



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# VLIV PROVOZNÍCH PODMÍNEK NA HLUK TRAMVAJE V REÁLNÉM PROVOZU

EFFECT OF OPERATING CONDITIONS ON TRAM NOISE IN REAL TRAFFIC

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kryštof Lounek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Valena

BRNO 2023



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Kryštof Lounek</b>
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Martin Valena</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Vliv provozních podmínek na hluk tramvaje v reálném provozu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Průjezdem tramvajové soupravy obloukem o malém poloměru, typicky točny, může dojít k hlukovému projevu trvajícím od zlomků sekund až po vyšší jednotky sekund. Tento hluk je nežádoucí zejména v obydlených oblastech, kde snižuje kvalitu života. Četnost i délka projevů závisí nejenom na projíždějí soupravě, ale i na povětrnostních podmínkách a dalších parametrech.

Typ práce: výzkumná

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem bakalářské práce je stanovit vliv provozních podmínek na hluk tramvaje projíždějí traťovým obloukem.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- provést rešerši v oblasti hluku generovaného kolejovými vozidly,
- analýza rešerše z pohledu provozních podmínek ovlivňující hluk,
- experimentální stanovení jejich vlivu na hluk,
- diskuse jednotlivých vlivů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Editor R. LEWIS, U. OLOFSSON. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8

EADIE, D. T., M. SANTORO aj. KALOUSEK. Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves: changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear*. 2005, 258(7), 1148-1155. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.061>

THOMPSON, D.J. Wheel-rail Noise Generation, Part I: Introduction And Interaction Model: Introduction And Interaction Model. *Journal of Sound and Vibration*. 1993, 161(3), 387-400. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1993.1082>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce zkoumá vliv povětrnostních podmínek na kvílivý hluk produkovaný kontaktem kola s temenem kolejnice. Povětrnostními podmínkami se zde rozumí vlhkost vzduchu, teplota vzduchu a přítomnost deště. Dále práce porovnává konkrétní tramvaje z hlediska jejich tendence produkovat kvílivý hluk a také dle parametrů produkovaného hluku. Datové soubory použité v analýze pocházejí z období jednoho měsíce ze stacionárního modulu umístěného v blízkosti traťového oblouku v tramvajové smyčce Brno-Komín. Grafické závislosti, které jsou výstupem práce, popisují klesající tendenci průměrné hladiny hluku v závislosti na vlhkosti a stoupající tendenci průměrné hladiny hluku v závislosti na teplotě. Také ukazují výraznou redukci výskytu kvílivého hluku během deště. Z hlediska porovnání tramvají nejčastěji produkuje kvílivý hluk tramvaj č. 1713 a to v 86 % případů. Zároveň má i jedny z nejvyšších hodnot všech parametrů hluku. Závěry zjištěné touto prací mohou pomoci objasnit proměnlivé chování kvílivého hluku a také mohou sloužit pro identifikaci konkrétních hlučných tramvají.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Kvílivý hluk, reálné měření, tramvaj, teplota, vlhkost, dešť

## ABSTRACT

The bachelor's thesis investigates the influence of weather conditions on the squeal noise produced by the contact of the wheel with the top of the rail. Weather conditions are defined here as humidity, air temperature and the presence of rain. The thesis also compares specific trams in terms of their propensity to produce squeal noise and the parameters of the noise produced. The data sets used in the analysis come from a one-month period from a stationary module located near the track curve in the Brno-Komín tram loop. The graphical dependencies, which are the result of the work, describe a decreasing tendency of the average noise level depending on the humidity and an increasing tendency of the average noise level depending on the temperature. They also show a significant reduction in the occurrence of squeal noise during rain. As far as the tram comparisons are concerned, tram no. 1713 produces the most squeal noise, in fact in 86% of the cases. It also has one of the highest values of all noise parameters. The results of this work can help to explain the variable behaviour of squeal noise and can also be used to identify specific noisy trams.

## KEYWORDS

Squeal noise, real measurements, tram, temperature, humidity, rain



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LOUNEK, Kryštof. *Vliv provozních podmínek na hluk tramvaje v reálném provozu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149710>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Martin Valena.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Valenovi za věnovaný čas, odborné rady a cenné zkušenosti. Velké díky patří také rodině, která mě podporovala po celou dobu studia. Nemohu zapomenout ani na své spolužáky a přátele, kteří mi byli oporou.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Martina Valeny. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Základy akustiky	14
2.2	Hluk generovaný kolejovými vozidly	18
2.3	Kvílivý hluk	21
2.4	Vliv provozních podmínek na kvílivý hluk	24
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>31</b>
3.1	Analýza problému	31
3.2	Cíl práce	32
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>33</b>
4.1	Materiál	33
4.2	Metody	38
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>42</b>
5.1	Vliv teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu a přítomnosti deště na parametry hluku	42
5.2	Srovnání hlučností jednotlivých tramvají a jejich náchylnosti k tvorbě kvílivého hluku	47
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>51</b>
6.1	Vliv povětrnostních podmínek	51
6.2	Vliv jednotlivých tramvají	53
6.3	Limity studie	54
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN</b>	<b>59</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>60</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>62</b>



# 1 ÚVOD

Kolejová doprava je jedním z nejstarších druhů dopravy, který se používá v téměř nezměněné formě dodnes. Mezi její hlavní výhody patří schopnost dopravovat objemný náklad na dlouhé vzdálenosti za relativně krátký čas a nízkou cenu. Speciálním druhem kolejové dopravy je tramvajová doprava, která je důležitá zejména pro dopravní obsluhu velkých měst. Tramvaj je schopná pojmout násobně více cestujících než osobní automobil nebo autobus a tím výrazně odlehčit silničnímu provozu.

Bohužel stejně jako železniční, i tramvajovou dopravu provází nežádoucí hluk. Závažnost její hlukové emise spočívá především v tom, že tramvajová dráha leží nejčastěji v bezprostřední blízkosti obytné zástavby a tím přímo ovlivňuje kvalitu života v tomto prostoru. Jedním z nejvýraznějších hlukových projevů tramvaje je tzv. kvílivý hluk od temene kolejnice, který se objevuje při průjezdu tramvaje traťovým obloukem o malém poloměru. Tento hluk by se dal popsat jako tonální pískání. Výškově se nachází v oblasti nejvyšší citlivosti lidského ucha a dosahuje hladin hluku krátkodobě i přes 100 dB. Z těchto faktů vyplývá značná nepříjemnost a negativita vlivu kvílivého hluku na člověka.

To, jaké parametry bude výsledný kvílivý hluk mít a jestli se vůbec objeví záleží na mnoha okolnostech. Jelikož zdrojem hluku je kontakt valícího se kola a kolejnice, zásadní roli v této problematice hraje tření právě v oblasti styku kola s kolejnicí. Parametry tření v kontaktu nejsou stálé a na základě různých vlivů se mění v čase. Nezanedbatelnou roli hrají v tomto případě i povětrnostní podmínky, jako jsou vlhkost a teplota vzduchu, ale také přítomnost deště. Jelikož zdrojem hluku je styk kola s kolejnicí je zřejmé, že výsledný hluk se bude odvíjet i od jejich technického stavu. V případě kola nemusí jít pouze o kolo samotné, ale i o stav celého podvozku či tramvaje.

Hlavním cílem bakalářské práce je popsání vlivu výše zmíněných povětrnostních podmínek na hladinu hluku a dobu trvání kvílivého hluku. Dalším cílem je rozlišení konkrétních tramvají dle jejich náchylnosti k tvorbě kvílivého hluku a také dle výraznosti produkovaného hluku. Závěry prezentované touto prací mohou pomoci lépe pochopit chování kvílivého hluku za různých podmínek, ale také mohou vést k vytipování konkrétních „hlučných“ tramvají, které svými projevy negativně ovlivňují obyvatele města Brna.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Základy akustiky

Zvuk je druh mechanického vlnění, které se šíří v pružném látkovém prostředí prostřednictvím kmitů navzájem na sebe působících částic. Tyto kmity se navenek projevují jako okamžité změny tlaku v daném místě prostředí. Zvuk se v plynech a běžných kapalinách vyskytuje pouze jako vlnění podélné (tj. směr kmitání částic je shodný se směrem šíření zvuku). Rychlost šíření zvuku závisí na prostředí, ve kterém je pozorován. Obecně platí, že čím větší hustotu dané prostředí má, tím vyšší je rychlost šíření tlakových vln v něm [1]. Běžná hodnota udávaná pro rychlost zvuku ve vzduchu o teplotě 20 °C je cca 340 m/s [2].

Jednou z fyzikálních veličin používanou pro popis zvuku je frekvence  $f$  (Hz):

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

kde  $T$  (s) je čas kmitu (neboli perioda). Pokud je akustické vlnění harmonické (částice kmitají v prostředí pravidelně), jedná se o tzv. čistý tón, jehož frekvence se v čase nemění [1]. Lidské ucho vnímá frekvenci jako „výšku“ tónu (čím vyšší frekvence, tím vyšší tón) a běžně udávaný slyšitelný rozsah je 20 až 20 000 Hz. Vlivem vystavování nadměrnému hluku či stárnutí se tento rozsah zužuje především o horní frekvenční pásma [2].

Další důležitou veličinou je již zmiňovaný akustický tlak  $p$  (Pa), který se mění v čase  $t$  (s). Jedná se o tlak relativní a jeho okamžité hodnoty dosahují od 20  $\mu$ Pa (práh slyšení při frekvenci 1 000 Hz) až po jednotky MPa (např. ultrazvukový skener). Pro práci s hodnotami akustického tlaku je využívána tzv. efektivní hodnota akustického tlaku označována  $p_{ef}$ , nebo také  $p_{RMS}$  [1] (z anglického „root mean square“ [2], v překladu „kvadratický průměr“):

$$p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t)^2 dt} \quad (2)$$

kde  $\tau$  (s) je časový interval, ve kterém je sledován průběh akustického tlaku  $p(t)$ . Efektivní hodnota tlaku  $p_{RMS}$  reprezentuje energetický účinek, který má tlak  $p$  za čas  $\tau$ . V praxi je efektivní hodnota tak užívaná, že se dolní index, který ji označuje často neuvádí [1].

Jelikož je v akustice nutné počítat s velkými rozsahy sledovaných veličin a lidské ucho vnímá zvukové podněty jako logaritmus jejich fyzikální příčiny, používají se pro vyjádření akustických veličin logaritmická měřítka. Takto vyjádřené veličiny jsou nazývány „hladiny“ a jsou označovány písmenem  $L$ . Hladiny reprezentují srovnání sledované hodnoty s hodnotou referenční pro danou veličinu (často prahovou hodnotu pro lidské ucho). Jednotkou hladiny v akustice je decibel (dB), jedná se o bezrozměrnou jednotku. [1]

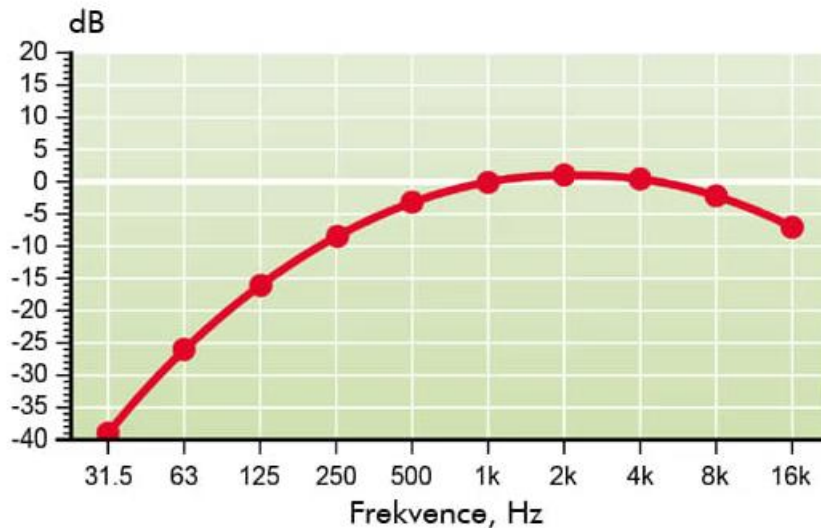
Jednou z nejčastěji používaných hladin je hladina akustického tlaku (někdy také hladina zvuku, pokud jde o vlnění v slyšitelném frekvenčním pásmu [1]) označována jako  $L_p$  nebo také pouze  $L$ . Je definována jako:

$$L = 10 \cdot \log \left( \frac{p_{RMS}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{p_{RMS}}{p_{ref}} \right) \quad (3)$$

kde  $p_{ref}$  (Pa) je referenční hodnota akustického tlaku, obvykle uvažována právě jako prahová hodnota slyšení při 1 000 Hz [2]. Hladina akustického tlaku popisuje stav akustického pole v určitém čase a místě, a tudíž se mění se vzdáleností od zdroje zvuku a s podmínkami ve kterých je měřena. Pro bodový zdroj zvuku ve volném zvukovém poli platí, že s dvojnásobnou vzdáleností od něj klesne hladina akustického tlaku o 6 dB [1].

Další používanou hladinou je hladina akustického výkonu  $L_p$  (nebo také  $L_W$ ). Ta se využívá při definování a hodnocení samotného zdroje zvuku, jelikož na rozdíl od hladiny tlaku nezávisí na místě a způsobu měření. Další z užitečných hladin je hladina akustické intenzity  $L_I$ , která popisuje zvuk z hlediska toku akustické energie skrz plochu. Obě hladiny jsou definovány obdobně jako hladina akustického tlaku. [1]

Lidské ucho vnímá hodnoty akustického tlaku pro různé frekvence odlišně. Nejvíce citlivé je okolo frekvencí 1 až 5 kHz [2], naopak nejmenší citlivosti dosahuje při nízkých frekvencích pod 100 Hz. Například již zmiňovaný práh slyšitelnosti má hodnotu hladiny akustického tlaku přibližně 0 dB (odpovídá akustickému tlaku 20  $\mu$ Pa) při frekvenci 1 000 Hz, ale při frekvenci 40 Hz je hodnota prahu slyšitelnosti už 50 dB. Z tohoto důvodu jsou zavedeny tzv. váhové (útlumové) křivky, které mají za úkol modifikovat hladinu akustického tlaku v závislosti na frekvenci tak, aby určitá hodnota decibelů odpovídala přibližně stejné slyšitelnosti v celém definovaném frekvenčním pásmu. Nejpoužívanější váhovou křivkou je tzv. A křivka. Na Obr. 2-1 lze vidět, jak A filtr koriguje reálnou hladinu akustického tlaku zejména v nižších frekvencích. Hladina zvuku (tj. hladina akustického tlaku) je po aplikaci A filtru nazývána hladinou A zvuku a označována  $L_A$  (dB(A) nebo také dBA) [1]. V praxi se pro hodnocení vlivu zvuku na člověka používá právě tato hladina  $L_A$ . Bývá také uvažována jako vyjádření hlasitosti, ačkoliv striktně vzato je hlasitost subjektivní veličinou. Díky logaritmické povaze hladiny zvuku je její změna o méně než 2 dB [3] lidským uchem téměř nepostřehnutelná, zato její zvýšení o 10 dB je vnímáno jako zdvojnásobení „hlasitosti“ [2].



Obr. 2-1 Frekvenční průběh váhové A křivky [3]

Po úvahách o prahu slyšení je logické zajímat se i o opačný konec spektra hladiny zvuku a tím je v případě lidského ucha práh bolesti. Prahem bolesti bývá označována hladina zvuku o velikosti 120 dB(A) [3]. Při hodnotách přesahujících 130 dB(A) dochází k téměř okamžitému nevratnému poškození sluchu. Zvláště nebezpečné jsou pak krátké, tzv. impulzní zvuky (jako např. výstřely, údery strojů apod.), které jsou následované obdobím s nízkou hladinou zvuku. Zvuk má nicméně potenciál poškozovat sluch už od hladiny cca 80 dB(A). Rozhodujícím faktorem je doba, po kterou je člověk zvuku vystaven [4].

V praxi má ale málokterý zvuk konstantní hodnotu hladiny v čase, a proto se zavádí ekvivalentní hladina A zvuku  $L_{Aeq,T}$  (dB(A)). Vyjadřuje stálou hodnotu hladiny zvuku, jenž by měla na člověka za sledovaný časový interval stejný účinek, jako hodnocený časově proměnný zvuk. Je definována jako:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{p_A(t)}{p_{ref}} \right]^2 dt \quad (4)$$

kde  $T = t_2 - t_1$  (s) je sledovaný časový interval a  $p_A(t)$  je časově proměnný akustický tlak vážený A filtrem. Pro vyjádření zvukového působení se nejčastěji používá časový interval  $T = 8$  h a takovou ekvivalentní hladina je pak označována  $L_{Aeq,8h}$  (dB(A)). [1]



Jak již bylo zmíněno, závažnost dopadů zvuku na člověka závisí na hodnotě ekvivalentní hladiny zvuku a na době zvukové expozice. To ve zkratce znamená, že vysoká hladina zvuku působící po krátkou dobu bude mít na lidské ucho stejné dopady jako nižší hladina zvuku působící po dobu delší. Pro kvantifikaci tohoto jevu byl zaveden koeficient bisekce  $q$ , který bývá uvažován jako  $q = 3$  [1]. Z toho vyplývá skutečnost, že s každým zvýšením hodnoty ekvivalentní zvukové hladiny o 3 dB se doba expozice zkrátí na polovinu, při uvážení totožných účinků na člověka [4]. Dle Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. je základní hlukový limit pro ustálený a proměnný hluk na pracovišti  $L_{Aeq,8h} = 85$  dB(A). Po aplikaci koeficientu bisekce to znamená, že platí limity  $L_{Aeq,4h} = 88$  dB(A),  $L_{Aeq,2h} = 91$  dB(A) atd. Při žádné z expozic však nesmí být překročena hodnota nejvyšší hladiny zvuku  $L_{Amax} = 107$  dB(A) [5].

Tab. 2-1 Limitní hodnoty hluku působeného dopravou na pozemních komunikacích a dráhách [5]

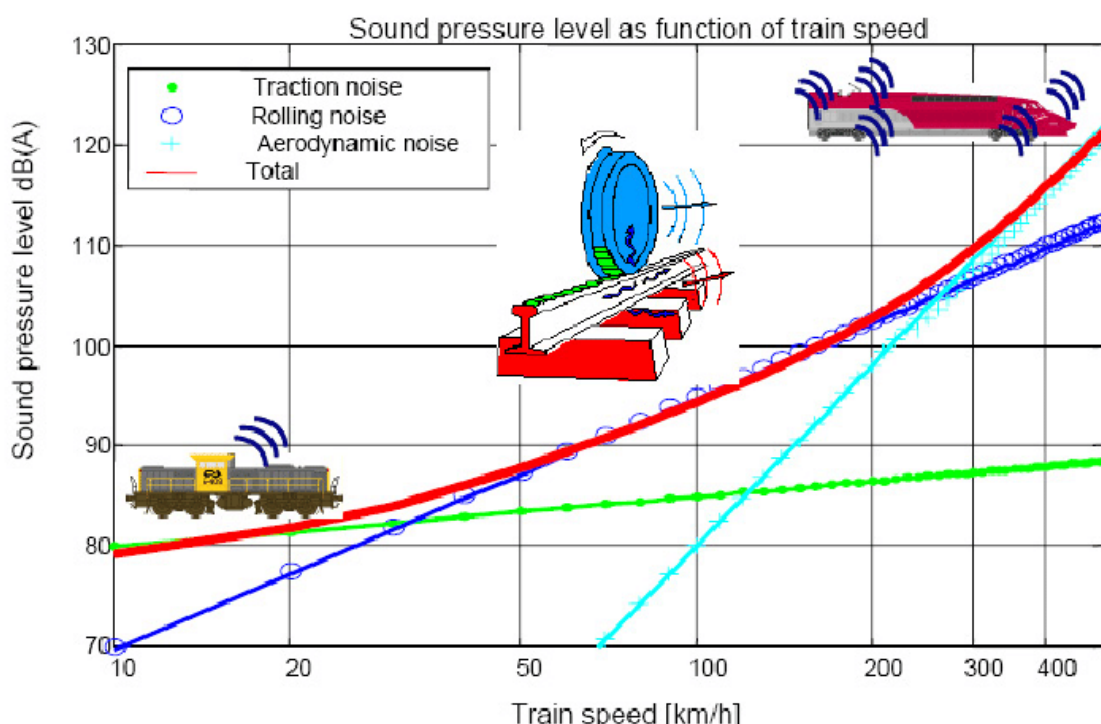
Pozemní komunikace a dráhy	Doba dne	$L_{Aeq,T}$ (dB(A))
Dálnice, silnice I. a II. tř., místní komunikace I. a II. tř. a <u>tramvajové a trolejbusové dráhy vedené po silnicích I. a II. tř. a místních komunikacích I. a II. tř.</u>	denní	65
	noční	55
Silnice III. tř., komunikace III. tř., účelové komunikace a <u>tramvajové a trolejbusové dráhy vedené po silnicích III. tř. a místních komunikacích III. tř.</u>	denní	60
	noční	50
<u>Železniční, speciální a tramvajové dráhy v ochranném pásmu dráhy</u>	denní	65
	noční	60
Železniční dráhy mimo ochranné pásmo dráhy	denní	60
	noční	55

Pro provoz na tramvajové dráze upravuje zmíněné nařízení [5] hygienické hlukové limity v závislosti na denní době a poloze dráhy. Tab. 2-1 prezentuje hodnoty ekvivalentních hladin A zvuku  $L_{Aeq,T}$  pro časové intervaly  $T = 16$  h pro denní dobu trvající od 6:00 do 22:00, resp.  $T = 8$  h pro noční dobu od 22:00 do 6:00. Ve sloupci „Pozemní komunikace a dráhy“ jsou podtrženy popisy týkající se tramvajového provozu.

