová slova

Hluk, měření, železnice, zvuk, akustika, absorpce, spektrum

Abstract

This master thesis deals with using acoustic camera with beamforming method for identification and localisation of railway noise sources. On theoretical basis are identified main railway noise sources and its causes. In other part are investigated methods and possibilities of noise measurement focused on acoustic camera. In practical part is measured real train noise moving on test railway track in Velim. On this basis is made detailed analysis of noise sources and according to theoretical background are made some suggestions to decrease railway noise.

Key words

Railway, noise, sound, acoustic, measurement, spectral, analysis, absorption

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 25. 5. 2017

Bc. Jana Pavelková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Musilovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
1 ZDROJE HLUKU V ŽELEZNIČNÍ DOPRAVĚ SE ZAMĚŘENÍM NA NÁKLADNÍ VOZY	10
1.1 POJEM HLUK	10
1.1.1 Zdravotní aspekty hluku	12
1.2 HLUK VYTVÁŘENÝ KOLEJOVOU DOPRAVOU	15
1.2.1 Zdroje hluku ze železniční dopravy	16
1.3 VZNIK VALIVÉHO HLUKU	18
1.4 VLIVY NA VZNIK A ŠÍŘENÍ VALIVÉHO HLUKU	22
1.4.1 Vliv rychlosti pohybu	22
1.4.2 Technický stav vozidel a železničního svršku	24
1.4.3 Překážky a zábrany	26
1.4.4 Povětrnostní podmínky	26
1.5 SPECIFIKA NÁKLADNÍ ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY	27
1.6 PRÁVNÍ RÁMEC LIMITŮ HLUKU	29
2 VÝHODY A NEVÝHODY POUŽITÍ AKUSTICKÉ KAMERY VE SROVNÁNÍ SE STANDARDNÍMI METODAMI MĚŘENÍ HLUKU	30
2.1 HLUKOMĚR	30
2.2 AKUSTICKÁ KAMERA	31
2.2.1 Principy měření akustickou kamerou	32
2.2.2 Provedení a vlastnosti akustických kamer	33
2.3 VÝHODY A NEVÝHODY POUŽITÍ AKUSTICKÉ KAMERY	35
3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ AKUSTICKÉ KAMERY PRO LOKALIZACI ZDROJŮ HLUKU ŽELEZNIČNÍCH VOZIDEL	36
3.1.1 Vhodná použití akustické kamery	36
4 REALIZUJTE VYHODNOCENÍ A ANALÝZU DAT ZÍSKANÝCH PŘI MĚŘENÍ VYZAŘOVANÉHO HLUKU NÁKLADNÍHO VOZU S VYUŽITÍM AKUSTICKÉ KAMERY	41
4.1 PODMÍNKY STANDARDNÍHO MĚŘENÍ HLUKU ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY	41
4.2 SOFTWARE PRO ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZU MĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	43
4.3 DEMONSTRACE MĚŘENÍ AKUSTICKOU KAMEROU V LABORATOŘI	44
4.4 MĚŘENÍ NA REFERENČNÍ TRATI VELIM	46
4.4.1 Referenční trať	47
4.4.2 Použité vybavení a konfigurace pracoviště	47
4.4.3 Provedená měření	48
4.5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	49
5 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ VYZAŘOVANÝCH HLUKOVÝCH EMISÍ ŽELEZNIČNÍCH NÁKLADNÍCH VOZŮ	51
5.1 OPATŘENÍ AKTIVNÍ	51
5.1.1 Úpravy vozidla	51
5.1.2 Úpravy kolejové trati	55
5.1.3 Další aktivní opatření	58
5.2 OPATŘENÍ PASIVNÍ	58
5.2.1 Omezení šíření hluku	58
ZÁVĚR	60
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62
PŘÍLOHY	63

Úvod

Zvukové prostředí je vedle složení ovzduší, teploty a vlhkosti prostředí a dalších aspektů bezesporu nedílnou součástí celkového životního prostředí a je třeba k tomuto faktoru takto přistupovat a mít jej v zorném poli v principu stejným způsobem, jako je tomu např. u zmíněné kvality ovzduší. Kromě ostatních smyslových podnětů vnímá člověk nezanedbatelnou část komplexu informací z okolního světa pomocí sluchu. Na rozdíl od ostatních smyslů ale nelze přijímání zvukových podnětů jednoduše přirozeně zabránit, zvuky přicházejí na smyslové receptory prostřednictvím zvukovodu přímo. Mimo to je sluchový smysl ve velmi úzké spojitosti s nervovou a rovnovážnou soustavou, potažmo s kardiovaskulárním systémem člověka. Také proto může mít nadměrné namáhání sluchu velmi závažné odrazy na zdraví a celkovou konfiguraci člověka. Přiloží-li se k tomuto faktu trend rychle narůstající dopravního ruchu, stále častější používání strojového vybavení vydávajícího už z podstaty hlukové emise v takových aplikacích, kde se dříve používalo ručních pomůcek a další zdroje hluku, je závěr velmi alarmující a nabádá k maximální možné prevenci vzniku hluku, a ta, kde nelze aplikovat prevenci, klást důraz alespoň na důslednou ochranu.

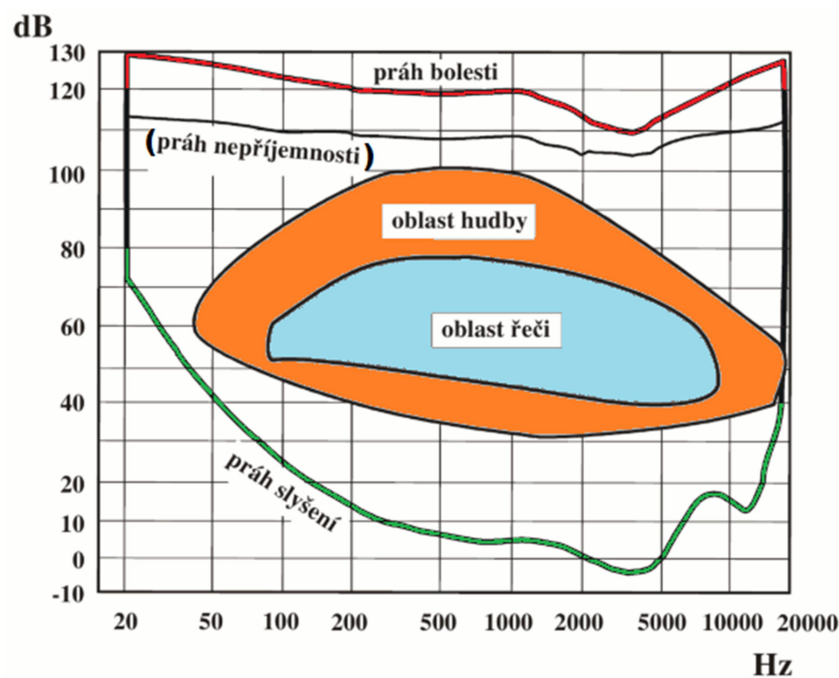
Jedním ze zásadních zdrojů dopravního hluku je také železniční doprava. Tato práce se zabývá především způsoby měření a analýzy zdrojů hluku v železniční dopravě, ale v úvodní části je věnována pozornost hluku jako takovému a zdravotním aspektům s hlukem spojeným, další stěžejní část je věnována příčinám vzniku hluku v železniční dopravě, jednotlivým zdrojům a jejich aspektům. Další část práce obsahuje způsoby měření hluku, přičemž důraz je kladen na moderní metodu měření hluku akustickou kamerou. Praktická část práce zahrnuje měření hluku železničního provozu akustickou kamerou a vyhodnocení měření a v závěru práce je věnována pozornost také možným opatřením k zamezení nadměrné expozice okolí železnic jejím hlukem.

1 Zdroje hluku v železniční dopravě se zaměřením na nákladní vozy

Pro regulaci a udržení hladiny hluku ve snesitelných mezích je třeba hluk nejen měřit a monitorovat, ale znát maximum informací o jeho původu, tedy o zdrojích hluku.

1.1 Pojem hluk

Lidský sluch dokáže zaznamenat frekvence zvukových vln obecně v rozsahu zhruba 16 Hz až 16 kHz, někdy se horní hranice tohoto rozsahu uvádí až 20 kHz¹. Zvukové vlnění lze fyzikálně naprosto přesně specifikovat prostřednictvím řady parametrů. Stejně tak lze pomocí parametrů vytvořit exaktní popis zdroje zvuku i mechanismu šíření zvuku prostředím². Všechny tyto parametry je možné také vhodnou metodikou měřit. Oblast, v níž je zvuk pro lidské ucho slyšitelný, jinak oblast slyšení, je naznačena na obr. 1.



Obr. 1: Oblast slyšení, ultrazvuku a infrazvuku.

Oblast slyšení je na obr. 1 frekvenčně ohraničena velkorysejší z uvážených hranic, a sice 20 Hz až 20 kHz. Nižší kmitočty pod 20 Hz se označují jako infrazvuk³, kmitočtová oblast

¹ VAVERKA, Jiří & kol. Stavební fyzika 1: urbanistická, stavební a prostorová akustika. Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 1998. 343 stran. ISBN 80-214-1283-6.

² ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika. Academia, 2001, 527 stran. ISBN 80-200-0461-0.

³ ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika.

zvuku nad 20 kHz patří pod pojem ultrazvuk⁴. Oblast řeči je naznačená na obr. 1 modrou barvou, oblast, v níž se standardně pohybuje hudba, je pak kolorována oranžově. Oblast slyšení co do intenzity lemuje spodní hraniční křivka, která se nazývá práh slyšení, a horní hraniční křivka, nesoucí označení práh bolesti. Oproti tomu pojem „hluk“ pomocí exaktních parametrů takto definovat v zásadě nelze, nicméně dle aktuálně platné normy ČSN 01 1600 (011600) Akustika - Terminologie⁵, která doplňuje normu ČSN IEC 50 Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 801: Akustika a elektroakustika⁶, je hluk „jakýkoli zvuk, který vyvolává nepříjemný nebo rušivý vjem nebo má škodlivý účinek.“. Norma ČSN 01 1600 doplňuje ČSN IEC 50 (801) o další důležité termíny tak, aby byl v co největší možné míře zajištěn soulad mezi současným stavem poznání a praxí v oboru akustiky.

Hodnocení zvuku pojmem „hluk“ je také velkým dílem subjektivní a značně relativní. Obecně v souladu s normou ČSN 01 1600 lze hluk charakterizovat jako zvuk, který splňuje některé z těchto kritérií:

- **Je nežádoucí** – vzniká obvykle jako vedlejší produkt jiného děje (mechanického pohybu, elektrického či elektromagnetického jevu (elektrický výboj, např. blesk, nebo výkonový transformátor apod.).
- **Ruší či obtěžuje** – zarušuje či zcela zahlcuje zvukové prostředí a žádoucí zvukové vlnění, či vzbuzuje subjektivně nepříjemné pocity.
- **Má škodlivé účinky** – škodlivé účinky může způsobovat jednorázově vyšší intenzita zvuku, ale také úzkopásmová expozice na citlivě vnímaných kmitočtech či stabilní expozice o nižší intenzitě působící dlouhodobě, popř. jejich kombinace. V extrémním případě může být důsledkem poškození sluchu, ale mohou se projevat i účinky na nervovou soustavu (poruchy soustředění, stavy úzkosti apod.)⁷.

Ačkoli hluk nemusí vždy vykazovat všechny výše uvedené poznávací znaky najednou, na základě uvedeného je nutné považovat hluk za nepříznivý až škodlivý vliv, jenž lze stručně shrnout jako **nežádoucí zvuk, jehož účinky jsou dané jeho intenzitou, časovým průběhem a frekvenčním spektrem.**

⁴ ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika.

⁵ ČSN 01 1600 (011600) Akustika – Terminologie.

⁶ ČSN IEC 50 Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 801: Akustika a elektroakustika.

⁷ VAVERKA, Jiří & kol. Stavební fyzika 1: urbanistická, stavební a prostorová akustika. Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 1998. 343 stran. ISBN 80-214-1283-6.

Nutno doplnit, že zmíněný znak nežádoucnosti hluku se netýká jen fyzikálních vlastností zvuku, tedy intenzity, kmitočtu atd., ale má také rozměr sociální. Pro člověka hraje významnou roli i významová složka zvuku, a jako hluk v zásadě působí i zvuk, jenž má pro příležitostného posluchače nevyžádanou informační hodnotu. Jako jeden z typických příkladů může sloužit práce v otevřených kancelářích (angl. open office)⁸, tedy v otevřeném prostoru rozděleném pouze nízkými zástěnami a skříněmi, kde při nedodržování základních pravidel může jeden hlasitý pracovník současně rušit celou řadu dalších, na něž pracovníkem vydávaný zvuk působí jako rušivý hluk. V této souvislosti poněkud paradoxně působí fakt, že Zákon č. 267/2015 Sb., kterým se mění zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví říká, že „za hluk podle věty první se nepovažuje zvuk působený hlasovým projevem fyzické osoby, nejde-li o součást veřejné produkce hudby v budově, hlasovým projevem zvířete, zvuk z produkce hudby provozované ve venkovním prostoru, zvuk z akustického výstražného nebo varovného signálu souvisejícího s bezpečnostním opatřením, zvuk působený přelivem povrchové vody přes vodní dílo sloužící k nakládání s vodami...“⁹.

Za zmínku také stojí, že pojem hluk obsahuje na základě výše uvedených poznávacích znaků také podskupinu zvukových signálů v češtině označovaných jako „(akustický) šum“. Ačkoli český jazyk pro šum rozlišuje samostatný pojem¹⁰, anglická terminologie jak pro „šum“, tak pro „hluk“ užívá slova „Noise“.

1.1.1 Zdravotní aspekty hluku

Účinky hluku na lidský organismus jsou do značné míry individuální záležitostí, která souvisí nejen s kondicí sluchového ústrojí zkoumané osoby, ale i základním zdravotním stavem jako takovým. Nicméně jsou stanoveny obecné parametry zvuku, při nichž lze ty které konkrétní důsledky expozice hluku u průměrného zdravého člověka očekávat.

1.1.1.1 Účinky hluku

Změny a stavy, které může hluk u člověka vyvolávat, lze roztřídit do následujících tří skupin:

⁸ ČSN-EN-ISO-3382-3-Akustika-Měření-parametrů-prostorové-akustiky-Část-3: Otevřené-kanceláře.

⁹ Zákon č. 267/2015 Sb., kterým se mění zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: Sbíрка zákonů. ISSN 1211-1244.

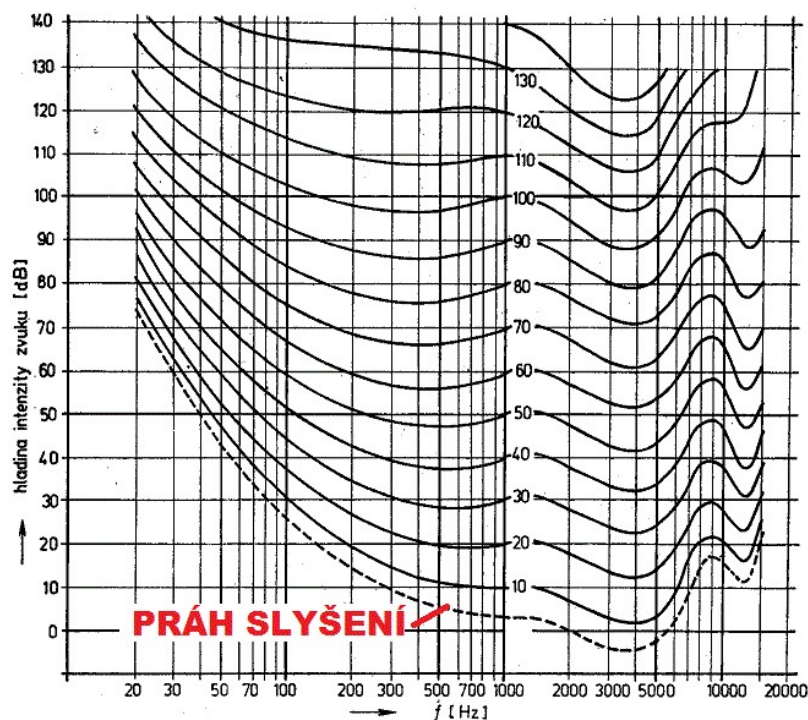
¹⁰ ČSN IEC 50 Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 801: Akustika a elektroakustika.

- **Poruchy sluchu** – patří sem poškození sluchového ústrojí jako takového, tedy nedoslýchavost či ohluchnutí, poškození bubínku atd.
- **Poruchy nervové soustavy** – kategorie zahrnuje poruchy psychomotoriky, narušení regulace krevního oběhu (např. hypertenze), trávicí poruchy, emocionální poruchy a poruchy spánku.
- **Poruchy celkové regulace** – mezi projevy patří poruchy rovnovážných funkcí organismu nebo poruchy imunity.

K faktorům, které ovlivňují účinky hluku na člověka a k nimž patří především intenzita zvuku, frekvenční spektrum, časový průběh, patří v neposlední řadě také psychika člověka, resp. jeho osobní vztah ke konkrétnímu hluku. Při hodnocení účinku hluku na lidský organismus z hlediska intenzity rozlišujeme tyto oblasti:

- **Oblast psychického působení** – intenzita zvuku do 65 dB, zdraví bezprostředně neškodí, rozhodující je ale také individuální vnímání.
- **Oblast vegetativních funkcí** – v bdělém stavu 65 dB až 90 dB, ve spánku se hranice výrazně snižují na rozmezí 45 dB až 80 dB. Projevuje se např. zvýšenou nervozitou, zrychlením dechu, zúžením cév, zvýšením krevního tlaku, zintenzivněním srdeční činnosti, rozšířením zornic, svíráním žaludku apod.
- **Oblast poškození sluchu** – intenzita se pohybuje v rozmezí 90 dB až 120 dB. Dochází k poškození sluchových orgánů a v krajním případě může vést až k ohluchnutí.
- **Oblast smrtelného poškození** – intenzita zvuku přesahující 120 dB.

Na subjektivní vnímání zvuku mají zásadní vliv i kmitočty. Zvuky o určitých frekvencích mají škodlivější účinky, než ty zvuky, jejichž frekvenční spektrum je více rozprostřené. Tento faktor nejlépe ilustrují křivky na obr. 2, kde jsou zachyceny subjektivní křivky stejné hlasitosti v závislosti na frekvenci.



Obr. 2: Křivky stejné hlasitosti pro binaurální poslech¹¹ +upravý.

Podle časového průběhu, jenž je také jedním z hlavních faktorů, ovlivňujících subjektivní vnímání hluku, lze hluk dělit takto:

- **Ustálený hluk** – hladina intenzity se v bodě pozorování v čase výrazněji nemění (maximálně v řádu jednotek dB)¹²,
- **Proměnlivý hluk** – hladina intenzity v čase kolísá o více, než jednotky dB. Proměnlivý hluk může mít charakter přerušovaný, který skokově snižuje intenzitu, ale v průběhu intervalu expozice je ustálený, dále pak nepravidelný, jenž náhodně mění svoji intenzitu, a impulsní, který vytváří časové impulsy s trváním cca do 20 ms, popř. shluky impulzů v intervalech delších než cca 10 ms¹³.

1.1.1.2 Účinky ticha

Poněkud paradoxně některé podobné účinky jako hluk může mít i nepřírozené ticho. Účinky se pochopitelně netýkají poškození sluchového orgánu či poruch krevního oběhu, ale mohou mít znatelné dopady na psychiku. Co do nízkých hladin zvuku rozlišujeme tyto stavy:

- **Hluboké ticho (20 dB a méně)** – může mít co do psychiky negativní účinky podobně

¹¹ ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika.

¹² EVEREST, Alton F., POHLMANN, Ken C. Master Handbook of Acoustics. McGraw-Hill Education, 2015, 640 stran. ISBN 978-0071841047.

¹³ tamtéž.

jako nadměrný hluk. Může se vyskytnout např. v poušti nebo polárních oblastech či v kosmickém prostoru, uměle pak v bezodrazových akustických komorách (obr. 3), které se používají pro akustická měření¹⁴. Zde v téměř dokonale bezodrazovém a odhlučněném prostředí je možné slyšet zvuky např. vlastního krevního oběhu apod. Proto je např. v kosmických lodích jistá úroveň umělého hluku spíše žádoucí.

- **Příjemné ticho (20 dB až 35 dB)** – jedná se o přirozené ticho, kde jistá velmi nízká úroveň hluku navozuje příjemné a přirozené pocity. Příkladem může být šum klidného moře, šum listů stromů.



Obr. 3: Bezodrazová akustická komora (zdroj: WorkProAudio.com).

1.2 Hluk vytvářený kolejovou dopravou

Železniční doprava ekologicky šetrným způsobem uspokojuje trvale narůstající potřebu mobility, proto se těší v posledních letech u široké veřejnosti i mezi politiky vzrůstající oblibě. Tomu napomáhá rychle se zvyšující vytíženost silničních komunikací způsobující časté dopravní zácpy, tuzemská značně neuspokojivá kvalita silnic nebo v porovnání s vlakovou osobní dopravou obecně vnímaná větší nebezpečnost. Mezi další ekologické přednosti železnice patří také výrazně nižší potřeba ploch¹⁵, nižší spotřeba energie a velmi nízké, u elektrického pohonu v zásadě nulové, emise oxidu uhličitého. Veškeré tyto pozitivní faktory lze vnímat jako výrazné konkurenční přednosti před jinými tuzemsky realizovatelnými druhy dopravy, především před dopravou silniční.

¹⁴ KOLMER, Felix, KYNCL, Jaroslav. *Prostorová akustika*. SNTL, 1980, stran. ISBN 04-514-80.

¹⁵ KOCH, Bernhard. *Emise hluku a jeho snižování v železniční dopravě* [online]. Odis, Edice 2008, 1, [cit. 20. 3. 2017]. Dostupný z WWW: <http://edice.cd.cz/edice/zivpro/dzp4_08/emise.pdf>.

Mezi negativa železniční dopravy kromě vyšší logistické náročnosti v porovnání s automobilovou nákladní dopravou, tedy velice omezené variability železničních uzlů (nádraží, překladiště apod.), patří bezesporu emise hluku¹⁶. Ačkoli z hlediska statistického posouzení se železniční doprava v porovnání s ostatními způsoby dopravy obecně vnímá jako méně významný přispěvatel k celkové hlukové zátěži¹⁷, je třeba tento faktor brát na zřetel a jeho vlivy důsledně řešit. Např. ankety německého Spolkového úřadu pro životní prostředí realizované v roce 2007 ukázaly, že 20 % obyvatel Německa se cítí obtěžováno hlukem železničního provozu, zatímco 60 % obyvatel obtěžuje hluk dopravy silniční¹⁸. Úrovně hladiny imisí hluku v noci mohou v blízkosti železnice dosahovat hodnot přes 60 dB, přičemž na frekventovaných tratích se hodnoty mohou zvýšit až nad 75 dB¹⁹.

1.2.1 Zdroje hluku ze železniční dopravy

Hluk pocházející z kolejové dopravy lze dle mechanismu vzniku rozdělit na tyto základní kategorie:

- *Aerodynamický hluk.*
- *Hluk hnacího soustrojí a pomocných zařízení.*
- *Valivý hluk.*

Dále pak v souvislosti s železnicí vzniká dopravní hluk lokálního charakteru, jehož příčinami je např. hluk brzd vozidla (vázáno převážně na nádraží a místa s prudkým snižováním rychlosti) a kolejových brzd (brzdění odvěsků při seřazování), hluk drážního rozhlasu (výhradně v blízkosti nádraží), či zabezpečovacím zařízením (např. vázaný lokálně na přejezdy s výstražnou signalizací). Tyto zdroje hluku ale jsou vzhledem k tématu této stati irelevantní a tudíž je lze v tomto textu úplně zanedbat. Emise hluku závisí také na tvaru trasy (převýšení, zatáčky atd.), druhem trakce a konstrukcí a technickým stavem železničního svršku a vozidel. Směrové vedení tratě se co do emisí hluku projevuje zejména v obloucích menších poloměrů, v nichž dochází ke vzniku další významné složky hluku vlivem většího tření okolku kol vozidel o hlavu kolejnice²⁰. Tento zdroj zvuku ale v rámci textu opět nebude

¹⁶ HLAVÁČEK, Jan. Technické specifikace pro interoperabilitu subsystému „Hluk“. Vědeckotechnický sborník Českých drah [PDF]. roč. 2004, č. 18, 18 stran. ISSN 1214-9047.

¹⁷ KOCH, Bernhard. Emise hluku a jeho snižování v železniční dopravě.

¹⁸ Tamtéž.

¹⁹ Tamtéž.

²⁰ NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy. Stavebnictví, roč. 2011, č. 10, strana 33–36. ISSN 1802-2030.

podrobněji uvažován pro svůj lokální charakter a závislost na konkrétním provedení trati. Jednotlivé typy hlavních zdrojů hluku způsobovaného pohybem železniční soupravy jako takovým jsou znázorněny na obr. 4.



Obr. 4: Hlavní zdroje hluku v železniční dopravě (zdroj: Eurail.com + úpravy).

Všechny tři složky hluku železničních vozidel přibližují následující odstavce, přičemž valivému hluku bude věnována pozornost z pohledu vozidla, resp. náprav, i z pohledu trati (železničního svršku).

1.2.1.1 Aerodynamický hluk

Aerodynamický hluk vzniká v důsledku obtékání tělesa vlakové soupravy okolním vzduchem, nebo při prudké změně tlaku vzduchu při proudění²¹. První varianta záleží především na aerodynamice vozidla, která je navržena především s ohledem na rychlosti, kterými se vlak pohybuje. Efekt zesilují zejména nekapotované podvozky a turbulence vznikající při nedostatečně aerodynamickém tvaru vozidla vzhledem k rychlosti pohybu, přičemž vliv na trajektorie obtékání vzduchu a vzduchové turbulence nemá pouze přední část vozu, ale samozřejmě také charakter opláštění po celé délce vozu i tvar zadní části²². Druhá možnost souvisí především s železničními tunely, resp. s jejich aperturou, kde dochází k velmi prudkému, téměř skokovému poklesu tlaku vzduchu, který vlak projíždějící tunelem tlačí před sebou.

²¹ NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy.

²² NEUBERGOVÁ, Kristýna, KOČÁRKOVÁ Dagmar. Snížení hluku z železniční dopravy jako jedna z cest k udržitelné dopravě. Vědeckotechnický sborník ČD, ROČ. 2011, č. 32. ISSN 1214-9047.

1.2.1.2 Hluk hnacího soustrojí a pomocných zařízení

Do této složky hluku železniční dopravy patří hluk způsobený pohonnou jednotkou, tedy zjednodušeně motorem lokomotivy. V případě neelektrické trakce je to spalovací motor a v případě elektrické trakce, kdy elektromotory v pohonné jednotce lokomotivy jsou samy o sobě v podstatě tiché, vstupují do hry především polovodičové měniče a v rámci elektrické sekce je to hluk způsobený pohybem sběračů (pantografů) po trakčním vedení²³. Tento hluk pantografů má s vyšší rychlostí pochopitelně narůstající vliv, nicméně celkový příspěvek této kategorie hluku v celkovém souhrnu emisí dominuje pouze při nízkých rychlostech zhruba do 30 km/h, tedy při rozjíždění a zastavování soupravy (ve druhém případě hraje významnější roli zvuk brzd). K hluku pohonné jednotky se v rámci této kategorie připočítává také hluk převodovek, odpružení a tlumení náprav, hluk chladicích, klimatizačních a kompresorových jednotek atp.²⁴.

1.2.1.3 Valivý hluk

Valivý hluk je při běžných cestovních rychlostech na tuzemských železnicích jednoznačně dominantním zdrojem hluku. Vzniká na kontaktu kola a kolejnice a skládá se ze dvou zásadních složek – hluku vozidlových náprav a hluku kolejového svršku (zjednodušeně kolejnic)²⁵. Jelikož se jedná o výrazně dominantní složku celkových hlukových emisí způsobovaných železniční dopravou, zvláštní pozornost této kategorii hluku věnují samostatné kapitoly 1.3 a 1.4.

1.3 Vznik valivého hluku

Na vzniku valivého hluku se podílí velké množství faktorů, mezi nimiž lze rozlišit např. drsnost kola a kolejnice, aerodynamický hluk podvozku samotného nebo proměnné parametry podél trati (tuhost, drobné odchylky tvaru hlavy kolejnice, různost v náklonu a výškách kolejnic atd.), přičemž za dominantní složku se pokládá první z vlivů, tedy drsnost a zvlnění

²³ NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy.

