



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## HLUK TRAMVAJOVÉ DOPRAVY V BRNĚ

NOISE FROM ROLLING STOCK IN BRNO

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František Dolíhal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.

BRNO 2024





# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. František Dolíhal**  
Studijní program: Konstrukční inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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 diplomové práce:

## Hluk tramvajové dopravy v Brně

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti je snaha minimalizovat negativní dopad hluku z tramvajové dopravy v Brně v obytných oblastech. Za tímto účelem je třeba ve vybraných lokalitách zkoumat vliv meteorologických a provozních podmínek při jízdě vozu na vznik nežádoucího hluku. Výsledky analýz povedou k návrhu účinnějších opatření k eliminaci hluku vznikajícího při jízdě.

Typ práce: výzkumná  
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)  
Projekt: TAČR

### Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je komplexní citlivostní analýza vlivu meteorologických a provozních podmínek na vznik a charakter hluku z tramvajové dopravy.

Dílčí cíle diplomové práce:

- sběr dat ve vybraných lokalitách (relativní vlhkost, teplota, rychlost průjezdu, hladina akustického tlaku, apod.),
- citlivostní analýza vlivu meteorologických podmínek na vznik hluku,
- citlivostní analýza vlivu provozních podmínek na vznik hluku.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

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

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

### Seznam doporučené literatury:

PÉRIARD, F.J. Wheel-rail noise generation: Curve squealing by trams. Doctoral thesis, vedoucí J.J. Kalker. Delft, Netherlands: Delft University of Technology.

LUKO, Stephen N. Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis. 9th. ASTM International, 2018. ISBN 978-0-8031-7110-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá analýzou dat z dlouhodobého měření hluku tramvají na točně v Brně-Komíně, resp. na točně Technologický park v Brně. Na základě hladiny akustického tlaku a frekvence hluku byly průjezdy posuzovány, zda docházelo ke vzniku kvílivého hluku pohybem po úzce stočeném traťovém oblouku. Paralelně s měřením hluku probíhal záznam meteorologických podmínek (teplota, relativní vlhkost a srážky). Spolu s údaji z paměti předřazené výhybky o identifikačním čísle vozu a inspekčními údaji poskytnutými Dopravním podnikem města Brna byla provedena analýza těchto vlivů na vznik kvílivého hluku. Je nalezena slabá závislost na vzdušnou vlhkost (a s ní závislou teplotou). Měření prokázalo rozdílné hlukové chování tramvajových vozů stejné konstrukce. Vliv přítomnosti vody v kontaktu, se projevil hlavně při vysychání. Ruční terénní měření ukazuje také na vliv rychlosti vozu. Z pozorování také vyplývá, že bude v budoucnu vhodné posoudit také vliv řidiče a celkové dynamiky jízdy (zejména zrychlení), tomuto se již tato práce nevěnuje.

## KLÍČOVÁ SLOVA

tramvaj, kvílivý hluk, analýza, terénní měření, meteorologické podmínky, vliv vozu, rychlost

## ABSTRACT

This study is focused on the analysis of data from long-term noise measurements of trams at the turning loop in Brno-Komín, and at the Technological Park turning loop in Brno. Automated field measurement based on sound pressure level and frequency evaluated tram passages to determine if there was the occurrence of squealing noise while traversing tightly curved track segments. Concurrent with noise measurements, meteorological conditions (temperature, relative humidity, and rain) were recorded. Alongside data from the preceding switch memory, including vehicle identification numbers and inspection data provided by the Brno Public Transit Company, an analysis of influencing factors on the occurrence and parameters of squealing noise was conducted. A weak dependence on air humidity (and consequently temperature) was found. This revealed varied noise behavior among tramcars of the same construction. Influence of water in contact of wheel was described during process of drying tracks. Manual field measurements also suggest the influence of vehicle speed. Observations also indicate the need for future assessment of the driver's influence and overall driving dynamics (especially acceleration), which this study does not address.

## KEYWORDS

Tram, curve squeel, analysis, field measurements, meteorological conditions, vehicle influence, speed



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLÍHAL, František. *Hluk tramvajové dopravy v Brně*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157679>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D..