## 2.2 Hluk generovaný kolejovými vozidly

Za hluk obecně bývá označován nepříjemný, obtěžující, nežádoucí nebo jinak škodlivý zvuk [1]. Při generování hluku kolejovými vozidly se uplatňuje hned několik mechanismů jeho tvorby. Mezi nejvýznamnější patří strukturální vibrace. V případě kolejových vozidel jsou to nejčastěji vibrace železničního kola, kolejnice a dalších částí vlakové soupravy či trati. Vlastní vibrace struktur rozvibrují okolní vzduch, který pak hluk dále přenáší do okolí. Druhým významným mechanismem jsou aerodynamické fluktuační. Vzduch obtékající okolo karoserie jedoucího vozidla se vlivem jejího tvaru a prvků na ní vrtí, což způsobuje turbulence, které jsou opět zdrojem hluku šířícího se do okolí. [2]

Typy hluků generovaných kolejovými vozidly lze dále dělit podle jejich zdroje. V pouhém výčtu se jedná o valivý hluk (tzv. „rolling noise“) tvořený odvalováním železničního kola po kolejnici, nárazový hluk (tzv. „impact noise“) excitovaný nahodilými nerovnostmi jako např. kolejnicovými svary, kvílivý hluk (tzv. „curve squeal“) produkovaný železničním kolem při průjezdu prudkým traťovým obloukem, aerodynamický hluk („aerodynamic noise“) tvořený turbulencemi obtékajícího vzduchu při vysokých rychlostech a trakční hluk („traction noise“) produkovaný např. pohonnou jednotkou vozidla [2]. Tyto zdroje hluku nabývají různou měrou na významnosti v závislosti na rychlosti soupravy, jak prezentuje Obr. 2-2.

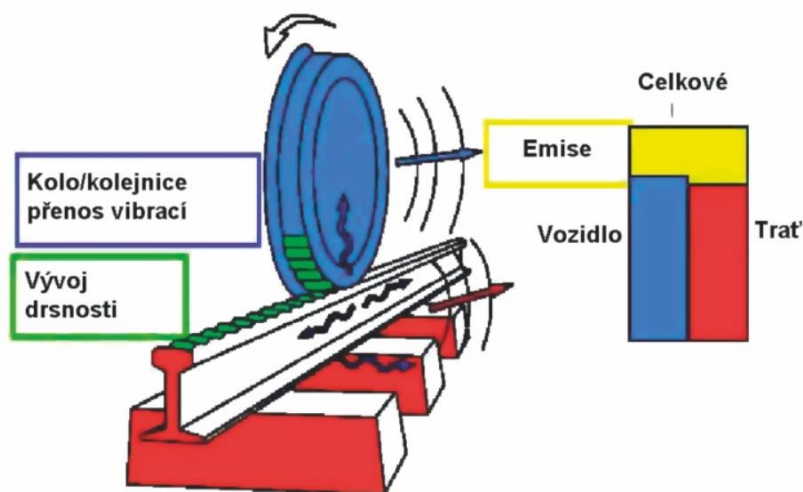


Obr. 2-2 Hladiny hluku jednotlivých zdrojů hluku v závislosti na rychlosti soupravy [6]

## ▪ Valivý hluk

Je nejvýznamnějším typem hluku generovaným v kontaktu železničního kola s kolejnicí. Jeho příčinou je nenulová drsnost povrchu stykových ploch kola s kolejnicí. Tato drsnost však nemá význam mikro-drsnosti, ale tzv. vlnkovitosti jejíž vlnová délka se pohybuje mezi 5 a 250 mm, což je podstatně více než u mikro-drsnosti [7]. Jedním z původů vlnkovitosti na železničním kole jsou špalkové brzdy, u kterých probíhá brždění přímo o jízdni plochu kola, čímž se tato plocha významně zdrsnuje [8]. Alternativou ke klasickým špalkovým brzdám z litiny jsou tzv. „K-bloky“, které jsou vyrobeny z kompozitu a nemají tak dramatický dopad na zdrsnění kola během provozu [2]. Příčinou vlnkovitosti na kolejnici mohou být také traťové oblouky o malém poloměru, kde se vnitřní kolo železničního dvoukolejní dostává do skluzu, čímž opotřebovává povrch a tvoří vlnkovitost [9].

Při jízdě soupravy po trati dochází ke kombinaci efektů odlišné vlnkovitosti povrchu kola a kolejnice, což má za následek tvorbu vibrací jak v kole, tak v kolejnici. Jelikož železniční kolo i kolejnice jsou málo tlumené rezonanční struktury s mnoha vlastními frekvencemi [2], vibrace se následně přenášejí jako mechanické vlnění do okolního vzduchu. Tento proces ilustruje Obr. 2-3. Pro zmíněný rozsah vlnových délek vlnkovitosti dochází v závislosti na rychlosti soupravy k excitaci hluku v slyšitelném frekvenčním pásmu. Frekvence emitovaného hluku pak závisí přímo na rychlosti vlaku a nepřímo na vlnové délce vlnkovitosti [7]. Nejvyšší hladiny hluku jsou dosahovány v rozmezí frekvencí od 800 do 2 500 Hz [10].



Obr. 2-3 Ilustrace buzení valivého hluku [11]

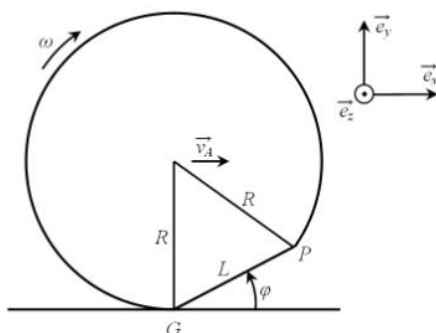
Použití kotoučových brzd může snížit emise valivého hluku (oproti špalkovým brzdám) až o 10 dB na trati v dobrém technickém stavu. Avšak na tratích, kde již vznikla vlnkovitost kolejnic se hluk o cca 10 dB zvýší (v porovnání se špalkovými brzdami na trati v dobrém technickém stavu) nehledě na to, jestli je souprava osazena špalkovými či kotoučovými brzdami [10]. Je proto zřejmé, že se nelze zaměřovat pouze na stav samotného železničního kola, ale je také nutné nejčastěji broušením udržovat povrch kolejnic relativně rovný [7].

Další metodou, jak redukovat valivý hluk je minimalizace šíření vibrací v kole a kolejnici. Toho se dosahuje optimalizací tvaru kola a kolejnice na základě modální analýzy tak, že se vlastní frekvence struktur přesunou mimo excitační frekvence vibrací [7]. Jiným přístupem je přidání dodatečného tlumícího materiálu na povrch kola, nebo pod povrch železničního svršku, což vede ke zvýšení útlumové schopnosti struktury. Pro tyto úpravy platí, že redukuje hladinu hluku o 1 až 5 dB, v extrémních případech až o 8 dB [2].

V poslední řadě lze do blízkosti trati instalovat protihlukové bariéry, jejichž účinnost závisí na vzdálenosti od středu trati a také na tom, jaké výšky dosahují. Mohou přinést redukcii hladiny hluku o 10 až 20 dB, jejich nevýhodou je ale neestetičnost a vysoká cena. [2]

#### ▪ Nárazový hluk

Má příčinu ve větších nerovnostech na povrchu kolejnic, jako jsou kolejnicové spoje a svary, nebo mezery mezi kolejnicemi ve výhybkách a kříženích. Původ hluku může být i v samotném železničním kole, a to, pokud se na něm vlivem skluzu při brždění a následném tření bez odvalu vytvoří tzv. plošky [7]. Ty jsou obvykle dlouhé okolo 50 mm a mají bezprostředně po vzniku ostré hrany (viz. Obr. 2-4), které způsobují velkou koncentraci napětí přenášeného do kolejnice. To poté může zapříčinit i poškození komponentů trati. Vliv plošek na nárazový hluk roste se zvyšující se rychlostí a projevuje se zejména zvýšením akustické emise ve frekvenčním pásmu od 200 do 400 Hz [2].



Obr. 2-4 Představa idealizované plošky na železničním kole [12]

V případě hluku produkovaného kolejnicovými spoji má na jeho úroveň vliv zejména šířka mezery mezi kolejnicemi, výškový rozdíl mezi povrchy sousedních kolejnic a hloubka zahlobení kolejnicového spoje. Např. pro výškový rozdíl sousedních kolejnic 2 mm bude průměrná předpokládaná hladina akustického výkonu o 10 dB vyšší než ta u valivého hluku. [2]

Redukce nárazového hluku lze v případě kolových plošek dosáhnout instalací skluzové ochrany do řídicího systému železničních vozidel a monitorováním a následným zarovnáváním profilu kol. V případě kolejnic jsou v posledních 30 letech spoje nahrazovány kontinuálními svary, u kterých je ale důležité správné finální zarovnání povrchů. [7]

### ▪ **Aerodynamický hluk**

Tento typ hluku není na rozdíl od předchozích působen vibrací struktur a vyznačuje se strmější závislostí na rychlosti vozidla než mechanické hluky. Nad ostatními zdroji hluku začne dominovat až při rychlostech přes 300 km/h a v mnoha případech (jako je např. tramvajová doprava) ho lze tedy zanedbat. Typickými zdroji aerodynamického hluku jsou části podvozku, spojení mezi vagony, sběrače elektrického proudu a součásti elektrické výzbroje umístěné na střeše. [2]

### ▪ **Trakční hluk**

Do hluku trakce lze řadit veškerý hluk produkovaný hnacím ústrojím vozidla. Zejména se jedná o hluk způsobený trakčními motory (kdy elektrické jsou tišší než dieselové) a dále pak elektrickou výzbrojí (jako jsou ventilátory, statické měniče apod.) [2]. Tento hluk obvykle převládá nad ostatními v rychlostech do 60 km/h a je méně závislý na rychlosti vozidla [11].

### ▪ **Další zdroje hluku**

Nezanedbatelnými zdroji hluku jsou i brzdový systém vozidla, kontakt sběrače a troleje, rotující části podvozku, rozhlasová zařízení ve stanicích a zvukové návěsti. [11]

## 2.3 Kvílivý hluk

Kvílivý hluk je posledním zmíněným z druhů hluku emitovaných železniční dopravou a vzhledem k zaměření praktické části práce je mu věnována samostatná podkapitola.

V roce 2002 byl spuštěn organizací UIC (Internacional Union of Railways) 3fázový projekt, který měl za úkol vypracovat metodiku a možné využití nástrojů pro boj s kvílivým hlukem. Podnětem pro vznik tohoto projektu byla malá zmapovanost problematiky a neexistující regulace a kalkulace pro tento typ hluku. Pádným argumentem byl i fakt, že v Evropě bylo ze všech obyvatel ovlivněných valivým hlukem, 12 % ovlivněno i kvílivým hlukem. To odpovídá počtu přibližně 1,5 milionu obyvatel. Obtížnost vyhodnocování kvílivého hluku spočívá zejména v množství parametrů, které mají na jeho výskyt vliv [13]. Mezi hlavní patří teplota, vlhkost, rychlost vozidla, geometrie trati a opotřebení kola a kolejnice [2]. To zapříčiňuje, že se tento hluk nevyskytuje pravidelně, ale pouze s jistou pravděpodobností, a tudíž nemůže být spolehlivě předvídan ani srovnáván [13].

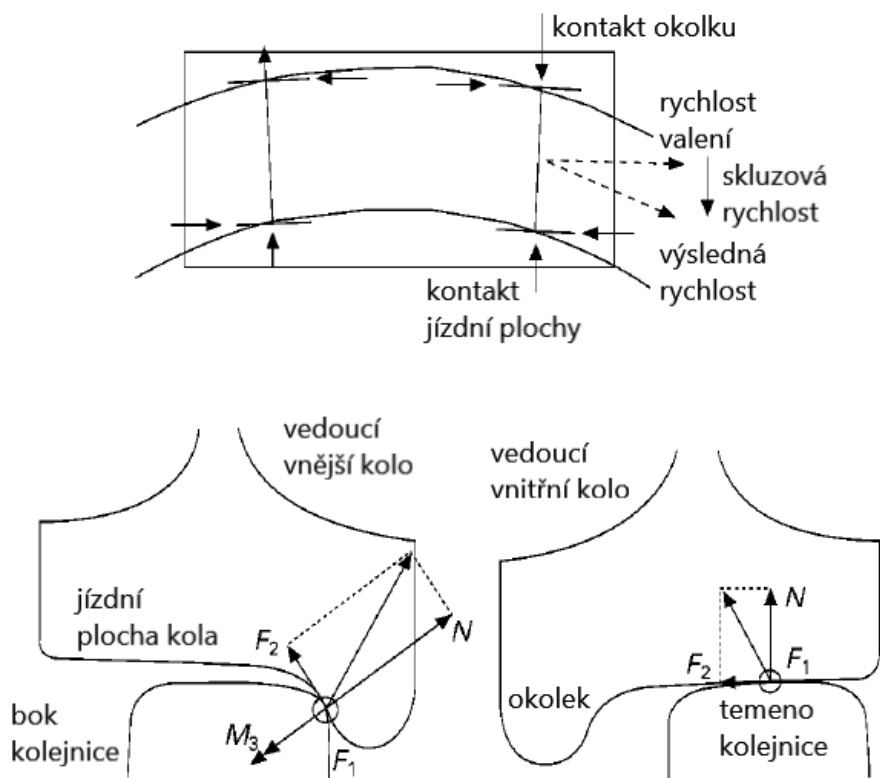
Kvílivý hluk je tonální, vysokofrekvenční hluk, který je o 10 až 30 dB hlasitější než valivý hluk [13]. Vyskytuje se při průjezdech traťových oblouků o poloměru menším jak 500 m, ale běžný je až při poloměrech menších než 200 m [14]. Rudd [15] stanovil podmínku pro výskyt kvílivého hluku pomocí stonásobku rozchodu uvažovaného železničního dvoukolí. Pokud je tato hodnota menší než poloměr pojížděného traťového oblouku, kvílivý hluk by se neměl objevit.

Z hlediska oblasti původu lze kvílivý hluk dělit na 2 druhy:

- kvílivý hluk od kontaktu jízdní plochy kola a temena kolejnice (anglicky označován „top of rail (TOR) squeal“ nebo „curve squeal“)
- kvílivý hluk od kontaktu okolku a boku kolejnice (anglicky „flanging noise“ nebo „flange squeal“)

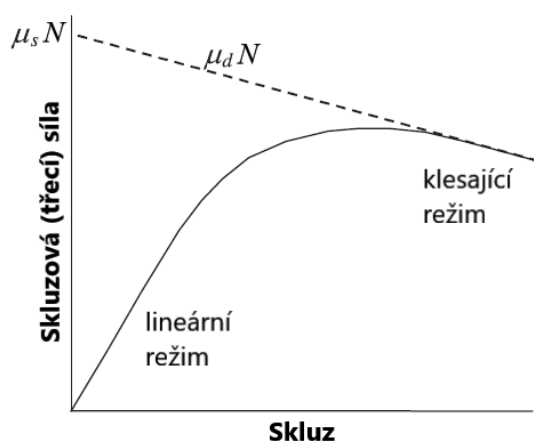
Obr. 2-5 ilustruje situaci při průjezdu podvozku pravotočivým obloukem. Vnitřní vedoucí kolo se dotýká temene kolejnice výhradně jízdní plochou, která je u železničního dvoukolí kónického tvaru, aby se při průjezdu oblouky zamezilo prokluzu vlivem rozdílných obvodových rychlostí kol dvoukolí [14]. Pro tento dotyk je charakteristický hluk zvaný „TOR squeal“ pohybující se mezi frekvencemi 1 000 a 5 000 Hz [16] (podle některých publikací už od 200 Hz [2]).

Naproti tomu vnější vedoucí kolo (případně vnitřní vlečné kolo) je při průjezdu prudkým traťovým obloukem v kontaktu především s bokem kolejnice, a to prostřednictvím okolku, který svým tvarem zaručuje setrvání vozidla na kolejnicích a zároveň udržuje směr průjezdu obloukem [2]. Kóničnost jízdní plochy kola obecně napomáhá zatačení nápravy, takže v dlouhých obloucích není třeba kontaktu okolku s kolejnicí [14]. Tento kontakt způsobuje hluk nazývaný „flanging noise“ pro který jsou charakteristické vysoké frekvence v pásmu mezi 5 000 a 10 000 Hz [16].



Obr. 2-5 Schématické naznačení sil a rychlostí působících na železniční dvoukolí při průjezdu traťovým obloukem;  $N$  je normálová síla,  $F_1$  je podélná skluzová síla (na vnitřním kole působí směrem „z“ obrázku a na vnějším směrem „do“ obrázku),  $F_2$  je boční skluzová síla a  $M_3$  je točivý moment, upraveno dle [14]

Příčina vzniku kvílivého zvuku je dle Rudda [15] pro oba typy hluků stejná a sice tzv. „stick-slip“ („roll-slip“) efekt přítomný v místě kontaktu. V případě kvílivého hluku od temene kolejnice tento efekt závisí přímo na boční skluzové síle  $F_2$  (viz. Obr. 2-5 vpravo dole) [2]. Ta se při určité velikosti skluzu stane tzv. nasycenou a není dále schopna se zvyšovat. Naopak se vlivem klesajícího koeficientu dynamického tření  $\mu_d$  (který při suchém kontaktu klesá s rostoucí rychlostí, viz. Obr. 2-6) začne snižovat. Tato negativní třecí charakteristika je považována za hlavní důvod nestabilního dynamického chování, ačkoliv jsou případy, kdy se kvílivý hluk vyskytl i bez přítomnosti klesajícího režimu ve třecí křivce [14].



Obr. 2-6 Negativní třecí křivka, upraveno dle [14]

„Stick-slip“ efekt se vyznačuje fázemi přilnutí („stick“) a skluzu („slip“), které se periodicky střídají. Právě tato periodicitu rychlého střídání fází se navenek jeví jako kvílivý hluk o dané frekvenci. Na výsledný hluk má velký vliv rozdíl mezi koeficienty statického  $\mu_s$  a dynamického  $\mu_d$  tření. Čím větší tento rozdíl je, tím delší je fáze přilnutí a nižší frekvence kvílivého hluku. [14]

Metody redukce kvílivého hluku se různí, ale UIC projekt [13] zmiňuje následující: tlumení vibrací v kole (pomocí kroužkových tlumičů, tlumičů s přídavnou vrstvou a pomocí pružných kol), tlumení vibrací v kolejnici (kolejnicové tlumiče), maziva a modifikátory tření v kontaktu kola a kolejnice, povlaky kol nebo kolejnic a říditelné nápravy vozidel.

Často diskutovaným řešením v poslední době jsou právě maziva a „top-of-rail“ (TOR) produkty, díky své účinnosti a relativní cenové dostupnosti. Maziva určená na okolek jsou starším řešením a jejich primární účel spočívá v redukcí opotřebení kolejnice a kola, nicméně jako vedlejší efekt i potlačují emitovaný hluk. TOR produkty se aplikují na temeno kolejnice, a proto je nutné dbát na dodržení zachování adheze mezi kolem a kolejnici, aby nebyla ohrožena bezpečnost při brždění nebo jízdě do svahu. Tyto látky se oproti mazivům nesnaží dosáhnout co nejnižšího součinitele tření, ale pouze ho udržovat v určitých mezích, které jsou příznivé jak pro trakci, tak pro redukcí hluku. Jejich dalším cílem je transformace třecí křivky do pozitivního sklonu (tj. koeficient dynamického tření  $\mu_d$  bude s rostoucí rychlostí stoupat), čímž efektivně zabráňují tvorbě kvílivého hluku z temene. TOR produkty mohou být na vodní bázi (modifikátory tření) nebo na olejové (TOR maziva) a aplikují se stacionárně na kolejnici nebo tzv. „on-board“ z jedoucího vozidla přímo na kola [14].

Eadie a Santoro [17] zkoumali vliv třecího modifikátoru zvaného KELTRACK®, který se aplikuje přímo na temeno kolejnice. Z výsledků výzkumu je patrný značný účinek modifikátoru a sice průměrná redukce hladiny A hluku o 6,3 až 22,8 dB. Přípravek byl testován na různých tratích v Evropě s tím, že čím lepší byl technický stav trati, tím většího snížení hluku bylo dosaženo. Zajímavé také je, že ačkoliv je tento modifikátor navržen primárně k redukcí kvílivého hluku z temene, objevilo se i znatelné snížení kvílivého hluku od okolku. Autoři mají za to, že se jedná o nepřímý mechanismus, kdy při snížení bočních skluzových sil dojde zároveň i ke snížení sil na okolku, což se projeví právě nižším kvílivým hlukem z této části.