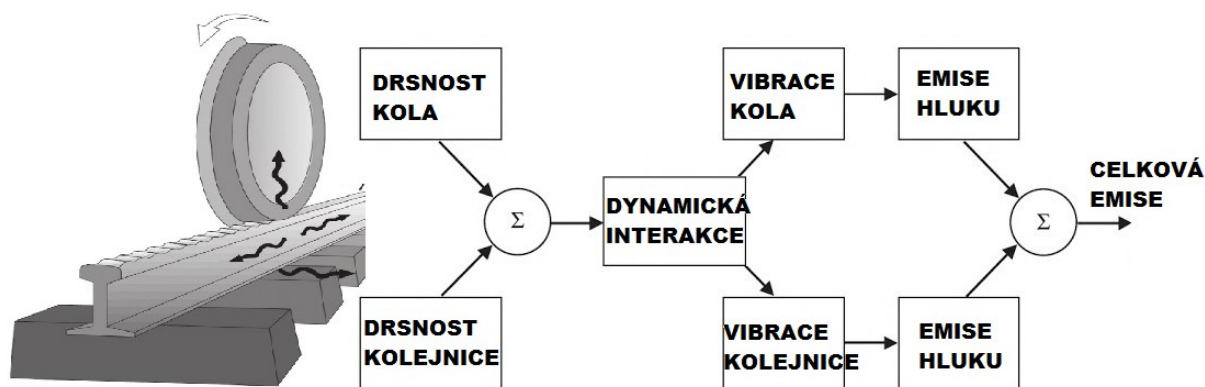
²⁴ tamtéž.

²⁵ TRÁVNÍČEK, Bohumír. Možnosti řešení hlukové zátěže z pozice provozovatele dráhy v kontextu stávající právní úpravy. In Železniční dopravní cesta 2010, Pardubice : SŽDC Praha, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.szdc.cz/soubory/konference-a-seminare/zdc-2010/sbornik-zdc-2010.pdf>>. ISBN 978-80-254-6802-2.

povrchu kola a kolejnice²⁶. Nárůst hladiny akustického tlaku způsobeného valivým hlukem v závislosti na rostoucí rychlosti pohybu soupravy lze vypočíst dle vzorce²⁷

$$L_p = L_{p0} + N \cdot \log_{10}(v/v_0) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

kde L_p je výsledná hladina akustického tlaku v [dB], L_{p0} je hladina akustického tlaku v [dB] při referenční rychlosti v_0 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost pohybu soupravy a N je bezrozměrný koeficient experimentálně určený měřeními a metodou lineární regrese, který se pohybuje v rozmezí 25 až 35, přičemž obvykle se volí hodnota 30. Získaná závislost odpovídá grafickému průběhu na obr. 8, kap. 1.4.1. Vznik valivého hluku jako celku lze blokově znázornit schématem na obr. 5.



Obr. 5: Princip vzniku valivého hluku^{28+ úpravy}.

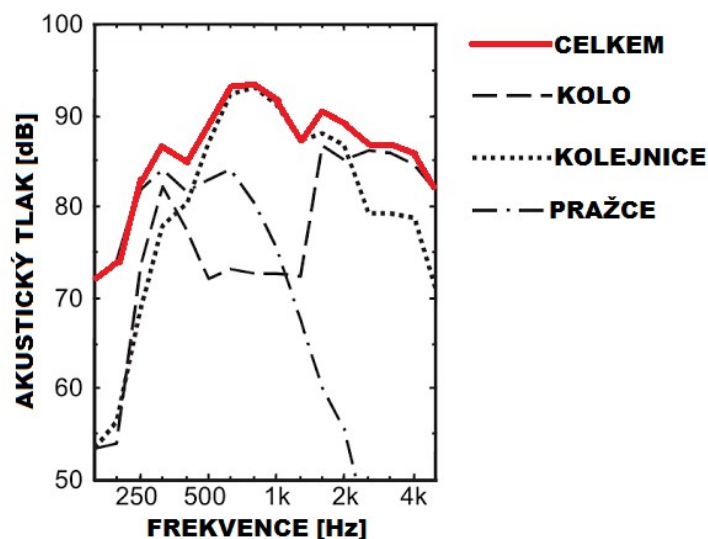
Společným vlivem drsnosti a zvlnění kola i kolejnice vznikne vzájemná dynamická interakce, kde dle konkrétních parametrů mechanické pružnosti a zákonitostí šíření mechanických kmitů (zejména co do kmitočtového přenosu) vzniknou sekundární vibrace, které způsobí emisi akustických vln neboli hluku. Jedná se samozřejmě o velmi zjednodušený nástin principu. V reálné situaci vstupuje do řetězce mnoho dalších faktorů, jako je konkrétní provedení železničního svršku (typ pražců, způsob uložení a fixace kolejnice na pražcích atd.), technické provedení konkrétní nápravy (průměr kola a jeho uložení, odpružení a tlumení atd.), hmotnost a rychlost pohybu nápravy, technický stav jak vozu, tak kolejnice atd.

²⁶ NELSON, James. Wheel/Rail Notes Kontrol Manual: Transit Kooperative Research Program Report 23. Washington: National Academy Press, 1997, stran. ISBN 0-309-06060-5.

²⁷ THOMPSON, David. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Elsevier, 2008, 536 stran. ISBN 978-0-08-045147-3.

²⁸ tamtéž.

Frekvenční rozsah standardního valivého hluku lze umístit do intervalu zhruba 250 Hz – 5 kHz²⁹. Struktura příspěvků tří základních složek, tedy kola, kolejnice a pražců (ve zjednodušeném schématu na obr. 5 je vibrace kolejnice a pražců sjednocena do jednoho zdroje emise hluku), je spektrálně naznačena na obr. 6. Grafické znázornění zachycuje typický nominálně zatížený nákladní vůz v rychlosti 100 km/h, pohybující se po trati s měkkým uložením kolejnice na betonovém pražci. Jak je vidět na obr. 6 v kmitočtové oblasti kolem 250 Hz je zřejmý prudký nástup příspěvků ze všech tří zdrojů, přičemž největší podíl v tomto pásmu mají pražce těsně za příspěvky hlukových emisí kola. Směrem k vyšším kmitočtům vzrůstá dominance hluku kolejnic a propad příspěvků kola těsně před kmitočty 500 Hz. V této frekvenční oblasti nastává definitivní pokles příspěvků hluku pražců. Naopak zhruba v pásmu 600-700 Hz kulminuje emisní dominance hluku kolejnice a dále k vyšším kmitočtům následuje její pozvolný pokles. Okolo kmitočtu zhruba 2 kHz dále zastává majoritní podíl emise hluku s původem v kolech nápravy.



Obr. 6: Zastoupení majoritních zdrojů emise valivého hluku^{30+ upravy}.

Ve shrnutí lze konstatovat, že převažující podíl na valivém hluku náleží kolejnici zejména v pásmu zhruba od 500 Hz do 1,5 kHz. Nezanedbatelný podíl má hluk, jenž generuje pražce zejména v pásmu zhruba od 400 Hz do 1 kHz a příspěvky kol nápravy mají svá maxima v pásmech kolem 300 Hz a zejména pak na kmitočtech nad 2 kHz³¹. S tímto poznáním také koresponduje fakt, že v případě tzv. aktivní prevence vzniku hluku je stěžejní otázkou řešení

²⁹ THOMPSON, David. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control.

³⁰ tamtéž.

³¹ NORDBORG, Anders. Vertical Rail Vibrations: Parametric Excitation. Acustica united with Acta Acustica, roč. 84, 1998, strana 289–300. ISSN 1610-1928..

pružného a vibrace tlumícího uložení kolejnice na pražcích, popř. prostředky akustického tlumení uvnitř kolejiště³².

Je třeba dodat, že v případě jiného uložení kolejnic, jiného průměru kola, jiného materiálu pražců a zejména při jiné rychlosti pohybu soupravy by frekvenční zastoupení bylo poněkud odlišné od obr. 6, nicméně jednotlivá frekvenční pásma, v nichž ten který ze zdrojů výrazně dominuje, a jejich vzájemné rozložení, by se zásadně nezměnilo³³. S vyšší rychlostí se obecně kmitočty posouvají směrem k vyšším hodnotám a naopak. Nutno poznamenat, že v nižším kmitočtovém pásmu při vyšších rychlostech blízkých 100 km/h je třeba brát v úvahu možný příspěvek aerodynamického hluku nekrytého podvozku.

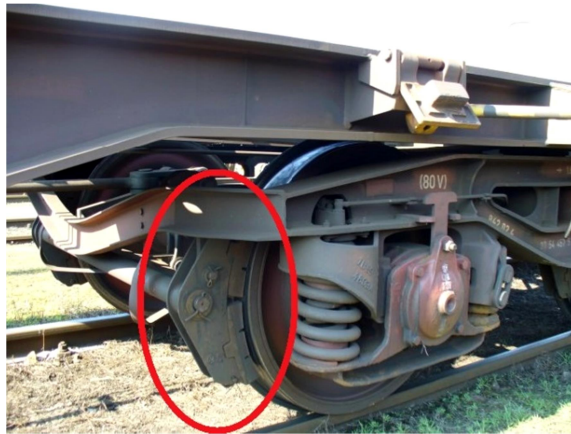
Nejnižší frekvence, které dokonce přesahují spodní hranici slyšitelného pásma a zasahují až do oblasti infrazvuku, se alokují v pásmu 2 až 80 Hz a jsou způsobeny vibracemi celého drážního tělesa jako celku. Vibrace způsobené drsností kol a kolejnic se přenáší i do okolních objektů a způsobují rovněž emise akustického hluku. Zvukové vlny způsobené otřesy podlah, stěn a stropů objektů se týkají frekvencí zhruba v rozmezí 30 Hz až 250 Hz. Tato složka je akcentována zejména u železničních tunelů a podjezdů. U městské a příměstské hromadné dopravy se pak týká především metra, které se pohybuje převážně zcela pod povrchem.

Drsnost a zvlnění povrchu kola samotného se objevuje především u náprav brzděných mechanickými zdržovými brzdami osazenými litinovými brzdovými špalíky doléhajícími přímo na valivou plochu kola (obr. 7), což je případ týkající se v současnosti zejména nákladní dopravy³⁴.

³² TRÁVNÍČEK, Bohumír. Možnosti řešení hlukové zátěže z pozice provozovatele dráhy v kontextu stávající právní úpravy.

³³ SZWARC, Małgorzata, KOSTEK, Bożena, KOTUS, Józef, SZCZODRAK, Maciej, CZYZEWSKI, Andrzej. Problems of Railway Noise – A Case Study. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), 2011, roč. 17, č. 3, strana 309–325. ISSN 1080-3548.

³⁴ HLAVÁČEK, Jan, KONEČNÝ Jiří, SEDLÁČEK, Radek. Postup implementace „TSI – hluk“ v České republice, současný stav, možnosti řešení, stanovisko dopravce. Vědeckotechnický sborník Českých drah [PDF]. roč. 2007, č. 23, 19 stran. ISSN 1214-9047.



Obr. 7: Zdržová brzda nákladního podvozku typu Y25 (zdroj: Vagony.cz + úpravy)

1.4 Vlivy na vznik a šíření valivého hluku

Pokud jde o posuzování hlukové zátěže s původem ve valivém hluku, je pro tyto účely stěžejní místo pozorování oné zátěže. Exponované místo pochopitelně neleží v principu téměř nikdy bezprostředně u místa vzniku, tedy těsně u železničního svršku, a do hry tedy vstupuje kromě příčin vzniku hluku také mechanismus šíření zvukových vln.

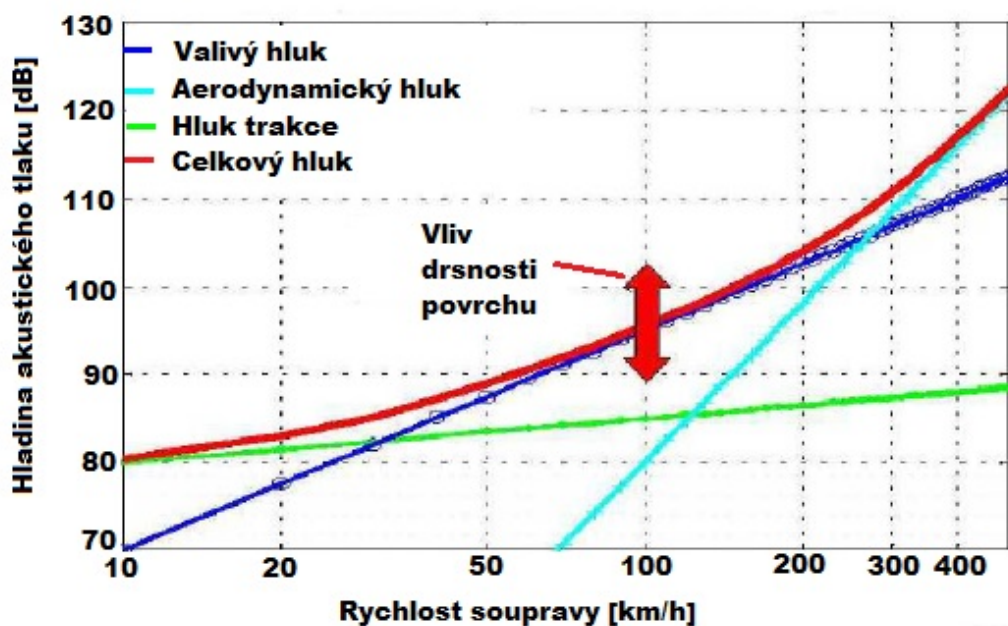
1.4.1 Vliv rychlosti pohybu

Zásadním faktorem určujícím dominantní zdroj hluku železničního komplexu je právě rychlost pohybu vlakové soupravy³⁵. Obecně lze říci, že při nižších rychlostech pohybu cca do 60 km/h bude převažující hluk hnacího vozidla jako takového, tedy např. hluk hnací jednotky (motoru, elektromotoru) ventilátorů apod. U rychlostí středních až vyšších v pásmu 60 km/h až 200 km/h, se začne zvyšovat až do úplné dominance hluk valivý. Při rychlostech nad 200 km/h postupně hraje již významnou roli hluk aerodynamický³⁶. Závislost akustického tlaku na rychlosti u jednotlivých složek hluku i celkového hluku na rychlosti pohybu je naznačen na obr. 8. Jak je z této závislosti patrné, valivý hluk se zvyšující se rychlostí roste nejprudčeji, méně strmě narůstá hluk aerodynamický, nicméně při rychlostech zhruba kolem 250 km/h se příspěvky těchto složek vyrovnávají (samozřejmě záleží na konkrétním technickém provedení a stavu vlakové soupravy) a s dalším zvyšováním rychlosti pak aerodynamická složka převažuje. S rychlostí pohybu soupravy nejmírněji roste hluk způsobený kolejovou trakcí, nicméně jak již bylo popsáno, jeho složky jsou velmi silné zejména na nižších kmitočtech³⁷.

³⁵ THOMPSON, David. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control.

³⁶ NELSON, James. Wheel/Rail Noise Kontrol Manual: Transit Kooperative Research Program Report 23.

³⁷ NORDBORG, Anders. Vertical Rail Vibrations: Pointforce Excitation. Acustica united with Acta Acustica,



Obr. 8: Závislost akustického tlaku na rychlosti u jednotlivých složek hluku³⁸.

Pokud rychlost pohybu železniční soupravy vzroste např. ze 140 km/h na 200 km/hod., průměrná úroveň hladiny hluku se zvýší o cca 3 dB³⁹, tedy akustický výkon naroste zhruba na dvojnásobek. Nutno doplnit, že při míjení dvou protijedoucích vlaků stejného typu o stejných rychlostech by se měla teoreticky zvuková energie také zdvojnásobit, tedy úroveň hluku v tomto místě by měla narůst rovněž o 3 dB. Nicméně ve skutečnosti je v tomto případě zvýšení úrovně menší, protože jednak vlaky jeden druhému částečně vytvoří bariéru, a také dochází k interferenci jednotlivých zvukových vln a tím k lokálním poklesům intenzity. Dále je nutno říci, že s nárůstem délky vlakové soupravy se hluk v místě pozorování nezvýší, nicméně vlivem delšího času průjezdu vlakové soupravy místem pozorování dojde ke zvýšení průměrné úrovně hladiny hluku⁴⁰.

Aerodynamický hluk se tedy zásadně projevuje až při rychlostech pohybu soupravy nad 60 km/h, nad hlukem způsobeným trakcí převáží při rychlosti zhruba nad 120 km/h a dominanci co do celkového hluku získává nad 200 km/h⁴¹. Vzhledem k faktu, že práce je zaměřena především na nákladní vlaky, které se v tuzemsku mohou pohybovat rychlostí

roč. 84, 1998, strana 280–288. ISSN 1610-1928.

³⁸ HLAVÁČEK, Jan. Technické specifikace pro interoperabilitu subsystému „Hluk“. Vědeckotechnický sborník Českých drah [PDF]. roč. 2004, č. 18, 18 stran. ISSN 1214-9047.

³⁹ KOCH, Bernhard. Emise hluku a jeho snižování v železniční dopravě.

⁴⁰ NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy.

⁴¹ tamtéž.

maximálně 100 km/h⁴², lze složku aerodynamického hluku v poměru k hluku valivému v rámci této práce zcela zanedbat. Nutno doplnit, že v rámci tuzemska se aerodynamická složka hluku výrazně neprojeví ani v osobní vlakové dopravě, neboť jak vyplývá z Výroční zprávy Správy železniční dopravní cesty z roku 2015⁴³ maximální rychlost na tuzemských tratích je 160 km/h, a to pouze na 389 km vybraných úseků železničních tratí z celkové délky elektrifikovaných tratí 3 218 km⁴⁴. Existují výhledy na zvýšení rychlosti na některých úsecích až na 200 km/h, nicméně tato změna bude vyžadovat kromě technických úprav tratí, nástupišť železničních stanic v daných úsecích, modernizace vozového parku atd. také zakotvení této změny v legislativě.

1.4.2 Technický stav vozidel a železničního svršku

Technické provedení a stav náprav vozidel a rovněž provedení a kondice železničního svršku mají naprosto zásadní vliv na celkový objem generovaných hlukových emisí⁴⁵. Závislost úrovně hluku na stavu náprav kolejových vozidel názorně ukazuje graf na obr. 9. Měření bylo prováděno na třech úsecích trati se stejným konstrukčním typem svršku v podobném technickém stavu. Pro vyloučení závislosti měření na délce (resp. počtu náprav) projíždějící vlakové soupravy je jako nezávislá proměnná použit součin rychlosti soupravy a počtu jejích náprav.

Na obr. 10 je obdobným způsobem zachycen vliv modernizace železničního svršku na emise hluku. Grafické znázornění jednak nepřímou naznačuje zvýšení rychlosti na modernizované trati, ale především z grafu přímo vyplývá velmi signifikantní snížení hlukových emisí daného úseku a rovněž také výrazně menší strmost křivky závislosti hladiny zvukové expozice na rychlosti pohybu soupravy⁴⁶.

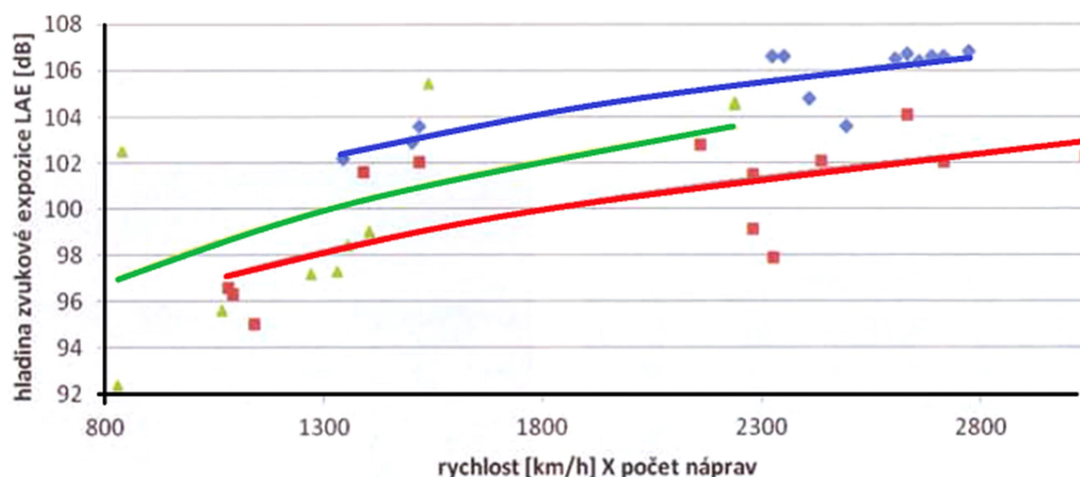
⁴² Výroční zpráva 2015. Správa železniční dopravní cesty, 25. 5. 2016, 79 stran.

⁴³ tamtéž..

⁴⁴ tamtéž.

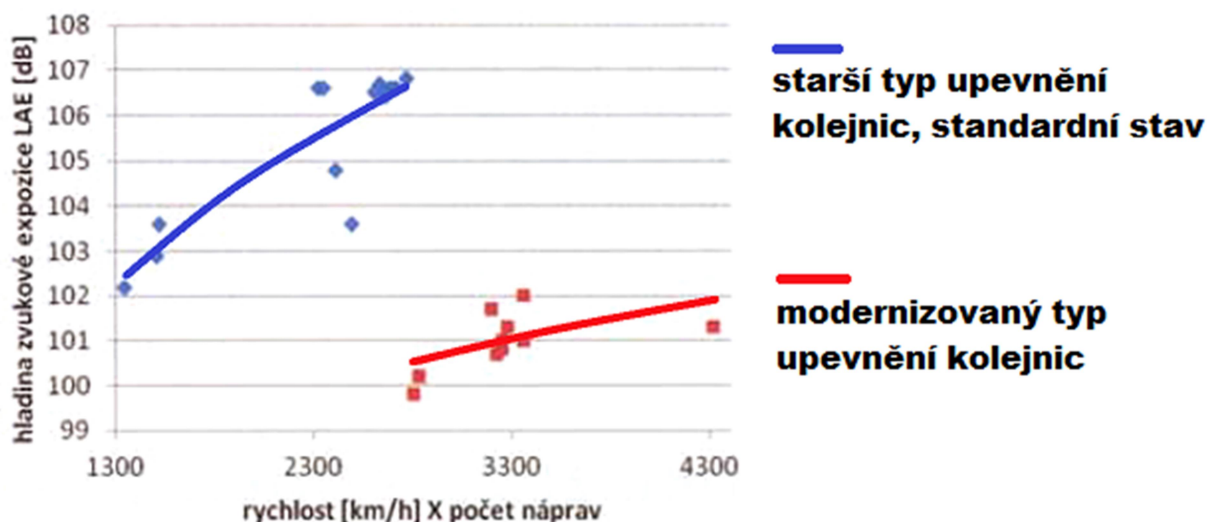
⁴⁵ NEUBERGOVÁ, Kristýna, TÝFA, Lukáš, VAŠICA, David, LÁDYŠ, Libor. Vliv různých konstrukcí železničního svršku na hluk ze železniční dopravy. Nové železniční trendy – doprava – telematika. 2013, roč. 21, č. 1, strana 4-8. ISSN 1210-3942.

⁴⁶ NORDBORG, Anders. Wheel/rail noise generation due to nonlinear effects and parametric excitation. The Journal of the Acoustical Society of America, roč. 111, č. 4, 2002, ISSN 0001-4966.



- souprava klasické konstrukce (prům. rychlost 91 km/h)
- souprava moderní konstrukce (prům. rychlost 93 km/h)
- souprava moderní konstrukce (prům. rychlost 101 km/h)

Obr. 9: Vliv modernizace náprav kolejových vozidel na emise hluku^{47+úpravy}



Obr. 10: Vliv modernizace upevnění železničního svršku na emise hluku^{48+úpravy}

Z výše uvedeného v prvním přiblížení mj. také vyplývá, že přestože modernizace kolejových vozidel a zejména modernizace železničního svršku umožňují zvýšení rychlosti provozu na daném úseku až o 20 km/h⁴⁹, tak toto zvýšení rychlostí s ním narůstajících emisí zdaleka nedosahuje úrovní, které byly co do hluku standardní při technickém provedení před modernizací. Pozitivní efekt modernizace je tedy dvojitý – snížení emisí hluku a současně zvýšení efektivity provozu trati.

⁴⁷ NEUBERGOVÁ, Kristýna, TÝFA, Lukáš, VAŠICA, David, LÁDYŠ, Libor. Vliv různých konstrukcí železničního svršku na hluk ze železniční dopravy. Nové železniční trendy – doprava – telematika..

⁴⁸ Tamtéž.

⁴⁹ Tamtéž.

1.4.3 Překážky a zábrany

Na mechanismus šíření zvukových vln je zásadní trajektorie šíření a případné překážky na ní, jako je např. zástavba apod., zejména pak jejich pohltivost a odrazivost.⁵⁰ Při vzdálenostech pozorovatele a zdroje kolejového hluku až do cca 200 m snižuje se průměrná úroveň intenzity o cca 4 dB s dvojnásobkem vzdálenosti, při vzdálenostech nad 200 m klesá úroveň s dvojnásobkem vzdálenosti o cca 6 dB⁵¹. Poněkud překvapivě klasická stromořadí a křoviny podél trati k významnému snižování úrovně hluku železniční dopravy nevedou. Teprve souvislý pás porostu šířky zhruba 50 m a více má na útlum šíření zvukových vln významnější vliv⁵². Nejvýznamnější vliv na šíření hluku mají překážky v nejbližším okolí trati⁵³. Z toho se také vychází v koncepcích protihlukových zábran.

1.4.4 Povětrnostní podmínky

Šíření zvuku zásadně ovlivňují rovněž povětrnostní vlivy.⁵⁴ Je nasnadě, že zásadním povětrnostním vlivem ovlivňujícím šíření zvuku je vítr. Rychlost větru roste s výškou nad terénem⁵⁵. Jak ukazuje obr. 11 šíří-li se hluk proti směru větru, stáčejí se trajektorie proudění směrem nahoru a naopak⁵⁶ – při šíření hluku po směru větru mají dráhy šíření tendenci stáčet se dolů. Při šíření zvuku ve větru tak dochází vlivem proudění vzduchu k jeho zeslabení na straně protivětru a naopak k nárůstu při šíření ve směru větru. Rychlost a směr větru je tak důležitým parametrem zejména při provádění kontrolních měření hluku ve volném prostoru.

Vliv na šíření hluku má i teplota ovzduší, resp. teplotní gradient ve svislém směru⁵⁷. Za běžných klimatických podmínek teplota s rostoucí výškou klesá a způsobuje ohyb drah šíření zvuku směrem nahoru. Naopak je tomu při teplotní inverzi, při níž se směr zvukových vln tendenčně stáčí dolů.

⁵⁰ ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika.

⁵¹ KOCH, Bernhard. Emise hluku a jeho snižování v železniční dopravě.

⁵² Tamtéž.

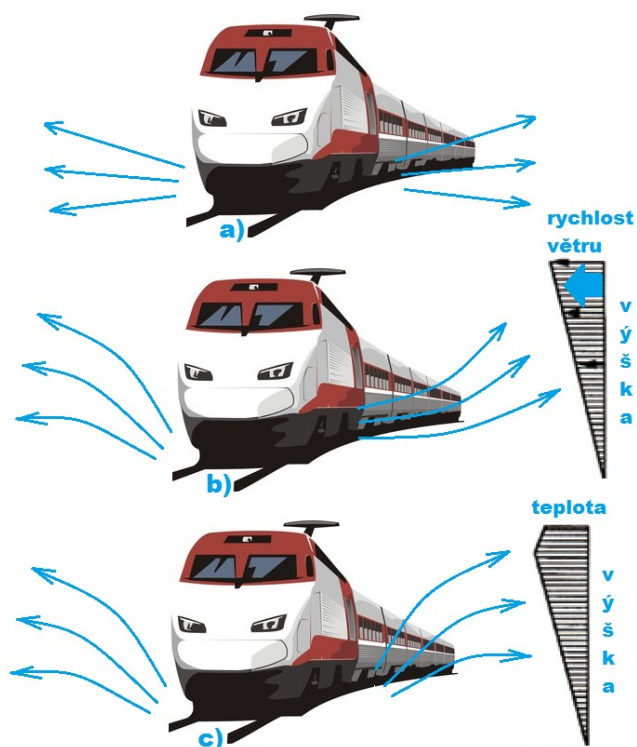
⁵³ NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy. Stavebnictví, roč. 2011, č. 10, strana 33–36. ISSN 1802-2030.

⁵⁴ ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika.

⁵⁵ NELSON, James. Wheel/Rail Notes Kontrol Manual: Transit Kooperative Research Program Report 23.

⁵⁶ NELSON, James. Wheel/Rail Notes Kontrol Manual: Transit Kooperative Research Program Report 23.

⁵⁷ NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy.



Obr. 11: znázornění vlivu klimatických podmínek na šíření hluku: a) bezvětří, normální podmínky; b) vliv větru (směr zprava doleva); c) vliv teplotní inverze.