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing Milanu Klapkovi, Ph.D. za věcné připomínky a rady při řešení práce i za spolupráci při testování a kalibraci radaru před mým měřením na tramvajové smyčce. Dále bych rád poděkoval Ing. Radovanu Galasovi, Ph.D. za podnětné nápady z oblasti výzkumu kolejové dopravy a Ing. V. Navrátilovi za pomoc s ovládním hlukoměru a zpracování dat. Mé díky také patří skvělým spolužákům, kteří nikdy nepromeškali vhodnou příležitost, kdy se společně zasmát i si vzájemně pomoci. Průběh studia byl také skvělý díky Tomášovi, Jirkovi a Vítkovi, se kterými jsem mohl tvořit pracovní skupinu TYM 2. V neposlední řadě bych rád poděkoval za neustálou podporu své milující rodině, přátelům muzikantům a své slečně Markétě.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Milana Klapky, Ph.D. 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>14</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1	Akustika a měření hluku	15
2.2	Názvosloví tramvajových kol a kolejí	16
2.2.1	Tramvajová kola	16
2.2.2	Tramvajové podvozky	17
2.2.3	Části kolejnice	17
2.2.4	Trat'	18
2.3	Mechanismy vibrací kol v kolejové dopravě	18
2.3.1	Kvílivý hluk v oblouku (Curve squeel)	18
2.3.2	Hluk od okolku (Flanging noise)	19
2.3.3	Ostatní mechanismy hluku kolejové dopravy	20
2.4	Výzkum součinitele adheze	20
2.5	Terénní měření hluku kolejové dopravy	23
2.5.1	Terénní studie složených kol a vlivu vody	23
2.5.2	Experimentální studie vlivu rychlosti	24
2.5.3	Dlouhodobé pozorování – Vídeň	25
2.5.4	Dlouhodobé pozorování – Stockholm	28
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>31</b>
3.1	Analýza problému	31
3.2	Výzkumné otázky	32
3.3	Cíle výzkumu	32
3.4	Hypotézy	33
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>34</b>
4.1	Materiál	34
4.1.1	Data z měření na tramvajové smyčce v Brně-Komíně	34
4.1.2	Data z měření na tramvajové smyčce Technologický park	34
4.2	Přístrojové vybavení	35
4.2.1	Výhybkový modul	35
4.2.2	Měřicí modul VUT	35
4.2.3	Dopplerovský radar	36
4.2.4	Hlukoměr	37

4.3	Testované točny	37
4.3.1	Brno-Komín	37
4.3.2	Technologický park	40
4.4	Metody	41
4.4.1	Zpracování dat – smyčka Komín	41
4.4.2	Zpracování dat – smyčka Technologický park	43
4.4.3	Zpracování dat – dodatečná data o vozech	43
4.5	Metody	44
4.5.1	H1.1 – Zvýšená vlhkost snižuje SPL hluku tramvaje	44
4.5.2	H1.2 – Zvýšená teplota sníží SPL hluku tramvaje	44
4.5.3	H2.1 – Meteorologické srážky snižují SPL hluku tramvaje	45
4.5.4	H2.2 – Vysychání kolejí dočasně zvýší SPL hluku tramvaje	45
4.5.5	H3.1 – Různé konstrukce vozů se liší v hlukových parametrech	45
4.5.6	H3.2 – Různé vozy téže konstrukce se liší v hlukových parametrech	45
4.5.7	H4 – Při vyšších rychlostech bude narůstat SPL hluku tramvaje	45
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>46</b>
5.1.1	H1.1 – Zvýšená vlhkost snižuje SPL hluku tramvaje	53
5.1.2	H1.2 – Zvýšená teplota sníží SPL hluku tramvaje	61
5.1.3	H2.1 – Meteorologické srážky snižují SPL hluku tramvaje	62
5.1.4	H2.2 – Vysychání kolejí dočasně zvýší SPL hluku tramvaje	64
5.1.5	H3.1 – Různé konstrukce vozů se liší v hlukových parametrech	68
5.1.6	H3.2 – Různé vozy téže konstrukce se liší v hlukových parametrech	68
5.1.7	H4 – Při vyšších rychlostech bude narůstat SPL hluku tramvaje	75
<b>6</b>	<b>DISKUSE</b>	<b>77</b>
6.1	Analýza výsledků	77
6.1.1	Vliv vlhkosti	77
6.1.2	Vliv teploty	78
6.1.3	Vliv srážek	79
6.1.4	Vliv konstrukce vozu	80
6.1.5	Rozdíly mezi vozy	81
6.1.6	Vliv rychlosti	82
6.2	Analýza měření	83
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>84</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>85</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN</b>	<b>89</b>