## 2.4 Vliv provozních podmínek na kvílivý hluk

Jak už bylo řečeno, na výskyt i výšku hladiny kvílivého hluku má vliv velké množství parametrů včetně povětrnostních podmínek. Jedná se zejména o vliv vlhkosti a teploty okolního vzduchu (resp. kolejnice samotné), dále pak vliv přítomnosti deště a také vliv teploty rosného bodu.

Tato problematika je v reálných podmínkách stále velmi málo prozkoumaná a díky komplexnosti a provázanosti provozních parametrů není stanoven jednotný model pro předpověď kvílivého hluku [18]. Podkapitola mapuje publikace, které se těmito vlivy zabývaly ať už v reálných nebo laboratorních podmínkách.

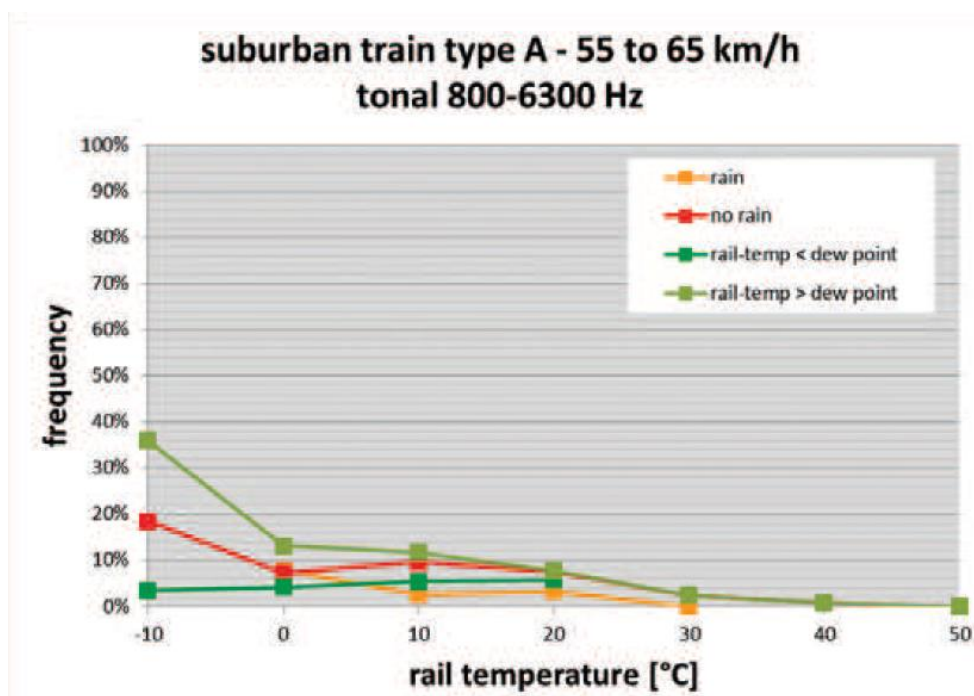


[18] MALY, Thomas, Florian BIEBL a Michael OSTERMANN. The effects of weather conditions and wheel wear on curve squeal. In: *Proceedings of the International Congress on Acoustics* [online]. 2019, , s. 1559-1566 [cit. 2023-05-05]. ISBN 9783939296157. ISSN 2226-7808. Dostupné z: doi:10.18154/RWTH-CONV-239967

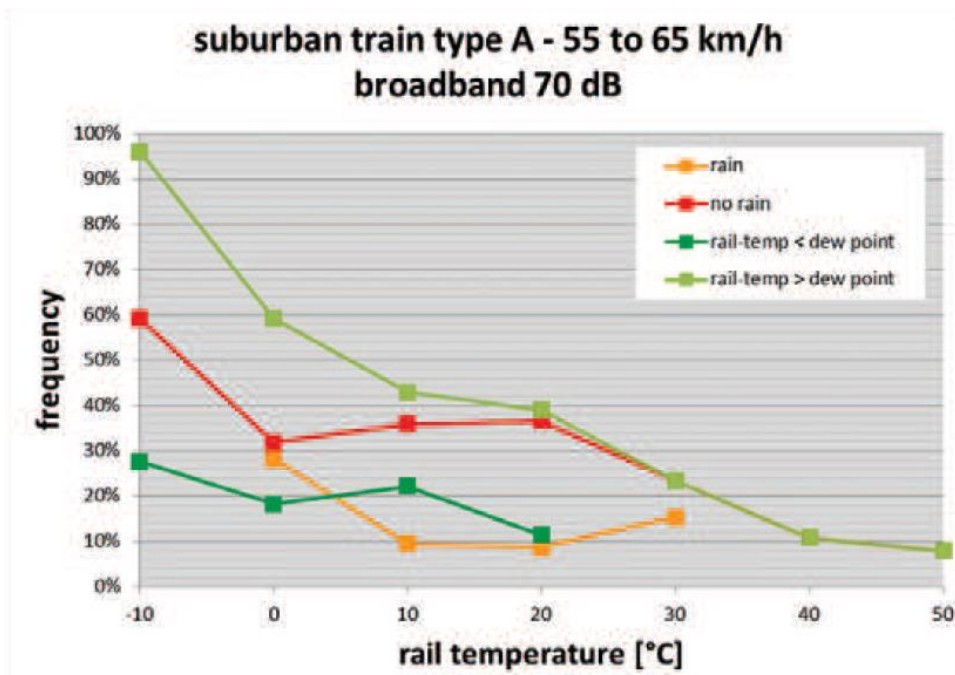
Maly, Biebl a Ostermann se zabývali vlivem povětrnostních podmínek a opotřebení železničního kola na kvílivý hluk. Měření probíhalo na příměstské železniční trati ve Vídni v oblouku o poloměru 230 m. Hluk byl zaznamenáván po dobu 11 měsíců za kterých bylo napočítáno 20 265 průjezdů vlaků. Průměrná rychlost průjezdu vozidla sledovaným místem se pohybovala mezi 55 a 65 km/h, což je vyšší rychlost, než při jaké dokázal sklon trati vyrovnat účinky boční síly.

Rozdělení kvílivého hluku na hluk od okolku („flanging noise“) a od temene kolejnice („squeal noise“) proběhlo na základě empirického odvození z frekvenční analýzy. Autoři stanovili hluk od okolku jako širokopásmový (tj. řádově od stovek až po tisíce Hz), překračující hladinu akustického tlaku 70 dB. Hluk od temene byl vnímán jako tonální (tj. vyskytující se při specifických frekvencích 3 150 Hz, 4 000 Hz a 8 000 Hz), ale při vyhodnocování bylo bráno v potaz pouze pásmo od 800 do 6 300 Hz.

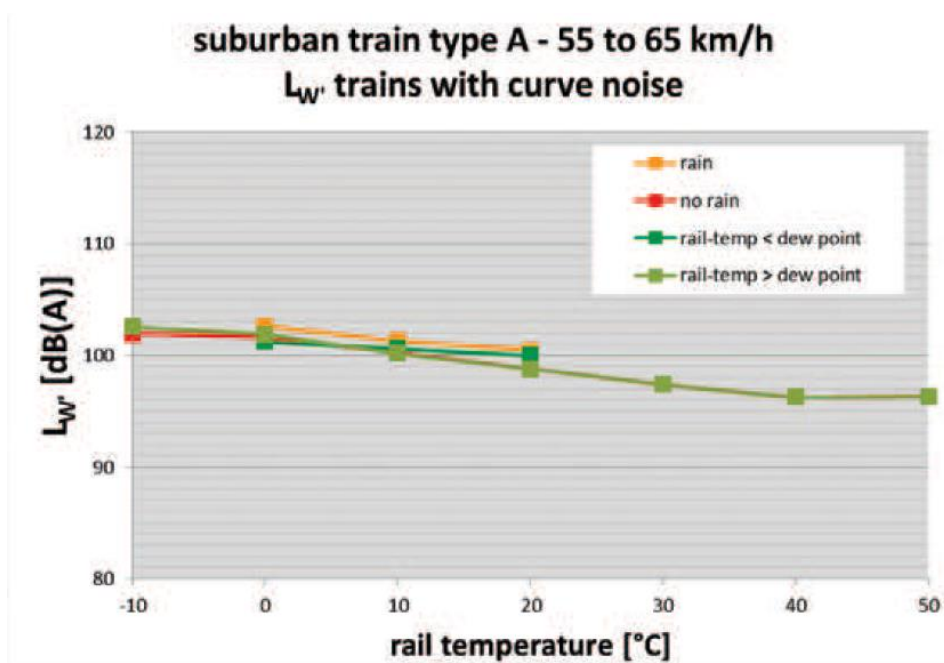
Získané výsledky týkající se teploty kolejnice jsou zobrazeny na Obr. 2-7, Obr. 2-8 a Obr. 2-9. Autoři dělili data do 4 skupin: záznamy s deštěm (oranžově); záznamy bez deště (červeně); záznamy, kdy byla teplota kolejnice nižší než teplota rosného bodu (tmavě zeleně) a záznamy, kdy byla teplota kolejnice vyšší než teplota rosného bodu (světle zeleně).



Obr. 2-7 Frekvence výskytu kvílivého hluku od temene v závislosti na teplotě kolejnice



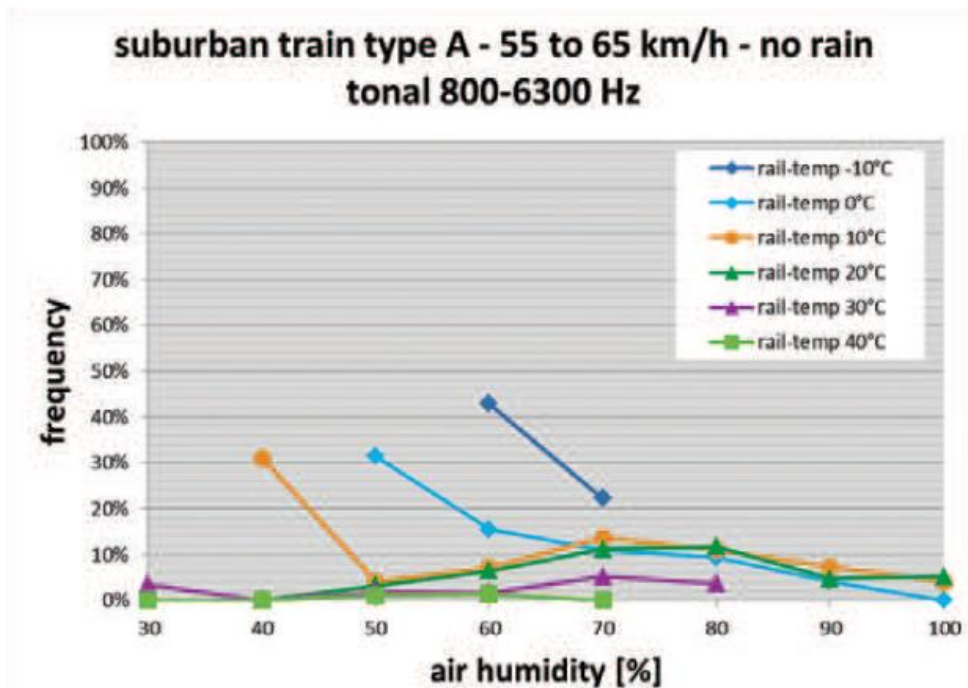
Obr. 2-8 Frekvence výskytu kvílivého hluku od okolku v závislosti na teplotě kolejnice



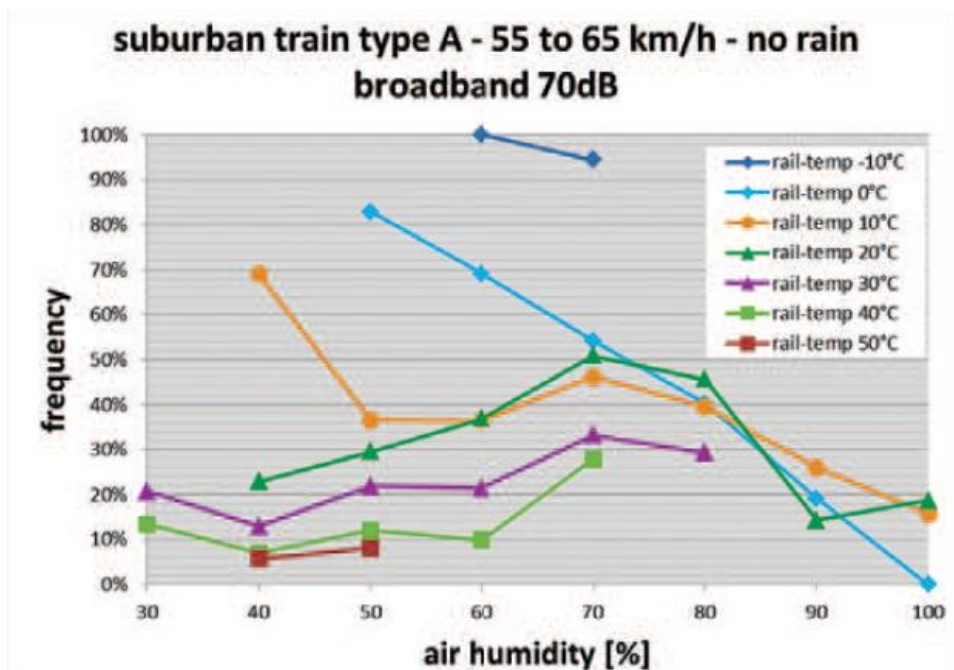
Obr. 2-9  $L_w$  Hladina akustického výkonu kvílivého hluku v závislosti na teplotě kolejnice

Z Obr. 2-7 a Obr. 2-8 je zřejmé, že frekvence výskytu kvílivého hluku se obecně se zvyšující teplotou kolejnice snižuje. Tento efekt je výraznější u hluku od okolku a zároveň lze u něj pozorovat lokální maxima frekvencí výskytu při teplotách mezi 10 a 20 °C. Klesající trend závislosti hladiny akustického výkonu na teplotě kolejnice ukazuje Obr. 2-9. Podle autorů se průměrné hodnoty teploty vzduchu a teploty kolejnice mírně lišily, ale jejich celkové efekty jsou srovnatelné.

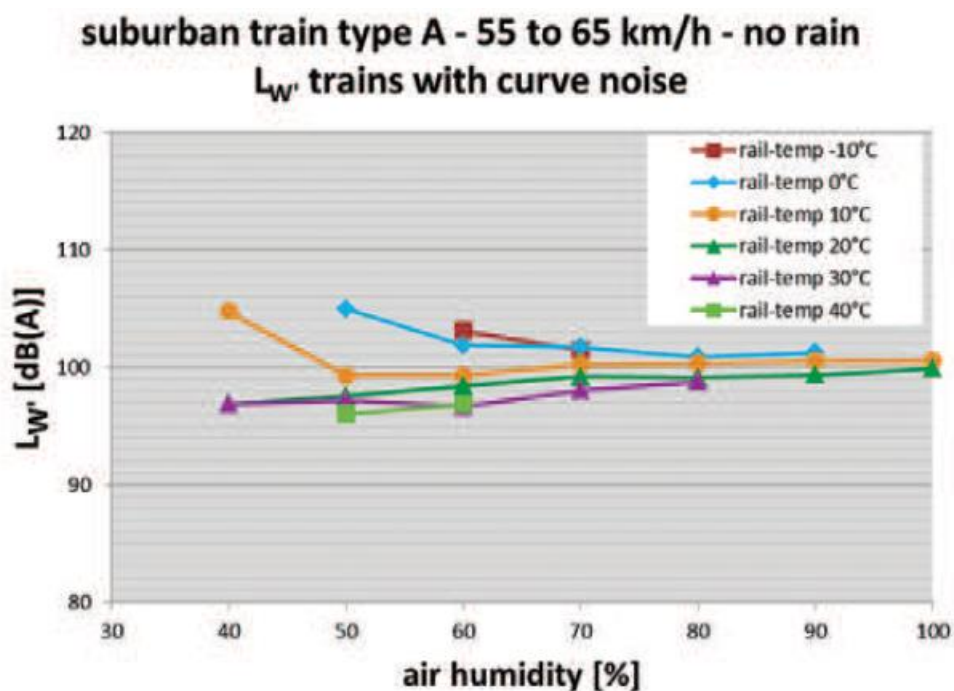
Záznamy obsahující déšť mají menší frekvenci výskytu pro oba typy kvílivého hluku, s tím, že největšího efektu déšť dosahuje při teplotách od 0 do 20 °C. Při pohledu na data s deštěm a data, kdy byla teplota kolejnice pod rosným bodem si lze všimnout, že tyto jevy mají na frekvenci výskytu podobný účinek. Nicméně pro hladinu akustického výkonu při dešti platí, že je o něco vyšší, než když byla kolejnice „orosená“.



Obr. 2-10 Frekvence výskytu kvílivého hluku od temene v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu



Obr. 2-11 Frekvence výskytu kvílivého hluku od okolku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu



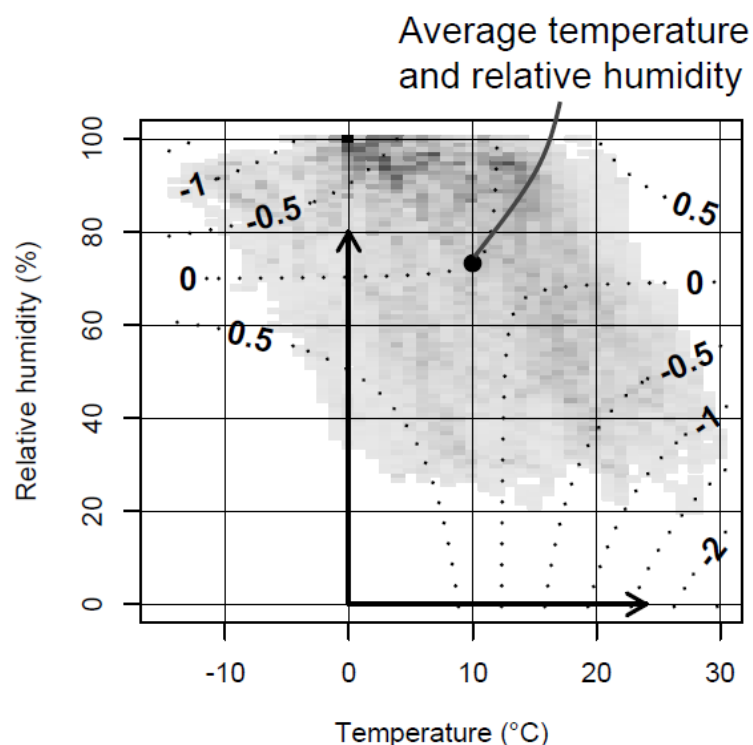
Obr. 2-12 A Hladina akustického výkonu kvílivého hluku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu

Obr. 2-10, Obr. 2-11 a Obr. 2-12 ukazují vliv vlhkosti vzduchu na zaznamenaný kvílivý hluk. Barevně jsou rozlišeny různé úrovně teplot v rozmezí od -10 do 40 °C. Na frekvencích výskytu lze pozorovat lokální maxima při vlhkostech od 60 do 70 %. Zajímavé je, že pro data s teplotami do 10 °C frekvence výskytu hluku se snižující se vlhkostí strmě stoupá, ale nad 10 °C je tento trend přesně opačný, tj. frekvence výskytu s nižší vlhkostí klesá. Závislost hladiny akustického výkonu na vzdušné vlhkosti je celkově mírně rostoucí a vykazuje podobnou změnu trendu s ohledem na teplotu jako frekvence výskytu.

[19] ERIKSSON, Olle, Peter TORSTENSSON, Astrid PIERINGER, Rickard NILSSON, Martin HÖJER, Matthias ASPLUND a Anna ŚWIERKOSKA. Statistical analysis of curve squeal based on long-term onboard noise measurements. In: *21st Nordic Seminar on Railway Technology* [online]. Tampere, 2022 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1678532&dswid=-5985>

Eriksson a kol. prezentovali výsledky z měření kvílivého hluku na zelené lince Stockholmského metra. Monitorovací systém byl však v tomto případě tzv. „on-board“, což znamená instalovaný přímo na palubě vozidla. Spolu s hlukovým modulem bylo vozidlo vybaveno i GPS pro určení rychlosti a polohy. Stanovené podmínky pro zařazení hluku jako kvílivého byly: lokace vozidla v oblouku (o poloměru maximálně 900 m) nebo v kruhovém úseku (o délce více než 50 m); hladina akustického tlaku alespoň 95 dB a zároveň vnitřní kolo přesahující svou hladinou to vnější o minimálně 3 dB(A); časový úsek nejméně 0,5 sekundy nepřetržitého kvílivého hluku.

Data byla sbírána dvěma vozidly od ledna 2019 do listopadu 2021 (tj. 33 měsíců) v celkovém počtu 143 oblouků a za toto období bylo zaznamenáno 379 776 průjezdů těmito oblouky. Teplota a vlhkost vzduchu byly měřeny separátně meteostanicí na letišti Stockholm-Bromma.