1.5 Specifika nákladní železniční dopravy

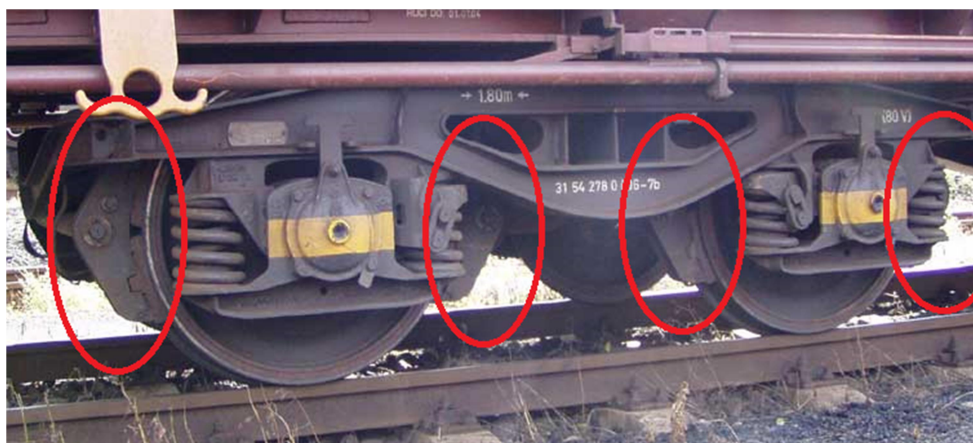
Valivý hluk jakožto nejvýznamnější zdroj emisí při cestovních rychlostech běžných pro nákladní vlakové soupravy v tuzemsku, tedy 60-100 km/h, sice vzniká také u osobních vlaků, nicméně problém hluku ze železniční dopravy vyniká u vlaků nákladních z několika důvodů. Pomineme-li vliv kvality provedení a technický stav železničního svršku má na úroveň valivého hluku zásadní vliv technické provedení vagonů, zejména pak náprav. Patrné je to zejména u nákladních vagonů často staršího data s větším příspěvkem podvozku i nástavby oproti vozům s novějšími podvozky⁵⁸. Navíc jde o vozy podléhající velkému opotřebení vlivem velké zátěže. Hluk z valení je v případě neudržovaných železničních vozidel a vlaků pochopitelně obecně vyšší. Jednou z příčin je brzdový systém náprav.

Podvozky nákladních vozů využívají k brzdění takřka vždy brzdy mechanické zdržové, u novějších náprav pak v kombinaci s brzdami kotoučovými⁵⁹. Důvod je nasnadě – zdržové brzdy mají uspokojivou účinnost, jednoduchou a bezporuchovou konstrukci, snadno lze vizuálně kontrolovat opotřebení a provádět servis. Nevýhodou je kromě již zmíněného

⁵⁸ HLAVÁČEK, Jan, KONEČNÝ Jiří, SEDLÁČEK, Radek. Postup implementace „TSI – hluk“ v České republice, současný stav, možnosti řešení, stanovisko dopravce.

⁵⁹ tamtéž.

zvvyšování drsnosti kola také značné zahřívání brzd a především kola samotného při brzdění za vysokých rychlostí nad 100 km/h, avšak těchto rychlostí nákladní vlaky v tuzemsku nedosahují. Jedním z novějších typů podvozků pro nákladní vozy je podvozek Y25Lss. Jedná se o dvounápravový podvozek pro nákladní vozy dovolující rychlost až 120 km/h při 22,5 t zátěže na tuto nápravu⁶⁰. Brzdová výbava zahrnuje kromě dvou jednotek kotoučových brzd také čtyři jednotky špalíkových brzd. U osobní dopravy se stále více prosazují brzdy kotoučové.



Obr. 12: Podvozek Y25Lssd (zdroj: Vagony.cz + úpravy)

U náprav, kde se místo litinových brzdových válečků používají kompozitní materiály, popř. u náprav brzděných kotoučovými brzdami je drsnost a zvlnění kola a tím i vznikající valivý hluk výrazně nižší, nehledě na to, že nižší hluk vydávají i samotné brzdy při brzdění. U nákladní dopravy je schůdným řešením problémů vznikajících v souvislosti s litinovými brzdovými špalíky právě náhrada za nekovové. Nekovový špalík s třecí charakteristikou odpovídající litinovému typu lze použít na nákladních vozech staršího data výroby bez úpravy brzdové výstroje⁶¹. Výsledky jasně prokázaly snížení akustických emisí, a navíc bylo dosaženo zlepšení vlastností při brzdění a prodloužení životnosti jak špalíků samotných, tak i kol nápravy⁶². Ačkoli původním záměrem bylo zdokonalení brzdových vlastností, byl zaznamenán výrazný vedlejší efekt v zásadním snížení hlukových emisí: V Evropě obvyklá hodnota hlukových emisí čtyřnápravových nákladních vozů ve vzdálenosti 25 m od středu trati dosahuje 88 dB a 95 dB ve vzdálenosti 7,5 m. Hodnoty naměřené s nekovovými špalíčky klesly na 79 dB ve vzdálenosti 25 m 86 dB pro odstup 7,5 m, což představuje skutečně

⁶⁰ HLAVÁČEK, Jan, KONEČNÝ Jiří, SEDLÁČEK, Radek. Postup implementace „TSI – hluk“ v České republice, současný stav, možnosti řešení, stanovisko dopravce.

⁶¹ tamtéž.

⁶² tamtéž.

významný pokles. Hodnota byla dosažena bez jakýchkoliv dalších úprav na voze, který je starší výroby. Limit pro rekonstruované nákladní vozy na $L_p = 87$ dB pro vzdálenost 7,5 m.

Přestože bylo výše uvedeno, že při maximálních rychlostech tuzemské nákladní dopravy nebude příspěvek aerodynamické složky hluku v celkové emisi zásadní, je v souvislosti s nákladní dopravou třeba poznamenat, že oproti osobním vlakům s uceleným a aerodynamicky řešeným designem je nákladní doprava často naprosto aerodynamicky neřešená (např. otevřené vagonky s kládami apod. nebo otevřené vagonky pro přepravu automobilů apod.) a příspěvek tohoto hluku může být v některých případech oproti krytým osobním vagonům abnormálně vysoký. Dále je v souvislosti s nákladní dopravou třeba zmínit emisi hluku o velmi nízkých kmitočtech sahajících od infrazvuku přes dolní meze akustického pásma až do cca do 80 Hz, která vniká vlivem vibrací celého drážního tělesa. U těžkotonážních nákladních vozů bude tato složka hluku rovněž nesrovnatelně významnější, nicméně je třeba zároveň dodat, že při měření standardní akustickou kamerou jsou tyto složky frekvenčního spektra neměřitelné.

1.6 Právní rámec limitů hluku

Hygienické limity hluku (HLH) pro hluk pocházející z železniční dopravy jsou pochopitelně určeny příslušným právním rámcem. V rámci zákona č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví jsou definovány prostory, k nimž jsou hygienické limity hluku vztaženy⁶³. Jedná se o "chráněný vnitřní prostor staveb", "obytné a pobytové místnosti", "chráněný venkovní prostor staveb" (tzn. území do vzdálenosti 2 m před fasádou) a "chráněný venkovní prostor" (územní zóny určené k rekreaci, sportu atp.). Zákon též současně stanoví, že "vlastník dráhy je povinen zajistit nepřekračování hygienických limitů hluku (HLH), které jsou stanoveny prováděcím právním předpisem" a rovněž je popsán i mechanismus pro situace, kdy provozovatel zdroje hluku nemá v daném okamžiku možnost snížit hladiny hluku pod úroveň HLH. V tomto případě přenáší svoji působnost do modelu správním řízením povolených "časově omezených povolení provozování zdroje hluku" (tzv. výjimky)⁶⁴. Samozřejmou součástí zákona je také úprava sankcí až do výše 2 mil. Kč. Nařízení vlády č. 148/2006 Sb. o ochraně před nepříznivými účinky hluku a vibrací pak konkretizuje základní

⁶³ Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví. In: Sbírka zákonů. ISSN 1211-1244.

⁶⁴ tamtéž.

hygienické limity hluku pro konkrétní prostory a denní doby včetně korekcí, které se dle konkrétního území provádějí vzhledem k základní hladině hluku⁶⁵.

Konkrétní hodnoty HLH pro hluk pocházející ze železniční dopravy tedy jsou pro chráněný venkovní prostor (obytných) staveb v časovém pásmu 6-22 hod stanoveny na hodnotu 50 dB. Pro tentýž prostor v nočním časovém pásmu 22-6 hod je hodnota zvýšena na 55 dB. Dále se rozlišují dílčí situace podle toho, zda se jedná o posunovací činnosti, ochranné pásmo drah apod., tedy hluk ze seřaďovacích činností, hluk z dopravy na dráhách mimo ochranné pásmo drah atd. vždy s rozlišením doby denní a noční. Dle stávající právní úpravy je však třeba vždy zajistit nepřekračování hygienických limitů hluku pro chráněný venkovní i vnitřní prostor staveb současně.

2 Výhody a nevýhody použití akustické kamery ve srovnání se standardními metodami měření hluku

Pokud jde o měření hluku klasickou metodou je použití hlukoměru, ať již v provedení příručním, nebo externí mikrofón připojený k měřicímu přístroji. Existují ovšem i další modernější metody, které dovolují nejen měřit úroveň hluku, ale také zvukové vlny mapovat do obrazu sledované scenerie, což v mnoha aplikacích prokazuje takřka nenahraditelnou službu.

2.1 Hlukoměr

Hlukoměr, jinak také technicky správně označovaný jako zvukoměr, je přístroj sloužící k měření zvuku, resp. hladin zvuku. Reaguje na zvuk podobným způsobem jako sluch a umožňuje tak objektivně a reprodukovatelně měřit hladiny hluku⁶⁶. Skládá se typicky z jednoho mikrofónu (pevně zabudovaného, vyměnitelného či externího), elektroniky pro úpravu signálu, měřicího a vyhodnocovacího bloku a popř. také z analyzátoru zvukových signálů. Používá se primárně k měření a vyhodnocení zvukových signálů co do úrovní akustického tlaku. Základní přístroje dovolují měřit pouze úroveň ve zvoleném rozsahu, ve zvolených časových intervalech a vyhodnocovat toto měření⁶⁷. Složitější zařízení umožňují také jednodušší analýzu zvukových signálů, ale také záznam měřených signálů a dodatečnou

⁶⁵ Nařízení vlády č. 148/2006 Sb.

⁶⁶ EVEREST, Alton F., POHLMANN, Ken C. Master Handbook of Acoustics.

⁶⁷ tamtéž.

frekvenční analýzu, okamžitá, či minimo-maximální měření nebo časosběrná měření dlouhodobé zvukové expozice, váhování dle zvolené charakteristiky nebo přímé vyhodnocování dle předdefinovaných norem.

Nutno podotknout, že hlukoměry vnímají celé spektrum signálů v jednom okamžiku a typicky také všesměrově v místě expozice. Lze ale samozřejmě použít směrových mikrofonů, které dovolují dle zvolené směrové charakteristiky mikrofonu měřit emise hluku ze specifikovaného směru. Ukázka složitějšího hlukoměru s možností frekvenční analýzy je na obr. 13.



Obr. 13: Hlukoměr typu 2270-S renomované firmy Brüel & Kjær (zdroj: Brüel & Kjær).

2.2 Akustická kamera

Akustickou kamera je zařízení pro měření v oblasti akustiky, které umožňuje zobrazit naměřený a zpracovaný akustický signál v obraze z videokamery. Zařízení dokáže lokalizovat zdroj zvuku v reálném čase na základě umístění změřených a zpracovaných akustických signálů umístěných do obrazu kamery na pozadí. Akustické kamery mohou mít mnoho odlišných technických provedení, ale v zásadě se skládají z těchto hlavních částí:

- *mikrofonní pole*
- *videokamera*
- *frontend*
- *software*

2.2.1 Principy měření akustickou kamerou

V rámci jednoduchosti objasnění základního fyzikálního principu mikrofonního pole je třeba předpokládat několik zjednodušujících podmínek. První podmínkou je, že zdroj zvuku je od mikrofonního pole vzdálen na mnohonásobek vlnové délky akustického signálu, z čehož plyne, že na mikrofonní pole dopadá rovinná vlna⁶⁸. Dále je třeba stanovit, že prostředí, v němž se zvukové vlny šíří, je striktně homogenní a bezútlumové. Rychlost šíření vlnění pak ve všech směrech shodná a neměnná. Třetí podmínkou je, že zdroj zvuku se vzhledem k mikrofonnímu poli nepohybuje a leží před mikrofonním polem.

Z hlediska uspořádání mikrofonů v poli rozlišujeme tři základní typy mikrofonních polí⁶⁹:

- *Lineární pole*
- *Rovinné pole*
- *Prostorové pole*

V základním principu fungují všechny tři typy polí podobně, přičemž princip je nejvíce zřejmý na lineárním poli⁷⁰. Předpokládejme, že zvukové vlny se šíří z bodového zdroje uloženého na kolmici k vztyčené ze středu linie mikrofonů. Mezi mikrofony v řadě jsou známy vzájemné rozestupy. Přicházející zvuk budí v jednotlivých mikrofonech stejný signál (v principu lhostejno, zda digitální či analogový), ovšem vlivem různých vzdáleností mikrofonů v řadě v různých časech. Z časového zpoždění signálů jednotlivých mikrofonů vzhledem k tomu vprostřed řady, k němuž dorazil signál jako první po kolmici, a z rychlosti šíření zvuku lze pak určit vzdálenost zdroje od prvků pole. Stejný princip se uplatní při vychýlení zdroje od kolmice o určitý úhel, který se pouze zohlední ve výpočtu. Systém sice nedokáže z principu rozlišit přední a zadní směr, ale vzhledem k praktickým provedením předpokládejme, že zdroj se může nacházet jen na jedné straně mikrofonní řady (toho lze docílit např. použitím směrových mikrofonů).

Při vícenásobných zdrojích signálu je situace poněkud složitější⁷¹. Používá se zde metody tvarování přijímací charakteristiky, která mikrofonnímu poli umožní zaměřit se na zdroje

⁶⁸ BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Systems: Theory, Implementation, and Application. Wiley-Blackwell, 2014, 536 stran. ISBN 978-0-470-82723-9.

⁶⁹ tamtéž.

⁷⁰ tamtéž.

⁷¹ tamtéž.

zvuku z jednoho konkrétního směru. To poskytuje možnost identifikovat jeden zdroj zvuku. Nejpoužívanější způsob je zpoždění jednotlivých mikrofonních signálů prvků pole o určené hodnoty a signály poté sečíst. To způsobí zesílení signálů z požadovaného směru a potlačení signálů ze směrů ostatních.

Mikrofonní pole je v zásadě dvou typů – rovinné pole (lineární, čtvercové, kruhové, hvězdicovité apod.) a prostorové pole (kubické, sférické)⁷². Akustická kamera využívá principů jak rovinného, tak prostorového pole, přičemž u rovinných polí se nejčastěji využívá konfigurace kruhové, ve speciálních případech pak čtvercové, křížové či speciálních tvarů s pseudonáhodným rozložením mikrofonů a prostorové pole téměř výhradně používá struktury sférické. V principu ale platí, že čím více mikrofonů je v poli použito, tím přesnější informaci o poloze zdrojů zvukového signálu jsme schopni získat.

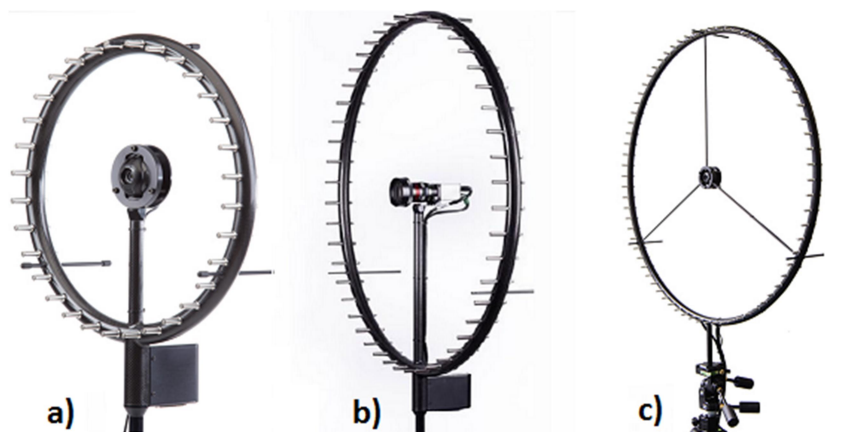
2.2.2 Provedení a vlastnosti akustických kamer

Akustické kamery pracují v zásadě všechny na podobném principu a liší se tak konstrukčními detaily, zejména rozměry a konfigurací mikrofonního pole.

2.2.2.1 Kruhové mikrofonní pole

Zřejmě nejtypičtější uspořádání rovinného mikrofonního pole pro dvojrozměrné měření se týká jak lehkých typů pro ruční použití s kruhovou či čtvercovou topologií, tak pro použití ve stativu pro větší objekty a vzdálenosti s topologií kruhovou. Jsou dostupné např. typy s průměrem 35 cm a počtem 32 mikrofonů až např. po průměr 1,2 m s počtem 72 mikrofonů po obvodu. Na obr. 14 jsou příklady tří základních typů kruhové topologie o třech průměrech mikrofonního pole a rovněž s různým počtem mikrofonů. Tato provedení co do stěžejních parametrů srovnává Tab. 1.

⁷² BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Systems: Theory, Implementation, and Application.



Obr. 14: Akustické kamery kruhové topologie: a) Ring 32-35 AC Pro b) Ring 48-75 AC Pro c) Ring 72 AC Pro (zdroj: acoustic-camera.com).

2.2.2.2 Hvězdicovité uspořádání pole

Mikrofony jsou umístěny v matematicky určených rozestupech zhušťujících se směrem ke středu na třech ramenech, přičemž průměr kružnice opsané rameny je 3,4 m.



Obr. 15: Akustická kamera hvězdicové topologie Star 48 AC Pro – celek a detail středu s kamerou (zdroj: acoustic-camera.com).

Tento typ je vhodný především k měření rozlehlých objektů nebo na velkou vzdálenost. I tato anténa je přidána do srovnání parametrů v Tab. 1.

Tab. 1: Srovnání základních parametrů akustických antén výrobce Acoustic Camera gfaitech GmbH

Model	Pole	Průměr pole [cm]	Mikrofonů	Frekv. rozsah mapy [Hz]	Dynamický rozsah [dB]	Měřicí vzdálenost [m]
Ring 32-35 AC Pro	kruh	35	32	800-20k	23-130	0.3-5
Ring 48-75 AC Pro	kruh	75	48	400-20k	23-130	0.5-5
Ring 72 AC Pro	kruh	120	72	200-20k	23-130	1.5-20
Star 48 AC Pro	hvězda	340	48	100-13k	11-130	4-500

2.2.2.3 Další verze mikrofonního pole

Další uspořádání mikrofonních polí jsou ilustrována na Obr. 16. Je zde ukázka jak čtvercového mikrofonního pole výrobku, tak speciálního tvaru mikrofonního pole čítajícím

120 snímacích prvků a dvě kamery. Na třetím snímku je pak ukázka prostorového mikrofonního pole ve sférickém uspořádání osazením v počtu 120 mikrofonů.



Obr. 16: Další méně běžné verze mikrofonního pole – čtvercová konfigurace, speciální pole (120 mikrofonů a dvě kamery) a sférické prostorové mikrofonní pole.

2.3 Výhody a nevýhody použití akustické kamery

Základní výhodou akustické kamery, která současně určuje oblast jejího použití, je mapování zvukového prostoru do vizuálního obrazu, a tedy snadná identifikace míst přicházejícího signálu. Ve spojitosti s frekvenční analýzou dává měření jasný obraz o zdrojích měřené směsi zvuků, přičemž při této aplikaci díky metodě směřování charakteristiky dokáže akustická kamera jednotlivé zdroje vzájemně odlišit. V tomto je třeba spatřovat zásadní výhodu akustické kamery oproti klasickým měřením zvukoměrem⁷³.

Oproti tomu klasický zvukoměr, který je rovněž schopný poskytnout frekvenční analýzu měřeného signálu, dává přesnější obraz o směru zvuku a charakteru zvukového prostoru pouze za pomoci směrových mikrofonů a vysoce odborné obsluhy⁷⁴. Výhodou zvukoměru je výrazně širší kmitočtové spektrum měřeného signálu a také jednodušší analýza celkové expozice hluku s širokými možnostmi časově určených intervalů měření.

Zvukoměry se tedy hodí zejména pro měření expozice zvuku ve zkoumaném bodě. Oproti tomu akustická kamera dokáže dát mnohem lepší a přesnější obraz o zdrojích signálu a je naopak méně vhodné při potřebě informace cílovém bodě, tedy o expozici hluku v určitém místě. Další nevýhodou akustické kamery je omezení co do nízkých kmitočtů řádově pod stovky Hz, popř. při nízkých kmitočtech značně velké rozměry mikrofonního pole⁷⁵.

⁷³ KOLMER, Felix, KYNCL, Jaroslav. Prostorová akustika.

⁷⁴ tamtéž.

⁷⁵ BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Syst.: Theory, Impl. and Application.

3 Možnosti využití akustické kamery pro lokalizaci zdrojů hluku železničních vozidel

Akustická kamera má celou řadu velmi praktických a účelných použití a pro některé aplikace je dokonce prakticky nenahraditelná. V některých případech lze v zásadě namísto akustické kamery použít kombinace klasických metod měření hluku a analýzu měřených signálů, ovšem za cenu neúměrně zvýšené pracnosti, výrazně menší názornosti. Kde a jak lze akustickou kameru s úspěchem použít je nejlépe vidět z praktických příkladů.

3.1.1 Vhodná použití akustické kamery

Akustickou kameru lze s výhodou použít obecně v případech, kdy je třeba přesně lokalizovat zdroj zvuku jakéhokoliv objektu. Výraz „objekt“ je myšlen naprosto obecně, a může to být průmyslový areál na volném prostranství, část strojního zařízení uvnitř uzavřeného prostoru nebo zdroje zvukových signálů z malého přístroje⁷⁶. Některé typické aplikace ukazují následující příklady.

3.1.1.1 Stacionární zdroje ustáleného hluku

Pro zařízení, které je hlučné, ale není jasný původ hluku (stroje, motory, atd.). Pokud je zařízení samo o sobě hlučné, ale pracuje správně a nelze tak na první pohled odhalit příčinu hluku, lze tento zdroj pomocí akustické kamery snadno identifikovat. Tato aplikace je vhodná také u pohyblivých strojů, k nimž se za pohybu nelze bezpečně dostat dostatečně blízko pro podrobné prozkoumání. Příkladem může být hluk způsobovaný listy rotoru větrného zdroje energie při rotaci.



⁷⁶ BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Syst.: Theory, Impl. and Application.

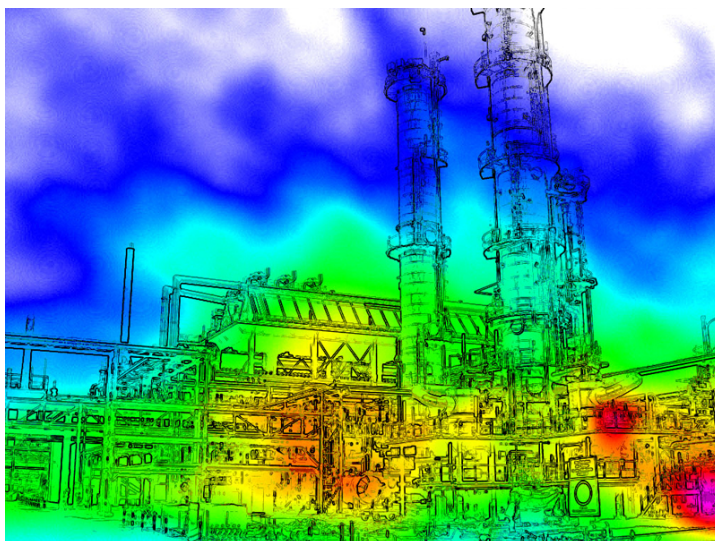
Obr. 17: Měření hluku lopatek u větrného zdroje elektrické energie (zdroj: Acoustic-camera.com).

3.1.1.2 Kontrola kvality a detekce závad

Pro identifikaci problematických částí soustrojí (v soustavě sekvencí strojů, motorů, atd.)⁷⁷. Prostřednictvím snímku měřeného zařízení a jeho akustického vyzařování lze odhalit některé příčiny poruch, zejména mechanického charakteru (převodovka pohonu, vadné ložisko apod.), ale také závady, jejichž základ je v elektrotechnice (rezonance nevhodně navrženého transformátoru či cívky apod.). Stejným způsobem lze kontrolovat kvalitu výrobku porovnáním teoretického předpokladu s reálným měřením.

3.1.1.3 Lokalizace a redukce zvukového znečištění

Typickým příkladem je lokalizace a měření zdrojů hluku průmyslového komplexu (výroba, těžba apod.). V areálu průmyslových podniků se nalézají současně mnoho zdrojů hluku (výrobní haly, dopravní systémy – pásové dopravníky, jeřáby apod., potrubí, vzduchotechnika, těžební stroje atd.). Prostřednictvím prostého měření hluku hlukoměrem sice docílíme zjištění, zda je nebo není překročen imisní hlukový limit sledovaného místa expozice, nicméně pro přijetí opatření nutných k omezení emisí hluku je třeba lokalizovat majoritní zdroje hluku a provést jejich kmitočtovou analýzu. A zde již klasický hlukoměr nepostačuje a nejvhodnějším nástrojem se stává akustická kamera, která dokáže na pozadí snímků celého komplexu ony majoritní zdroje přesně lokalizovat⁷⁸. Ukázky snímků tohoto typu aplikace akustické kamery jsou na obr. 18 a 19.

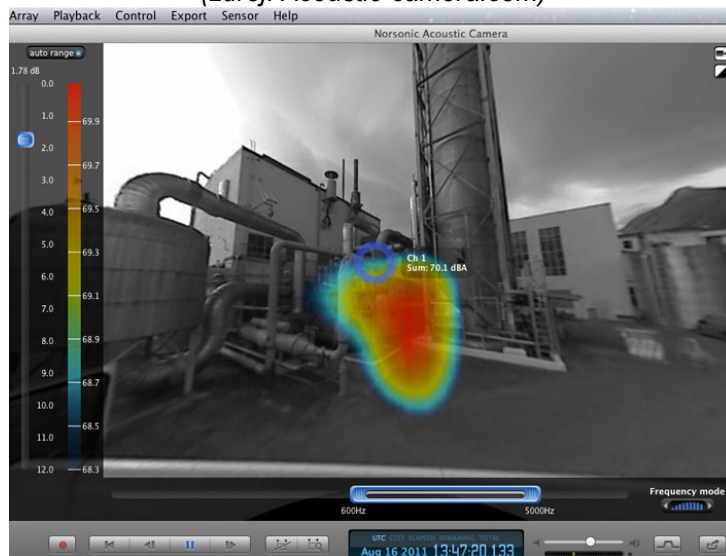


Obr. 18: Stylizovaný snímek továrního komplexu s identifikovanými místy největších emisí hluku

⁷⁷ Tamtéž.

⁷⁸ BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Syst.: Theory, Impl. and Application.

(zdroj: Acoustic-camera.com)



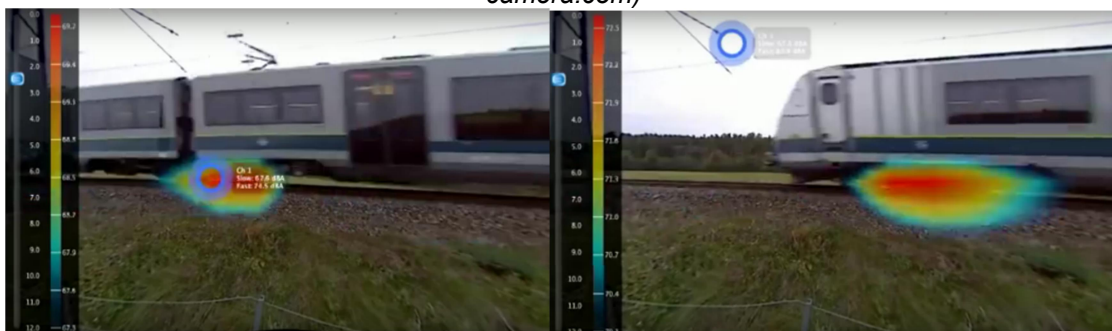
Obr. 19: Lokalizace zdroje hluku v průmyslovém zařízení (zdroj: Norsonic.com).

Pro sledování a analýzu podobně rozsáhlých komplexů se používají akustické kamery čítající 48 a více mikrofonů rozmístěných v tříramenném systému značných rozměrů. Rozpětí ramen často dosahuje několika jednotek metrů.

Jednou z aplikací tohoto typu je také stěžejní téma této práce, a tedy lokalizace zdrojů hluku železničních vozidel. Ačkoli se na rozdíl od předchozích ukázek jedná o pohybující se zdroj hluku, jedná se o lokalizaci hluku objektu ve volném prostranství s mnoha různými zdroji hluku, přičemž cílem je experimentálně určit dominantní složku z množství přispěvatelů, tedy zdroj majoritních emisí, a současně také místo, kde tato majoritní složka vzniká. Následující obrázky ukazují příklady lokalizace zdrojů hluku železničních vozidel.



Obr. 20: Ukázka konfigurace měřících pracovišť pro měření akustickou kamerou (zdroj: Acoustic-camera.com)



Obr. 21: Ukázka snímku projíždějícího vlaku akustickou kamerou (zdroj: Norsonic.com)

3.1.1.4 Aplikace vhodné pro měření akustickou kamerou

V případech, kdy nestačí pouhá informace o úrovni akustického tlaku, popř. analýza frekvenčního spektra celkového zvuku, ale předmětem zkoumání jsou zdroje jako takové jednotlivě, je nezbytně nutné použít akustickou kameru⁷⁹. Charakteristické aplikace vhodné pro použití akustické kamery lze na základě předchozích příkladů shrnout dle cíle měření do následujících bodů:

- **Potřeba lokalizace zdrojů zvuku** – zejména v případě, kdy je zdrojů hluku více a je třeba určit dominantní zdroje a tyto přesně lokalizovat.
- **Potřeba zmapování zdrojů hluku pocházejících z rozlehlé či fyzicky obtížně dostupné oblasti** – mapování zdrojů zvuku např. u rozlehlého průmyslového komplexu, nebo naopak identifikace zdrojů hluku u větrných zdrojů elektrické energie, k nimž je nemožný přístup za chodu zařízení.
- **Potřeba zmapování zdrojů hluku u pohybujících se zařízení** – obsahuje téma této práce, tedy lokalizace zdrojů hluku pohybující se železniční soupravy, ale obsahuje také obecně dopravní situace, tedy zmapování zdrojů hluku v dopravní infrastruktuře (uzlech, tunelech, mostech apod.), nebo obřích pohybujících se zařízení (těžebních strojů, vrtných souprav, jeřábů apod.), či menších s rychlým přerušovaným pohybem (robotická ruka osazená nástrojem apod.).