9.1	Použité veličiny	89
9.2	Formát časové značky	89
9.3	Použité zkratky	89
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>94</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>95</b>

# 1 ÚVOD

Hluk tramvajové dopravy je závažným a komplexním fenoménem, jehož podrobnější výzkum nastal v 60. letech [1]. Tento problém však zůstává aktuální i v dnešní době, jelikož je neustále Dopravním podnikem města Brna (dále jen DPMB) investováno do údržby, modernizace i zvětšování tramvajové sítě, která za rok 2023 přepravila 174 mil. cestujících (více než polovinu všech uživatelů brněnské hromadné dopravy). Specifikem brněnského vozového parku čítajícího 319 tramvají je aktivní využití až 16 různých typů vozů a konstrukčních modifikací.[2]

Tato práce se zabývá analýzou příčin hluku na tramvajových točnách, jejichž umístění v urbánních oblastech způsobuje nutnost užití ostře stočených traťových oblouků. Jízda po obloucích o malých rádiích (méně, než 100 m) však při jistých podmínkách způsobuje vznik charakteristického nepříjemně pronikavého hluku. Celý problém umocňuje skutečnost, že tyto traťové oblouky se nacházejí v obydlených oblastech (které často malý rádius zapříčinily), a tak je problém hluku o to závažnější.

Způsobů řešení problému existuje několik, od protihlukových stěn až ke speciálním tramvajovým kolům, doposud však není využit potenciál moderních technologií, které dovolují adaptivně řídit aktivní prostředky snižování hluku tramvajové dopravy. Tento budoucí systém, jako součást tzv. Smart Cities, může na základě jednoduchých automatizovaných měření v daných problematických lokalitách například vyhodnotit optimální dávkování maziva v maznicích zabudovaných přímo do kolejí, množství a typ modifikátorů tření aplikovaných vozem, případně může dočasně snížit dovolenou rychlost tramvaje, či vytipovat problematické soupravy.

Zde představená studie jde cestou dlouhodobého automatického měření skutečných terénních dat, jejich vyhodnocením a vysledováním závislostí a trendů. Tyto informace pak mohou být bází pro vznik a vývoj prediktivního systému aplikace modifikátorů adheze vhodných pro danou lokalitu v návaznosti na stávající výzkumy Ústavu Konstruování VUT.[3]

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato práce se zabývá posouzením meteorologických i provozních vlivů na vznik kvílivého hluku, proto i přehled současného poznání v této oblasti začíná nezbytným vhladem do akustiky, dále pokračuje mechanismy vzniku tohoto fenoménu a jejich laboratorním výzkumem a konečně také pojednává o komplexnosti terénních měření vlivů hluku kolejové dopravy.

### 2.1 Akustika a měření hluku

Kvílivý hluk, který je palčivým problémem zejména v ostrých traťových obloucích, je měřitelný, nahlížíme-li na něj jako na komplexní typ zvuku. Pro kvantifikaci tohoto zvuku nám slouží fyzikální a akustické veličiny. Zvuk se projevuje jako mechanické vlnění kontinua, a tedy je možné měřit jeho frekvenci (resp. dílčí frekvence), ale také tlak, kterým působí toto vlnění na své okolí. Definice frekvence je tedy:

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

kde  $T$  (s) je perioda kmitu. U jednoduchého stojatého vlnění s harmonickým průběhem pak zpravidla určujeme nejnižší, tedy základní frekvenci. Jelikož je téma této práce motivováno zvukem coby fenoménem s negativními hygienickými účinky na člověka, je dobré také zmínit přibližný frekvenční rozsah, který je člověkem slyšitelný. Za lidský život se zpravidla podstatně snižuje citlivost na vysoké frekvence, přesto se běžně udává frekvenční pásmo lidského sluchu mezi 20 až 20 000 Hz.