Obr. 2-13 Výskyt kvílivého hluku (šedě) v závislosti na teplotě a vlhkosti okolního vzduchu

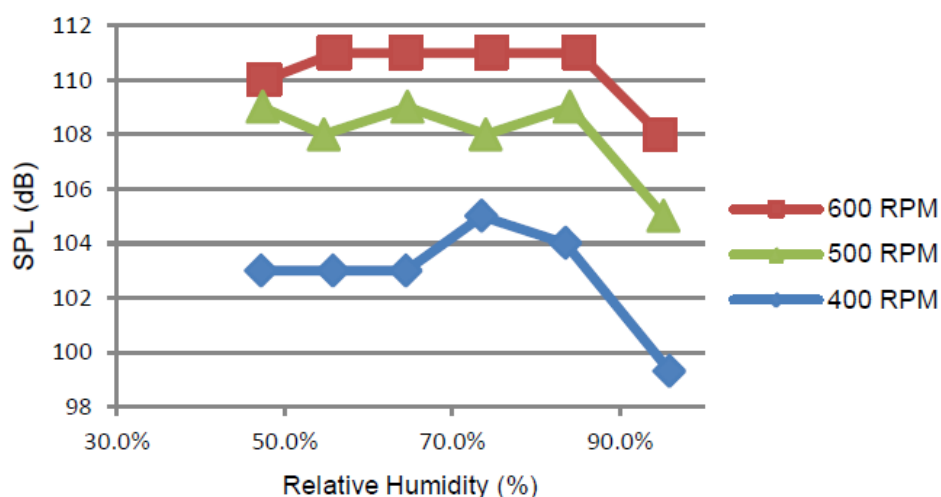
Výsledky výzkumu týkající se povětrnostních podmínek zobrazuje Obr. 2-13. Průjezdy, ve kterých byl kvílivý hluk zaznamenán jsou vyznačeny šedými čtverečky, tmavší odstín znamená více průjezdů. Autoři také počítali regresní model výskytu kvílivého hluku, v němž byly zahrnuty vlivy konkrétního vozidla, broušení kolejnic a teplota a vlhkost vzduchu. Výsledky tohoto modelu znázorňují tečkované čáry spolu s hodnotami pravděpodobnosti výskytu kvílivého hluku. Právě podle tohoto modelu lze říci, že teplota cca 10 °C je hraniční pro trend závislosti výskytu hluku na vlhkosti vzduchu. Nad 10 °C tedy pozorujeme rostoucí výskyt hluku se stoupající vlhkostí a pod 10 °C je tomu přesně naopak.

Dále z výzkumu vyplývá, že pro oblouky o poloměru menším než 600 m se pravděpodobnost výskytu kvílivého hluku zvyšuje se snižujícím se rádiusem oblouku. Měření dvou různých vozidel ukázalo, že tendence generovat kvílivý hluk silně závisí i na vozidle samotném. Nebyla nalezena žádná významná korelace mezi rychlostí vozidla a výskytem kvílivého hluku, ale bylo prokázáno, že pravděpodobnost jeho výskytu se zvyšuje po broušení kolejnic.

[20] LIU, X., et al. *Investigation about the effect of angle of attack and relative humidity on wheel squeal* [online]. Australia: Proceedings of ACOUSTICS, 2011 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: [https://acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/AAS2011/papers/p79.pdf](https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p79.pdf)

Liu a kol. zkoumali vliv úhlu náběhu, rychlosti a vlhkosti na kvílivý hluk v laboratorních podmínkách. Zkušebním přístrojem bylo dvoudiskové testovací zařízení, které funguje na principu odvalování kotouče s menším průměrem po kotouči s větším průměrem. Oba disky jsou poháněny elektromotory, takže lze kontrolovat jejich vzájemnou rychlost a skluz. Zároveň lze i nastavit přítláčnou sílu disků, která simuluje reálné zatížení kontaktu. Nastavení úhlu náběhu probíhá vyosením jednoho nebo obou z disků. Tento úhel způsobuje vznik bočních skluzových sil a tím simuluje zakřivení traťového oblouku. Vlhkost byla v laboratoři regulována mezi 45 a 95 % soustavou zvlhčovač a odvlhčovač vzduchu.

Z obdržných výsledků plyne, že s rostoucím úhlem náběhu roste i hladina kvílivého hluku. Největší efekt má úhel od 0 do 6 miliradiánů a další navyšování už přinese pouze malé zvýšení hladiny hluku. S vyšším úhlem náběhu se hluk nicméně stává více tonálním. Vliv rychlosti na kvílivý hluk byl v tomto testu prokazatelný, tj. při otáčkách disků  $100 \text{ min}^{-1}$  byla maximální hladina hluku okolo 85 dB, ale při  $700 \text{ min}^{-1}$  už byla okolo 115 dB.



Obr. 2-14 Závislost hladiny akustického tlaku kvílivého hluku na relativní vlhkosti vzduchu pro různé otáčky testovacích disků

Z Obr. 2-14 je patrné, že relativní vlhkost neměla v tomto experimentu na hladinu akustického tlaku velký vliv až do bodu, kdy vlhkost přesáhla hodnotu cca 85 %. Za tímto místem je vidět výrazný pokles hladiny hluku, který si autoři vysvětlují jako důsledek vody vysrážené v místě kontaktu. Ta vytvoří spolu s kontaminanty tenký film, který může významně ovlivnit třecí vlastnosti.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Z rešeršní části práce věnující se vlivu povětrnostních podmínek na kvílivý hluk vyplývá, že všechny zkoumané vlivy mají určitý efekt na výsledný hluk. Těmito vlivy jsou zejména teplota kolejnice, vlhkost vzduchu, přítomnost deště a teplota rosného bodu. Je ale třeba vzít v potaz mnoho dalších parametrů (způsob měření, typ trati a vozu, rychlost apod.), které mohou měřený hluk zásadně ovlivnit.

V první řadě je důležitá samotná kvalifikace kvílivého hluku. Maly a kol. [18] provedl rozdělení na kvílivý hluk od okolku a od temene na základě terénní frekvenční analýzy. Dle této analýzy zařadil hluk od okolku do širokého frekvenčního pásma (tj. od stovek po tisíce Hz). Toto zařazení se ale vymyká např. publikaci Eadieho [16], který hluk řadí do pásma 5 000 až 10 000 Hz. Eriksson a kol. [19] zvolili odlišný přístup, který ke kvalifikaci hluku nevyužívá frekvenci, ale pouze hraniční hladinu akustického tlaku 95 dB. Díky on-board systému dokáže monitorovat hluk od každého z kol železničního dvoukolí zvlášť. Při znalosti mechanismu vzniku kvílivého hluku lze na základě rozdílu hluků od vnitřního a vnějšího kola určit, zda byl kvílivý hluk emitován. Liu [20] v laboratorních podmínkách sledoval frekvenční pásmo 500 až 5 000 Hz. Na základě analytického výpočtu předpověděl rezonanční frekvence testovacího disku, které při experimentu generovaly tonální kvílivý hluk od temene.

Velmi důležitým parametrem je metodologie měření. V publikaci Maleho [18] byl způsob měření hluku realizován stacionárním modulem dle normy DIN EN ISO 3095 umístěným v blízkosti trati. Eriksson [19] využil „on-board“ měření hluku a Liu [20] měřil hluk v laboratoři. Není tedy možné vzájemně porovnávat např. hodnoty hladin hluku z těchto výzkumů.

Další odlišností je rádius pojížděného oblouku, který je v publikaci [18] fixní (je sledován jeden konkrétní oblouk o poloměru 230 m), ale Eriksson [19] porovnává hluk ze 143 různých oblouků. Z toho mimo jiné vyplývá i různá průjezdová rychlost vozidel. Vliv rádiusu na kvílivý hluk je významný, zmiňují to [14], [19] a i [20], kde s rostoucím úhlem náběhu roste hladina hluku. Vzhledem k malému poloměru oblouku sledovaného v této práci se dá očekávat, že hlukové projevy budou četnější než ty, které popisuje např. Maly [18].

Naproti tomu na vlivu rychlosti se informační zdroje neshodnou. Thompson [14] uznává vliv rychlosti, ale zároveň prezentuje 2 mechanismy, z nichž jeden stoupající rychlostí redukuje kvílivý hluk a druhý ho naopak zesiluje. Eriksson [19] žádnou významnou korelaci mezi kvílivým hlukem a rychlostí nezjistil. Liu [20] v laboratorních podmínkách naopak prokázal vliv rychlosti (resp. otáček disků), viz. Obr. 2-14.

Z hlediska studovaných povětrnostních podmínek nabízí nejpodrobnější vhléd článek Maleho [18]. Z publikace nevyplývá, kde byla umístěna meteostanice zaznamenávající teplotu vzduchu, vlhkost vzduchu a dešť. Z rozdělení dat ale vyplývá, že byla měřena zvlášť teplota vzduchu a zvlášť teplota kolejničky, díky čemuž pak byli autoři schopni dopočítat teplotu rosného bodu. Za definující vliv považovali autoři teplotu kolejničky a prokázali, že ve všech případech s rostoucí teplotou obecně klesá jak frekvence výskytu hluku, tak hladina akustického výkonu. V případě frekvence výskytu hluku bylo podstatné rozdělení dat na základě přítomnosti či nepřítomnosti deště a teploty kolejničky nad nebo pod teplotou rosného bodu. Všechny čtyři skupiny se zejména při nízkých teplotách vyznačují velmi rozdílnou frekvencí výskytu. Zajímavé je, že toto rozdělení nemá téměř žádný vliv na hladinu akustického výkonu, která zůstává v rámci cca 3 dB pro všechny skupiny totožné. Z výzkumu vyplývá, že na závislost hluk – vlhkost vzduchu má velký vliv hraniční teplota cca 10 °C, která obrací trend této závislosti (viz. např. Obr. 2-10). Tato změna trendu ale platí jen pro hodnoty vlhkosti do 70 %. Nad 70 % se zdá být trend pro všechny teploty obdobný a sice s vyšší vlhkostí se frekvence výskytu hluku snižuje, ale hladina akustického výkonu zvyšuje. Stejný paradox potvrzuje i výzkum Erikssona [19], žádný z autorů ale nevysvětluje jeho původ. Naopak laboratorní výsledky Lia [20] říkají, že za hranicí vlhkosti 85 % nastává prudký pokles hladiny hluku (Obr. 2-14), což je v rozporu s Malym [18], u kterého za touto hranicí vlhkosti žádná významná změna nenastala (Obr. 2-12). Vysvětlením může být například to, že Maly měří v reálném prostředí a zaznamenává A hladinu akustického výkonu, zatímco Liu zaznamenává v laboratorním prostředí hladinu akustického tlaku. Z článku Lia také nevyplývá, při jaké teplotě měření probíhalo.

## 3.2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je stanovení vlivu provozních podmínek na hlukový projev tramvaje projíždějící traťovým obloukem o malém poloměru ve smyčce Brno-Komín. Práce má za úkol nalézt spojitosti a trendy mezi povětrnostními podmínkami (teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a přítomnost deště) a kvilivým hlukem (resp. jeho hladinou akustického tlaku, dobou trvání a četností projevu). Do analýzy vstupují mimo jiné i data identifikující konkrétní projíždějící vůz, dalším výsledkem tedy bude rozlišení hlučnosti jednotlivých tramvají. Tento výstup může dále posloužit k vytipování nevyhovujících vozidel, a tím ke zkvalitnění tramvajové dopravy v Brně.



## 4 MATERIÁL A METODY

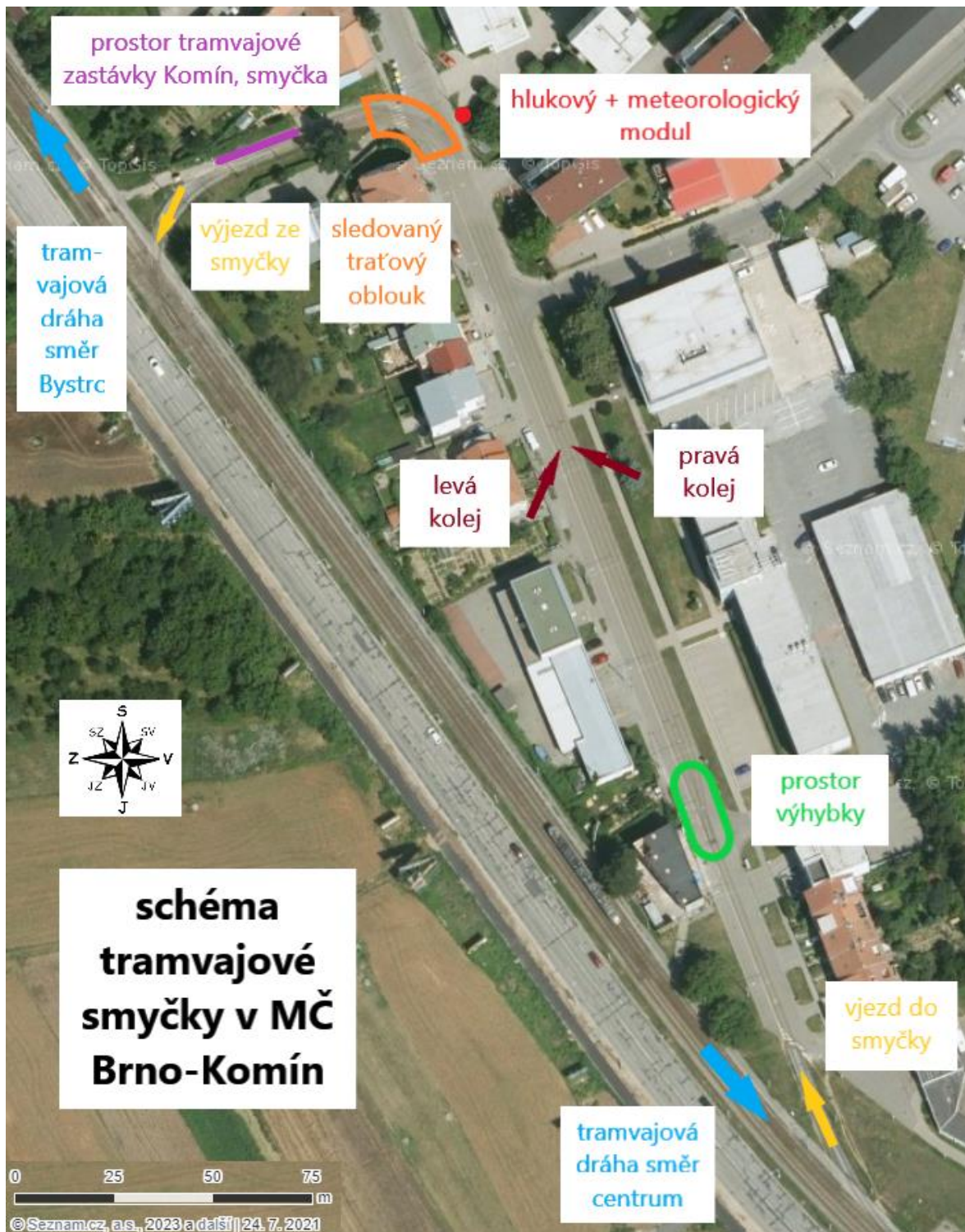
### 4.1 Materiál

Materiálem vstupujícím do analýzy jsou datové soubory, obsahující informace o datumu, čase, emitovaném hluku, projíždějícím vozidle, projížděné koleji a povětrnostních podmínkách. Tyto soubory jsou sestaveny z dat získaných pomocí tří nezávislých modulů.

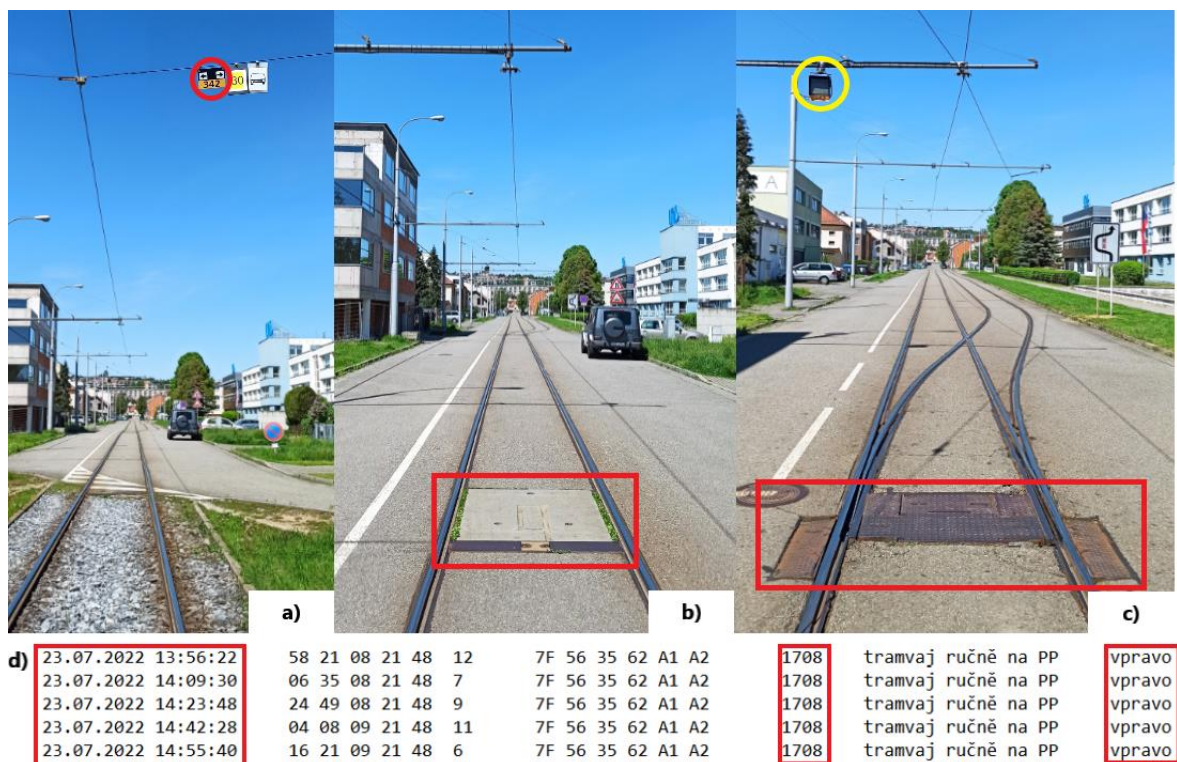
Celá měřicí soustava (viz. Obr. 4-1) je umístěna v prostoru tramvajové smyčky v městské části Brno-Komín. Tramvaj přijíždí do smyčky ve směru žluté šipky v pravém dolním rohu a projíždí přes výhybku (vyznačena zeleně), na které si řidič volí mezi pravou a levou kolejí. Dále pokračuje po jedné z nich až k prvnímu oblouku, kde se obě koleje opět sbíhají. Tento oblouk (oranžově) je předmětem hlukového měření. Hlukový a meteorologický modul (červeně) je umístěn v bezprostřední blízkosti oblouku. Následně přijíždí tramvaj do prostoru zastávky Komín, smyčka (fialově). Odtud tramvaj vyjíždí ve směru žluté šipky druhým obloukem ven ze smyčky na hlavní trať směr centrum.

Prvním modulem, který na vjezdu do smyčky tramvaj zaregistruje, je řídicí jednotka výhybky. Tato jednotka vzdáleně komunikuje s jednotkou v tramvaji a pro tento výzkum poskytuje data o využití pravé či levé koleje a také identifikační číslo tramvaje. Obr. 4-2 ilustruje v abecedním pořadí jednotlivé části soustavy výhybky, tak jak následují při průjezdu tramvaje za sebou. Řídicí jednotka, která poskytuje výše zmíněné informace, se nachází na Obr. 4-2 b) (zvýrazněna červeně) a je umístěna pod úrovní komunikace. Obr. 4-2 d) prezentuje příklad datového souboru obdržného ze systému řídicí jednotky výhybky. První červený sloupec značí datum a čas komunikace tramvaje s výhybkou, druhý červený sloupec odpovídá identifikačnímu číslu tramvaje a poslední červený sloupec zaznamenává postavení jazyků výhybky (resp. následně využitou kolej) při průjezdu tramvaje.

Za výhybkou, na konci rovného úseku trati, se nachází sledovaný oblouk, v jehož blízkosti je umístěn hlukový a meteorologický modul (viz. Obr. 4-3 a)). Oba moduly jsou integrovány ve společné skříni, která se nachází zhruba ve výšce 4 m nad zemí, na sloupu trolejového vedení, jak ukazuje Obr. 4-3 b). Na Obr. 4-3 c) lze vidět detail skříně s moduly včetně popisu vnějších komponent. Horizontální vzdálenost modulu od středu traťového oblouku je cca 11 m (viz. Obr. 4-4). Měření hluku neprobíhá podle stanovených hygienických norem a vzdálenost mikrofónu od trati není tudíž normalizovaná.