⁷⁹ BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Syst.: Theory, Impl. and Application.

3.1.1.5 Aplikace nevhodné pro měření akustickou kamerou

Existují samozřejmě také aplikace, při nichž měření akustickou kamerou s uspokojivým výsledkem použít nelze⁸⁰. V některých případech může pomoci kombinace s měřením klasickým zvukoměrem. Jedná se o tato dvě zásadní omezení:

Významné zastoupení nízkých frekvencí - akustická kamera je dle svých rozměrů a použitého algoritmu zpracování signálů schopna rozlišit frekvence zhruba od 200 Hz u větších typů, u malých příručních modelů je to 400-800 Hz. Tato hranice se v principu odvíjí od vlnové délky měřeného signálu. Horní frekvenční hranice v rámci akustického pásma není v principu konstrukcí akustické kamery limitována, limitem jsou pouze kmitočtové parametry použitých mikrofonů.

Hluk je málo kontrastní vzhledem k akustickému pozadí – pro měření akustickou kamerou je třeba, aby měřený zvukový signál dostatečně kontrastoval s akustickým pozadím, nejlépe aby obsahoval dominantní frekvenční složky. Jsou-li hladiny tohoto signálu srovnatelné s hladinami pozadí, akustická kamera se pro identifikaci a lokalizaci zdrojů hluku použít nedá. Pokud okolností dovolují možnost výběru, je lépe vybrat si pro měření lokalitu s co nejméně výrazným akustickým pozadím. Konkrétně pro měření hluku železničního provozu je pro získání lepších výsledků vhodné vybrat si lokalitu mimo městský hluk či další zdroje (řeka, dálnice apod.).

Pro konkrétní aplikaci je také důležitý vhodný výběr typu akustické kamery z hlediska rozměru kamery a počtu mikrofonů. Pokud je třeba měřit a analyzovat rozlehlý nebo vzdálený objekt (průmyslový areál, větrný zdroj elektřiny apod.), je třeba zvolit kameru s velkým poloměrem a vyšším počtem mikrofonů, naopak pro objekty menších rozměrů či objekty prostorově omezené (vnitřní prostory vozidel či strojovny apod.) je nutno použít malé a příruční verze akustických kamer samozřejmě za cenu zmíněných omezení.

⁸⁰ Tamtéž.

4 Realizujte vyhodnocení a analýzu dat získaných při měření vyzařovaného hluku nákladního vozu s využitím akustické kamery

Pro analýzu zdrojů hluku železničních vozidel bylo využito dat získaných z měření pohybu reálné vlakové soupravy na referenčním okruhu a pro demonstraci využití akustické kamery pak bylo provedeno zkušební měření zdrojů hluku v laboratoři.

4.1 Podmínky standardního měření hluku železniční dopravy

Požadavky na přístrojové vybavení a konfiguraci měřicího pracoviště pro hluková měření specifikuje norma ČSN EN ISO 3095⁸¹. V rámci normy jsou definovány požadavky na vlastnosti měřicích mikrofونů a také na jejich kalibrace, na akustické prostředí a meteorologické podmínky.

Pokud jde o parametry zkušebního stanoviště při měření na zkušební koleji je třeba zajistit celou řadu podmínek, které jsou ale v principu podobné jakýmkoli akustickým měřením ve volném poli. Ve volném poli by měla hladina hluku klesat se strmostí 6 dB na dvojnásobek vzdálenosti⁸². Především měřicí pracoviště je nutno uzpůsobit tak, aby se hluk mohl volně šířit bez dalších vlivů. Terén by měl být rovný, popř. pouze s normou dovoleným sklonem a v okolí mikrofону je třeba zajistit volný prostor v poloměru minimálně trojnásobku měřené vzdálenosti, což je obvykle zhruba 30 m (viz dále). V bezprostřední blízkosti, a tedy ani mezi zdrojem a snímacím zařízením (mikrofonom) nesmějí ležet žádné akusticky významné překážky. Mezi měřeným vozidlem a mikrofony nesmí být prostor zamokřený a musí být prost zvukově pohltivých materiálů (sníh, vegetace apod.), ale také materiálů vysoce odrazivých (voda, led, tvrdá hladká dlažba apod.). Povrch terénu je vhodné popsat v protokolu, stejně jako meteorologické podmínky ovlivňující akustické vlastnosti prostředí, tedy teplotu, vzdušnou vlhkost, barometrický tlak nebo rychlost a směr větru. Je pochopitelné, že za nepřízně počasí nebo při vyšších rychlostech větru standardní měření ve volném prostoru nemá smysl provádět.

⁸¹ ČSN EN ISO 3095. Železniční aplikace – Akustika - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly. ÚNMZ, 2014.

⁸² Tamtéž.

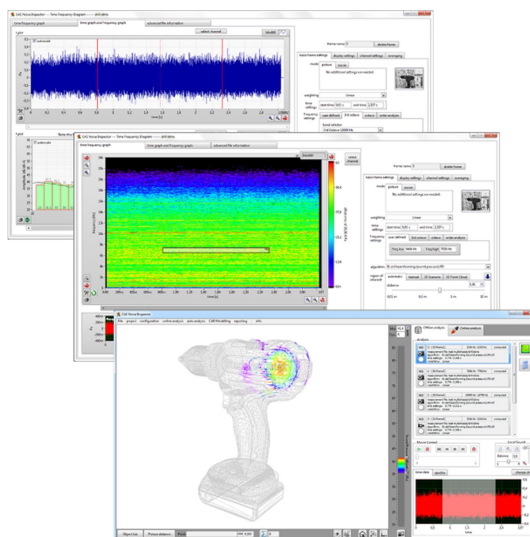
Samozřejmě také polohy mikrofonů pro měření hluku způsobeného vlaky pohybujícími se stálou rychlostí předepisuje norma⁸³. V duchu této normy je třeba fixovat měřicí mikrofony ve vodorovné poloze, a to ve dvou distancích. Ve vzdálenosti 7,5 m od osy koleje na kolmici k ní norma specifikuje dvě výškové kóty pro umístění mikrofonů. Ve výšce $1,2 \pm 0,2$ m měřeno od horní hrany kolejnice pro standardní měření a pro případ, že významný zdroj hluku se nachází v horní části jedoucího vozidla, je přípustná také výška $3,5 \pm 0,2$ m. Ve druhé delší vzdálenosti 25 m určené normou musí být měřicí mikrofon umístěn ve výšce $3,5 \pm 0,2$ m. Není nezbytně nutné provést měření ve všech znázorněných polohách, ale je to možné. Pro volbu poloh je třeba provést kvalifikovaný úsudek dle předpokládaných vlastností měřeného zdroje. Norma pamatuje rovněž na požadavky a zohlednění přirozeného hluku pozadí tak, aby měření nebylo ovlivněno hlukem z jiných nerelevantních zdrojů. Podobně jsou v normě zakotveny podmínky na měřené vozidlo jako takové. Pro standardní vozidlo způsobilé k měření je třeba vzít v úvahu stav kol (najeto 3 tis. km a více v běžném provozu bez poškození pojezdových ploch atd.), stav brzd, je třeba eliminovat hluk z jiných částí vlaku apod. Vozidlo musí být nezatížené, okna a dveře musí být uzavřeny. Také parametry měřicí koleje norma specifikuje a říká, že kolej musí být především suchá a bez námrazy a že v zásadě by se zkouška měla provádět na trati takového konstrukčního provedení, na níž je vozidlo běžně používáno. Kolej musí být také bezspojového typu a nesmí vykazovat nestandardní nerovnosti atd. Veškerá nestandardní zjištění je opět třeba zaznamenat do protokolu. To vše je třeba vzít v úvahu také a je nutné tyto detaily zaznamenat v protokolu o měření.

Standardní postup měření hluku při vlaku v pohybu říká, že při měření se zkoumané vozidlo musí pohybovat ustálenou rychlostí s přesností $\pm 5\%$, přičemž tato rychlost musí být sledována zařízením s minimální přesností $\pm 3\%$. Standardní doporučené rychlosti pro účely měření norma stanoví na tyto hodnoty: 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h, 140 km/h, 160 km/h, 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h, 320 km/h, 350 km/h.

⁸³ Tamtéž.

4.2 Software pro zpracování a analýzu měřených výsledků

Pro zpracování signálu získaného mikrofonním polem a frontendovým hardwarovým zpracováním signálů byl použit komplexní softwarový nástroj Noise Inspector německé firmy CAE Software und Systems GmbH. Robustní a komplexní softwarový balík nabízí veškeré dílčí nástroje k zobrazení signálu měřeného akustickou kamerou samozřejmě v reálném čase, a také pestrou sadu dalších nástrojů určených pro následné zpracování a analýzu množiny naměřených dat. Mezi klíčové vlastnosti tohoto softwarového produktu patří tedy v prvním sledu měření a zobrazování zvukových signálů v reálném čase (sound imaging), což je důležité zejména pro prvotní rychlý náhled zkoumaného děje, pokud předem neznáme vlastnosti měřeného hluku. Software dokáže takto zpracovat zvuk ve frekvenčním pásmu 40 Hz až 20 kHz, což je pro drtivou většinu aplikací bohatě dostačující. Nutno poznamenat, že je dobré, že v tomto pásmu je zahrnuto 50 Hz jako frekvence napětí 230V/400 V v evropské distribuční síti, protože tento kmitočet se zejména u silových elektro zařízení pracujících se síťovým napětím (např. transformátory apod.) jako jedna ze složek nežádoucího hluku může objevovat. Zde je však kromě softwarového omezení také omezení z hlediska rozměru mikrofonního pole (desítky Hz znamenají rozměry pole řádově v metrech). Většina standardních mikrofonních polí pracuje od kmitočtů řádově stovek Hz, nicméně pro případ potřeby tu v rámci softwaru tato možnost existuje.



Obr. 22: Ukázka prostředí programu Noise Inspector (zdroj: cae-systems.de).

Dynamické rozlišení, které je možné rozlišit nástrojem Sound Inspector je 40 dB, což je také dostatečné. Velmi užitečné je softwarové rozhraní pro LabVIEW a Matlab. LabVIEW je i přes svoji ne právě přívětivou licenční politiku velmi hojně používané ve výzkumu a vývoji např. pro automatizaci procesů a zpracování výsledků při testování a měření a možnost

propojení prvku akustické kamery s dalšími přidruženými systémy pomocí LabVIEW se jeví jako velice užitečná. Podobně je tomu i u Matlabu, který slouží ve výzkumu a vývoji např. pro matematické zpracování měřených dat a procesů, nebo k provádění simulací.

Dále je podstatnou součástí balík nástrojů pro zpracování měřeného signálu (postprocessing), k čemuž software využívá dle slov výrobce výjimečně výkonné algoritmy, což je tedy uživatel schopen posoudit samozřejmě pouze z hlediska rychlosti provádění požadovaných operací nad množinou dat, což je u tohoto softwaru rozhodně minimálně uspokojivé. Dále je možný export celé video scény do souboru AVI a zvuková stopa může být exportována do souboru WAV.

4.3 Demonstrace měření akustickou kamerou v laboratoři

Praktické uplatnění akustické kamery je nejlépe patrné z praktické demonstrace měření v laboratoři. Jako modelový příklad byly použity dva odlišné zdroje signálu, a sice reprodukováná hudba, jejímž zdrojem byl mobilní telefon na stole a druhým zdrojem bylo současně monotónní zapískání obsluhy řídicího PC. Výsledky měření při jsou zobrazeny v Příloze 1 prostřednictvím spektrogramu. Spektrogram vyjadřuje úroveň hladiny akustického tlaku na jednotlivých kmitočtech v závislosti na čase. Hladina akustického tlaku je vyjádřena barvou bodu vždy pro určitý čas a frekvenci, přičemž nejnižší hladiny mají barvu fialovou a při zvyšující se intenzitě se barva mění do tmavě modré, přes světle modrou dále přechází do odstínů zelené a přes žlutou a oranžovou do červené. Spektrogram při tomto typu měření podává základní přehled o celkové hlukové energii v měřeném časovém úseku a jednotlivých frekvenčních složkách. Na základě spektrogramu lze v celé naměřené množině dat identifikovat jednotlivé příspěvky a lokalizovat je v časové a kmitočtové rovině. Tyto příspěvky lze poté blíže zaměřit vhodnou volbou časového a frekvenčního pásma. Protnutí těchto dvou pásem ve spektrogramu lokalizuje pomyslný obdélník vytyčený hranicemi oblasti našeho zájmu. Díky snímání signálu akustickou kamerou s metodou Beamforming, jinak také akustické holografie, lze tuto oblast promítnout do snímku scény v rámci zvoleného časového okna a vhodnými volbami frekvenčních popř. časových pásem pak lokalizovat jednotlivé významné zdroje samostatně. Časové okno je vhodné volit takové šířky, aby obraz scény získané kamerou obsáhl oblast působení zkoumané hlukové složky a podal dobrou informaci o detailech zdrojů zvuku. Analogicky je třeba vybrat frekvenční pásmo zobrazení takové, aby obsahovalo frekvenční složky zkoumaného zdroje (frekvenční špičky) a bylo současně

dostatečně úzce ohraničené. Nejlépe tento princip ilustruje laboratorní demonstrace, jejíž výsledky jsou zobrazeny v Přílohách 1 až 4.

Příloha 1 obsahuje spektrogram změřených akustických signálů. Při podrobnějším pohledu na spektrogram je zřejmé, že zobrazuje směs zvuků různých kmitočtů s různým časovým rozprostřením o celkové délce trvání 3,15 s. Barevná škála hladin akustického tlaku říká, že kmitočtový rozsah výkonově významnějších složek sahá zhruba do 8 kHz se slabými stopami kolem 10 kHz. Nejvýznamnější časově poměrně stabilní akustická složka je na spektrogramu zřetelná v pásmu pod 2 kHz. Složka je kmitočtově úzkopásmová a stabilní s výrazně vyššími hladinami intenzity. Lze téměř s jistotou předpokládat, že jde právě o pískání na ústa. Zatímco hudební podklad představuje frekvenčně rozprostřený a časově nestabilní signál, který je ve spektrogramu vyjádřený stopami tyrkysové do zelena přecházející barvy s intenzitou zhruba 30 až 40 dB(A), pískání je ve spektrogramu vykresleno úzkou časově stabilní linkou barvy žluté až červené, což vyjadřuje hladinu intenzity zhruba 65 až 85 dB(A).

Výše zmíněné úsudky a předpoklady vytvořené na základě spektrogramu měřeného zvuku lze samozřejmě potvrdit podrobnější analýzou, kterou zachycují Přílohy 2 až 4. Z obsahu kmitočtového spektra po vhodném nastavení prahové úrovně vystoupí několik dominantních kmitočtových složek, které představují významné partie reprodukováné hudby (zřejmě sólové nástrojové party) a také pískání na ústa. Příloha 2 ukazuje detaily vybraného úseku záznamu, a sice časový interval 2,192 s v rozmezí 0,410-2,602 s, a současně kmitočtové pásmo: 630-1385 Hz. Dle zobrazeného spektra vybrané pásmo obsahuje několik výrazných kmitočtových složek, nicméně frekvence nejsilnější složky spektra je mimo tento interval. Z vizualizace měření akustickou kamerou je zřejmé, že vybrané kmitočtové pásmo obsahuje frekvence pocházející výhradně z reprodukováné hudby v hladinami intenzity akustického tlaku do 50 dB(A). Nutno poznamenat, že podobně jako ve spektrogramu jsou červeně a žlutě vyznačeny nejsilnější složky spektra, které s poklesem přecházejí do zelené a modré, ale vizualizace se přizpůsobuje dynamickému rozsahu zkoumané oblasti, tzn. barevné označení je relativní a absolutní hodnota hladiny akustického tlaku bude v různých přiblíženích pro tytéž barevné odstíny odlišná.

Zcela jiný bude získaný výsledek při volbě jiných parametrů zejména v rovině frekvencí. Příloha 3 obsahuje analýzu zhruba podobného časového úseku délky 1,502 s (0,749-2,251 s),

ale ve frekvenční rovině bylo zvoleno úzké pásmo šířky 87 Hz v rozmezí 1600-1687 Hz, které obsahuje Nejvýznamnější spektrální složku s blízkým okolím. Z následné vizualizace je patrné, že právě tato nejsilnější kmitočtová složka představuje ono pískání na ústa. Třetí příklad analýzy naměřeného signálu obsažený v Příloze 4 pro podobně dlouhý časový interval 2,192 s v rozmezí 0,410-2,602 s s volbou kmitočtového rozsahu v horní části spektra 1862 Hz-5381 Hz zahrnuje opět vyšší spektrální složky hudebního signálu, ale spodní část intervalu zahrnuje také okrajové spektrální složky pískání, ovšem podstatně výkonově slabší, než dominantní frekvence. Na vizualizaci je toto zjištění dobře patrné z označení zdrojů zvuku na snímané scéně. Rozsah úrovní barevné škály upřesňuje, že Nejvýznamnější složky dosahují hladin zhruba 45 dB(A).

Zkoumaný příklad velmi dobře ukazuje zásadní výhody akustické kamery s metodou Beamforming, tedy směrového snímání scény. V případě, že by pro toto měření byl použit klasický hlukoměr, bylo by v lepším případě možné získat spektrogram, časový průběh signálu a spektrum⁸⁴. V tomto jednoduchém příkladě by sice bylo pravděpodobně možné podrobnou analýzou spektra v kombinaci s poslechem nahrávky rozlišit pískání od hudebního podkladu (odlišné úrovně hlasitosti, popř. jiný charakter syrového zvuku a hudby z hlediska komprese, efektů apod.). Ale nebylo by možné bez představy o obrazové scéně a metody směrového snímání rozlišit směr přicházejícího signálu. Pokud by nastala modelová situace, kdy by ono pískání bylo výkonově podobné a charakterově nepříliš odlišné, nota bene pokud by totéž pískání obsahovala i reprodukováná hudba (např. pískání si melodie pískané i v rámci skladby), v časové i kmitočtové rovině by oba signály splynuly a nebylo by pomocí klasického měření hluku⁸⁵ bez akustické kamery a následné směrové analýzy možné zdroje rozlišit a lokalizovat.

4.4 Měření na referenční trati Velim

Realizace měření hluku na zvláštní referenční trati se známými akustickými parametry jsou stěžejní pro získání výsledků vhodných k analýze. Jak již bylo popsáno v kap. 4.1 referenční kolej musí splňovat přísné požadavky, které jsou na běžně provozované trati prakticky nedosažitelné.

⁸⁴ SMETANA, Ctirad, et al. Hluk a vibrace: Měření a hodnocení. 1. Vydání. Praha 1: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.

⁸⁵ Tamtéž.

4.4.1 Referenční trať

Jedna z takových zkušebních tratí se nachází i v tuzemsku ve Středočeském kraji nedaleko Poděbrad mezi železniční tratí Praha–Kolín a dálnicí D11. Jedná se o železniční zkušební okruh Cerhenice, který figuruje jako součást Zkušebního centra Velim. Okruh byl otevřen po tříleté výstavbě již v roce 1963 a je majetkem akciové společnosti Výzkumný Ústav Železniční, jejímž vlastníkem jsou České dráhy. Jedná se o uzavřenou trať, která se skládá z velkého a malého okruhu. Délka malého okruhu je 3,951 km a testované vozidlo se po něm může pohybovat maximální rychlostí 90 km/h a velký okruh čítá 13,272 km s maximální přípustnou rychlostí přesahující 200 km/h dle druhu vozidla. Oba okruhy přitom umožňují nezávislé napájení všemi nejpoužívanějšími evropskými napájecími soustavami.



Obr. 23: Poloha referenčních okruhů Cerhenice (zdroj: Wikipedia).

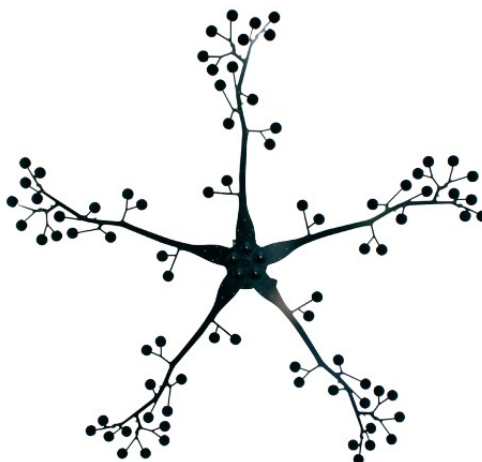
Referenční trať kromě parametrů pro testování kolejových vozidel jako takových, jejich rádiového spojení, simulace poruch apod. umožňuje také hluková měření na segmentu trati velkého zkušebního okruhu, který odpovídá svými parametry požadavkům technické specifikace.

4.4.2 Použité vybavení a konfigurace pracoviště

Pro měření na referenční trati Velim bylo použito vybavení renomované německé firmy CAE Software und Systems GmbH. Jako mikrofonní pole bylo použito řešení CAE Bionic XL, což je bionické pětiramenné mikrofonní pole, na němž je osazeno 80 mikrofonů. Vlastnosti mikrofonního pole shrnuje tab. 2. Místo měření bylo lokalizováno u vnitřního malého testovacího okruhu zhruba 3 m od kilometrovníku 1,3 km. Kolmo od trati bylo umístěno cca 13,2 m od osy kolejiště vnějšího (vzdálenějšího) okruhu dvojkolejné trati. Střed mikrofonního pole byl umístěn cca 1,5 m nad terénem.

Tab. 2: Vlastnosti použitého mikrofoniho pole CAE Bionic XL (zdroj: cae-systems.de).

Parametr	Hodnota
<i>Průměr pole</i>	1,7 m
<i>Hmotnost</i>	3.5 kg
<i>Počet mikrofonů</i>	80
<i>Počet ramen</i>	5
<i>Mikrofonů na rameni</i>	16
<i>Materiál ramen</i>	kompozit
<i>Spodní frekvenční limit pole</i>	350 Hz
<i>Typ mikrofonů</i>	MEMS, digitalní
<i>Vzorkování</i>	24 bitů, 48 kHz
<i>Dynamický rozsah mikrofonů</i>	33 dB - 120 dB
<i>Frekvenční rozsah mikrofonů</i>	20 Hz - 20 kHz



Obr. 24: Použité mikrofoniho pole CAE Bionic XL (zdroj: cae-systems.de).

4.4.3 Provedená měření

Na zkušebním okruhu Cerhenice ve Zkušebním centru Velim byla provedena tři měření systémem akustické kamery na vlakové soupravě při rychlostech pohybu 60 km/h, 80 km/h a 120 km/h. Na měření získaných datech byla provedena analýza a nalezení majoritních zdrojů hluku prostřednictvím programu Noise Inspector.

Stejným principem, jako u laboratorního měření je třeba vhodně zvolit časové okno obsahující změřený hluk a vybrat vhodné frekvenční pásmo tak, aby obsahovalo frekvenční složky, které jsou předmětem našeho zkoumání. Současně musí být zkoumaný interval dostatečně úzce ohraničený. Příkladem vhodně zvolených parametrů může být vizualizace hluku na obr. 25. V této souvislosti nutno doplnit, že pro měření zdroje, který se vzhledem k měřicímu pracovišti pohybuje, je třeba na rozdíl od stacionárního zdroje počítat s Dopplerovým efektem, tedy se změnou kmitočtu akustického signálu šířícího se směrem k měřicímu pracovišti (známý efekt projíždějící houkající sanitky), což je zahrnuto v rámci algoritmizace softwarového zpracování.



Obr. 25: Vizualizace zdroje hluku při průjezdu soupravy rychlostí 80 km/h, zobrazeno časové okno délky 1,004 s (3,472-4,476 s). Kmitočtové pásmo šířky 40 Hz (1612 Hz-1662 Hz). Příspěvky hluku jsou v hladinách akustického tlaku v rozmezí cca 77-81 dB(A). Zpracováno v SW Noise Inspector.

4.5 Analýza výsledků měření

Použití akustické kamery pro lokalizaci zdrojů hluku pohybujících se železničních vozidel je nejlépe vidět z výsledků analýzy naměřených dat při rychlosti pohybu 80 km/h. Jak je patrné z měření získaného spektrogramu v Příloze 5 energeticky Nejvýznamnější složky hluku se odehrávají v kmitočtovém pásmu řádově od stovek Hz do cca 1 kHz, další významné příspěvky se nacházejí v kmitočtech těsně pod hranicí 2 kHz, energeticky významné pásmo je zhruba v kmitočtech kolem 2,5 kHz a stopy významných zdrojů hluku jsou patrné zhruba do kmitočtu 4,5 kHz. Největší část změřené akustické energie se vyskytuje zhruba v první polovině pětisekundového časového okna, nicméně významné příspěvky hluku přetrvávají v celém časovém intervalu.

Z naměřených dat je patrné, že v první polovině časového intervalu se zvýšeným výkonovým příspěvkem hluku rozloženém ve spektrální rovině v širším intervalu šlo o průjezd vozidla vlakové soupravy, což nepřímou potvrzuje také to, že v dalších měřeních se podobně mocné hladiny intenzity zvuku nevyskytují. Dle teoretických předpokladů uvedených v předchozích kapitolách připadají kmitočty zhruba do 4 kHz dominanci valivého hluku, což změřené situaci přesně odpovídá.

Lze si také všimnout, že na počátku měřeného intervalu, tedy zhruba do času 600 ms, je na spektrogramu patrná výrazná dominance příspěvku na kmitočtu zhruba 1 kHz, což dle teorie zhruba odpovídá rezonančním kmitočtům kolejnice. Tento předpoklad je podpořen tím, že v tomto krátkém počátečním intervalu se jiné podobně výrazné složky hluku nevyskytují, což znamená, že kolejnice v měřeném prostoru již rezonuje, zatímco vlaková souprava je teprve těsně před měřeným úsekem. V této souvislosti lze odhadnout, že při rychlosti pohybu soupravy 80 km/h urazí souprava v časovém úseku 1 s dráhu 22,2 m, a tedy za čas 0,5 s od počátku měření urazí čelo vlaku vzdálenost zhruba 11 m. Pro jasnější představu o časových úsecích ve spektrogramu řekněme, že standardní lokomotiva i vagon představují délku 20 m (reálně spíše o něco méně), tedy pro jednoduchý odhad při rychlosti 80 km/h minou pomyslný měřený bod za méně, než jednu sekundu. To také zhruba odpovídá úsekům analyzovaným v přílohách 6 až 9 a 10 až 21, kde je z vizualizace patrné, že časové okno 1 s zabírá zhruba délku jednoho vagonu.

Z kmitočtové roviny lze dále vysledovat následující: Při rozdělení příspěvků hluku na pásma jsou patrné výrazné intenzitní úseky v pásmu zhruba 200 Hz až cca 600 Hz. Dle předchozích předpokladů patří toto kmitočtové pásmo příspěvkům rezonance pražců, nastupující rezonanci kolejnice a může sem spadat také první rezonančním kmitočet kola. Pro rozlišení jednotlivých zdrojů by bylo třeba provést podrobnější analýzu tohoto pásma, nicméně nevýhodou je, že z pohledu kamery se tyto prvky nacházejí částečně v zákrytu. Další velmi zajímavé složky hluku se nacházejí v pásmu 1 kHz až 2 kHz. Dle výše popsané teorie jsou mají v tomto pásmu majoritní podíl kolejnice, jejíž rezonanční křivka v tomto intervalu směrem k vyšším kmitočtům klesá, a především další rezonance kol nápravy.

První detailněji analyzovaný úsek spektrogramu v Příloze 5 je v Příloze 6 až Příloze 8. Zde je zvolen sekundový úsek 3,456-4,460 s, na němž je provedena kmitočtová analýza způsobem analogickým k demonstraci použití akustické kamery v laboratoři. Ze spektra je vybrán rezonanční kmitočet, resp. velmi úzký interval kolem této spektrální špičky. Pro příklad v Příloze 6 tedy konkrétně v kmitočtech 1662 Hz -1806 Hz. Tento frekvenční interval se následně v okně vizualizace objeví jako barevná skvrna umístěná na zdroji příslušného kmitočtu, zde konkrétně na kolech nápravy projíždějícího vozu, zejména pak na pravé straně koncové nápravy osobního vagonu. Intenzita tohoto zdroje je opět vyznačena barevnou škálou od modro fialové po červenou, jejíž dynamické rozmezí je přizpůsobeno sledovanému úseku a v absolutních číslech naznačeno na pravé straně vizualizačního okna, v konkrétním příkladě

v Příloze 6 je to rozmezí zhruba 76-82 dB(A). Analogicky lze pak pomocí vybírání dalších kmitočtových rezonančních špiček ze spektra pro daný časový úsek identifikovat jednotlivé dílčí příspěvky zdrojů celkového hluku. Další příklady analýzy celkového hluku jsou Příloze 10, kde je další spektrogram měřeného signálu projíždějící soupravy a v Příloze 11 až v Příloze 21 je detailní analýza krok za krokem pro jednotlivé dílčí rezonance měřeného spektra.