Silovým projevem zvuku je tzv. akustický tlak  $p$  (Pa). Jelikož absolutní hodnota tohoto tlaku je proměnná v čase, zavádí se veličina efektivní hodnota akustického tlaku  $p_{RMS}$  (Pa):

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

Lidské ucho však zvuk vnímá logaritmicky, a proto se ujalo tyto veličiny vyjadřovat jako hladiny  $L$  (dB), které porovnávají danou efektivní hodnotu akustického tlaku s historicky stanovenou referencí ( $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ ) pro citlivost lidského sluchu:

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

Jednotka hladiny akustického tlaku (Sound Pressure Level, dále jen SPL) se uvádí také s dodatkovým písmenem, například dB(A), které se odkazuje na danou váhovou funkci. V tomto případě funkce

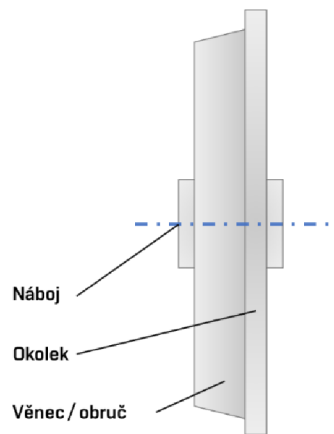
přirazuje větší váhu frekvencím v lidském sluchovém pásmu a bývá užívána pro hygienická měření.[4]

## 2.2 Názvosloví tramvajových kol a kolejí

I když je tato práce určena především pro osoby, které se kolejovou dopravou zabývají, dovoluji si zde pouze krátce shrnout používané názvosloví, aby byl následující text srozumitelnější.

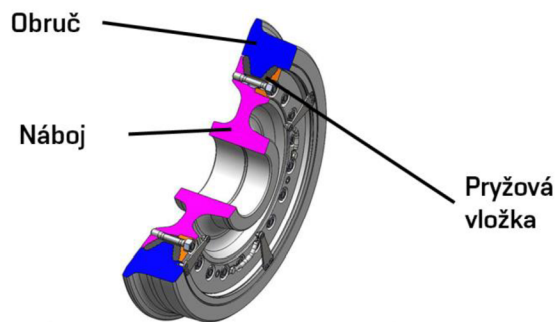
### 2.2.1 Tramvajová kola

Hlavními částmi kol jsou věnec či obruč (s kuželovitou kontaktní plochou) a okolek, který tuto plochu zakončuje směrem dovnitř nápravy. Dvojice kol jsou spojovány do železničních dvojkolí.



Obrázek 2-1 Železniční kolo

Kola tramvajů mohou být buď celistvá (monobloky), nebo složená (obručová). DPMB v současné době přechází u tramvajů typu KT8 na obručová odpružená kola firmy Bonatrans, která zajišťují snížení hluku.[5] [6]



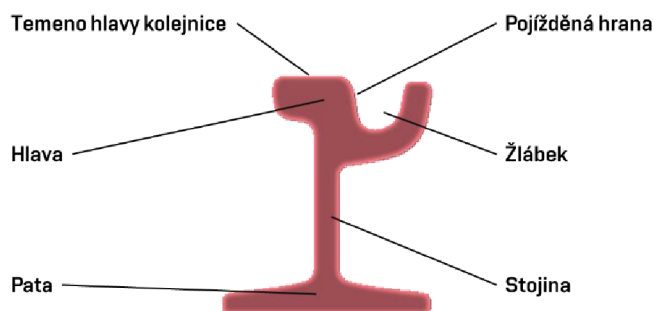
## 2.2.2 Tramvajové podvozky

Podvozky českých tramvají (nejprve ČKD Praha) se od druhé poloviny 20. století odvíjely od původně amerického konceptu PCC (Presidents' Conference Comitee Car). Typické pro tyto podvozky je použití čtyř kol na dvou nápravách. Tyto podvozky se zpravidla používají ve dvojici na samostatný vůz. Alternativou je také použití tzv. Jacobsonova podvozku, který spolu sdružuje dva sousední vozy vícečlánekové tramvaje. Tyto podvozky bývají trakční, tedy osazené pohonem. [7]

Nové tramvaje na přelomu století přinesly rozmanitost odlišných podvozků, například vozy Anitra (také nazývané Astra nebo Škoda Inekon LTM), popřípadě Elektra (označení 13T6 nebo též Porsche) jsou vícečlánekové konstrukce, avšak používají pevné podvozky. V průjezdu traťovým obloukem tedy dochází k natočení celého článku vozu, nikoliv samotného podvozku. [8]

## 2.2.3 Části kolejnice

V českých městech se pro tramvajovou dopravu používají tzv. žlábkové a blokové koleje, které dodávají Třinecké železárny. Tento typ kolejí chrání žlábkem prostor pro okolek, jestliže je temeno umístěno ve výšce okolní vozovky. Nejrozšířenější typ kolejnic nese označení NT 1 resp. NT 3. [9]