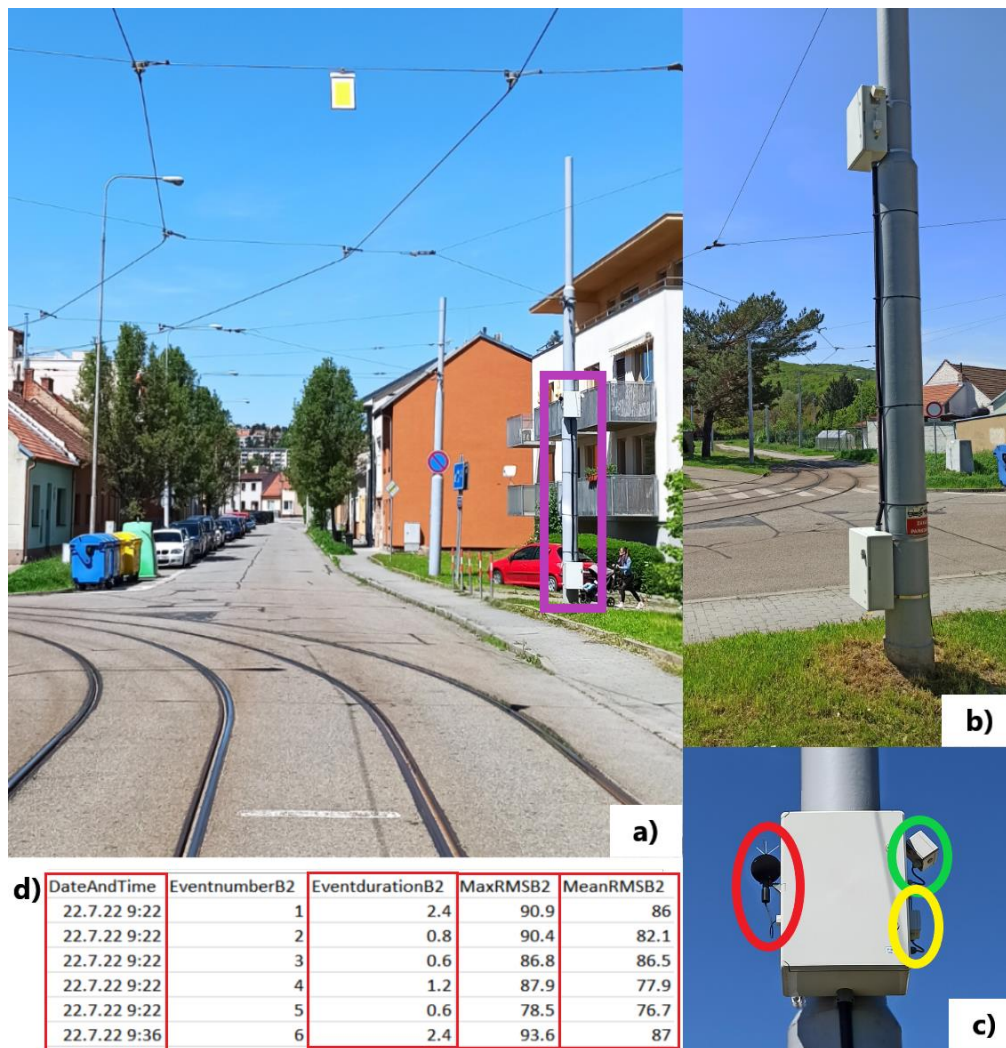


Obr. 4-1 Letecký pohled na tramvajovou smyčku v MČ Brno-Komín a její schématický popis



Obr. 4-2 Soustava výhybky ve smyčce Brno-Komín, a) návěstidlo označující elektrickou výhybku (zvýrazněno červeně), b) řídicí jednotka výhybky (červeně), c) mechanismus výhybky (červeně) a elektrické zablokování výhybky (žlutě), d) příklad dat z řídicí jednotky výhybky

Hlukový modul má na starost záznam průměrné hladiny akustického tlaku, maximální hladiny akustického tlaku a dobu trvání kvílivého hluku. Modul rozděluje hluk do 3 frekvenčních pásem, která byla vytyčena na základě terénních testů na tramvajové dráze v Brně a popsána v diplomové práci Navrátila [21]. Pro každé pásmo je stanovena prahová hodnota hladiny akustického tlaku, po jejímž překročení se hluk zaznamená. Zároveň musí být trvání tohoto hluku minimálně 0,3 s. Prvním pásmem je frekvence 400 až 2 000 Hz, která odpovídá kvílivému hluku od temene. Prahová hodnota hladiny hluku je zde určena jako 70 dB. Druhé pásmo má frekvenci 4 000 až 12 500 Hz a reprezentuje kvílivý hluk od okolku. Prahová hodnota hladiny hluku je nastavena na 60 dB. Posledním pásmem je „široké pásmo“, které zahrnuje všechny slyšitelné frekvence s prahovou hodnotou záznamu 80 dB. Vzorek dat zpracovaných hlukovým modulem je na Obr. 4-3 d). První červený sloupec poskytuje informace o datu a čase projevu hluku, druhý o trvání hluku v sekundách, třetí o maximální efektivní hladině akustického tlaku v decibelech a poslední o průměrné efektivní hladině akustického tlaku také v decibelech.



Obr. 4-3 Umístění hlukového a meteorologického modulu, a) měřený oblouk a sloup s moduly (zvýrazněn fialově), b) detail sloupu – v pozadí zastávka Komín, smyčka, c) detail skříně s moduly – mikrofon (červeně), dešťový senzor (zeleně), snímač teploty a vlhkosti vzduchu (žlutě) [21], d) příklad dat z hlukového modulu

Druhým modulem ve společné skříně na Obr. 4-3 c) je meteorologický modul, který zaznamenává informace o teplotě vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu a přítomnosti či nepřítomnosti deště. Tento modul spolupracuje s hlukovým a při vzniku záznamu hlukového projevu doplní do výstupního souboru data s povětrnostními podmínkami zmíněnými výše. Data z meteorologického modulu je možné vidět na Obr. 4-5 v posledních třech sloupcích. Třetí sloupec zprava popisuje teplotu vzduchu ve °C, druhý zprava relativní vlhkost vzduchu v % a první zprava přítomnost deště. Dešťový senzor vyhodnocuje dešť pouze binárně, tj. pracuje s určitou citlivostí a pokud intenzita deště překoná stanovenou hranici, je do datového souboru zapisováno číslo „100“. Jakmile intenzita deště klesne pod tuto hranici, je do souboru zapisována „0“.



Obr. 4-4 Vzdálenosti v měřeném oblouku, červeně vyznačen rádius pravé koleje (cca 21 m), modře vzdálenost hlukového modulu od středu oblouku (cca 11 m)

Sledovaný traťový oblouk je i se svým poloměrem zakřivení pravé koleje zvýrazněn červeně na Obr. 4-4. Rychlost v tomto oblouku byla v době měření omezena drážními předpisy na 15 km/h [22]. Oblouk je zvláštní tím, že se v jeho průběhu sbíhá pravá a levá kolej (viz. také Obr. 4-3 a) a b)) a obě koleje v něm tudíž mají rozdílný rádius. Tato práce se soustředí zejména na pravou kolej, jelikož z analýzy datového souboru vyplývá, že byla v době monitorování využívána dominantně.

Vzorek finální verze datového souboru exportovaného do MS Excel (Microsoft Excel) je na Obr. 4-5. Jelikož řídicí jednotka výhybky spadá pod správu Dopravního podniku města Brna, je zcela nezávislá na modulu umístěném v oblouku a má tedy i vlastní časomíru. Při skládání dat do jednoho datového souboru bylo proto ještě nutné synchronizovat časy obou jednotek tak, aby si zaznamenané události navzájem časově odpovídaly.

DateAndTime	Eventnumber	Eventduration	MaxRMS	MeanRMS	TramNumber	SwitchOperation	Note	Temperature	Humidity	Rain
22.07.2022 9:22	1	2.4	90.9	86	1716	ručně na PP	vpravo	29.3	54.4	0
22.07.2022 9:22	2	0.8	90.4	82.1	1716	ručně na PP	vpravo	29.3	54.4	0
22.07.2022 9:22	3	0.6	86.8	86.5	1716	ručně na PP	vpravo	29.4	54.7	0
22.07.2022 9:22	4	1.2	87.9	77.9	1716	ručně na PP	vpravo	29.4	54.7	0
22.07.2022 9:22	5	0.6	78.5	76.7	1716	ručně na PP	vpravo	29.4	54.7	0
22.07.2022 9:36	6	2.4	93.6	87	1716	ručně na PP	vpravo	33.1	44.6	0

Obr. 4-5 Příklad výsledného datového souboru

Finální datový soubor vstupující do analýzy provozních vlivů obsahuje 1894 záznamů o 11 parametrech, z nichž 9 (na Obr. 4-5 označeny červeně) je relevantních pro analýzu. Tento soubor pokrývá období od 22. července 2022 do 19. srpna 2022 s výjimkou 5 dní, kdy byl hlukový a meteorologický modul nefunkční. Záznamy týkající se hluku mapují pouze kvilivý hluk od temene (tj. frekvence 400 až 2 000 Hz, práh hladiny hluku 70 dB) a zbývající dvě frekvenční pásma nejsou součástí této analýzy.

## 4.2 Metody

Tato podkapitola popisuje úpravy datových souborů před jejich použitím v analýze. Schéma těchto úprav znázorňuje Obr. 4-6. Velká písmena ve čtvercích se zaoblenými rohy upřesňují, o jaký typ souboru se jedná a černá čísla pod nimi říkají, kolik záznamů se v dané verzi souboru právě nachází. Tlusté čáry s šipkou na konci spojují různé verze souborů a tenké čáry odkazují na využití souborů v jednotlivých obrázcích a tabulce. Červeně jsou vypsány provedené úpravy a číslo v závorce informuje o počtu vyřazených záznamů v daném kroku. Příčná zelená čára odděluje sekci diagramu s datovými soubory a jejich úpravami od sekce prezentující seznam výstupních obrázků a tabulky.

Veškerá práce s daty včetně jejich pozdějšího grafického znázornění jsou realizovány v softwaru MATLAB R2022b. Tento program byl zvolen kvůli velké variabilitě funkcí potřebných pro práci s objemnými daty (zejména s velkými maticemi), dále kvůli dobré algoritmickečnosti výpočtů a také kvůli široké škále možností vizualizace dat.

Finální datový soubor popisovaný v podkapitole 4.1 je dále označován jako hlukový a na Obr. 4-6 je znázorněn písmenem „H“. Hlukový soubor je syntézou pěti menších souborů (označeny „h1“ až „h5“), ze kterých každý pokrývá část mapovaného období. Při tomto sloučení došlo na okrajových místech podsouborů k časovému překrytí dat, a tudíž se konkrétně 24 záznamů ve výsledném souboru opakovalo. Po exportu datového souboru z MS Excel do MATLABu bylo nutné tato data vyhledat a odstranit (Obr. 4-6 a)).

Jelikož zaznamenaný kvilivý hluk se při průjezdu tramvaje obloukem neobjevuje kontinuálně, ale pouze v jistých oddělených intervalech, nacházelo se v hlukovém souboru mnoho záznamů popisujících jeden průjezd. Pro lepší přehlednost a práci s daty byly tyto záznamy sjednoceny do jednoho, který jako celek vypovídá o konkrétním průjezdu tramvaje. Kritériem pro sjednocení byl stanoven maximální časový rozdíl 1 minuty mezi záznamy. V rámci 1 minuty by měla být daná tramvaj schopna opustit oblouk a zároveň žádná další tramvaj by neměla v takto krátké době do oblouku najet. Všechny záznamy s kratším časovým rozestupem než 1 minuta tak byly sloučeny do jednoho. Pokud této podmínce záznam nevyhovoval, byl zakladatelem dalšího časového bloku, který znamenal další průjezd tramvaje. Hodnoty jednotlivých sloučených parametrů byly počítány následovně. Za datum a čas hluku byla vzata hodnota času prvního záznamu z bloku. Celková doba trvání hluku byla dána součtem všech dob trvání jednotlivých záznamů. Maximální efektivní hladina hluku byla získána výběrem nejvyšší hodnoty této hladiny ze všech záznamů v bloku. Průměrná efektivní hladina hluku byla stanovena kvadratickým průměrem hladin jednotlivých záznamů. Teplota a relativní vlhkost vzduchu byly vyjádřeny aritmetickým průměrem příslušných hodnot z bloku. Číslo tramvaje, volba koleje a přítomnost deště se během časového bloku neměnily a hodnoty těchto parametrů byly přejaty z prvního záznamu v bloku. Celkově se tak z 1870 záznamů stalo 668 záznamů (Obr. 4-6 b)), z nichž každý odpovídá jednomu průjezdu tramvaje.

Při vykreslení dat byly zjištěny 4 záznamy s nadměrně vysokými maximy hladiny hluku. Všechna měla totožnou velikost 183,6 dB, přičemž druhé nejvyšší maximum mělo hodnotu až 110 dB. Záznam takto vysoké hodnoty hladiny hluku je nepravděpodobný a je přičítán chybě hlukového modulu. Tyto záznamy byly proto vyňaty z analýzy (Obr. 4-6 c)).

Dalším problémem, se kterým se měření hluku potýkalo, je ovlivnění záznamu jinými zdroji hluku. Konkrétně se v případě smyčky v Komíně jedná o hluk emitovaný tramvají při průjezdu v pořadí druhým traťovým obloukem, který se nachází na výjezdu ze smyčky (na Obr. 4-1 je vyznačen žlutou šipkou v levém horním rohu). Vyhledání záznamů, které mohly mít potenciálně zdroj hluku v druhém oblouku, proběhlo s využitím znalosti jízdního řádu zastávky Komín, smyčka. Prostor zastávky (na Obr. 4-1 zvýrazněn fialově) se nachází mezi prvním (sledovaným) a druhým traťovým obloukem. Tramvaj tedy ihned po čase plánovaného odjezdu projíždí druhým obloukem. Kritériem pro vyhledání nežádoucích záznamů byl proto jejich časový údaj, tj. shodnost kalendářní minuty záznamu hluku s minutou odjezdu tramvaje dle jízdního řádu. Takovýchto záznamů bylo nalezeno a vyřazeno z analýzy celkem 11 (Obr. 4-6 d)).

Jak už bylo zmíněno v podkapitole 4.1, během monitorování oblouku byla téměř výhradně využívána pravá kolej. Počet zaznamenaných průjezdů po levé koleji byl pouze 8 a ve snaze zajistit totožné podmínky pro hlukovou analýzu byly tyto průjezdy odstraněny (Obr. 4-6 e)). Proměnná, které informovala o využití koleji obsahovala také kategorii „neutrál“, ze které není možné vyčíst informaci o volbě koleje. Záznamů s touto kategorií bylo nalezeno celkem 5 a byly také vyřazeny z analýzy (také Obr. 4-6 e)). V hlukovém souboru tedy zbyla v této proměnné jediná kategorie „vpravo“ a kvílivý hluk na levé koleji nebyl dále posuzován.

Z poznatků získaných v rešeršní části a také z posouzení dat v souboru vyplývá, že přítomnost deště významně snižuje produkovaný kvílivý hluk. V datovém souboru se nacházelo pouze 17 záznamů s deštěm a většina z nich se průměrnou hladinou hluku blíží dolní hranici 70 dB, která je potřebná pro to, aby záznam o hluku vůbec vznikl. Proto v rámci rovnocenných podmínek pro porovnávání hluků byla tato data z výsledného souboru vyňata (Obr. 4-6 f)). Vliv deště byl posuzován na základě vyloučených dat a datového souboru popsaného v následujícím odstavci separátně a popisují ho Obr. 5-6 a Obr. 5-7, jejichž datový původ lze dohledat na Obr. 4-6. Po aplikaci všech výše zmíněných filtrů klesl počet záznamů v hlukovém souboru z 668 na 623.

Nevýhodou souboru dat popisovaného do této doby je vlastnost, že kompletní záznam vznikne pouze při naplnění všech podmínek pro kvílivý hluk (viz. podkapitola 4.1). Tudiž např. informace o teplotě a vlhkosti vzduchu jsou zaznamenány pouze pokud je zaznamenán v danou chvíli i hluk. Vykreslení takovýchto dat na časovou osu pak přinese „skoky“ v průběhu teploty a vlhkosti, které dobře nevystihují tendence těchto veličin v čase. Podobný problém se týká i deště, který se v hlukovém souboru téměř nevyskytuje, jelikož při něm nebývají naplněny podmínky kvílivého hluku. Z těchto důvodů byl použit další datový soubor, který je produktem pouze meteorologického modulu. Ten ukládá údaje o teplotě, vlhkosti a přítomnosti deště každou minutu, nezávisle na přítomnosti hluku. Toto relativně husté vzorkování záznamů zajišťuje „spojitost“ zmíněných veličin v jejich grafickém zobrazení na časových osách, jak lze vidět např. na Obr. 5-4. Tento soubor je dále nazýván jako meteorologický a v diagramu na Obr. 4-6 je znázorněn písmenem „M“.

Třetím samostatným souborem, který je dále použit, je záznam dat z řídicí jednotky výhybky (viz. Obr. 4-2 d)). Část těchto dat sice vystupuje už v hlukovém souboru, zde jsou ale opět podmíněna přítomností hluku. Tzn. pokud tramvaj projede obloukem bez jakékoliv zvukového projevu, hlukový soubor o tomto průjezdu nedokáže podat žádnou informaci. Při hodnocení hlučností jednotlivých tramvají je nicméně zásadní porovnat průjezdy s hlukovým projevem a bez něj. Řídicí jednotka výhybky zaznamenává veškeré průjezdy tramvají nezávisle na jakýchkoliv parametrech, ale lze z ní získat pouze informace o čísle projíždějícího vozu a o datumu a čase průjezdu. Soubor dat z výhybky je dále zmiňován jako „výhybkový“ soubor a v diagramu na Obr. 4-6 je označen písmenem „V“. Počet záznamů obdržných z výhybky za období 23. červenec 2022 až 19. srpen 2022 byl 2047. Z datumu vyplývá, že časový interval mapovaný výhybkou je o den kratší oproti hlukovému souboru, který začíná datem 22. červenec 2022. Kvůli vzájemnému porovnávání souborů bylo tedy třeba tento rozdíl odstranit, a to zkrácením hlukového souboru o prvních 55 záznamů (Obr. 4-6 g)), během kterých se oba soubory časově nepřekrývaly.

Ze stejných důvodů bylo nutné i výhybkový soubor redukovat o určité části. První skupinou byly záznamy průjezdů tramvají s jinými evidenčními čísly, než které přijížděly do smyčky pravidelně v rámci jedné linky. Tyto tramvaje projížděly smyčkou sporadicky (maximálně 2x za celé sledované období) a neměly žádné záznamy v souboru s hlukem. V souboru výhybky se jednalo o 64 záznamů 48 různých tramvají a tato data byla z další analýzy vyřazena (Obr. 4-6 h)).

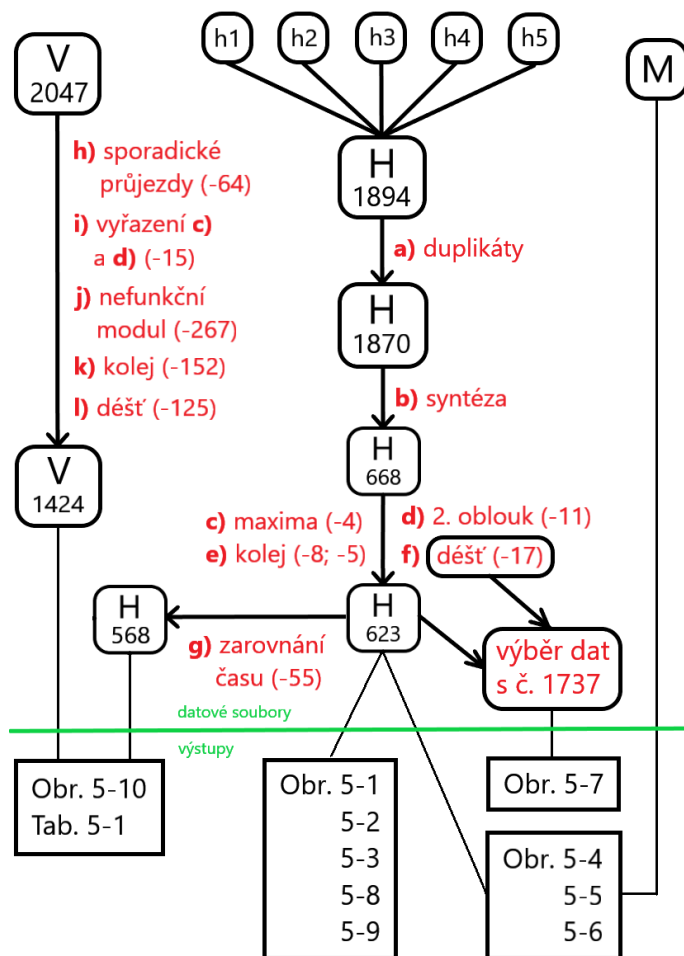
V následujícím kroku bylo nutné z výhybkového souboru odstranit průjezdy, které odpovídaly vyřazeným záznamům z původního hlukového souboru. Jednalo se o záznamy obsahující chybná maxima 183,6 dB a záznamy hluku z druhého traťového oblouku. V této sekci tak bylo odstraněno 15 záznamů (Obr. 4-6 i)).