5 Možnosti snížení vyzařovaných hlukových emisí železničních nákladních vozů

K opatřením pro snížení hlukového znečištění ze železniční dopravy lze přistoupit v zásadě dvojitým způsobem. Prvním přístupem jsou opatření aktivní, která se aplikují přímo u zdroje hluku a omezují tak emisi hluku jako takovou. Druhou možností jsou opatření pasivní, tj. taková, která snižují imise hluku v místech, v nichž je třeba tento problém řešit, tedy typicky v obydlených oblastech v blízkosti železniční trati. Při rozboru jednotlivých opatření ke snížení bude brán zřetel zejména na možné modifikace stávajícího systému (hlavně pokud jde o vozový park), ale nutno zmínit, že jednou z cest ke snížení hluku je kompletní výměna vozů (podvozků) za moderní typy.

5.1 Opatření aktivní

Opatření zaměřená na zdroj hluku při plošném zavedení snižují emise hluku celého železničního systému v celé délce trajektorie, zvláště při kombinaci více metod současně. Aktivní opatření se mohou týkat vozidla samotného nebo železničního svršku.

5.1.1 Úpravy vozidla

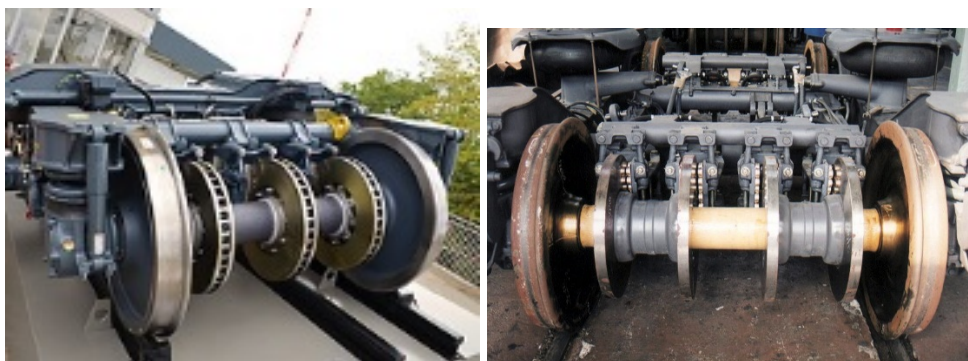
Úpravy vozidla zahrnují především opatření proti vzniku hluku valivého jako dominantní složky celkové hlukové emise soupravy pohybující se standardní rychlostí. Nutno poznamenat, že složkám hluku, které vznikají ve speciálních případech, zejména při dobržďování soupravy, posunu či při průjezdu ostrou zatáčkou, bude věnována samostatná kapitola.

5.1.1.1 Modifikace brzdového systému

V kapitole 1.5 již bylo zmíněno, že výrazného snížení hluku způsobeného brzdovým systémem podvozku železničních vozidel se docílí použitím nekovových (jiných, než

litinových) válečků zdržových brzd. Jednak jde o omezení hluku vznikajícího při samotném brždění či jen přibrzdování, a v druhém sledu dochází díky nekovovým válečkům k rapidně nižšímu opotřebení (zdrsnění) obvodu kola, které je při pohybu kolejového vozidla jednou z hlavních příčin valivého hluku. Kompozitní brzdové špalíky se v současnosti používají ve dvou typových provedeních, a sice LL a K. Liší se svou konstrukcí a v praktickém použití zejména tím, že typem LL lze prakticky plnohodnotně a bez větších úprav nahradit stávající litinové špalíky, zatímco pro použití typu K je třeba větších úprav na celém podvozku, což způsobuje další růst nákladů. Zatímco u výměny stávajících litinových špalíků prameny⁸⁶ hovoří o nákladech zhruba deseti tisíc Kč na jednu nápravu, u špalíků typu K jsou náklady navíc zhruba o 100 tis. Kč a více na jeden vůz vyšší. Uvádí se, že výměna litinových brzdových špalíků způsobujících výrazné zdrsnění kola za kompozitní typ dokáže ve výsledku snížit emisi valivého hluku až o 50 %⁸⁷.

Další možností snížení hluku kolejových vozidel je použití zcela odlišného brzdového systému založeného na tření, než takového, který třecí sílu uplatňuje přímo na oběžné ploše kola. Mezi takové systémy patří kotoučové brzdy obvyklé u automobilů. U kolových podvozků železničních vozidel se používá na jedné nápravě více, než jednoho páru kotoučových brzd, jak je patrné z obr. 26. Většího počtu kotoučů se používá zejména pro vyšší rychlosti pohybu souprav.



Obr.26: Ukázky vícenásobných systémů kotoučových brzd u podvozků kolejových vozidel (zdroj: trainweb.org)

Nutno doplnit, že ačkoli kotoučové brzdové systémy patří k moderním řešením, která nezpůsobují nadměrné opotřebení povrchu kola, ale i tak mají své nevýhody, které spočívají zejména v komplikovanější servisovatelnosti (kontrolu a opravu nelze provést bez odstavení

⁸⁶ HLAVÁČEK, Jan. Zpráva z mezinárodního jednání Expertní skupiny UIC/CER pro hluk a vibrace, „Network noise“ v Paříži.

⁸⁷ Tamtéž.

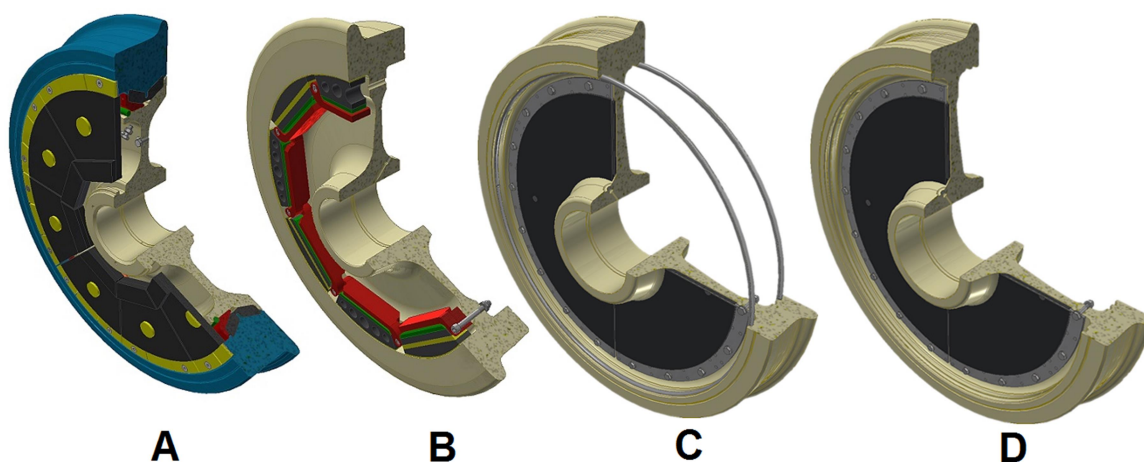
vozu do specializované dílny), oproti zdržovým brzdám v nesnadné vizuální kontrole stavu brzd. Naopak kromě výrazně nižší hlučnosti je nespornou výhodou fakt, že brzdný účinek se nemění s nárůstem rychlosti pohybu soupravy a přidanou hodnotou je i bezpečnostní hledisko, kdy při prudkém brždění nehrozí přehřátí a narušení povrchu kola.

Brzdové špalíky z kompozitních nekovových materiálů mají také na rozdíl od litinových nejen nižší hlučnost, ale v závislosti na rychlosti pohybu soupravy stabilnější součinitel tření mezi špalíkem a kolem⁸⁸. Tato vlastnost byla také primárním důvodem k rozšíření nekovových špalíků. Stabilita součinitele tření v závislosti na rychlosti se týká zejména brzdových klínů typu K. U původních litinových brzdových klínů se zvyšující rychlostí součinitel tření klesá prudčeji.

5.1.1.2 Modifikace kola

K aktivním protihlukovým a protivibračním opatření aplikovaných na vozidlo patří také opatření prováděná na kolech nápravy. Velmi zajímavým řešením, které lze v zásadě uplatnit i na stávajících vozidlech, jsou protihlukové absorbéry na kolech. Na trhu se nabízí mnoho variant řešení absorbérů. Ukázky několika z nich z produkce česko-německé firmy GHH-BONATRANS (Železniční dvojkolí ŽDB Bohumín) jsou na obr. 27. Tlumiče hluku vyrobené společností GHH-BONATRANS jsou dle firemních specifikací schopny dosáhnout snížení valivého hluku až o 5 dB(A) a snížení kvílivého hluku až o 30 dB(A) oproti kolům bez tlumičů. Za povšimnutí stojí zejména multisegmentové absorbéry, které je možné prostřednictvím vhodné konfigurace naladit do vybraných kmitočtových pásem tak, aby pohlcovaly nejvíce dominantní složky kmitočtového spektra. Výzkumy prokazují, že snížení emise hluku touto metodou může dosahovat 3-5 dB v kmitočtovém pásmu mezi 300 Hz a 2 kHz.

⁸⁸ HLAVÁČEK, Jan, KONEČNÝ Jiří, SEDLÁČEK, Radek. Postup implementace „TSI – hluk“ v České republice, současný stav, možnosti řešení, stanovisko dopravce.



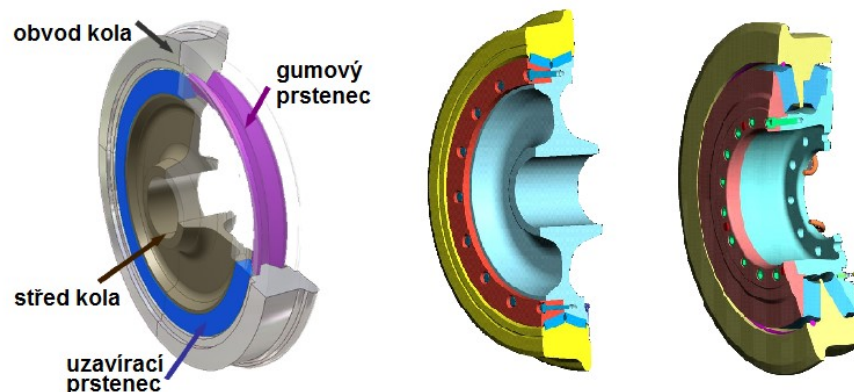
Obr. 27: Ukázky řešení kolových absorbérů z produkce firmy GHH-Bonatrans: a) listový absorbér, b) multisegmentový absorbér, c) deskový absorbér s vloženými kroužky, d) deskový absorbér bez kroužků (zdroj: ghh-bonatrans.com).

Na obr. 28 jsou fotografie skutečného provedení kolových hlukových absorbérů opět z produkce firmy GHH-BONATRANS.



Obr. 28: Fotografie provedení kolových hlukových absorbérů GHH-BONATRANS – deskový absorbér a multisegmentový absorbér (zdroj: ghh-bonatrans.com).

Dalším méně obvyklým řešením pro ztlumení vibrací a hluku kola nápravy železničního vozu jsou gumové mezikroužky vklíněné po obvodu ve struktuře kola, které za jízdy stojí v cestě vibracím, které se u běžného kola šíří od styku kola s kolejnicí směrem ke středu kola. Obvod takového vícesložkového kola je spojen se středem pružným tlumicím prostředím. Po obvodu kola bývá v tomto případě ještě umístěn kovový prstenec upevněný po obvodu šrouby, jejichž dotahováním lze gumové mezikrouží stlačovat a nastavovat tak jeho tuhost. Naznačené řešení je na obr. 29.



Obr. 29: Různá řešení gumových tlumících mezikruží (zdroj: ghh-bonatrans.com).

Kromě tohoto základního řešení jsou v nabídkách firem i mnohem složitější varianty (viz obr. 29), nicméně princip je vždy stejný – postavit vibracím způsobeným valivým pohybem do cesty pružné či pohltivé prostředí, zjednodušeně se jedná o obdobu pneumatik umístěných uvnitř struktury celého kola. Tato opatření se týkají především příměstské a městské dopravy (tramvaje, příměstské vlaky, metro apod.), kde je na maximální omezení emisí hluku kolejové dopravy kladen velký důraz.

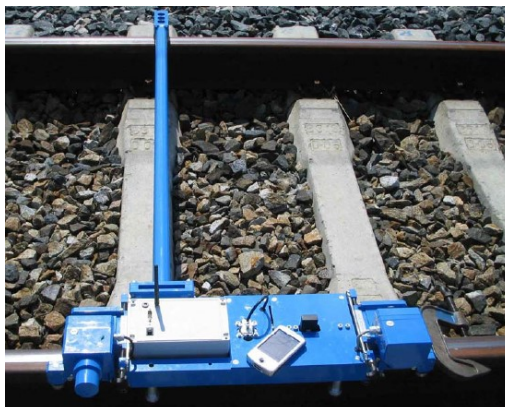
Pokud jde o optimalizaci tvaru kola, z hlediska vzniku hluku při pohybu po kolejnici patří mezi zásadní parametry zejména osová symetrie kola. Při nedokonalé symetrii kola vznikají vlivem excentricity vibrační rázy, jejichž frekvence při dané konstrukci kola je přímo úměrná rychlosti otáček, tedy na rychlosti pohybu soupravy. Tato vlastnost je naštěstí kontrolovatelná při rozsáhlejší údržbě vozidla. Hlukové emise jsou také závislé na poloměru kola, a to opět přímo úměrně, tedy čím menší průměr kola, tím menší emise hluku, což souvisí mj. s velikostí styčné plochy kola a hlavy kolejnice.

5.1.2 Úpravy kolejové trati

Další prvek, který je významně účasten na vzniku valivého hluku je kromě podvozku vozů také samotný železniční svršek. Valivý hluk vždy vzniká vzájemným působením kola a kolejnice. Při protihlukových opatřeních, která se přijímají na železničním svršku, se uplatňuje buď princip snížení vzniku hluku přímo vhodnou úpravou třecí plochy na hlavě kolejnice, nebo metoda absorpce hluku opatřeními na tělese kolejnice nebo na jejím uložení. Tyto úpravy budou zmíněny jen ve stručném přehledu, neboť se týkají železniční dopravy jako celku a nejsou specifická přímo pro nákladní vozy.

5.1.2.1 Úprava třecí plochy kolejnice

Zjišťování akustické drsnosti koleje jako zásadního parametru z hlediska vlivu kolejnice na vznik hluku se provádí buď přímou metodou, která obnáší ruční měření pomocí speciálního měřicího přístroje (obr. 30), nebo nepřímé metody založené na analýze odezvy kalibrované dynamické soustavy kolej-dvojkolí. Nepřímá metoda je oproti přímé výrazně výkonnější, neboť je schopna pokrýt řádově desítky kilometrů trati za hodinu a z pohledu praktické diagnostiky stavu tratí má tak nepřímá metoda zásadní důležitost.



Obr. 30: Přístroj pro měření akustické drsnosti kolejnice (zdroj: HLAVÁČEK, J.⁸⁹).

Při zjištění nevyhovujícího stavu akustické drsnosti daného úseku je nejčastějším protiopatřením broušení povrchu kolejnice. Nutno doplnit, že svůj vliv na akustické vlastnosti mají také zkorodované jízdní plochy kolejníc. Nutno poznamenat, že na příspěvky hluku mají svůj vesměs pozitivní vliv také modifikátory tření kolejníc, které se primárně používají na zvýšení adheze a tím efektivnějšího přenosu síly.

5.1.2.2 Hlukové absorpční prvky

Podobně jako se používá absorpčních prvků na kolech podvozků železničních vozidel lze aplikovat metodu absorpce hluku emitovaného kolejníc, po níž se kolo pohybuje. Konkrétně mohou být použity absorpční bloky, které se připevňují přímo na kolejnici ze strany a mohou zasahovat také do uložení samotné kolejnice. Několik příkladů zobrazuje obr. 31. Zajímavým řešením je také použití absorpční vrstvy, která souvisle pokrývá celou stranu kolejnice po celé její délce.

⁸⁹ HLAVÁČEK, Jan. Technické specifikace pro interoperabilitu subsystému „Hluk“.



Obr. 31: Absorpční prvky použité na kolejnici (zdroj: railway-technology.com)

Mezi další protihluková opatření aplikovaná na trati patří pružné uložení a pružné upevnění kolejí. Jako protivibrační opatření působí také tloušťka šterkového lože, pružnost kolejnicových podložek, kontinuálně podepřené kolejnice, optimalizace vzdálenosti mezi pražci, odpružené kolejnicové podpory. Hlukové absorpční prvky aplikované přímo na železničním svršku jsou vhodné zejména v případech, že vyšší úroveň hluku způsobuje traťová infrastruktura. Může to být např. hluk z viaduktů či skřípění v zatáčkách malého poloměru. To platí zejména v lokalitách, kde je okolní prostředí na zvýšenou hlukovou zátěž obzvláště citlivé, např. poblíž přírodních krás či v městských aglomeracích, kde se obytné budovy nacházejí v těsné blízkosti železniční trati. Zejména v městských aglomeracích se někdy používají speciální panely vkládané mezi kolejnice a po stranách kolejiště. Tyto zvukově pohltivé panely významně omezují šíření hluku zejména z kolejnic. Příklad takových panelů od slovenské firmy Stered je na Obr. 32.



Obr. 32: Absorpční panely přímo v prostoru kolejiště (zdroj: stered.sk).

K technickému provedení trati je nutno ještě doplnit, že dramatickou změnu v celkových akustických emisích působí stykovaná kolej, tj. taková, u níž je napojení dvou navazujících kolejnic provedeno šroubovým spojem. Zde přejezdem přes styky vznikají významné akustické špičky, tzv. „kročejový hluk“. U bezstykové koleje, kde jsou navazující kolejnice svařeny, tento hlukový příspěvek odpadá.

5.1.3 Další aktivní opatření

V rámci železniční dopravy mezi opatření aktivní patří také opatření urbanistická, architektonická či opatření dopravně-organizační. Konkrétně jde např. o organizaci železniční dopravy tak, aby se v kritickém úseku pohybovala vozidla méně hlučná, nebo přesunutím určitých dopravních úkonů (např. posun a sestavování souprav nebo výměna hnacího vozidla) na jinou denní dobu nebo do jiné lokace. Vzhledem k významné závislosti celkových emisí hluku na rychlosti pohybu soupravy lze snížení hluku docílit také omezením rychlosti v daném úseku. Tato opatření však značně komplikují plánování provozu a omezují již tak z principu omezenou pružnost železniční dopravy. Snížení rychlosti současně s nižším hlukem také bohužel snižují konkurenceschopnost železniční dopravy ve vztahu k dopravě silniční. K dalším aktivním protihlukovým opatřením mohou patřit opatření technická, jako kvalitní údržba stávajících vozidel či optimalizace tvaru vozidel s cílem eliminovat především aerodynamickou složku hluku.

5.2 Opatření pasivní

Nejvýznamnější a nejčastěji využívanou pasivní metodou k omezení emisí hluku ze železniční dopravy jsou protihlukové bariéry. Jedná se v principu o pozemní stavby umístěné mezi zdrojem a místem emisní zátěže, tedy především o protihlukové clony. Sem se řadí protihlukové stěny a také zemní valy. Paradoxně jsou tato opatření nejvíce politicky a finančně podporována. Je tomu tak zřejmě proto, že tato opatření jsou nejvíce viditelná a kromě zabránění šíření hluku mají i psychologický efekt. Mezi tato pasivní protihluková opatření kromě zmíněného také stavební opatření přímo na budovách zatížených hlukem, například protihluková okna vyšší třídy či zvukově izolační fasády. Podstatnou nevýhodou celé této skupiny opatření je, že svůj účinek mají pouze lokálně. Je-li třeba snížit hlukové imise na delších úsecích železniční sítě, je třeba vynaložit značně vysoké finanční prostředky.

5.2.1 Omezení šíření hluku

Pro omezení šíření hluku se používají především protihlukové stěny. Ty se začaly budovat podél tratí zejména v první polovině 90. let s rozsáhlou modernizací železničních tratí. Nárůst byl pak zaznamenán zejména od roku 2005, kdy bylo přijato nařízení vlády č. 148/2006 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, kterým byly stanoveny nejvyšší přípustné hygienické limity hluku v chráněném vnitřním prostoru staveb, chráněném venkovním prostoru staveb a chráněném venkovním prostoru. Zpočátku měly

protihlukové stěny podobu samonosných monolitů s hladkým jednolitým povrchem. Postupně začaly být na tyto bariéry kladeny také estetické požadavky a důraz byl kladen také na akustické vlastnosti. Z pohledu akustiky lze protihlukové stěny rozdělit do dvou skupin, a sice na stěny zvuk pohlcující a stěny odrazivé. Zvláštní skupinu pak tvoří stěny reaktivní, obsahují dutiny nebo rezonátory. Zatímco stěny pohltivé a reaktivní mají charakter masivní, stěny odrazivé mají lehčí konstrukci a často bývají transparentní. Při realizaci je kladen důraz na celou řadu parametrů, mezi něž patří výška stěny, plošná hmotnost (min. 10 kg/m²), z pohledu od zdroje hluku musí stěna tvořit uzavřenou plochu (jednotlivé segmenty mohou být případně v zákrytu) nebo na architektonické řešení stěny. Mezi nejužívanější materiály, které do značné míry udávají akustické vlastnosti bariéry, patří zejména beton, dřevo, cihly, kov, akrylátové sklo a v poslední době také recykláty. Útlum, který nabízejí protihlukové stěny, se v závislosti na jejich výšce pohybuje v širokém rozmezí 5-15 dB⁹⁰. Kromě lokální působnosti a vysokých investičních nákladů s sebou nesou další negativa, mezi něž lze zařadit obtížnější údržbu tratí, ztížení zásahu složek integrovaného záchranného systému, do značné míry utvářejí okolí tratí a snižují tak komfort cestujících stejně jako rezidentů v okolí tratí. Nutno dodat, že protihlukové stěny jako pasivní opatření pochopitelně přímo nesouvisejí pouze s nákladní železniční dopravou, ale týkají se svým lokálním charakterem veškeré kolejové dopravy v místě opatření.

⁹⁰ NEUBERGOVÁ, K., KOČÁRKOVÁ, D. Snížení hluku z žel. d. jako jedna z cest k udržitelné dopravě.

Závěr

Na základě teoretických předpokladů uvedených v první části práce bylo měřením prostřednictvím akustické kamery experimentálně ověřeno, jaké jsou výhody akustické kamery při lokalizaci zdrojů hluku obecného hluku, kde je zdrojů ve spektru signálu více a tyto zdroje jsou prostorově rozprostřeny. Použití akustické kamery bylo demonstrováno v laboratoři na jednoduchém příkladu a také ověřeno přímo měřením na reálné aplikaci, konkrétně tedy na měření hluku železničního vozidla na zkušebním okruhu Cerhenice ve Zkušebním centru Velim. Na množině naměřených hodnot byla dále provedena podrobná analýza, pomocí které bylo prakticky ověřeno, jak lze akustickou kameru pro lokalizaci zdrojů hluku prakticky využít.

Jako protihluková opatření vhodná pro použití speciálně na nákladních vozech lze naprosto jednoznačně označit v první řadě rekonstrukci brzdového systému. Jako ekonomicky méně náročná varianta v rámci úpravy stávajících vozů může být zvoleno použití brzdových špalíků typu „LL“, které lze přímo použít na nákladních vozech vyrobených před rokem 1983 bez úpravy brzdové výstroje. Experimentálně získané výsledky vykazují kromě zlepšení brzdových vlastností také snížení akustických emisí a zvýšení životnosti použitých špalíků i dvojkolí. Za poněkud náročnější řešení lze zvolit použití špalíků typu „K“ s úpravami brzdového systému. V případě pořizování nových vozů (podvozků) lze jednoznačně doporučit brzdy kotoučové. Další doplňkové opatření vhodné pro nákladní vozy jsou hlukové absorbery umístěné na kolech. Vzhledem k hmotnostní zátěži nákladních vozů nelze plošně doporučit kola akusticky ošetřená gumovým mezikruží, vždy by záleželo na konkrétním provedení vozu a jeho požadované nosnosti. Samozřejmou součástí opatření by měla být důsledná údržba vozů s důrazem na kontrolu osové symetrie kola a kontrola drsnosti povrchu kola.

Která metoda omezení hlukových emisí železniční dopravy je ze všech nabízených nejvíce efektivní a účinná lze jen těžko říci. Vždy záleží na konkrétní aplikaci a na faktorech s ní relevantních. Dle teoretických poznatků ověřených praktickým měřením se jako nejlepší jeví vždy kombinace několika faktorů současně. Nejlépe obecně účinkují opatření přímo na podvozcích vozidla v kombinaci s protihlukovým opatřením na železničním svršku. Příkladem může být použití výhradně kompozitních klínů typu LL u zdržových brzd starších vozidel a použití kotoučových brzd u nových podvozků, a k tomu současné použití hlukových

absorberů montovaných přímo na kolejnicích minimálně v místech s vyššími nároky na hlukové imise.

Obecně lze jednoznačně říci, že je vždy výhodnější minimalizovat vznik hluku přímo u jeho zdroje, než přijímat pouze opatření omezující jeho šíření, protože tento způsob se uplatní po celé trase pohybu soupravy. Za nejméně efektivní se z mnoha hledisek jeví použití pouze hlukových zábran. V tomto případě je nekompensovaný hluk, vznikající pohybem vozidla na trati, produkován po celé délce trajektorie, pouze je lokálně omezeno (usměrněno) jeho šíření. Jak již bylo řečeno je tento způsob značně nákladný na delších úsecích trati (obchvaty rozlehlých městských aglomerací apod.), ale tam, kde protihlukové zábrany chybějí, je hluk nekontrolovaně a nekompensovaně emitován do okolního prostředí. Dalším faktorem, který hovoří proti primárnímu použití protihlukových ohrazení a zábran je hledisko estetické. Zábrany jsou viditelným prvkem architektury, který má výrazný vliv na estetický ráz krajiny a životního prostředí, a to jak z vnějšího pohledu, tak v případě osobní dopravy při pohledu z okna vlaku. Protihlukové zábrany různých výšek by měly být z principu použity pouze jako doplněk v případech, kdy všechna ostatní opatření s menším estetickým dopadem a obecně vyšší účinností pro snížení imisí hluku v daném místě nedostačují.

Seznam literatury a informačních zdrojů

BAY, Mingsian R., IH, Jeong-Guon, BENESTY, Jacob. Acoustic Array Systems: Theory, Implementation, and Application. Wiley-Blackwell, 2014, 536 stran. ISBN 978-0-470-82723-9.

ČSN 01 1600 (011600) Akustika – Terminologie.

ČSN-EN-ISO-3382-3-Akustika-Měření-parametrů-prostorové-akustiky-Část-3: Otevřené-kanceláře.

ČSN EN ISO 3095. Železniční aplikace – Akustika - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly. ÚNMZ, 2014.

ČSN IEC 50 Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 801: Akustika a elektroakustika.

DAVENPORT, Wilbur R., Jr., ROOT, William L. An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise. John Willey & Sons, Inc., 1987, 391 stran. ISBN 0-87942-235-1.

EVEREST, Alton F., POHLMANN, Ken C. Master Handbook of Acoustics. McGraw-Hill Education, 2015, 640 stran. ISBN 978-0071841047.

HLAVÁČEK, Jan, KONEČNÝ Jiří, SEDLÁČEK, Radek. Postup implementace „TSI – hluk“ v České republice, současný stav, možnosti řešení, stanovisko dopravce. Vědeckotechnický sborník Českých drah [PDF]. roč. 2007, č. 23, 19 stran. ISSN 1214-9047.

HLAVÁČEK, Jan. Technické specifikace pro interoperabilitu subsystému „Hluk“. Vědeckotechnický sborník Českých drah [PDF]. roč. 2004, č. 18, 18 stran. ISSN 1214-9047.

HLAVÁČEK, Jan. Zpráva z mezinárodního jednání Expertní skupiny UIC/CER pro hluk a vibrace, „Network noise“ v Paříži. Praha, 2009.

KOCH, Bernhard. Emise hluku a jeho snižování v železniční dopravě[online]. Odis, Edice 2008, 1, [cit. 20. 3. 2017]. Dostupný z WWW: <http://edice.cd.cz/edice/zivpro/dzp4_08/emise.pdf>.

KOLMER, Felix, KYNCL, Jaroslav. Prostorová akustika. SNTL, 1980, stran. ISBN 04-514-80.

Nariadení komise (EU) č. 1304/2014 ze dne 26. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla – hluk“. Úřední věstník Evropské unie, 2014.

NELSON, James. Wheel/Rail Notes Kontrol Manual: Transit Kooperative Research Program Report 23. Washington: National Academy Press, 1997, stran. ISBN 0-309-06060-5.

NEUBERGOVÁ, Kristýna. Problematika hluku ze železniční dopravy. Stavebnictví, roč. 2011, č. 10, strana 33–36. ISSN 1802-2030.