Obrázek 2-3 Žlábková kolejnice

Jednoduché schéma žlábkové kolejnice v řezu zobrazuje hlavu kolejnice vyvýšenou na stojině nad patu kolejnice, za kterou je tato připevněna k pražcům pomocí tzv. drobného kolejiva. Hlava se pak dále dělí na temeno, po kterém se odvalují kola vozu, přechodovou oblast boční a horní plochy hlavy tvoří pojížděná hrana, která v tomto případě navazuje na boční žlábek umístěný na vnitřních stranách tramvajových kolejí. Žlábek zajišťuje prostor pro volný pohyb okolku tramvajového kola. [10]

## 2.2.4 Trať

Dvojice ukotvených kolejnic v dané společné rozteči, tzv. rozchod kolejí (normální rozchod je 1435 mm), tvoří trať. V případě, že se trať stáčí do zatáčky, tzv. traťového oblouku (dále jen oblouk), je rozchod mírně rozšiřován pro lepší průjezdnost vozu.[10]

## 2.3 Mechanismy vibrací kol v kolejové dopravě

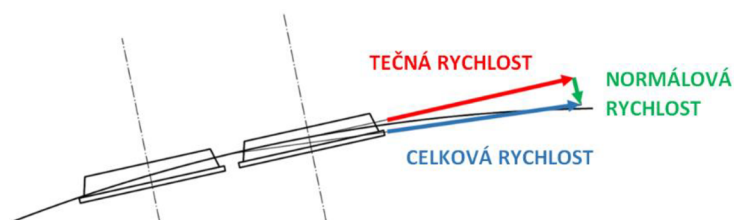
Nejstarším, ale dodnes relevantním článkem, který odstartoval intenzivnější výzkum hluku kolejové dopravy, je práce M. Rudda [11] z roku 1976. Oproti dnešnímu pohledu na problematiku hluku kolejové dopravy, kterou dělíme na jednotlivé složky hluku (viz níže) vycházely tehdejší hypotézy z komplexního pohledu na problém. M. Rudd si mechanismus vzniku kvílivého hluku v oblouku vysvětloval třemi různými hypotézami:

1. Dostředivé síly vytlačují dvojkolí směrem ven z oblouku, na vnější koleji dochází ke kontaktu pojížděné hrany kolejnice a okolku. (Pozdější experimenty však hypotézu vyvrátily, protože prokázaly maximum hluku na předním vnitřním kole)
2. Dvojice kol pevně spojená v rámci dvojkolí se pohybuje po různých drahách, kuželovité plochy kol již nemohou kompenzovat odlišné rychlosti valení, proto dochází k podélnému prokluzu a torznímu namáhání nápravy. Tyto torzní kmity pak způsobují vybuzení hluku.
3. Vlivem rozkladu dopředného křivočarého pohybu do přímočarého pohybu v oblouku dochází k nepravidelnému nestabilnímu bočnímu posuvu, který elasticky deformuje kola vozu a dochází k vybuzení kvílivého hluku.

Právě poslední hypotéza se stala základem dalších výzkumů kvílivého hluku, ale také důvodem pro rozlišování dalších typů hluku vzniklých odlišným způsobem.[11]

### 2.3.1 Kvílivý hluk v oblouku (Curve squeel)

Kvílivý hluk je vyvolán příčným smýkáním kol podvozku po temeni kolejnice. Pohybem soupravy v oblouku je první dvojkolí podvozku odchýleno od koleje o úhel náběhu a křivočarý posuv podvozku je rozložen do dvou směrů: ve směru oblouku (podélně) a do středu oblouku (příčně).