Konec podkapitoly 4.1 se zmiňuje o faktu, že v době měření byl hlukový a meteorologický modul zhruba 5 dní nefunkční. Systém výhybky je nicméně autonomní, a proto data z ní obsahují i záznamy z těchto dní. Logickým krokem tedy bylo vyřazení 267 záznamů souboru výhybky z těchto 5 dní (Obr. 4-6 j)).

Z hlukového souboru byly odstraněny záznamy z levé koleje a záznamy s neurčitou kolejí „neutrál“ (Obr. 4-6 e)). Aby bylo možné hlukový a výhybkový soubor porovnávat, bylo nutné z výhybkového souboru také odstranit záznamy koleje s kategorií „levá“ a „neutrál“. Těchto záznamů bylo nalezeno a vyřazeno celkem 152 (Obr. 4-6 k)).

V poslední řadě bylo třeba se vypořádat se záznamy obsahujícími dešť, jelikož z hlukového souboru byly také vyňaty. Protože data z výhybky nenesou informaci o dešti, nejdříve byly z meteorologického souboru extrahovány časy, kdy pršelo a těm byly následně přiřazeny ekvivalentní záznamy z výhybky. Zároveň byl po skončení každého dešťového bloku nastaven 20minutový offset, během kterého senzor už nevykazoval přítomnost deště. Tento čas byl odhadnut jako čas potřebný k alespoň částečnému oschnutí kolejnic, tak aby přítomnost zbylé vody neovlivňovala emitovaný hluk a tím i výsledky analýzy. Dohromady bylo kvůli vlivu deště odstraněno 125 záznamů (Obr. 4-6 l)). Celkový počet záznamů v souboru výhybky se tak po všech úpravách snížil z původních 2047 na 1424.



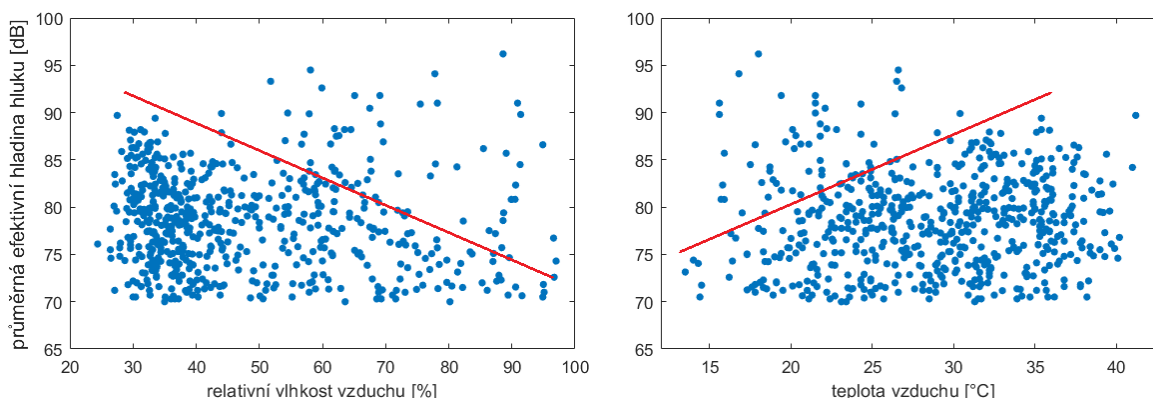
Obr. 4-6 Schématický diagram úprav výhybkového (V), hlukového (H) a meteorologického (M) souboru

## 5 VÝSLEDKY

Kapitola popisuje a graficky prezentuje vztahy mezi jednotlivými veličinami vystupujícími v datových souborech. První podkapitola se věnuje povětrnostním vlivům a jejich účinkům na atributy kvilivého hluku. Druhá podkapitola má za cíl zmapovat náchylnost jednotlivých tramvají k tvorbě kvilivého hluku a také porovnat hlučnost tramvají mezi sebou. Vstupními daty jsou protříděné záznamy, jejichž modifikace je popsána v podkapitole 4.2.

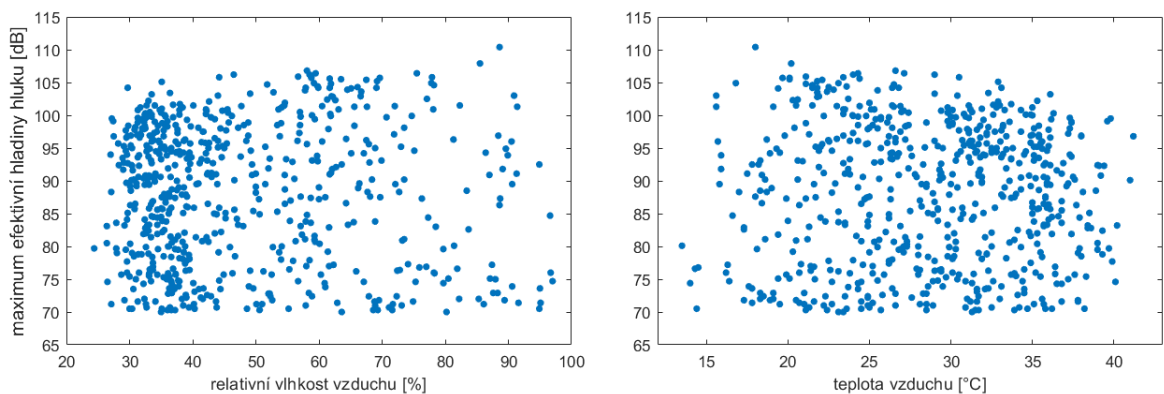
Na začátku je nutné podotknout, že zaznamenané hladiny hluku nejsou vážené, což způsobuje zkreslené vnímání hodnot decibelů. Práce se ale zabývá analýzou kvilivého hluku od temene, který se frekvenčně nachází v pásmu největší citlivosti lidského ucha [1], a tudíž nevážené hodnoty decibelů u tohoto typu hluku lze přibližně považovat za vážené A filtrem (viz. podkapitola 2.1).

### 5.1 Vliv teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu a přítomnosti deště na parametry hluku



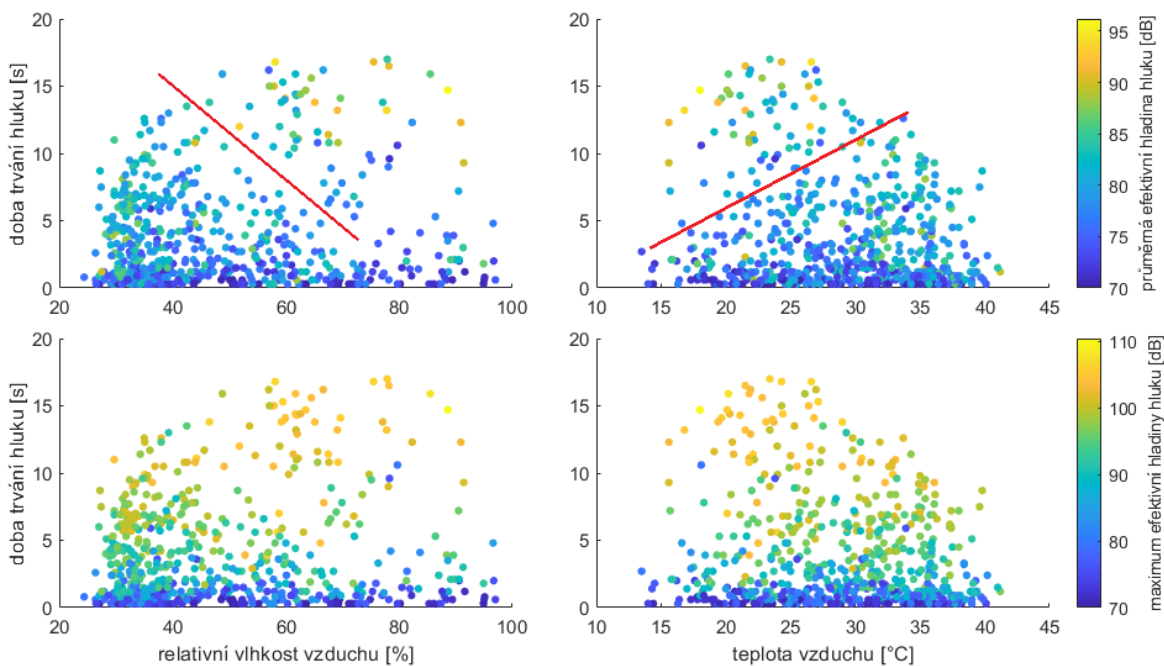
Obr. 5-1 Průměrná hladina hluku v závislosti na vlhkosti a teplotě vzduchu

Na Obr. 5-1 je zobrazen vztah mezi průměrnou hladinou hluku a vlhkostí vzduchu (vlevo), resp. teplotou (vpravo) vzduchu. Oba grafy jsou na základě rozložení dat rozděleny červenou čarou na dvě části. V levém grafu je pod čarou zřetelná sestupná tendence hladiny hluku, tak jak se vlhkost vzduchu zvyšuje. Průjezdy nad čarou se však tímto trendem neřídí a zachovávají si vysokou hladinu hluku i ve vyšších hodnotách vlhkosti. Situace v pravém grafu pod čarou je přesně opačná, tj. s nárůstem teploty roste i průměrná hladina hluku. Opět lze nad čarou pozorovat skupinu bodů, které trend nerespektují, a to zejména při teplotách nižších než 25 °C. V obou grafech si lze také všimnout, že data pod čarou se podél osy  $x$  nadržují v pásmu o konstantní šířce, ale že jejich variabilita v případě rostoucí vlhkosti klesá a v případě teploty roste.



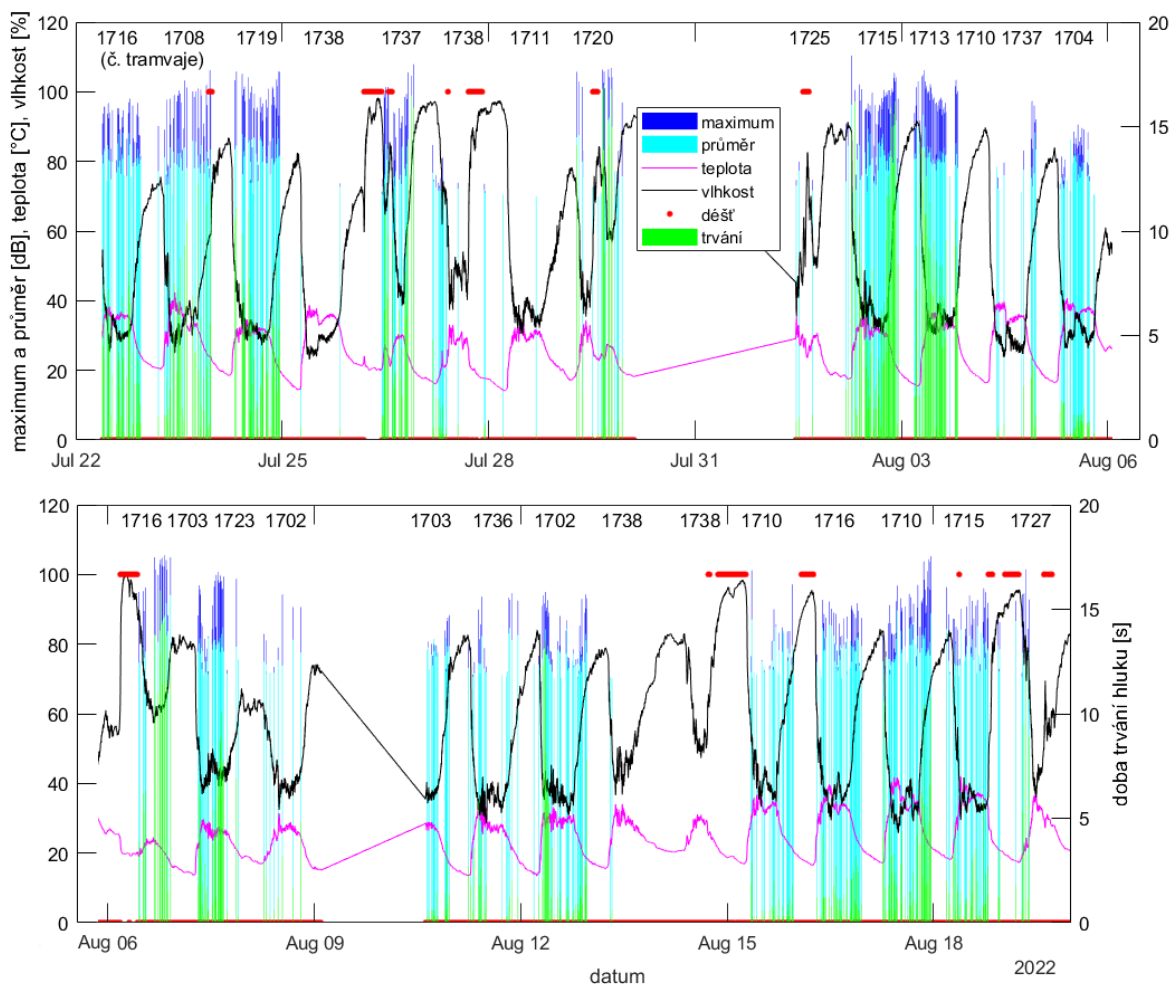
Obr. 5-2 Maximální hladina hluku v závislosti na vlhkosti a teplotě vzduchu

Souvislost mezi maximální hladinou hluku a vlhkostí vzduchu (vlevo), resp. teplotou (vpravo) vzduchu prezentuje Obr. 5-2. Oproti průměrné hladině hluku na Obr. 5-1 jsou data maximální hladiny hluku rovnoměrněji rozložená a není možné jednoznačně určit závislost tohoto parametru na vlhkosti nebo teplotě. To svědčí o tom, že hodnota maxima hluku je méně závislý parametr a jeho velikost je více náhodná než velikosti ostatních atributů hluku.



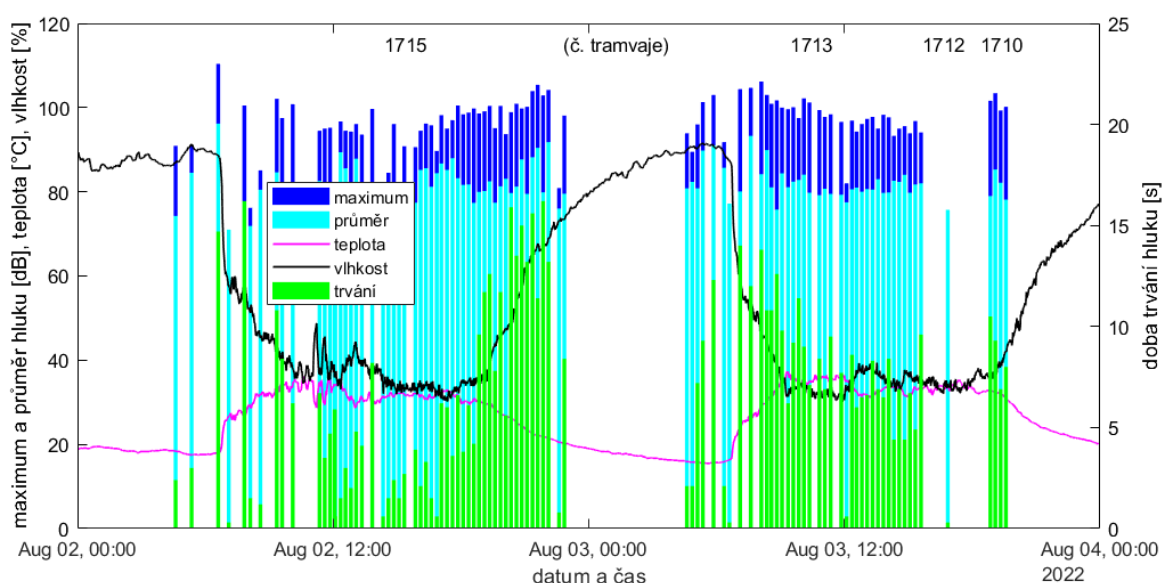
Obr. 5-3 Doba trvání kvilivého hluku v závislosti na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu, barevně je rozlišena velikost průměrné a maximální hladiny hluku

Obr. 5-3 ilustruje vztah mezi dobou trvání hluku a relativní vlhkostí vzduchu (levý sloupec), resp. teplotou vzduchu (pravý sloupec). V prvním řádku je barevně odlišena průměrná hladina hluku a v druhém maximum hladiny hluku. V případě vlhkosti v levém sloupci je z kumulace bodů pod červenou čarou patrné, že s jejím zvyšováním se trvání hluku zkracuje. Tento trend se zdá být platný minimálně do vlhkosti cca 70 %. Nicméně nad červenou čarou lze opět pozorovat skupinu bodů, která trend narušuje, a i přes vysoké hodnoty vlhkosti si udržuje také vysoké hodnoty trvání hluku. Naopak u teploty v pravém sloupci je závislost na době trvání pod červenou čarou lehce vzrůstající, ale opět se zde nad čarou nachází skupina bodů, která do trendu zasahuje. Na základě barevného odlišení bodů a vysokých hodnot doby trvání lze konstatovat, že obě skupiny bodů nad čarou, jak v grafu s vlhkostí, tak i s teplotou, mají velkou část dat společných. Dále lze také díky barevnému rozlišení říci, že s rostoucí dobou trvání se zřetelně zvyšuje maximum hladiny hluku (druhý řádek), ale pro průměrnou hladinu hluku tento trend není patrný (první řádek). Na všech čtyřech grafech lze vidět pás hodnot s velmi nízkým trváním hluku (zhruba do 2 s), který je nezávislý na vlhkosti nebo teplotě a vyznačuje se také nízkými hodnotami hladin hluku.



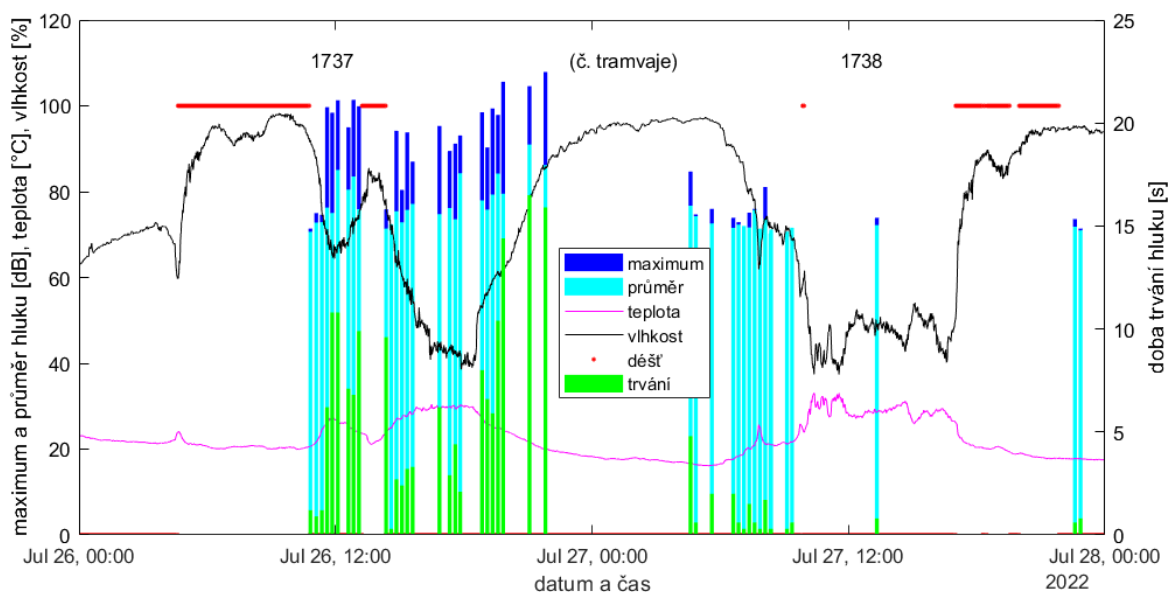
Obr. 5-4 Přehled všech sledovaných parametrů na časové ose za celé období

Na Obr. 5-4 lze vidět sloupcový graf ilustrující hlukové parametry a také vykreslené průběhy teploty a vlhkosti vzduchu přes celé sledované období. Červeně jsou zvýrazněny časy, ve kterých byl přítomen déšť. Osa y je rozdělena na levou a pravou část, kdy levá pokrývá maximální a průměrnou hladinu hluku, teplotu a vlhkost vzduchu a pravá část vyjadřuje dobu trvání hluku. V horní části grafu jsou přiřazeny čísla tramvají, které v dobu danou na časové ose obloukem projížděly. Z grafu jsou také patrná období, kdy hlukový a meteorologický modul nefungoval a to od 30. července do 1. srpna a od 9. do 10. srpna. Tento obrázek také vypovídá o náchylnosti jednotlivých tramvají ke kvílivému hluku. Lze si všimnout, že tramvaje č. 1715 a 1713 mají vyšší četnost projevů hluku než ostatní tramvaje a na druhé straně, že tramvaj č. 1738 nemá v grafu mnoho hlukových záznamů. Některé další jevy detailněji popisují Obr. 5-5 a Obr. 5-6, které vykreslují stejné parametry jako tento graf, pouze v kratším časovém období.