NEUBERGOVÁ, Kristýna, KOČÁRKOVÁ Dagmar. Snížení hluku z železniční dopravy jako jedna z cest k udržitelné dopravě. Vědeckotechnický sborník ČD, ROČ. 2011, č. 32. ISSN 1214-9047.

NEUBERGOVÁ, Kristýna, TÝFA, Lukáš, VAŠICA, David, LÁDYŠ, Libor. Vliv různých konstrukcí železničního svršku na hluk ze železniční dopravy. Nové železniční trendy – doprava – telematika. 2013, roč. 21, č. 1, strana 4-8. ISSN 1210-3942.

NORDBORG, Anders. Vertical Rail Vibrations: Parametric Excitation. *Acustica united with Acta Acustica*, roč. 84, 1998, strana 289–300. ISSN 1610-1928.

NORDBORG, Anders. Vertical Rail Vibrations: Pointforce Excitation. *Acustica united with Acta Acustica*, roč. 84, 1998, strana 280–288. ISSN 1610-1928.

NORDBORG, Anders. Wheel/rail noise generation due to nonlinear effects and parametric excitation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, roč. 111, č. 4, 2002, ISSN 0001-4966.

SMETANA, Ctirad, et al. Hluk a vibrace: Měření a hodnocení. 1. Vydání. Praha 1: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.

SZWARC, Małgorzata, KOSTEK, Bożena, KOTUS, Józef, SZCZODRAK, Maciej, CZYZEWSKI, Andrzej. Problems of Railway Noise – A Case Study. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 2011, roč. 17, č. 3, strana 309–325. ISSN 1080-3548.

ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika. Academia, 2001, 527 stran. ISBN 80-200-0461-0.

THOMPSON, David. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Elsevier, 2008, 536 stran. ISBN 978-0-08-045147-3.

TRÁVNÍČEK, Bohumír. Možnosti řešení hlukové zátěže z pozice provozovatele dráhy v kontextu stávající právní úpravy. In *Železniční dopravní cesta 2010*, Pardubice : SŽDC Praha, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.szdc.cz/soubory/konference-a-seminare/zdc-2010/sbornik-zdc-2010.pdf>>. ISBN 978-80-254-6802-2.

VAVERKA, Jiří & kol. Stavební fyzika 1: urbanistická, stavební a prostorová akustika. Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 1998. 343 stran. ISBN 80-214-1283-6.

Výroční zpráva 2015. Správa železniční dopravní cesty, 25. 5. 2016, 79 stran.

Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví. In: Sbíрка zákonů. ISSN 1211-1244.

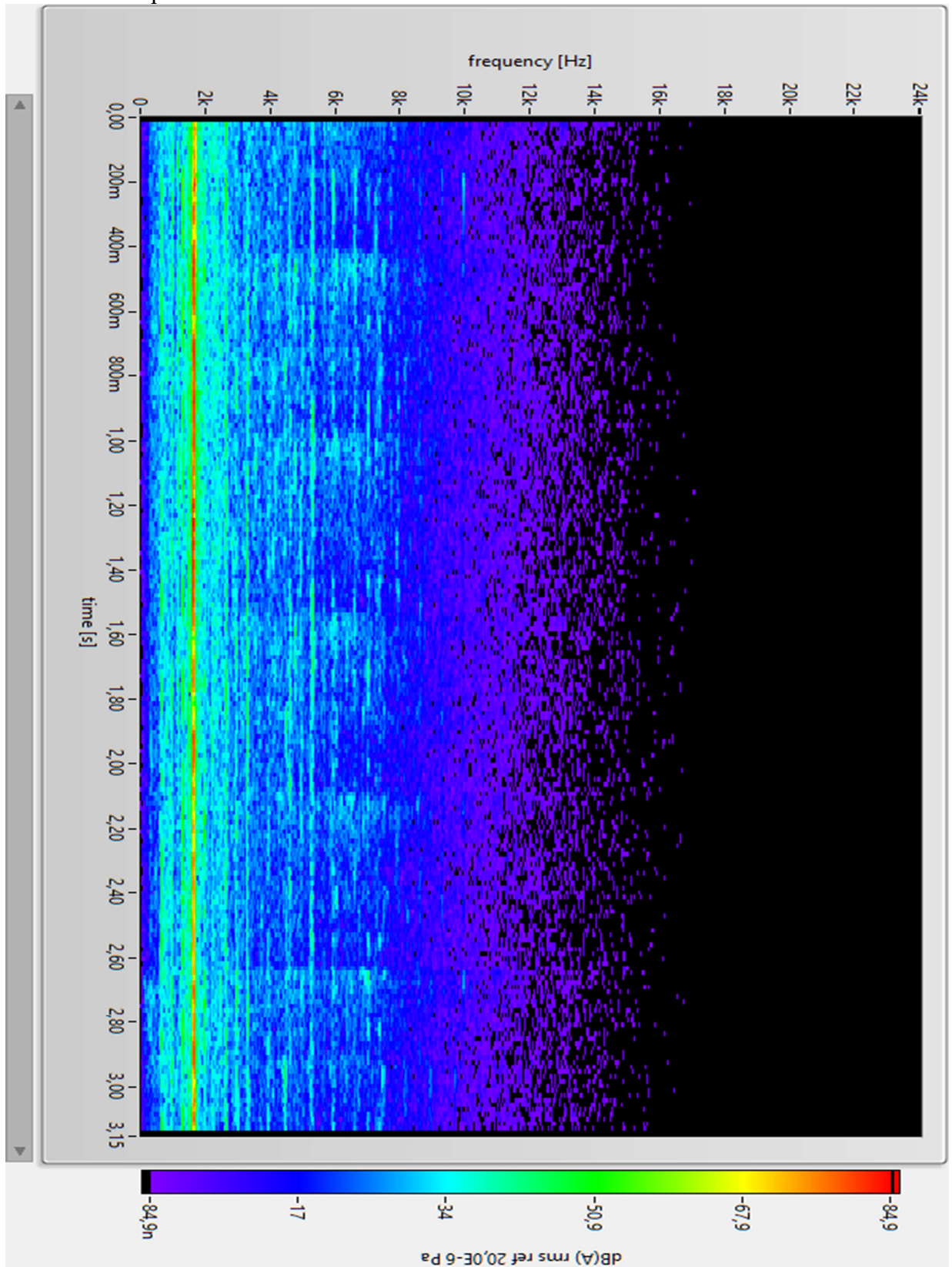
Zákon č. 267/2015 Sb., kterým se mění zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: Sbíрка zákonů. ISSN 1211-1244.

Příloha 1

Demonstrace měření zdrojů hluku akustickou kamerou v laboratoři.

Spektrogram – měření v laboratoři

Zvuk: hudba s písknutím

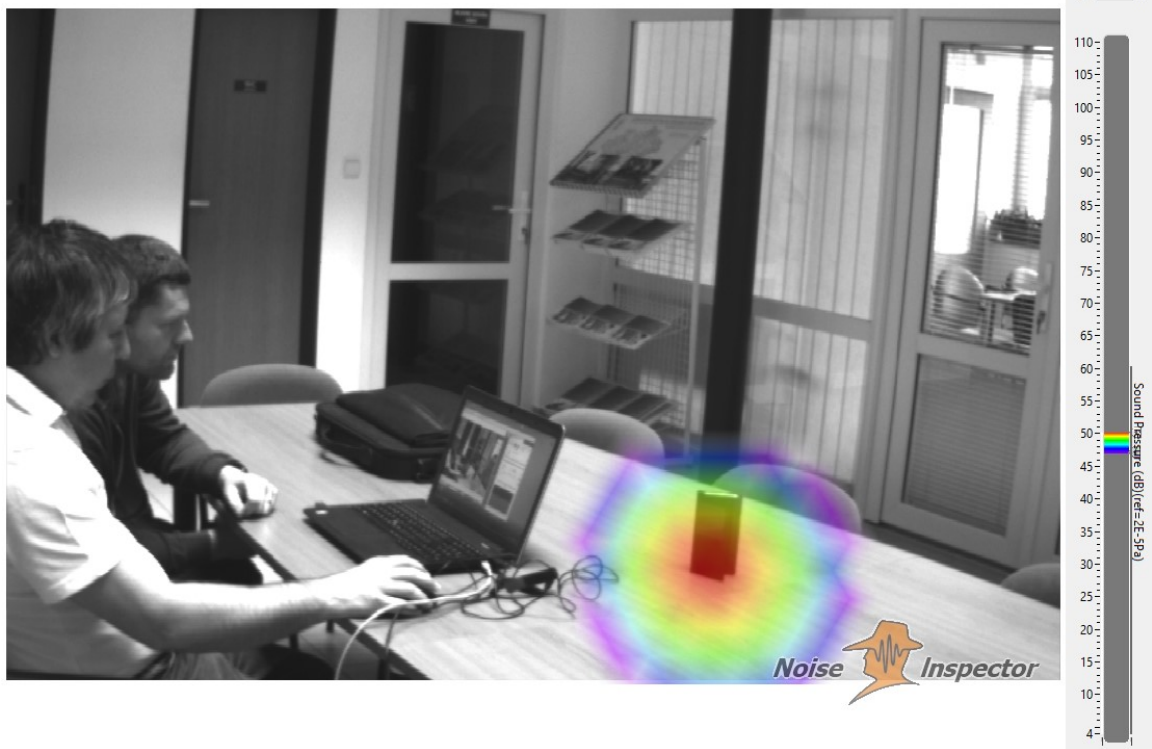
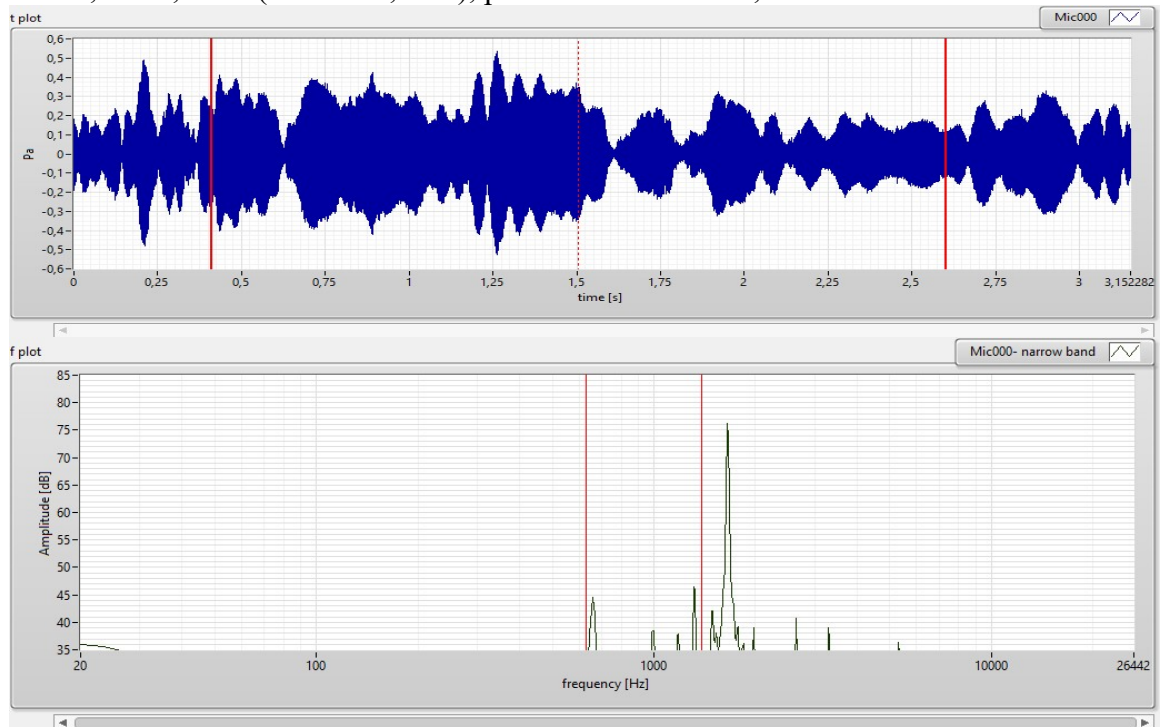


Příloha 2

Demonstrace měření zdrojů hluku akustickou kamerou v laboratoři.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – měření v laboratoři

Čas: 0,410-2,602 s (interval 2,192s), pásmo: 630-1385 Hz, vzdálenost 3 m.

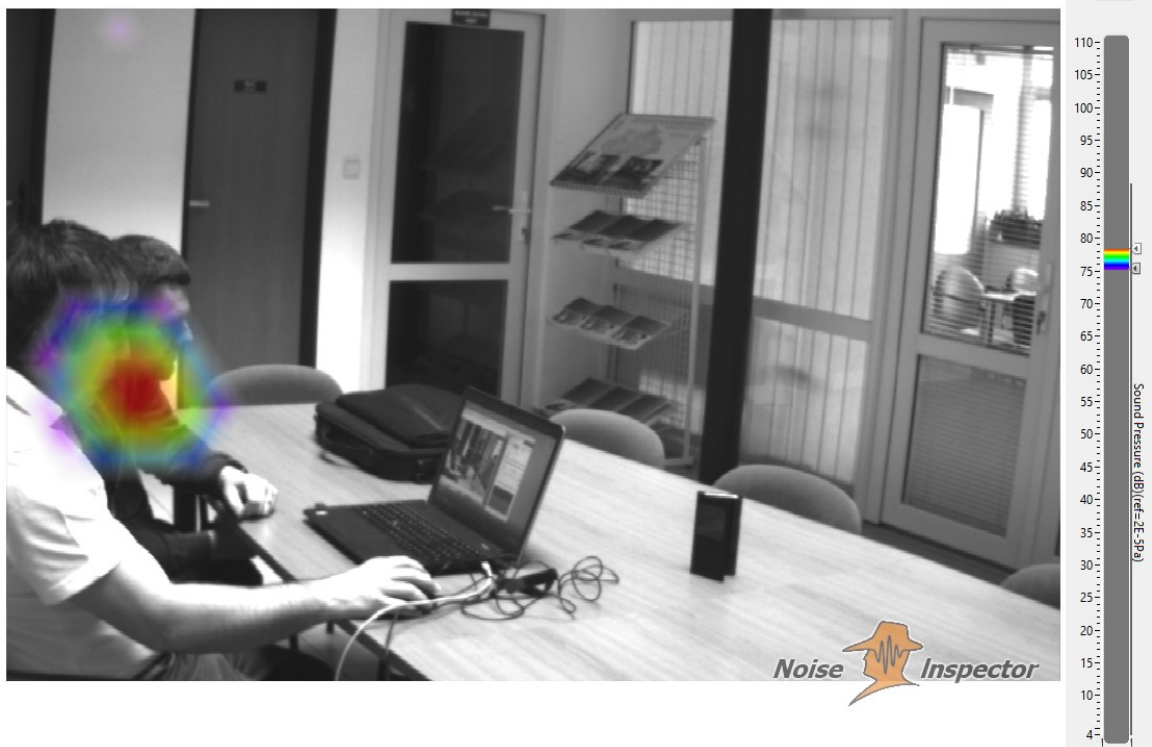
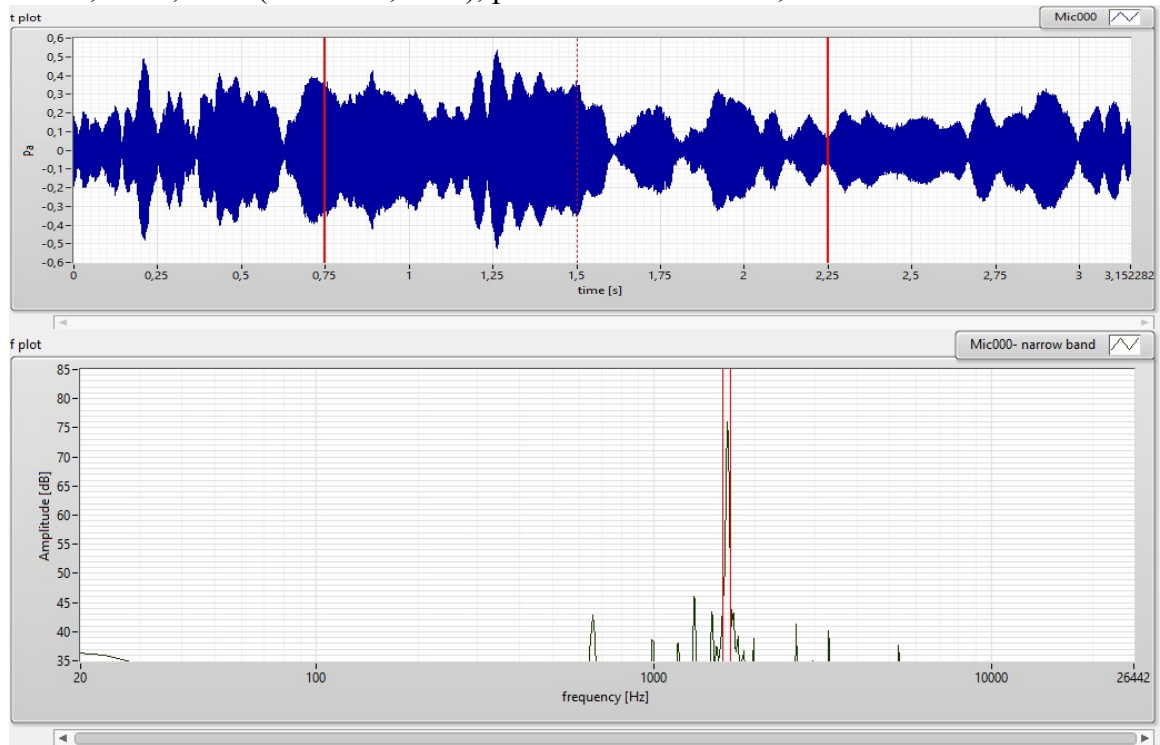


Příloha 3

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – měření v laboratoři

Čas: 0,749-2,251 s (interval 1,502 s), pásmo: 1600-1687 Hz, vzdálenost 3 m.

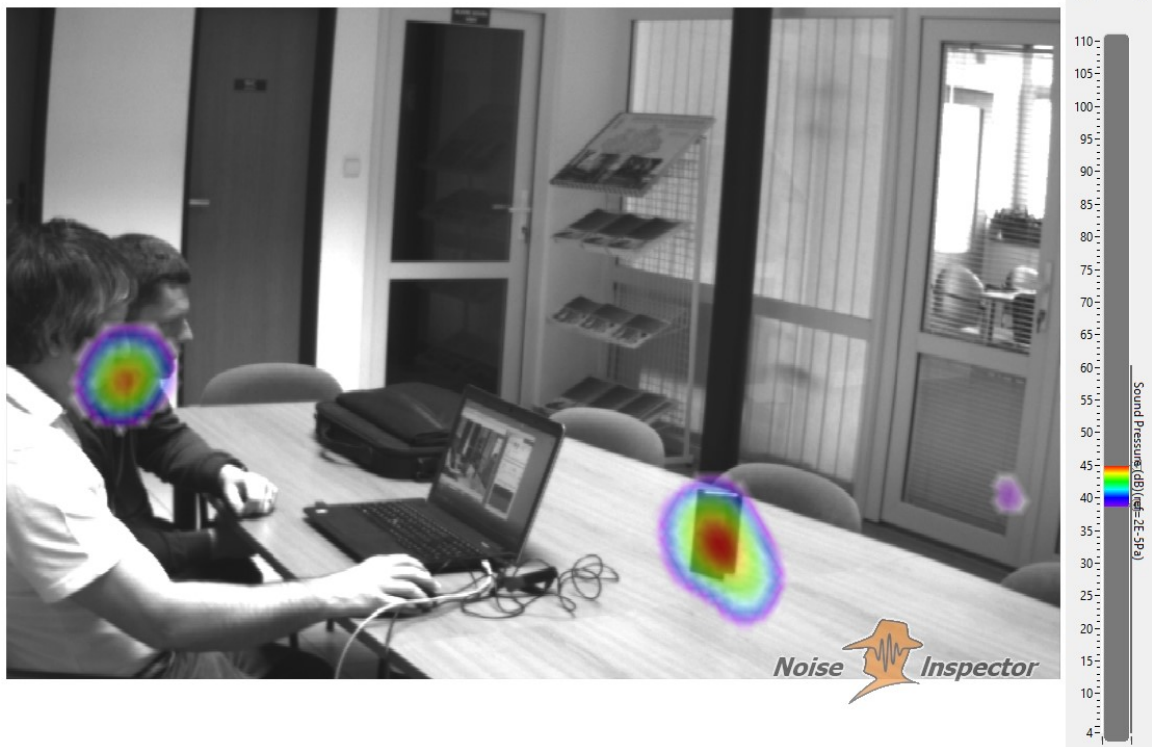
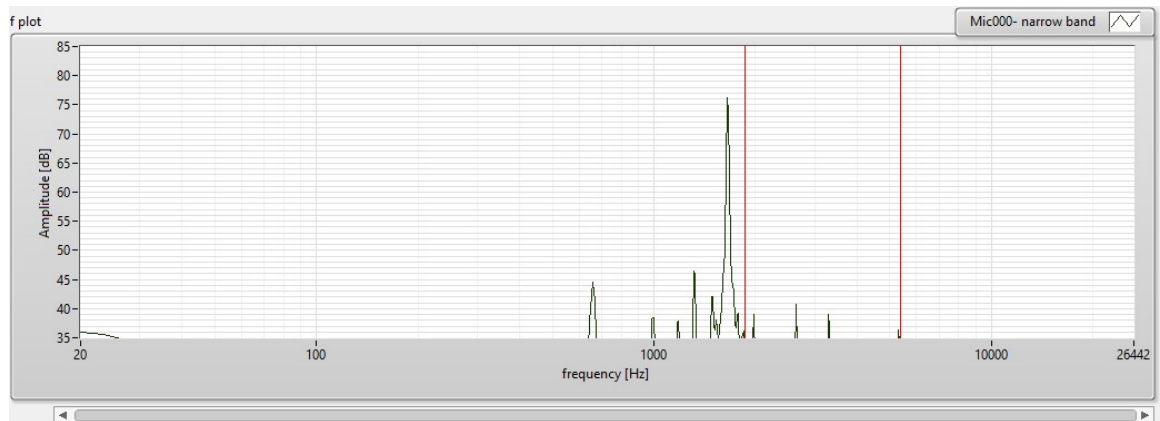
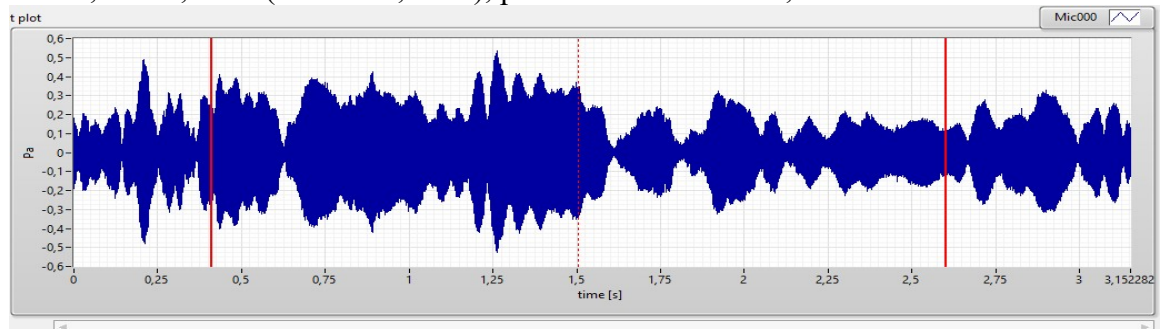


Příloha 4

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – měření v laboratoři

Čas: 0,410 -2,602 s (interval 2,192 s), pásmo: 1862-5381 Hz, vzdálenost 3 m.

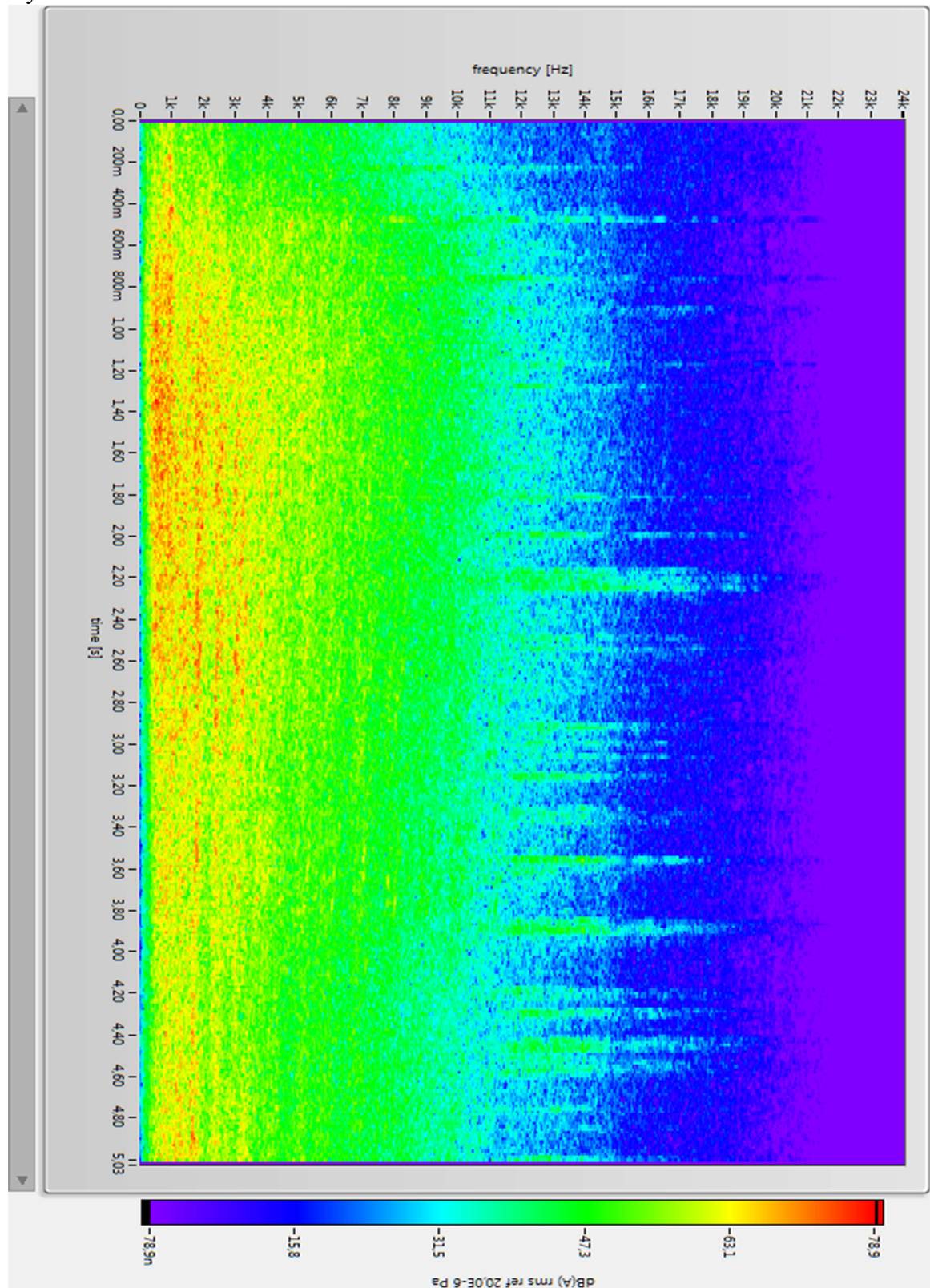


Příloha 5

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Spektrogram – měření 80-1

Rychlost: 80 km/h.