Obrázek 2-4 Rozklad rychlosti pohybem v oblouku



Adhezní síly brání příčnému smýkání kola, jsou však po čase saturovány (překonány energií příčného pohybu) a dochází k odtržení do nové polohy, kde se děj opakuje. Tyto příčné rázy excitují tvorbu vibrací celého kola vozu a mohou se přenášet také zpět do kolejnice. Výsledný zvukový účinek tvoří tonální hluk, jehož frekvenční spektrum je výrazně závislé na rozměrech a tvaru kola.[12]

Z pozorování vyplývá, že se amplituda kvílivého hluku mění v čase s pohybem vozu v oblouku. Rovněž vyzařování hluku není v rámci podvozku shodné, ale vnitřní kola vykazují větší hlučnost oproti kolům vnějším. Hluk kvílení je doprovázen také širokopásmovým hlukem způsobeným valením (viz níže), tento však nabývá nižších hodnot hladiny akustického tlaku. Pro odlišení kvílivého hluku od ostatních hluků pozadí (valení, další doprava atd.) je také možné provést frekvenční analýzu 1/3 oktávy, kde jsou jasně patrná tonální maxima kvílivého hluku, která převyšují okolní frekvence v amplitudě alespoň 5 dB. Periard ve své práci o hluku dále označuje 3 hlavní maxima typická pro kvílivý hluk, tedy 500 Hz, 2,5 kHz a 10 kHz. Nejvyšší frekvenční pásmo však v měření neprojevovalo větší odchylky, lze tedy předpokládat, že přímo nesouvisí s fenoménem kvílivého hluku.[13] Podobných výsledků dosáhl i V. Navrátil ve své diplomové práci, komplexní studii vlastních terénních dat hluku měřených na brněnských tramvajových točnách taktéž pomocí třetinooktávy analýzy určil frekvenční pásmo pro kvílivý hluk tramvají na 400 až 2000 Hz.[3] V teoretické rovině potvrdila tonální charakter kvílivého hluku také série numerických výpočtů pomocí metody konečných prvků, kdy byl model vybuzen fluktuací kontaktní (třecí) síly.[12]

Pro aktivní minimalizaci hluku cílenou změnou tribologických podmínek se používá modifikátorů adheze pro temeno kolejnice (Top of Rail, dále jen TOR produkty), které však svého účinku dosahují při vyšší míře aplikace. Naopak jejich excesivní množství má výrazný negativní účinek na zvýšenou brzdovou dráhu tramvajové soupravy.[14]

### 2.3.2 Hluk od okolku (Flanging noise)

Častým hlukovým projevem jízdy tramvaje v úzkém traťovém oblouku je také skřípavý hluk, který vytváří okolek předního vnějšího a zadního vnitřního kola dvounápravového podvozku odvalující se po pojížděné hraně kolejnice. V tomto kontaktu dochází ke smýkání, které přenáší vibrace především do kolejnice.[13] Vzniká atonální hluk o vysokých frekvencích s vysokou amplitudou. Práce V. Navrátila určila frekvenční pásmo hluku pro okolek mezi 4 až 12,5 kHz.[3]

P. Remington prokázal na datech pánů Bleedorna and Johnstona neočekávané snížení hladiny akustického tlaku o 10 dB. Navíc již nevzniká kvílivý hluk, protože tomuto mechanismu je zabráněno. [15] Oproti tomu G. Squicciarini prokázal druhotný vznik kvílivého hluku na odpružených tramvajových kolech, pokud dojde ke dvoubodovému dotyku okolku s pojížděnou hranou.[16]

Kromě hlukových účinků dochází také k mechanickému opotřebenému profilu tramvajového kola i vybroušení žlábků kolejnic, proto se tento problém zpravidla řeší aplikováním plastického maziva na pojížděnou hranu kolejnice pomocí automatizovaných mazníků.[14]

### 2.3.3 Ostatní mechanismy hluku kolejové dopravy

Tato práce se zaměřuje hlavně na hluk vznikající průjezdem vozů v oblouku, pro úplnost je však dobré doplnit výčtem také další mechanismy a jejich charakteristické hlukové účinky, které tramvajovou dopravu neodlučitelně provázejí.[1]