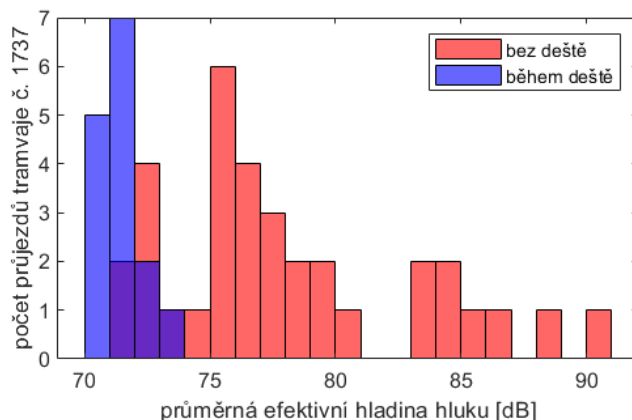
Obr. 5-5 Přehled všech sledovaných parametrů na časové ose v období mezi 2. a 4. srpnem

Hlukový projev tramvají č. 1715 a 1713 detailněji ukazuje Obr. 5-5. Z obrázku je dobře patrné, že v moment, kdy se začne vlhkost vzduchu zvyšovat z cca 40 na 80 % (2. srpna zhruba od 18 do 23 hodin), začne se značně prodlužovat i doba trvání hluku. Zvýší se také maximum a průměr akustického hluku. Při poklesu vlhkosti zpět pod hranici 40 % (3. srpna cca v 10 hodin) lze pozorovat opětovné snížení všech hlukových parametrů. Na druhou stranu si lze všimnout, že pro vysoké hodnoty vlhkosti okolo 90 % (3. srpna kolem 5. hodiny) jsou navzdory trendu veškeré parametry hluku redukovány.



Obr. 5-6 Přehled všech sledovaných parametrů na časové ose v období mezi 26. a 28. červencem

Obr. 5-6 vypovídá o vlivu deště na tvorbu kvílivého hluku. U tramvaje č. 1737, která 26. července projížděla místem už od 5. hodiny ranní, nebyl během deště zaznamenán ani jeden hlukový projev. Ovšem ihned po jeho skončení se začal kvílivý hluk u tramvaje objevovat. Z grafu je nicméně patrná jistá setrvačnost vlivu deště na parametry kvílivého hluku. Bezprostředně po skončení deště jsou všechny parametry hluku významně redukovány a maximum hladiny hluku se téměř shoduje s jejím průměrem.

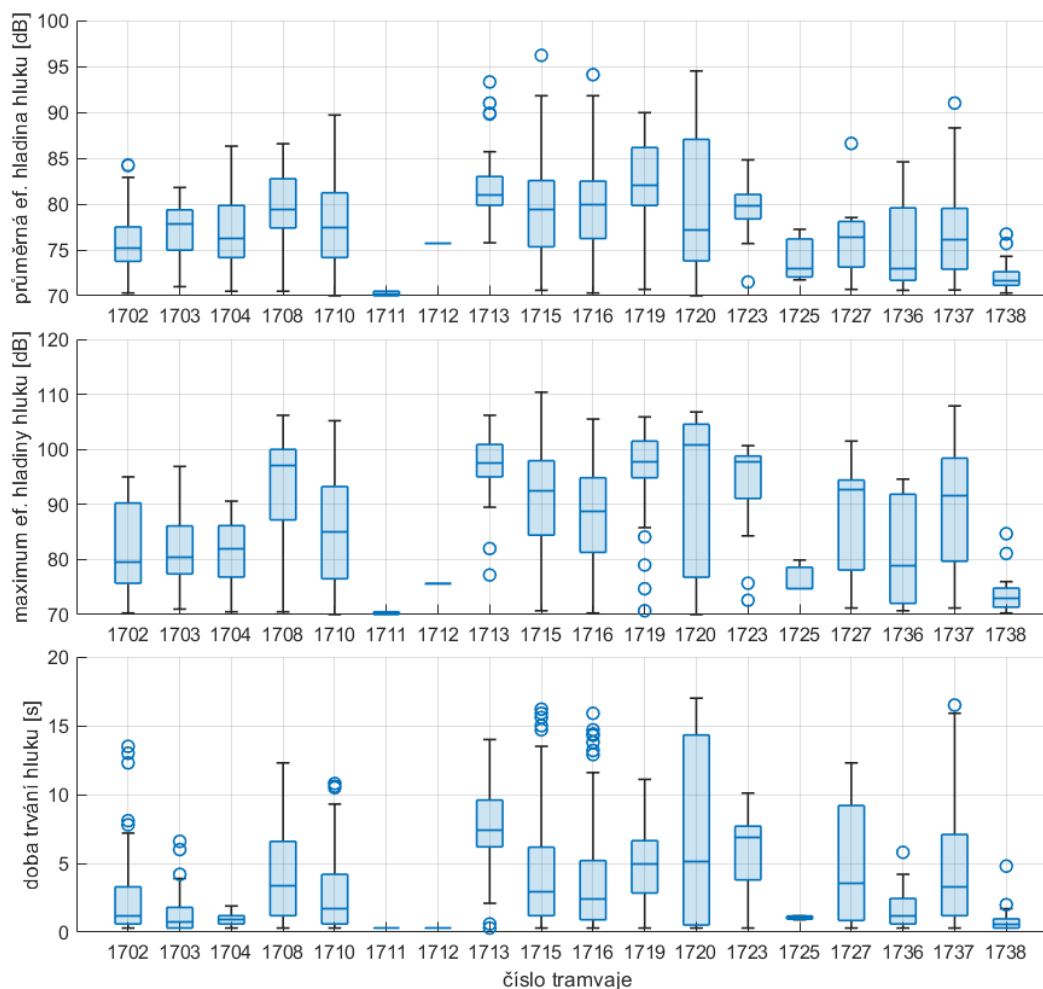


Obr. 5-7 Rozložení průměrné hladiny hluku s rozlišením přítomnosti deště

Histogram na Obr. 5-7 ukazuje vliv deště na hladinu kvílivého hluku. Tato data vypovídají pouze o tramvaji č. 1737, protože jako jediná dosáhla za přítomnosti deště několika průjezdů s hladinou hluku nad 70 dB. Z grafu je patrné, že průjezdy bez deště se vyznačují širokou škálou hladin hluku až k hranici 90 dB, zatímco během deště se tato škála výrazně zúží a nejvyšší hodnota průměrné hladiny hluku nepřesáhne 74 dB. Nicméně rozdíl v nejčtetnějších hodnotách obou stavů není tak markantní. Bez přítomnosti deště je nejčastějším rozmezím průměrné hladiny hluku 75 až 76 dB a za přítomnosti deště je to 71 až 72 dB.

## 5.2 Srovnání hlučností jednotlivých tramvají a jejich náchylnosti k tvorbě kvílivého hluku

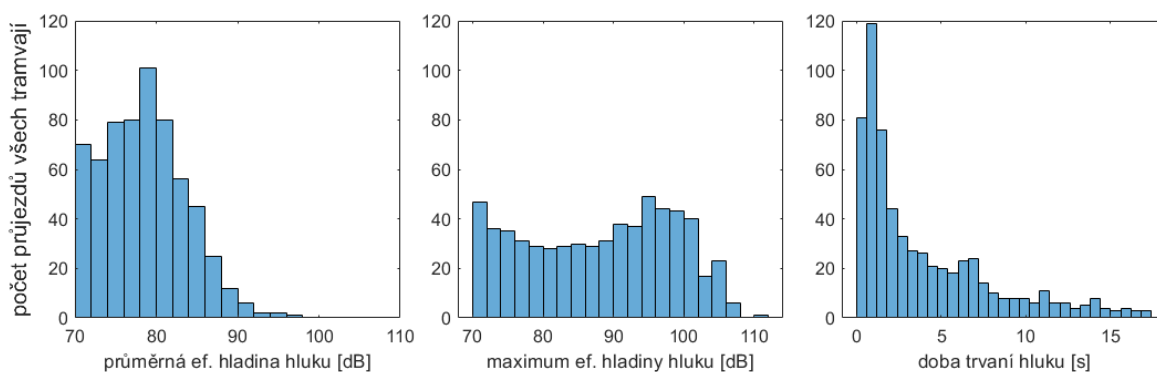
Na základě počtů záznamů v jednotlivých verzích hlukového a výhybkového souboru (viz. Obr. 4-6) lze prezentovat jednoduchou statistiku. Ke kvílivému hluku došlo v době měření v průměru 1x za každých 2,7 průjezdů tramvaje. Počet oddělených kvílivých projevů (mezi projevy nebyly naplněny podmínky hluku – viz. podkapitola 4.1) při 1 průjezdu s kvílivým hlukem byl v průměru 2,8.



Obr. 5-8 Statistické srovnání jednotlivých tramvají dle jejich hlukových parametrů

Na Obr. 5-8 je pomocí krabicových grafů vyjádřeno rozložení hodnot hlukových parametrů u jednotlivých tramvají. Výška modrého obdélníku vyjadřuje mezikvartální rozmezí dat, přičemž dolní okraj obdélníku reprezentuje 1. kvartil, horní okraj 3. kvartil a příčná čára mezi nimi značí medián. Kolmé šedé čáry, které vycházejí z modrého obdélníku, končí krátkou příčnou čarou a nazývají se „vousy“. Tyto vousy vyjadřují variabilitu dat pod 1. (resp. nad 3.) kvartilem. Příčná čára na jejich konci reprezentuje minimum (resp. maximum) vzorku dat a jeho vzdálenost od příslušného kvartilu je vypočtena jako 1,5násobek mezikvartálního rozmezí. Hodnoty, které jsou od kvartilu dále než minimum nebo maximum se nazývají odlehlé a označuje je modrý kroužek. Pro vzorky dat, ve kterých je maximální (resp. minimální) hodnota vzorku blíže příslušnému kvartilu, než by byla vypočtená hodnota pomocí 1,5násobku se bere jako konec vousu přímo maximum (resp. minimum) tohoto vzorku. Tuto situaci lze pozorovat pro minimum doby trvání všech tramvají mimo č. 1713, u které je aplikován právě přístup 1,5násobku mezikvartálního rozmezí.

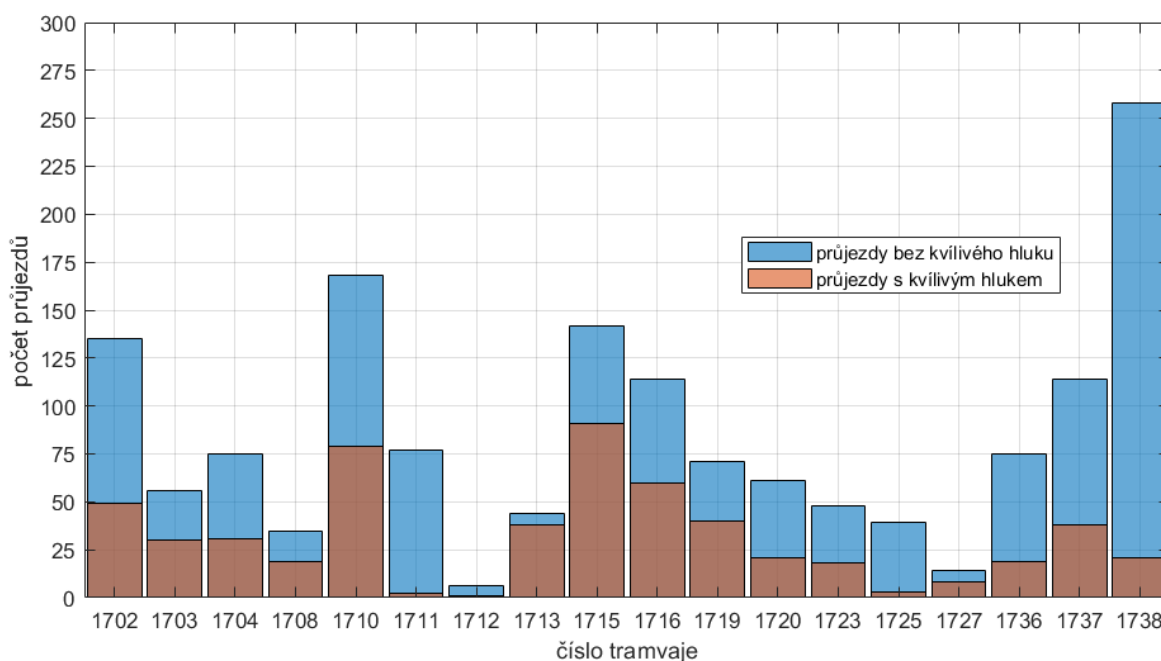
Obecně platí, že pokud je krabicový graf vysoký, tramvaj měla při každém průjezdu tendenci produkovat hluk o jiných parametrech, tj. její hlukový projev byl nestabilní. Nejvýraznější je v tomto ohledu tramvaj č. 1720, u které je patrně nejširší rozložení všech sledovaných parametrů hluku. Naproti tomu tramvaj č. 1738 má ve všech parametrech velmi malé rozmezí a její hlukový projev je tedy proti ostatním tramvajím velmi stabilní. Šíře rozložení hodnot nicméně nevyovídá o hodnotě mediánu. Tramvaj č. 1720 má sice nejširší rozmezí hodnot průměrné hladiny hluku (první řádek na Obr. 5-8), ale medián mají vyšší tramvaje č. 1719, 1716 a další. Ve třetím řádku je díky odlehlým hodnotám vidět, že tramvaje č. 1715 a 1716 jsou náchylné k dlouhým dobám trvání kvilivého hluku. Tyto hodnoty jsou daleko od mediánu a značí výkyvy v době trvání hluku v jednotlivých průjezdech.



Obr. 5-9 Rozložení hlukových parametrů



Nejčetnější hodnoty jednotlivých parametrů hluku prezentuje histogram na Obr. 5-9. Pro průměrnou hladinu hluku (vlevo) platí, že nejvíce průjezdů má hodnotu mezi 78 a 80 dB. Z grafu je také patrný nárůst četnosti směrem od 70 k 80 dB následovaný strmým poklesem. Maximum hladiny hluku (uprostřed) má dvě typická rozmezí a sice 70 až 72 dB a 94 až 96 dB. Zde je průběh odlišný od průměru hladiny hluku a celkově jsou hodnoty rovnoměrněji rozloženy. Četnost směrem od 70 dB nejdříve mírně klesá k 80 dB, následně roste až k 96 dB a poté strmě klesá. Četnost doby trvání (vpravo) klesá téměř exponenciálně a nejčetnějším úsekem je trvání 0,6 až 1,2 s.



Obr. 5-10 Podíl průjezdů s kvílivým hlukem jednotlivých tramvají

Histogram na Obr. 5-10 dává do souvislosti průjezdy jednotlivých tramvají, kdy byl zaznamenán kvílivý hluk a průjezdy, kdy nebyl zaznamenán. Posuzuje tedy pouze výskyt kvílivého hluku a nikoli jeho parametry. Graf také vyjadřuje, kolikrát daná tramvaj v době monitorování celkově projela obloukem. Nejčastěji provozovanou tramvají v tomto období byla tramvaj č. 1738, která místem projela 258x, z toho 21x byl u ní zaznamenán kvílivý hluk. Naopak nejméně používanou tramvají, která ale zároveň smyčkou nejela pouze sporadicky, byla tramvaj č. 1712 se 6 průjezdy z toho 1 s kvílivým hlukem. Graf nicméně zobrazuje absolutní hodnoty, takže např. tramvaj č. 1710, která má více průjezdů s kvílivým hlukem než č. 1713 je ve skutečnosti méně náchylná k tvorbě kvílivého hluku, protože má daleko více průjezdů bez hlukového projevu než právě č. 1713.

Tab. 5-1 Přehled výskytu kvílivého hluku u jednotlivých tramvaj

Evidenční číslo tramvaje	Počet všech průjezdů	Počet průjezdů s kvílivým hlukem	Podíl průjezdů s kvílivým hlukem v %
1713	44	38	86.4
1715	142	91	64.1
1727	14	8	57.1
1719	71	40	56.3
1708	35	19	54.3
1703	56	30	53.6
1716	114	60	52.6
1710	168	79	47.0
1704	75	31	41.3
1723	48	18	37.5
1702	135	49	36.3
1720	61	21	34.4
1737	114	38	33.3
1736	75	19	25.3
1712	6	1	16.7
1738	258	21	8.1
1725	39	3	7.7
1711	77	2	2.6

Data prezentovaná na Obr. 5-10 kvantifikuje a rozšiřuje Tab. 5-1. Poslední sloupec tabulky vyjadřuje procentuální podíl průjezdů s kvílivým hlukem dané tramvaje. Tyto hodnoty tedy vypovídají o tendenci dané tramvaje produkovat kvílivý hluk. Čísla potvrzují dříve zmíněnou domněnku utvořenou na základě Obr. 5-4, že tramvaje č. 1713 a 1715 jsou více náchylné k tvorbě kvílivého hluku než ostatní. Tramvaj č. 1715 emitovala kvílivý hluk v 64 % průjezdů a tramvaj č. 1713 dokonce v 86 %. Hodnoty pro diskutovanou tramvaj č. 1738 potvrzují, že navzdory velkému počtu průjezdů tato tramvaj emitovala kvílivý hluk relativně málo a to v 8 % průjezdů.

## 6 DISKUZE

### 6.1 Vliv povětrnostních podmínek

Závěry podkapitoly 5.1 říkají, že povětrnostní podmínky mají určitý vliv na parametry kvilivého hluku. Nejvíce závislým parametrem se zdá být průměrná hladina hluku, u které je dobře patrná klesající tendence vůči vlhkosti vzduchu, a naopak stoupající tendence vůči teplotě vzduchu. Tento závěr je však v rozporu s výzkumem Maleho [18], který zjistil opačné závislosti (srovnání Obr. 2-9, Obr. 2-12 a Obr. 5-1). Příčin tohoto nesouladu může být více. V první řadě se velmi liší podmínky měření obou výzkumů. V publikaci Maleho je měřen traťový oblouk o rádiu 230 m, což je přibližně 10x více než oblouk sledovaný touto prací. Z tohoto faktu vyplývá i rozdílná průjezdová rychlost vozidel, která je v publikaci cca 3x vyšší. Dalším podstatným rozdílem je, že Maly měří akustickou hladinu výkonu, zatímco tato práce vyhodnocuje akustickou hladinu tlaku. Meteostanice použitá v této práci umožňuje pouze měření teploty a vlhkosti vzduchu spolu s přítomností deště. Nelze tedy získat údaj o teplotě kolejniče a tím postihnout vliv teploty rosného bodu. V neposlední řadě Maly má k dispozici mnohem variabilnější datový soubor s 20 265 průjezdy během 11 měsíců. Tato analýza zpracovává pouze 623 průjezdů z 1 letního měsíce a neobsahuje např. záznamy s nižšími teplotami než 15 °C. To je současně i důvodem, proč práce nemůže postihnout změnu trendu závislosti parametrů hluku na vlhkosti vzduchu (viz. podkapitola 2.4). Tuto skutečnost zaznamenali obě publikace [18] a [19] souhlasně až při teplotách nižších než 10 °C.

Nesoulad popsáný v úvodu předchozího odstavce se týká situace, kdy jsou závislosti posuzovány na základě všech záznamů z hlukového souboru. Na Obr. 5-5 jsou selektována data z určitého časového rozmezí pro omezený počet tramvají. Tato data závěry Maleho [18] ohledně vlivu vlhkosti a teploty potvrzují a zaznamenávají stejný trend. Také lze nalézt paralelu mezi těmito daty a výzkumem Lia [20], kde v obou případech dojde k prudkému poklesu hladiny hluku při hodnotách relativní vlhkosti nad 90 %.

Z grafů závislosti průměrné hladiny hluku na vlhkosti a teplotě (Obr. 5-1) a doby trvání na vlhkosti a teplotě (Obr. 5-3 první řádek) je nad červenou čarou patrná skupina bodů, která se vyznačuje vyššími hodnotami než většina bodů v daných podmínkách. Dle žlutě zabarvených bodů (značí vysoké hodnoty průměrné hladiny hluku) v horním řádku Obr. 5-3 lze říci, že minimálně část bodů nad červenou čarou je pro skupiny na obou obrázcích společná. Tuto kombinaci dlouhé doby trvání (zpravidla nad 10 s) a vysokých hodnot průměrné hladiny hluku (cca nad 85 dB) lze dohledat v Obr. 5-4. Díky němu je možné přiřadit hlukové projevy konkrétním tramvajím. V úvahu připadají vozy č. 1737, 1720, 1715, 1713 a 1716. Je tedy možné, že za část nesourodosti dat v analýze hlukových parametrů mají zodpovědnost tyto konkrétní tramvaje. Pro jednoznačnější určení vlivu povětrnostních podmínek na hluk by bylo vhodné uvažovat data týkající se méně (ideálně jednoho) vozu, tak jak to dělá např. předchozí odstavec. Tento přístup však nemůže být plošně aplikován, jelikož práce nemá dostatek dat o jednom konkrétním vozu operujícím v různých povětrnostních podmínkách.