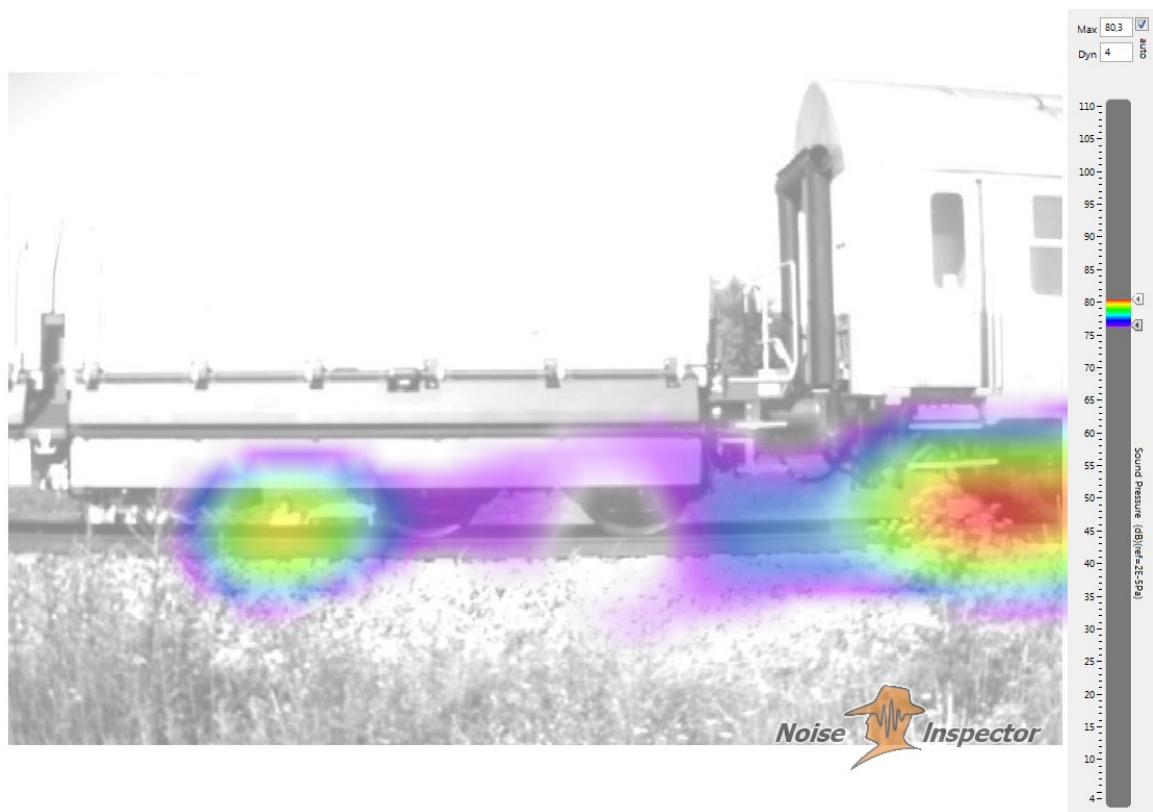
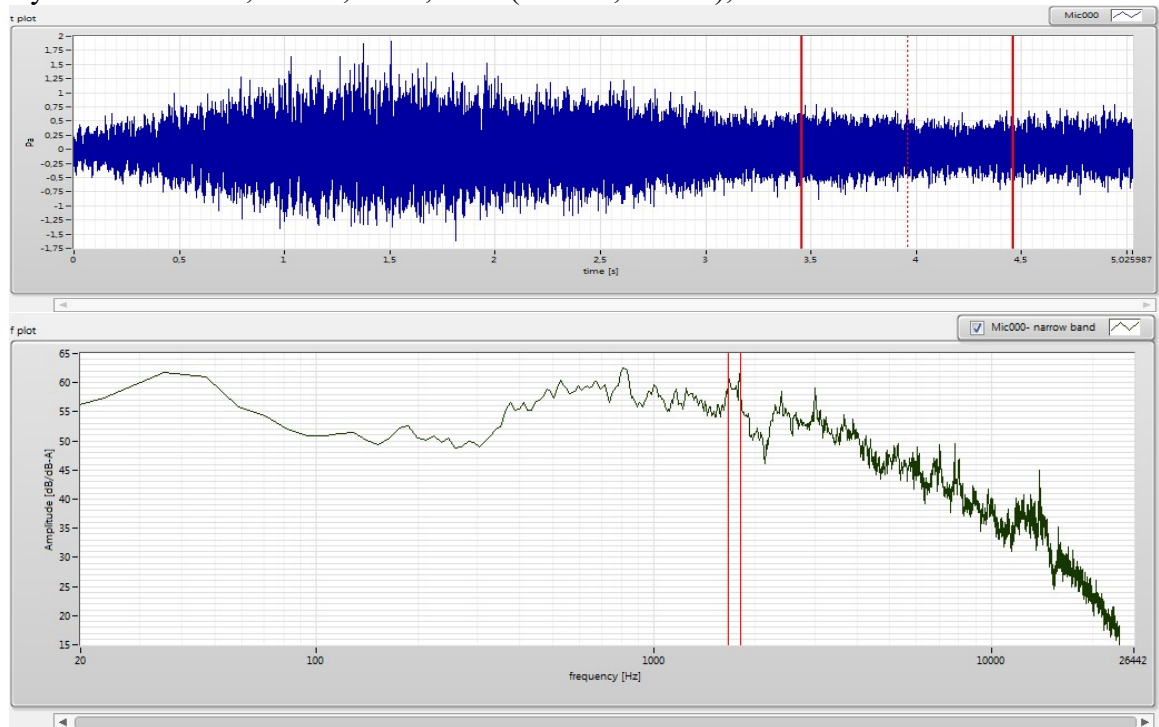


Příloha 6

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-1a

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,456-4,460 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1662 Hz -1806 Hz.

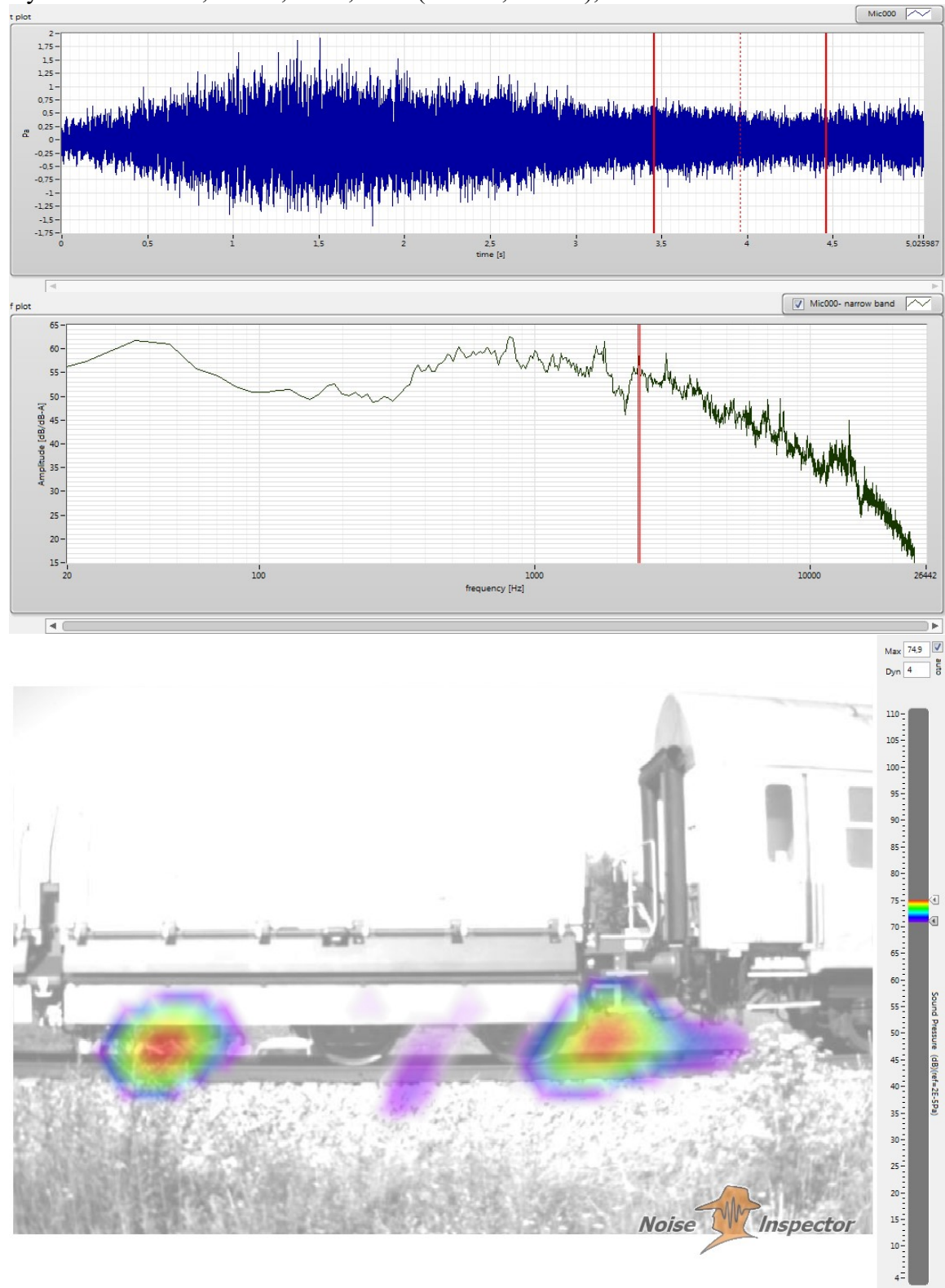


Příloha 7

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-1b

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,456-4,460 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 2373 Hz -2409 Hz.

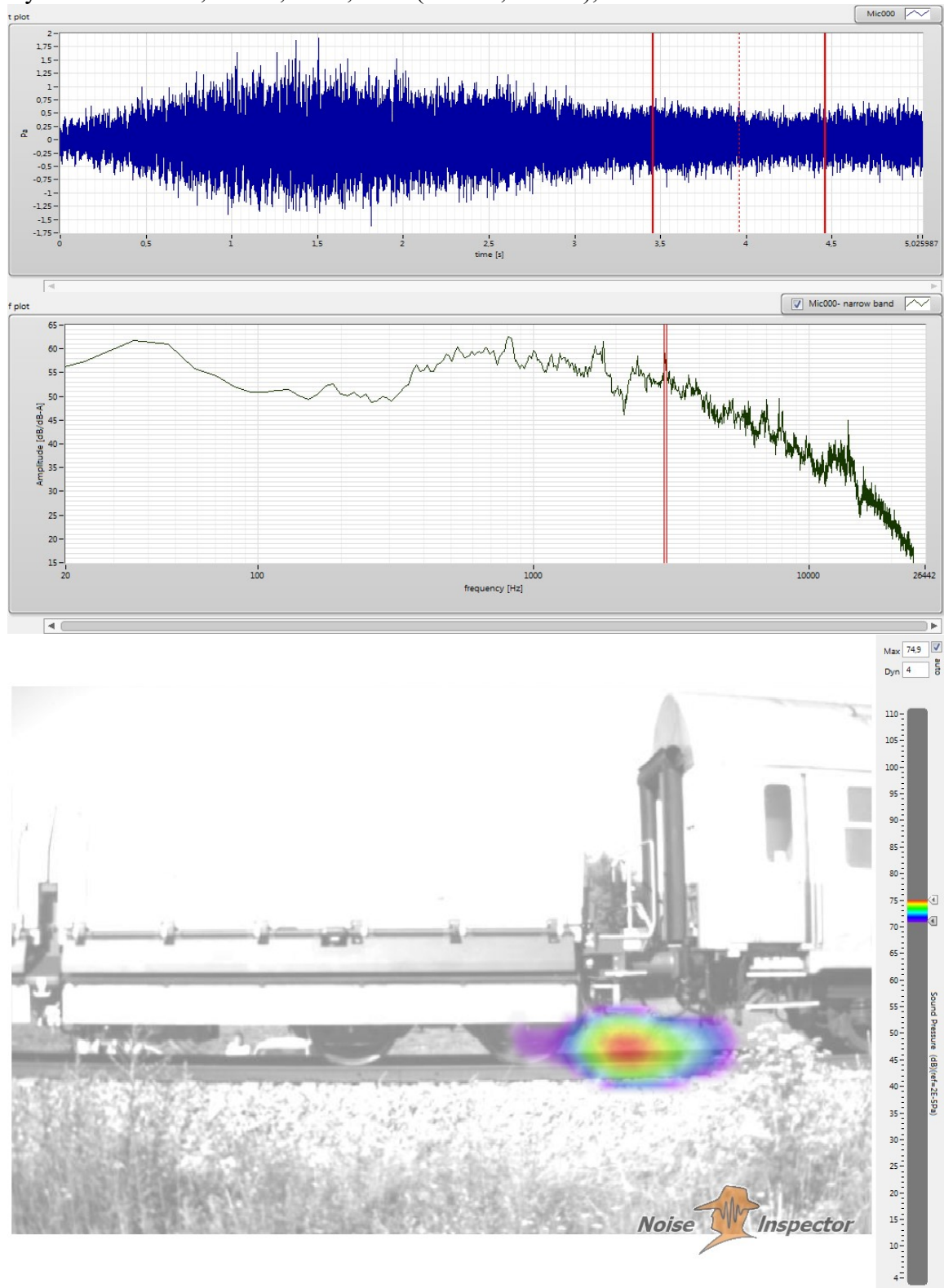


Příloha 8

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-1c

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,456-4,460 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 2979 Hz -3047 Hz.

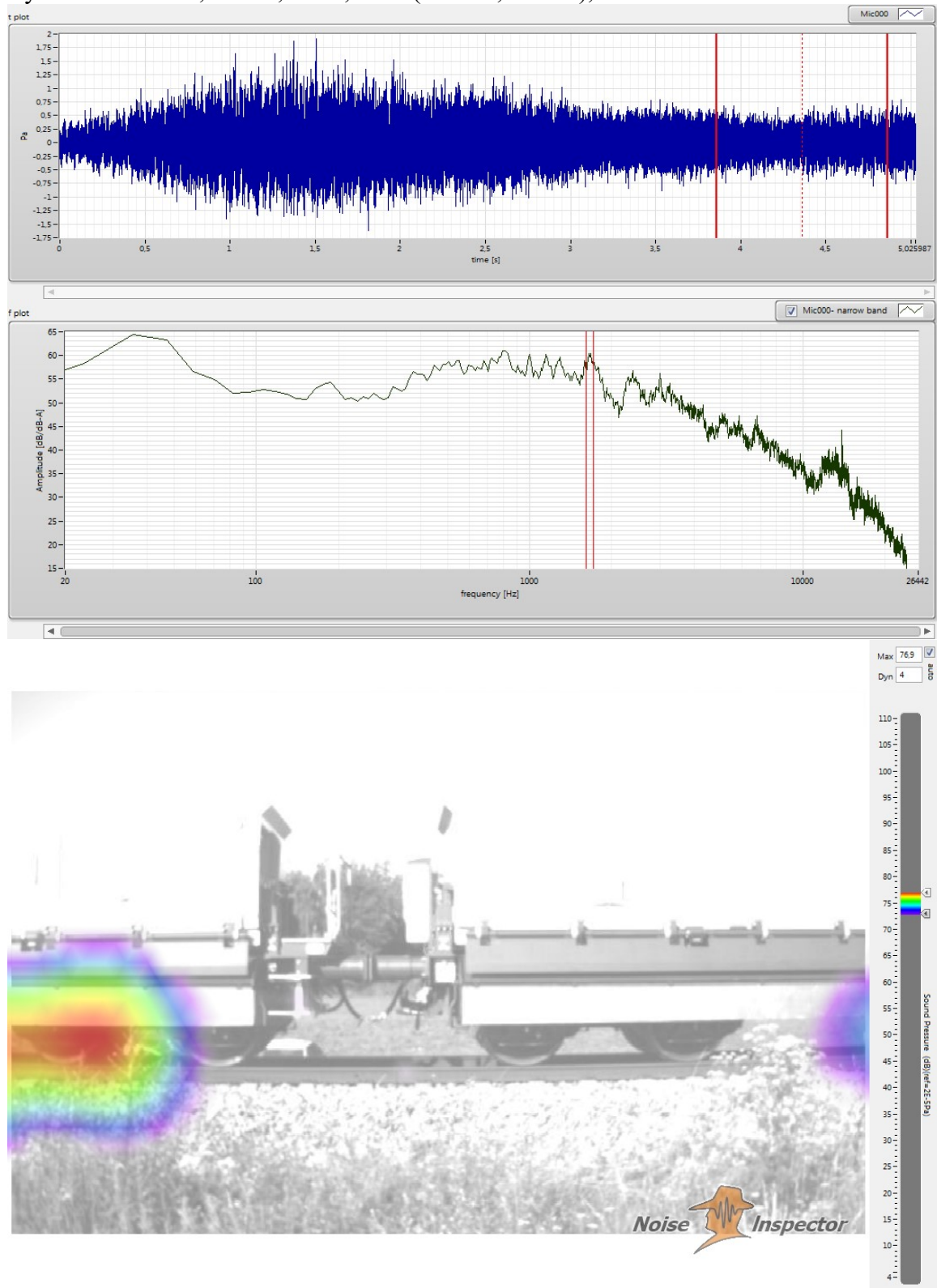


Příloha 9

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-1d

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,858-4,862 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1612 Hz -1713 Hz.

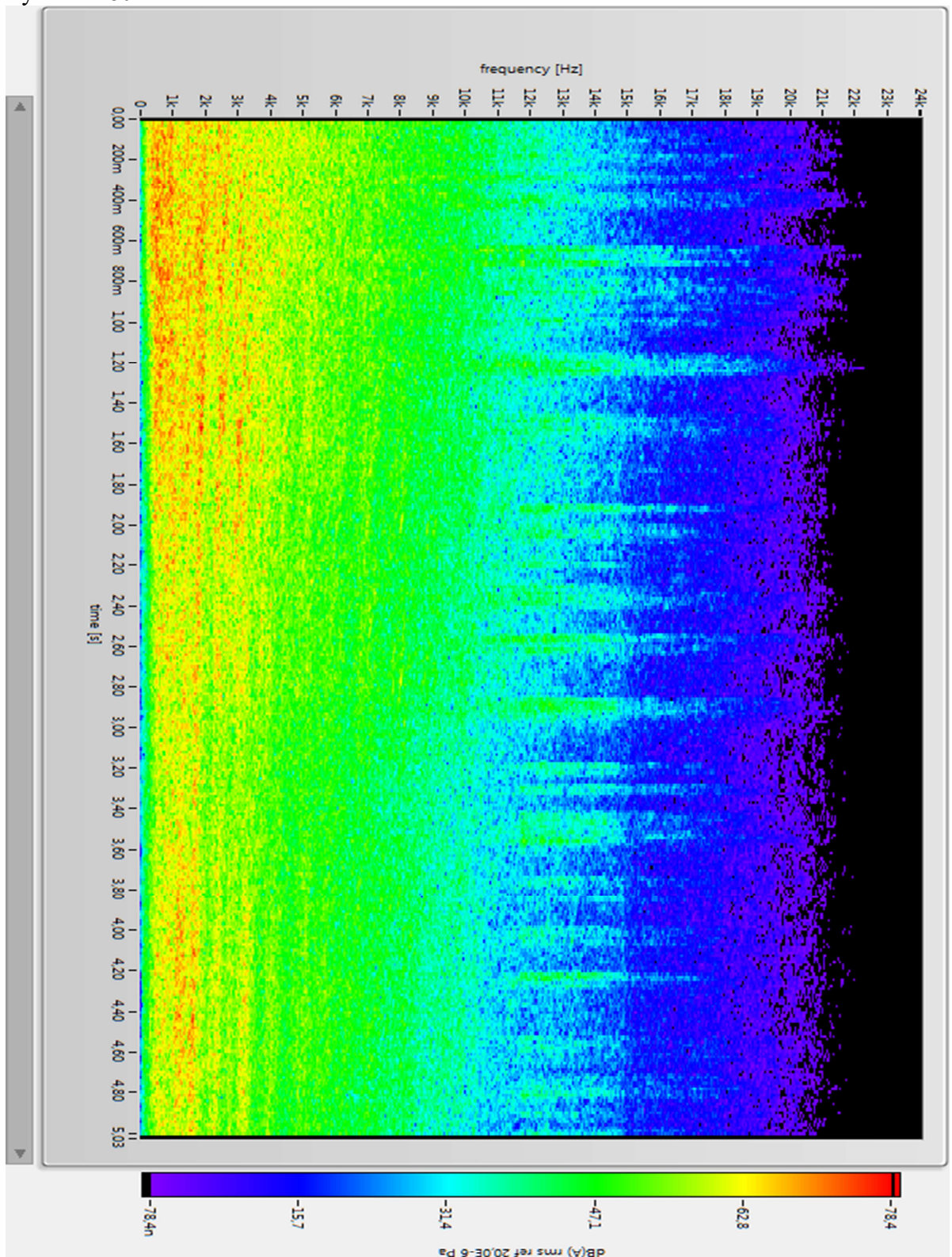


Příloha 10

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Spektrogram – měření 80-2

Rychlost: 80 km/h.

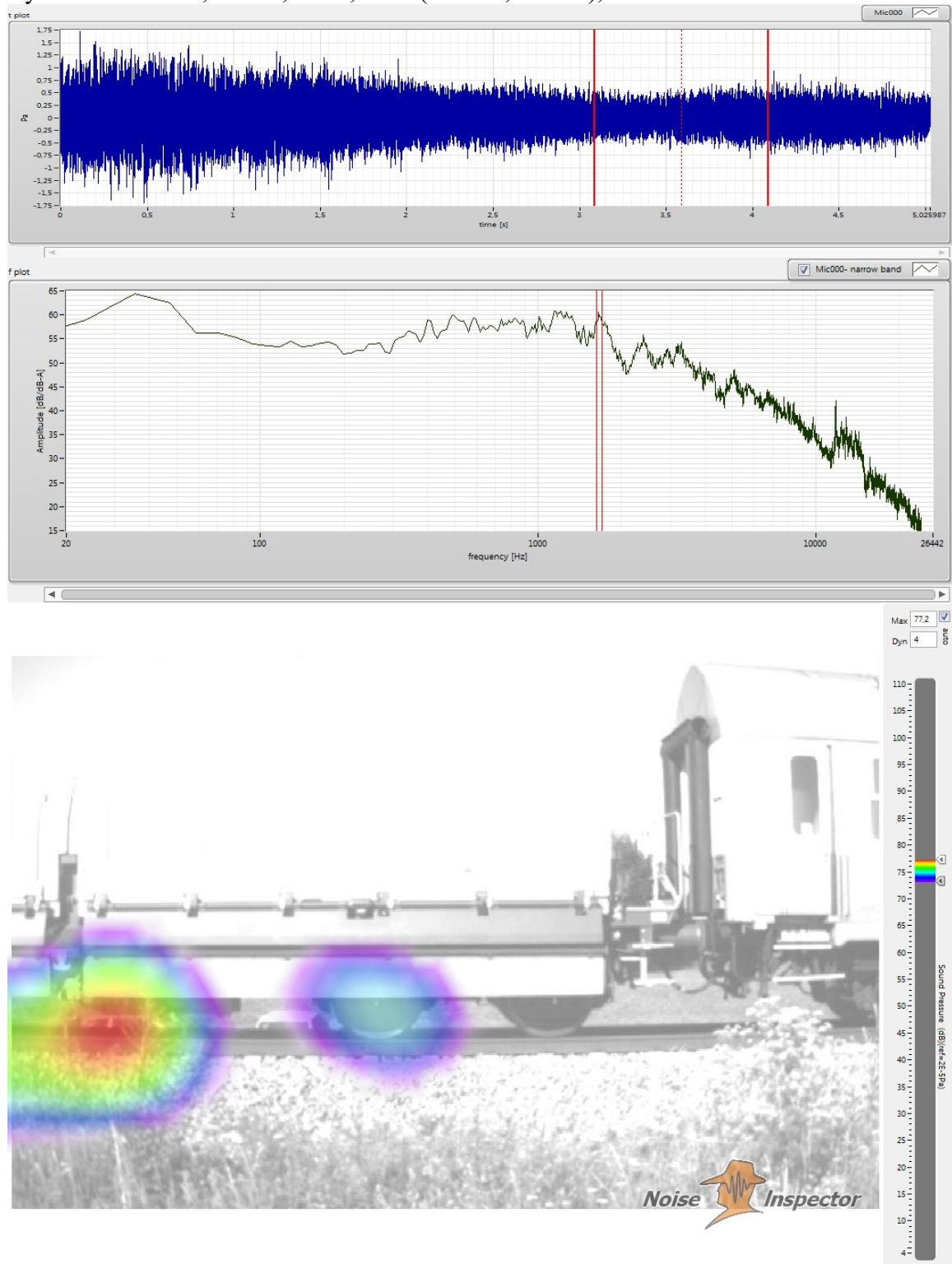


Příloha 11

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2a

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,086-4,091 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1624 Hz -1700 Hz.

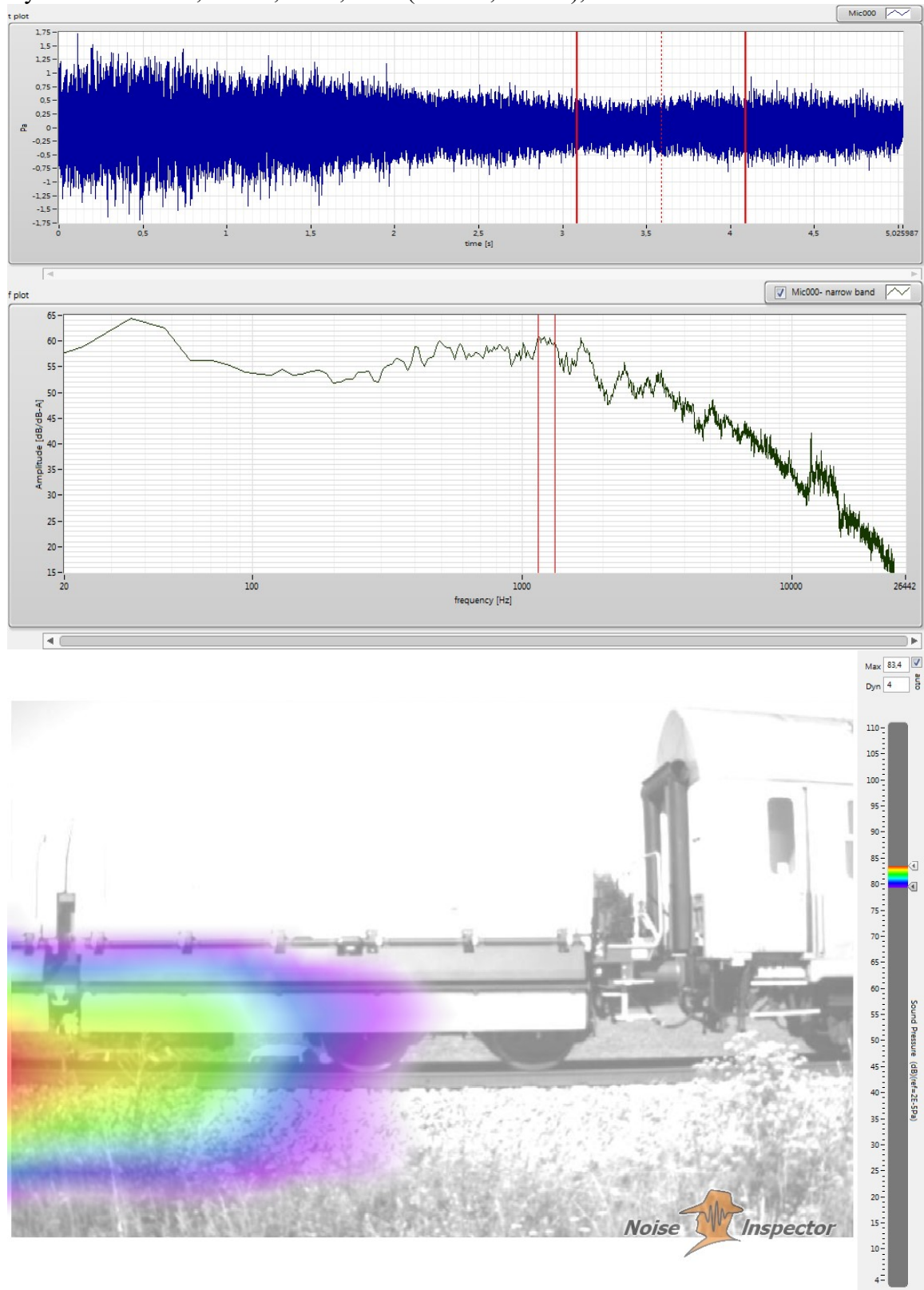


Příloha 12

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2b

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,086-4,091 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1146 Hz -1324 Hz.

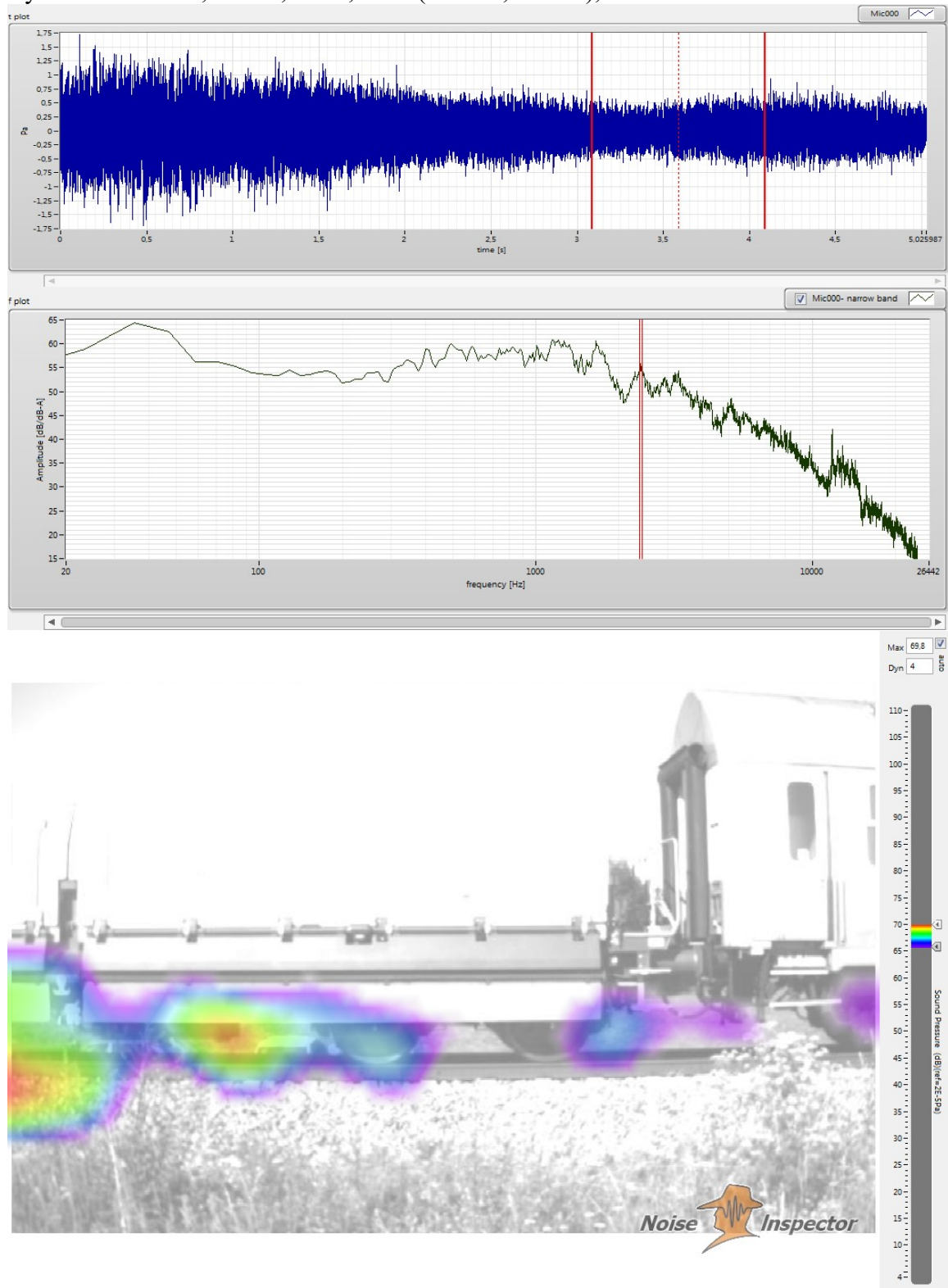


Příloha 13

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2c

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,086-4,091 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 2373 Hz -2428 Hz.