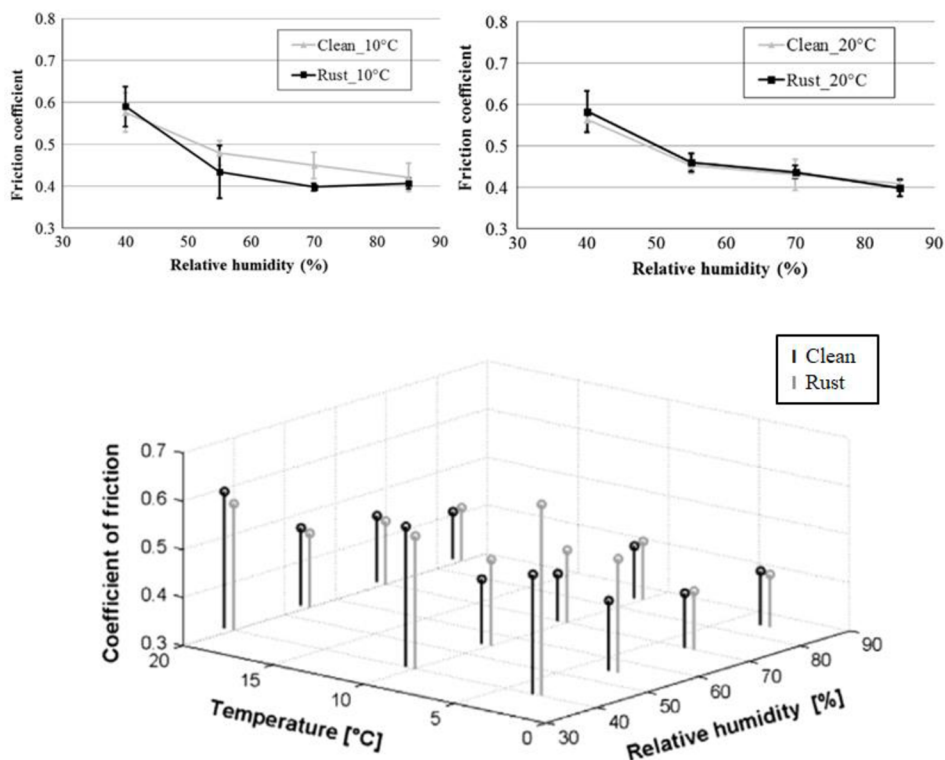
- Hluk od valení (Rolling noise) – vliv nerovností profilu kol, vlnkovatosti, anebo koroze kolejí
- Hluk od rázů (Impact noise) – vliv nespojitostí kolejí (výhybky, spoje, svary)
- Aerodynamický hluk – při vyšších rychlostech obtékáním karoserie vozů

## 2.4 Výzkum součinitele adheze

Pro bezpečné fungování kolejové dopravy je důležité udržovat součinitel adheze v daných intervalech. Ty shrnul U. Olofsson ve svém přehledovém článku následovně: [17]

- 0,60 – 0,45 Riziko vzniku adhezního opotřebení (trhliny)
- 0,40 – 0,25 Dobré provozní podmínky
- 0,17 Minimální požadovaná hodnota pro bezpečný provoz
- 0,05 – 0,01 Nízká adheze (přítomnost vody, nebo listí v kontaktu)

Součinitel adheze bývá zpravidla měřen laboratorně pomocí tribometrů, jejichž kompaktní rozměry dovolují měření provést v klimaticky kontrolovaném prostředí (dále klimakomora). Y. Zhu vedl tým, který pomocí tribometru typu pin-on-disk (kolík na otáčivém disku) vyhodnotil rozdílné hodnoty součinitele adheze pro teploty od 3 °C do 20 °C v rozmezí relativní vlhkosti od 40 % do 85 %.

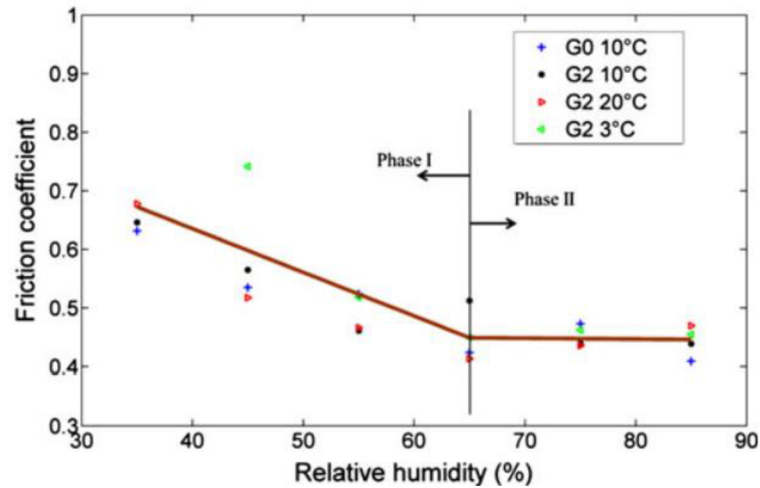


Obrázek 2-5 Zhu et al. – závislost součinitele adheze na teplotě a vlhkosti [18]