Obr. 5-3 (druhý řádek) také ukazuje dobrou korelaci mezi dobou trvání a maximální hladinou kvílivého hluku. Z obrázku vyplývá, že pokud jsou hlukové projevy dlouhé, dosáhnou zároveň i vysokého maxima hladiny hluku. To potvrzuje domněnku vyslovenou v popisu Obr. 5-2, že velikost maxima je parametr méně závislý na provozních podmínkách, ale realizuje se s určitou pravděpodobností v čase. Delší doba trvání tedy poskytuje více času k projevení vyššího maxima hladiny hluku.

Další úkaz, který Obr. 5-3 zobrazuje, je pás hodnot s krátkou dobou trvání (do 2 s) a nízkými hladinami hluku (zpravidla do 75 dB). Dle barevného rozlišení si také lze všimnout, že určitá část maxim hladiny hluku (druhý řádek) se shoduje s průměrem hladiny hluku (první řádek), zejména pro hodnoty blízké 70 dB. Hlukové projevy v tomto pásu hodnot jsou tedy krátké, relativně tiché a málo závislé na povětrnostních podmínkách. Při uvážení velikostí hlukových parametrů je zřejmé, že zmíněné projevy jsou z velké části produktem celkově málo hlučných tramvajím (Obr. 5-4, tramvaj č. 1738, 1711, 1702 apod.). Část projevů ale může být i výsledkem průjezdů bezprostředně po dešti, kdy voda zbylá na kolejnicích ještě ovlivňovala třecí vlastnosti kontaktu kola s kolejnicí (Obr. 5-6, 26. července těsně před 12 hodinou).

## 6.2 Vliv jednotlivých tramvají

Statistická vyjádření na Obr. 5-8 je nutné chápat v kontextu počtu průjezdů pro jednotlivé tramvaje. Tuto doplňující informaci poskytuje Tab. 5-1. Z obrázku by se mohlo zdát, že např. tramvaje č. 1711 a 1712 jsou ve svých hlukových projevech velmi stabilní. Tato zdánlivá stabilita je nicméně dána příliš malým počtem záznamů pro výpočet statistických veličin, kdy pro tramvaj č. 1711 hlukový soubor obsahuje 2 záznamy a pro č. 1712 pouze 1 záznam. Obecně tedy platí, že čím méně je tramvaj náchylná k tvorbě kvílivého hluku, tím hůře se hodnotí její hlukový projev, kvůli nedostatku dat.

Na základě Obr. 5-9 lze říci, že pro kvílivý hluk od temene kolejnice je typická relativně krátká doba trvání, nejčastěji do 1,8 s. Hodnoty doby trvání jsou výsledkem syntézy jednoho a více záznamů (viz. podkapitola 4.2), takže samostatný kvílivý projev bude mít tuto dobu ještě kratší. Hodnoty maxima hladiny hluku jsou v histogramu relativně rovnoměrně rozprostřené a téměř všechna hluková rozmezí jsou zastoupena 30x až 40x. To opět vypovídá o nezávislosti parametru na ostatních podmínkách.

Obr. 5-10 v kombinaci s Tab. 5-1 a krabicovým grafem na Obr. 5-8 dává úplné informace o hlučnosti jednotlivých tramvají. Jednoznačně nejčastěji produkovala kvílivý hluk tramvaj č. 1713 a to v 86,4 % průjezdů. Tato tramvaj také zaznamenala jedny z nejvyšších hodnot mediánů všech třech hlukových parametrů a zároveň její mezikvartální rozmezí je proti ostatním tramvajím malé. To ve zkratce znamená, že tramvaj má stabilně jedny z nejvyšších hodnot všech hlukových parametrů ve většině svých průjezdů. Pro srovnání tramvaj č. 1723 vykazuje velmi podobné rozložení i velikosti hodnot hlukových parametrů jako č. 1713, ale kvílivý hluk se u ní vyskytuje pouze v 37,5 % průjezdů. Ačkoliv tedy tato tramvaj produkuje podobně výrazný kvílivý hluk, díky jeho méně častému výskytu není tak velkou hlukovou zátěží pro okolí.

Z datových souborů byly odstraněny záznamy s deštěm a levou kolejí, které by mohly výrazně ovlivnit náchylnost ke kvílivému hluku tramvají. Na základě faktů prezentovaných v předchozím odstavci je tak důvodné domnívat se, že rozdíly v podílech průjezdů s kvílivým hlukem jsou způsobeny především technickým stavem tramvají. Všechny zde zmiňované tramvaje jsou typu KT8D5R.N2 a jejich výrobcem je ČKD Tatra. Jedná se o obousměrné, 3článekové tramvaje se 4 podvozky. Tyto tramvaje byly vyrobeny mezi lety 1986 a 1990 a v letech 2003 až 2013 prošly modernizací včetně osazením nízkopodlažním článkem. Vozy se nachází na konci své životnosti, takže část z nich je rekonstruována a část je postupně nahrazována novým typem obousměrných tramvají Škoda 45T. [23]

## 6.3 Limity studie

V této podkapitole jsou popsány známé nedostatky předchozí analýzy, které mohou mít za následek určité zkreslení výsledků. Při slučování záznamů z jednoho průjezdu (Obr. 4-6 b)) bylo zvoleno kritérium časový odstup méně než 1 minuta. V praxi by průjezd 30metrové [23] tramvaje obloukem o poloměru 21 m rychlostí cca 15 km/h neměl trvat déle než 20 sekund. Nicméně i po volbě kritéria 1 minuty bylo z vizualizace záznamů na časové ose patrné, že určité hlukové projevy patřící dle dat jedné tramvaji a jednomu průjezdu jsou od sebe vzdáleny déle než 1 minutu. Důvodem pro tento jev by mohla být přítomnost jiného zdroje hluku, který svými parametry zapadal do kategorizace kvílivého hluku. Jelikož se oblouk nachází na pozemní komunikaci, tímto zdrojem hluku mohlo být např. projíždějící osobní auto.

Další nepřesností je problematické vyřazení záznamů z druhého traťového oblouku (Obr. 4-6 d)), odkud byla data vyřazena pouze na základě jízdního řádu, který ale nereflektuje reálnou situaci v čase. V měřeném období jezdila do smyčky Komín pravidelně pouze linka č. 11, na které byl obratový čas 3 minuty. Mohlo se tak stát, že tramvaj přijela do smyčky se zpožděním např. až v čase odjezdu. V takovém případě hlukový záznam sice pochází ze sledovaného oblouku, protože se v něm ale tramvaj nacházela v čase odjezdu, byl záznam odstraněn. Stejně tak při následném pozdním odjezdu tramvaje zase nemusel být odstraněn záznam z druhého oblouku.

V podkapitole 4.2 byla při odstraňování záznamů s deštěm z výhybkového souboru řeč o zavedení 20minutového offsetu, který zajišťoval, aby se do analýzy nedostaly záznamy ovlivněné vodou zbylou na kolejnicích. Tento offset byl nicméně aplikován pouze na výhybkový soubor. V hlukovém souboru však data ovlivněné zbytkovou vodou zůstala, jak ukazuje Obr. 5-6. To má za následek „chybějící“ odpovídající data ve výhybkovém souboru. Z Obr. 4-6 vyplývá, že určitá část tramvají by tak v Tab. 5-1 vystupovala s nižšími procentuálními hodnotami v posledním sloupci. Dle odhadů není efekt tohoto zjednodušení velký, ale faktem je, že aktuální hodnoty podílu průjezdů s kvílivým hlukem v tabulce jsou mírně nadnesené.

## 7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se věnuje stanovení vlivu povětrnostních podmínek na kvílivý hluk od temene kolejnice emitovaný tramvají při průjezdu traťového oblouku ve smyčce Brno-Komín. Sledovanými povětrnostními podmínkami byly teplota a vlhkost vzduchu a přítomnost deště. Kvílivý hluk byl posuzován na základě jeho maximální a průměrné hladiny akustického tlaku a také na základě jeho doby trvání. Dále byly rozlišeny hlučnosti jednotlivých tramvají, které ve zkoumaném období obloukem projížděly.

V rešeršní části práce byly představeny publikace, které se výzkumu kvílivého hluku věnovaly ať už v reálných nebo laboratorních podmínkách. Z jejich závěrů vyplývá, že povětrnostní podmínky mají na výsledný hluk určitý vliv, ale ne u všech aspektů nastává shoda jaký. Obecně publikace tvrdí, že emitovaný hluk se s vlhkostí vzduchu zvyšuje a s teplotou naopak snižuje. Praktická část této práce se věnovala vizualizaci obdržených datových souborů a jejich interpretaci. Ještě před tímto krokem byly v rámci práce datové soubory upraveny, tak aby výstupy z nich byly relevantní. Pokud je brán v potaz soubor záznamů ze všech tramvají, z výsledků vyplývá, že průměrná hladina hluku se s vlhkostí snižuje a s teplotou zvyšuje. Tento závěr tedy zaznamenává jiný trend než zjištění publikací v rešeršní části. Pokud ale byla uvážena data pro konkrétní tramvaj, výsledky byly v souladu s publikacemi. Výstupy práce také potvrdily vliv deště na výskyt kvílivého hluku, který je díky němu zásadně redukován. Nesoulad s publikacemi v zmiňovaných trendech může být způsoben daty pocházejícími z velkého počtu odlišných tramvají. Jednotlivé vozy se nachází v různém technickém stavu, který také výrazně ovlivňuje produkci kvílivého hluku. Právě srovnání hlučností tramvají se věnovala druhá kapitola výsledků. Na jejím závěru byly tramvaje seřazeny dle náchylnosti k tvorbě kvílivého hluku. Nejhuře z analýzy vychází tramvaj č. 1713, která produkovala kvílivý hluk v 86 % případů. Zároveň je z hlukových dat patrné, že si drží i vysoké hodnoty průměrné a maximální hladiny hluku a doby trvání hluku.

Práce se zabývá problematikou kvílivého hluku, která je stále málo zmapovaná a podle všech indicií závislá na mnoha parametrech. Díky výstupu práce je možné dohledat konkrétní hlučné tramvaje a dále na nich zkoumat příčiny kvílivého hluku způsobené technickým stavem. Dalším rozšířením problematiky by mohlo být zahrnutí vlivu rychlosti vozidla, který není v rámci této práce postižen. V neposlední řadě by bylo opodstatněné zahrnout do analýzy širší časové rozmezí, které by poskytlo více variabilnějších dat. Bylo by tak možné pozorovat trendy při teplotách nižších než 15 °C, zahrnout vliv levé koleje ve smyčce a lépe zkoumat závislosti pro konkrétní vozy.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PETRÁK, Peter. *Hluk a vibrácie v dopravnej technike*. První vydání. Bratislava: STU v Bratislave, 2015. ISBN 978-80-227-4499-7.
- [2] IWNICKI, S, ed. *Handbook of railway vehicle dynamics*. První vydání. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. ISBN 978-0-8493-3321-7.
- [3] Obecné informace o zvuku. In: *PAROC* [online]. Helsinky, Finland: Paroc Group, 2023 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/obecně-informace-o-zvuku>
- [4] KOLIK DECIBELŮ ŠKODÍ. In: *Auris Audio* [online]. Plzeň: Auris Audio, 2016 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.auris-audio.cz/kolik-decibelu-skodi>
- [5] Nařízení č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. In: *Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., ©2001-2023 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-272-2011-sb-o-ochrane-zdravi-pred-nepriznivymi-ucinky-hluku-a-vibraci>
- [6] Railway exterior sound sources and typical dependence on train speed. In: *ResearchGate* [online]. Berlin: ResearchGate GmbH, © 2008-2023 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Railway-exterior-sound-sources-and-typical-dependence-on-train-speed-4\\_fig1\\_5326115](https://www.researchgate.net/figure/Railway-exterior-sound-sources-and-typical-dependence-on-train-speed-4_fig1_5326115)
- [7] LEWIS, R a U OLOFSSON. *Wheel-Rail Interface Handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. ISBN 9781845694128. Dostupné z: doi:10.1533/9781845696788
- [8] MAREŠ, Adam. *Hluk spojený s železničním kolem*. Brno, 2022, 37 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140766>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Matouš Rec.
- [9] Pojednání o styku kola a kolejnice. In: *ŽelPage* [online]. Praha: Spolek ŽelPage, 2011 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/clanky/pojednani-o-styku-kola-a-kolejnice?lang=cs>



- [10] THOMPSON, D.J. a C.J.C. JONES. A REVIEW OF THE MODELLING OF WHEEL/RAIL NOISE GENERATION. *Journal of sound and vibration* [online]. LONDON: Elsevier Ltd, 2000, **231**(3), 519-536 [cit. 2023-04-29]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1006/jsvi.1999.2542
- [11] Hluk ze železniční dopravy – porovnání účinku pasivních protihlukových opatření. In: *SILNICE ŽELEZNICE* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2014 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/hluk-ze-zeleznicni-dopravy-porovnan-ucinku-pasivnich-protihlukovych-opatreni/>
- [12] Geometry of a railway vehicle wheel with an idealized flat spot. In: *Engineering Science* [online]. Vienna, 2010 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://www.engineeringscience.rs/images/pdf/article%20179.pdf>
- [13] MÜLLER, B. a J. OERTLI. Combating Curve Squeal: Monitoring existing applications. *Journal of sound and vibration* [online]. LONDON: Elsevier Ltd, 2006, **293**(3), 728-734 [cit. 2023-05-02]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2005.12.005
- [14] THOMPSON, David. *Railway Noise and Vibration*. I. Title. Oxford: Elsevier Ltd., 2009. ISBN 9780080451473. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-045147-3.X0023-0
- [15] RUDD, M.J. Wheel/rail noise—Part II: Wheel squeal. *Journal of sound and vibration* [online]. Elsevier Ltd, 1976, **46**(3), 381-394 [cit. 2023-05-02]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/0022-460X(76)90862-2
- [16] EADIE, Donald, Marco SANTORO a Joe KALOUSEK. Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear* [online]. Lausanne: Elsevier B.V, 2005, **258**(7), 1148-1155 [cit. 2023-05-02]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2004.03.061
- [17] EADIE, D.T. a M. SANTORO. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of sound and vibration* [online]. LONDON: Elsevier Ltd, 2006, **293**(3), 747-757 [cit. 2023-05-02]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2005.12.007

- [18] MALY, Thomas, Florian BIEBL a Michael OSTERMANN. The effects of weather conditions and wheel wear on curve squeal. In: *Proceedings of the International Congress on Acoustics* [online]. 2019, , s. 1559-1566 [cit. 2023-05-05]. ISBN 9783939296157. ISSN 2226-7808. Dostupné z: doi:10.18154/RWTH-CONV-239967
- [19] ERIKSSON, Olle, Peter TORSTENSSON, Astrid PIERINGER, Rickard NILSSON, Martin HÖJER, Matthias ASPLUND a Anna ŚWIERKOSKA. Statistical analysis of curve squeal based on long-term onboard noise measurements. In: *21st Nordic Seminar on Railway Technology* [online]. Tampere, 2022 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1678532&dswid=-5985>
- [20] LIU, X. *Investigation about the effect of angle of attack and relative humidity on wheel squeal* [online]. Australia: Proceedings of ACOUSTICS, 2011 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: [https://acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/AAS2011/papers/p79.pdf](https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p79.pdf)
- [21] NAVRÁTIL, Václav. *Snižování hluku kolejových vozidel v traťových obloucích*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/179398>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.
- [22] Panorama. In: *Mapy.cz* [online]. Praha: Cyclomedia Technology B.V., 2022 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?pano=1&pid=91066742&newest=0&yaw=6.157&fov=1.571&pitch=0.072&x=16.5570336&y=49.2161269&z=19>
- [23] Evidence DPMB: vozy KT8D5R.N2. In: *BMHD* [online]. Brno: Ebola.cz, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.bmhd.cz>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN

$f$	frekvence
$T$	perioda (časový interval)
$p, p_A$	akustický tlak a akustický tlak vážený A filtrem
$t, \tau$	čas a časový interval
$p_{RMS}, p_{ref}$	efektivní a referenční hodnota akustického tlaku
$L$	hladina akustického tlaku (resp. zvuku nebo hluku)
$L_p, L_I$	hladina akustického výkonu a akustické intenzity
$L_A, L_{Aeq,\tau}, L_{Amax}$	hladina A zvuku, ekvivalentní a nejvyšší hladina A zvuku
$q$	koeficient bisekce
$N$	normálová síla
$F_1, F_2$	podélná a boční skluzová síla
$M_3$	točivý moment
$\mu_s, \mu_d$	koeficient statického a dynamického tření

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Frekvenční průběh váhové A křivky [3]	16
Obr. 2-2	Hladiny hluku jednotlivých zdrojů hluku v závislosti na rychlosti soupravy [6]	18
Obr. 2-3	Ilustrace buzení valivého hluku [11]	19
Obr. 2-4	Představa idealizované plošky na železničním kole [12]	20
Obr. 2-5	Schématické naznačení sil a rychlostí působících na železniční dvoukolí při průjezdu traťovým obloukem; $N$ je normálová síla, $F1$ je podélná skluzová síla (na vnitřním kole působí směrem „z“ obrázku a na vnějším směrem „do“ obrázku), $F2$ je boční skluzová síla a $M3$ je točivý moment, upraveno dle [14]	22
Obr. 2-6	Negativní třecí křivka, upraveno dle [14]	23
Obr. 2-7	Frekvence výskytu kvílivého hluku od temene v závislosti na teplotě kolejnice	25
Obr. 2-8	Frekvence výskytu kvílivého hluku od okolku v závislosti na teplotě kolejnice	26
Obr. 2-9	A Hladina akustického výkonu kvílivého hluku v závislosti na teplotě kolejnice	26
Obr. 2-10	Frekvence výskytu kvílivého hluku od temene v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu	27
Obr. 2-11	Frekvence výskytu kvílivého hluku od okolku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu	27
Obr. 2-12	A Hladina akustického výkonu kvílivého hluku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu	28
Obr. 2-13	Výskyt kvílivého hluku (šedě) v závislosti na teplotě a vlhkosti okolního vzduchu	29
Obr. 2-14	Závislost hladiny akustického tlaku kvílivého hluku na relativní vlhkosti vzduchu pro různé otáčky testovacích disků	30
Obr. 4-1	Letecký pohled na tramvajovou smyčku v MČ Brno-Komín a její schématický popis	34

Obr. 4-2	Soustava výhybky ve smyčce Brno-Komín, a) návěstidlo označující elektrickou výhybku (zvýrazněno červeně), b) řídicí jednotka výhybky (červeně), c) mechanismus výhybky (červeně) a elektrické zablokování výhybky (žlutě), d) příklad dat z řídicí jednotky výhybky	35
Obr. 4-3	Umístění hlukového a meteorologického modulu, a) měřený oblouk a sloup s moduly (zvýrazněn fialově), b) detail sloupu – v pozadí zastávka Komín, smyčka, c) detail skříně s moduly – mikrofon (červeně), dešťový senzor (zeleně), snímač teploty a vlhkosti vzduchu (žlutě) [21], d) příklad dat z hlukového modulu	36
Obr. 4-4	Vzdálenosti v měřeném oblouku, červeně vyznačen rádius pravé koleje (cca 21 m), modře vzdálenost hlukového modulu od středu oblouku (cca 11 m)	37
Obr. 4-5	Příklad výsledného datového souboru	37
Obr. 4-6	Schématický diagram úprav výhybkového (V), hlukového (H) a meteorologického (M) souboru	41
Obr. 5-1	Průměrná hladina hluku v závislosti na vlhkosti a teplotě vzduchu	42
Obr. 5-2	Maximální hladina hluku v závislosti na vlhkosti a teplotě vzduchu	43
Obr. 5-3	Doba trvání kvílivého hluku v závislosti na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu, barevně je rozlišena velikost průměrné a maximální hladiny hluku	43
Obr. 5-4	Přehled všech sledovaných parametrů na časové ose za celé období	44
Obr. 5-5	Přehled všech sledovaných parametrů na časové ose v období mezi 2. a 4. srpnem	45
Obr. 5-6	Přehled všech sledovaných parametrů na časové ose v období mezi 26. a 28. červencem	46
Obr. 5-7	Rozložení průměrné hladiny hluku s rozlišením přítomnosti deště	46
Obr. 5-8	Statistické srovnání jednotlivých tramvají dle jejich hlukových parametrů	47
Obr. 5-9	Rozložení hlukových parametrů	48
Obr. 5-10	Podíl průjezdů s kvílivým hlukem jednotlivých tramvají	49

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Limitní hodnoty hluku působeného dopravou na pozemních komunikacích a dráhách [5]	17
Tab. 5-1	Přehled výskytu kvílivého hluku u jednotlivých tramvají	50