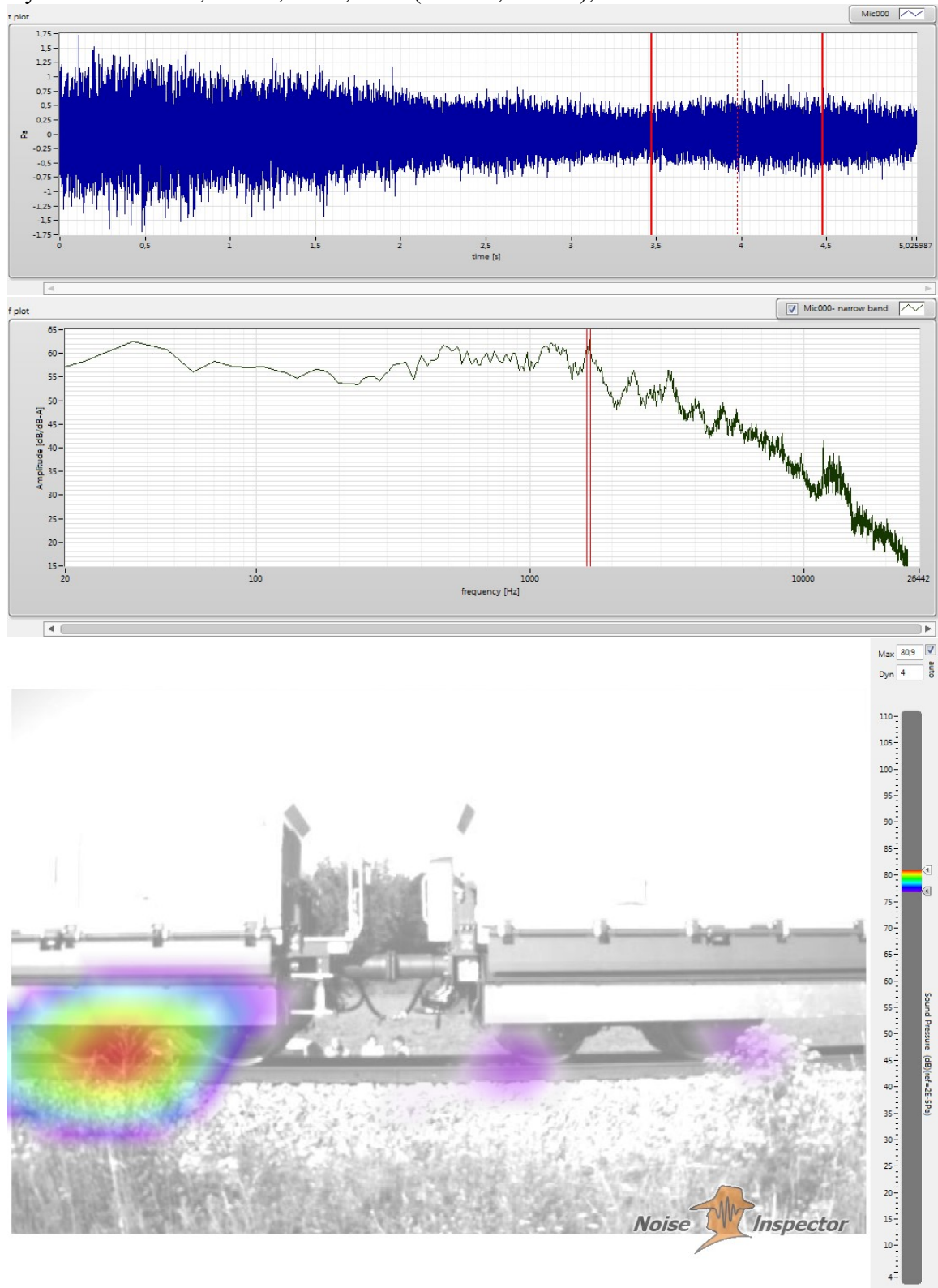


Příloha 14

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2d

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,472-4,476 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1612 Hz-1662 Hz.

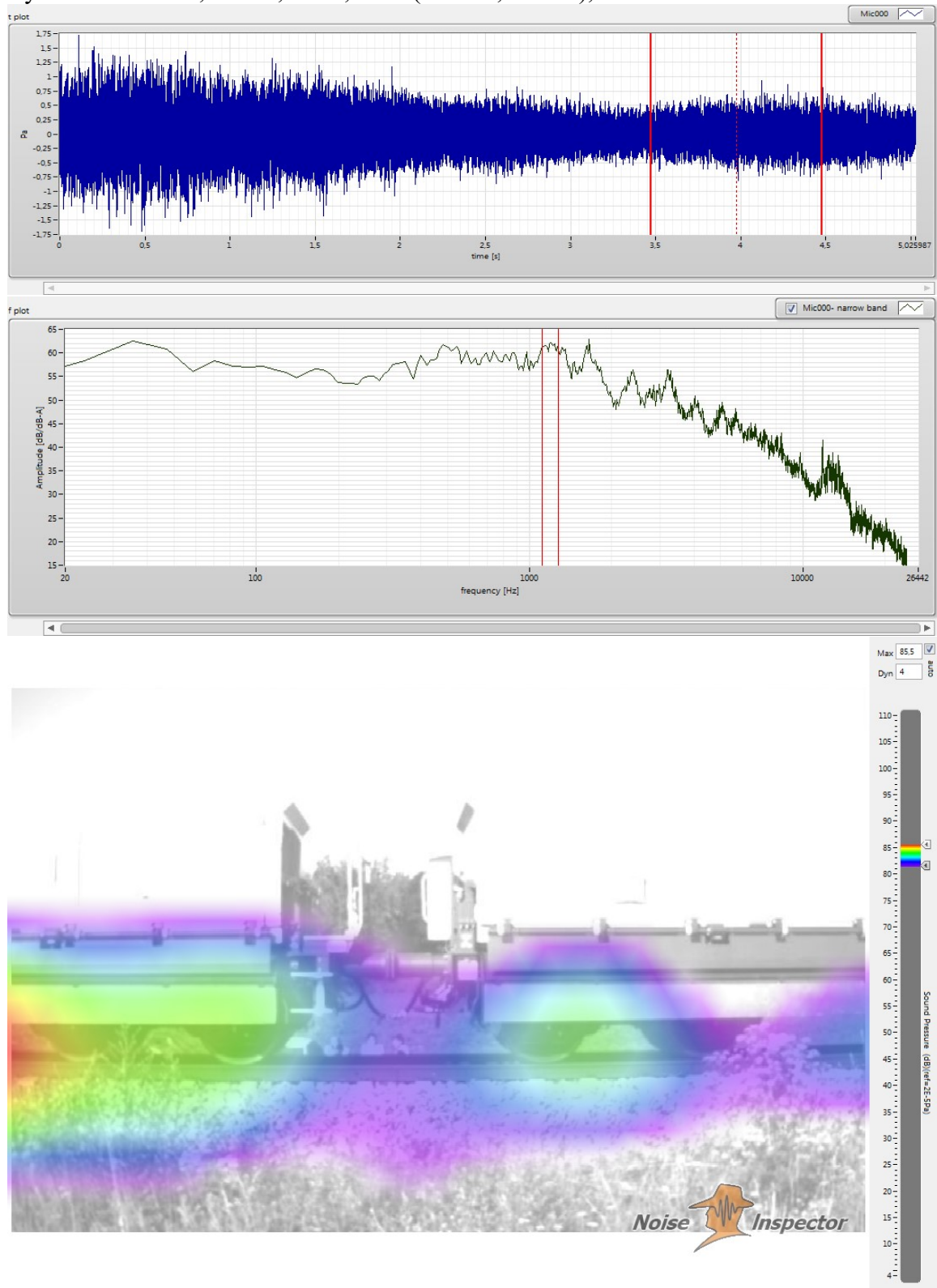


Příloha 15

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2e

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,472-4,476 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1112 Hz-1274 Hz.

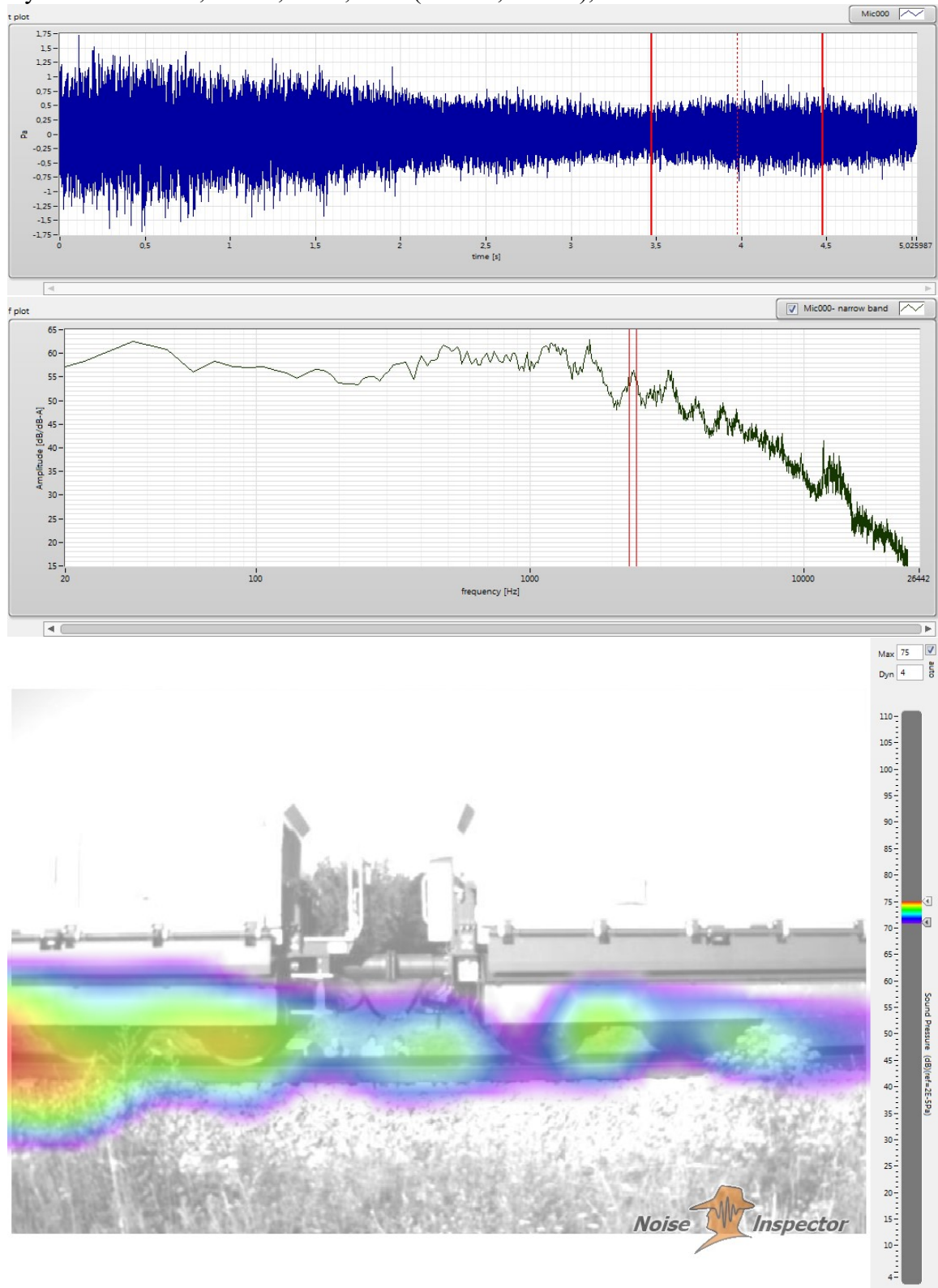


Příloha 16

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2f

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,472-4,476 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 2302 Hz-2446 Hz.

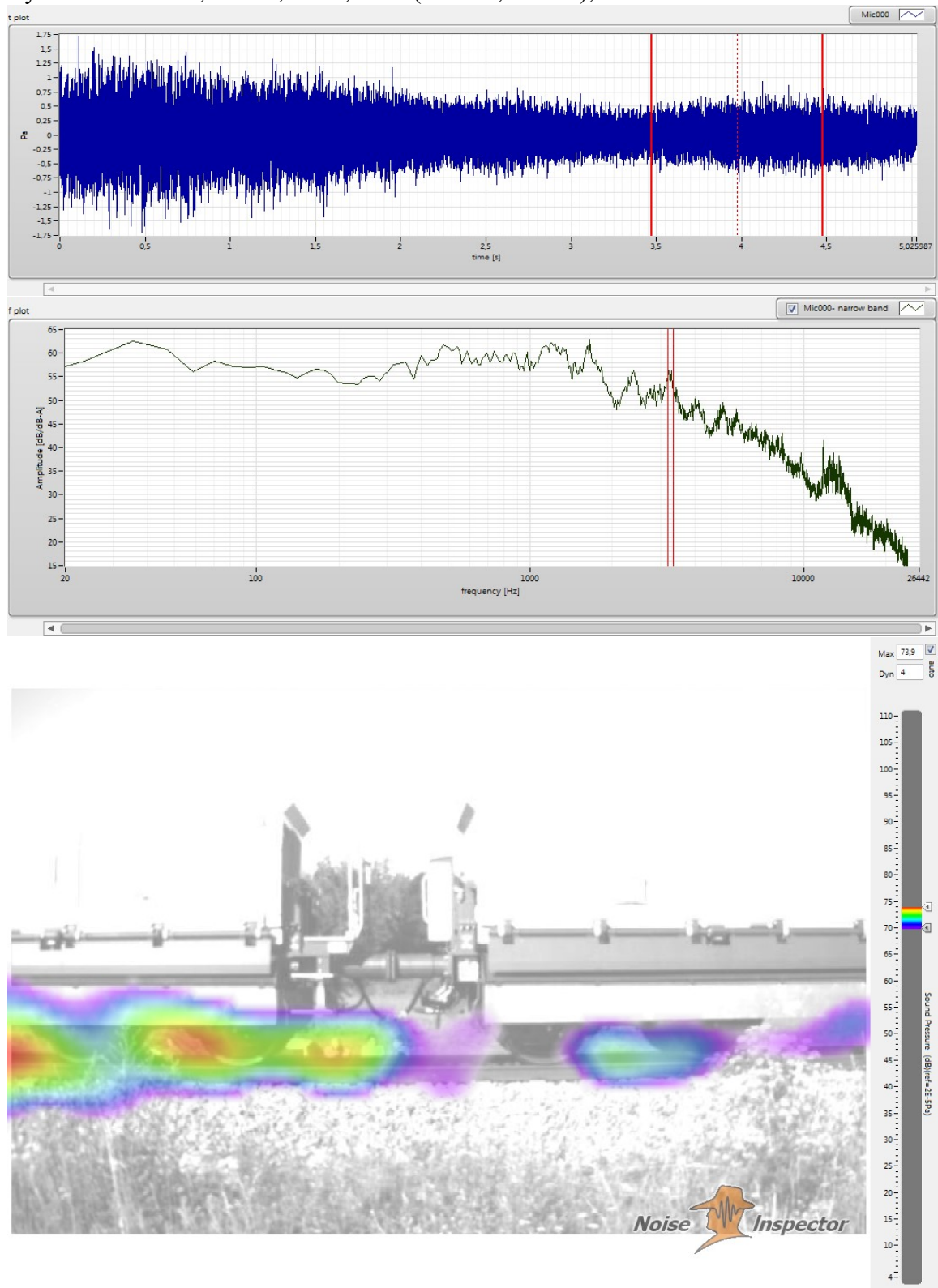


Příloha 17

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2g

Rychlost: 80 km/h, Čas: 3,472-4,476 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 3189 Hz-3338 Hz.

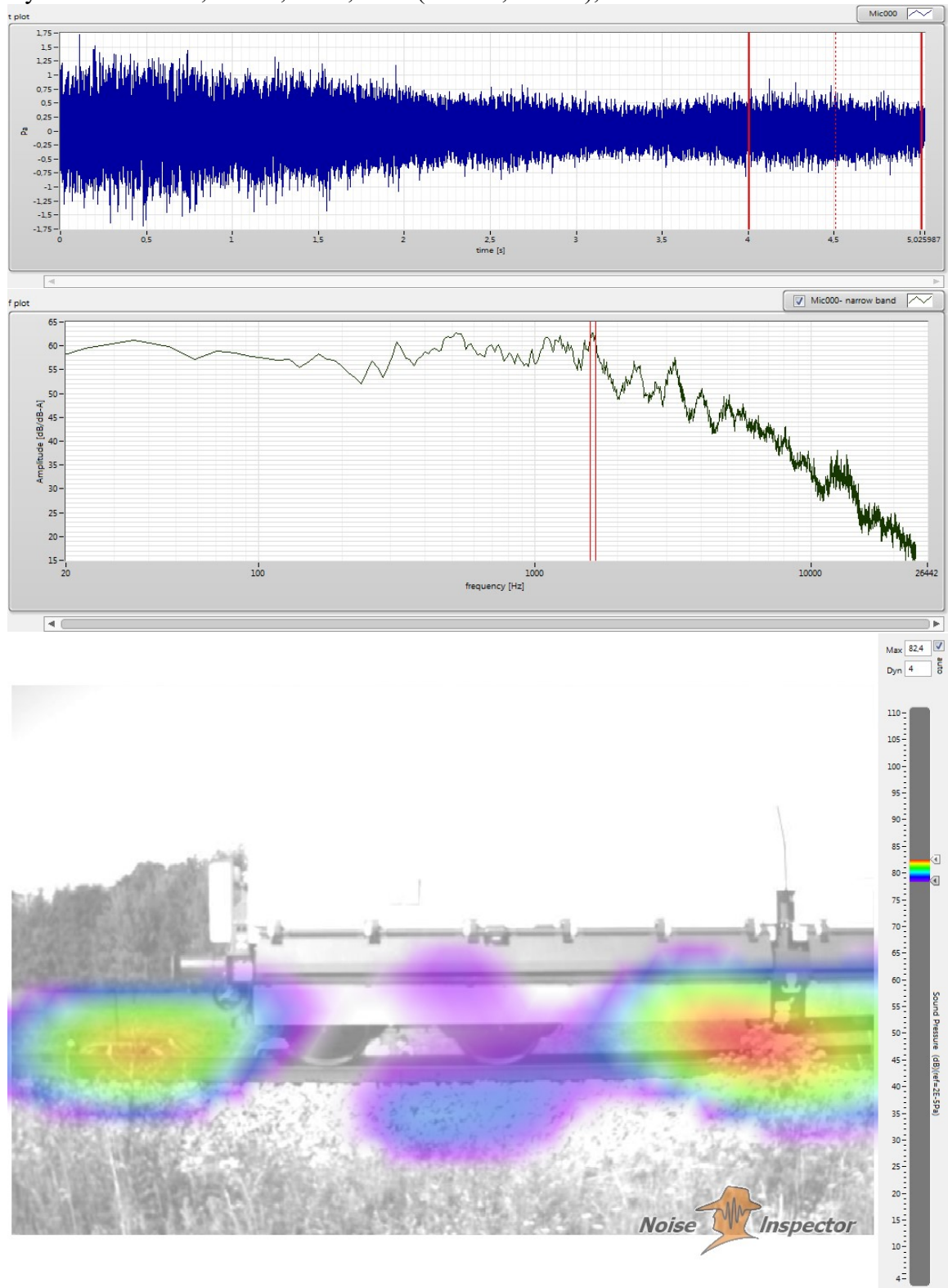


Příloha 18

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2h

Rychlost: 80 km/h, Čas: 4,006-5,010 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1588 Hz-1662 Hz.

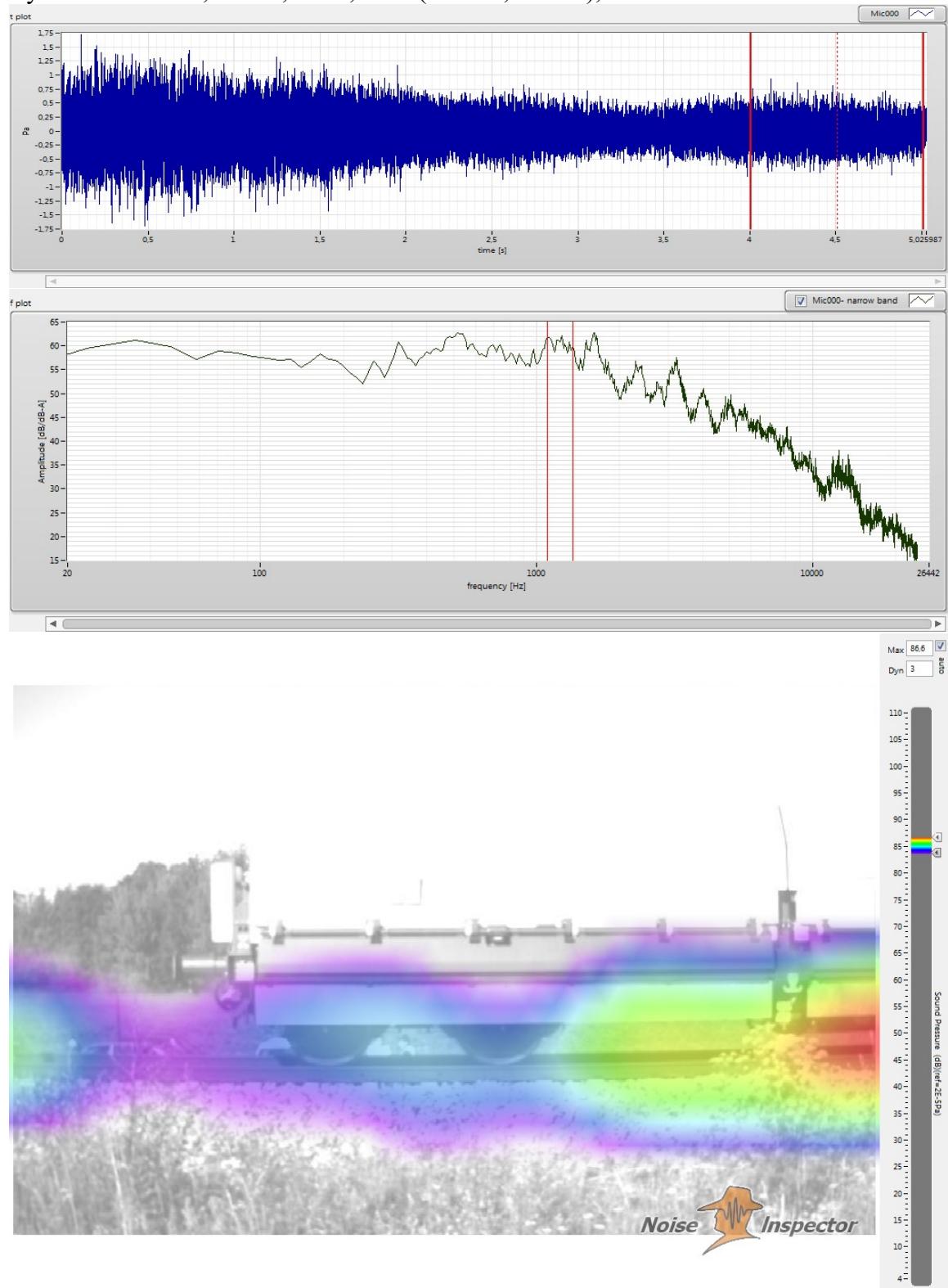


Příloha 19

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2i

Rychlost: 80 km/h, Čas: 4,006-5,010 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 1095 Hz-1354 Hz.

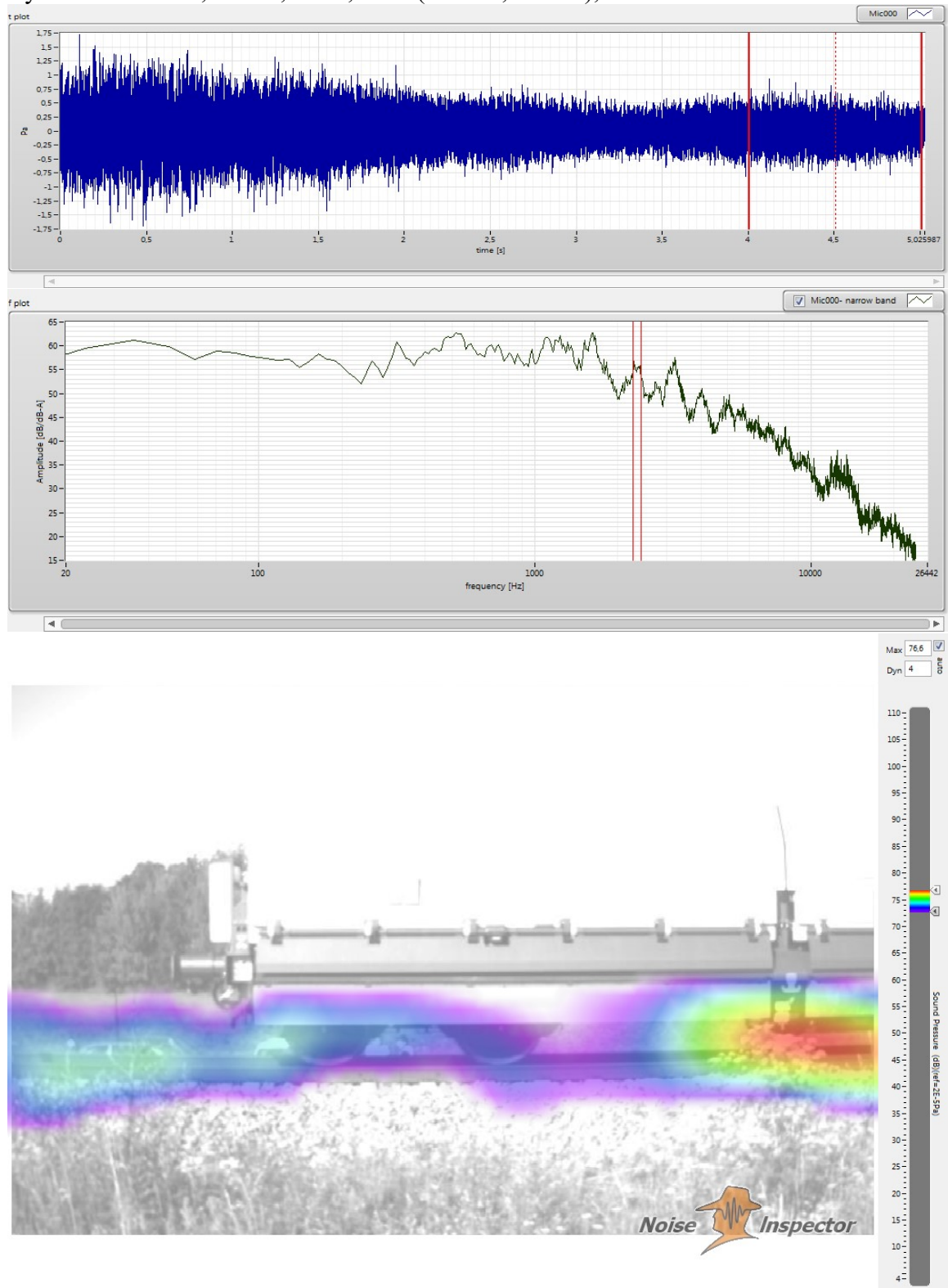


Příloha 20

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2j

Rychlost: 80 km/h, Čas: 4,006-5,010 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 2267 Hz-2428 Hz.



Příloha 21

Měření zdrojů hluku akustickou kamerou při průjezdu vlakové soupravy, okruh Velim.

Časový průběh, frekvenční spektrum a vizualizace – zpracování 80-2k

Rychlost: 80 km/h, Čas: 4,006-5,010 s (délka 1,004 ms), Pásmo: 3141 Hz-3287 Hz.