Vyhodnocené adhezní křivky jsou pro čistý disk bez povlaků, ale také pro disk s korozním povlakem (hematit). Studie ukázala pouze slabé odlišnosti od společného trendu: s rostoucí absolutní vlhkostí klesá součinitel adheze.[18]

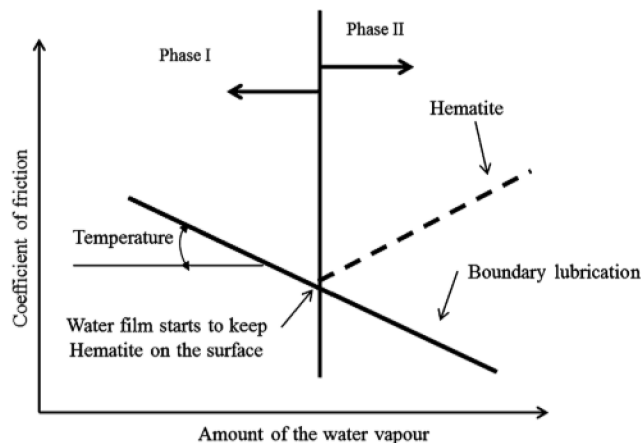
Laboratorní studie týmu U. Olofssona na tribometru ball-on-disk v klimakomoře zkoumala nejen vliv teploty a vlhkosti na velikost součinitele adheze, ale zaměřila se také na vznik oxidické vrstvy a její význam při změně adheze. Vzorčky byly rozděleny do dvou skupin podle doby expozice zvýšené vlhkosti na silně zoxidované (G1), slabě zoxidované (G2) a kontrolní (G0).[19]

Porovnáním třech teplotních pásem se ukazuje vyšší adheze při nižších teplotách a vlhkostech. Výsledky shrnuje graf níže. Byla vyzorována oblast s vlhkostí vyšší než 65 % procent (II. fáze), kdy jsou hodnoty součinitele adheze již srovnatelné a nezávislé na teplotě.



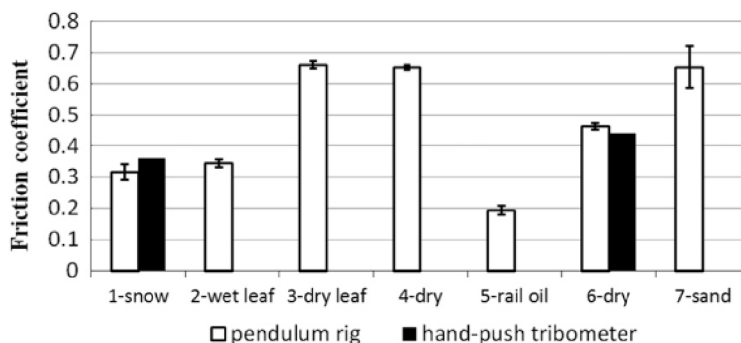
Obrázek 2-6 Olofsson et al. – závislost součinitele adheze na relativní vlhkosti [19]

Olofsson s pomocí Ramanovy spektroskopie určoval také chemické složení oxidické vrstvy, jejíž skladba i vlastnosti se měnily s časem. Graf níže ukazuje, že významnou roli hraje množství vodní páry v okolí, které zpomaluje proces vysychání, ale také tvoří podmínky pro vznik oxidické vrstvy (hematit), která zvyšuje součinitel adheze.[19]



Obrázek 2-7 Olofsson et al. – vliv vodní páry na součiniteli adheze při vzniku hematitu[19]

Vliv dalších kontaminantů popisuje Y. Zhu ve svém článku. Pomocí ručního, respektive kyvadlového tribometru byly stanoveny hodnoty pro typické znečištění kontaktu kola s kolejnici v reálném prostředí. V porovnání se suchým kontaktem dochází ke zvýšení součinitele adheze při pískování a v přítomnosti suchého listí. Naopak sníh, olej nebo mokré listí součinitel snižují.[18]



Obrázek 2-8 Zhu et al. – vliv kontaminantů v kontaktu na součinitel adheze [18]

## 2.5 Terénní měření hluku kolejové dopravy

### 2.5.1 Terénní studie složených kol a vlivu vody

Prvním měřením v reálných, ale kontrolovaných podmínkách byla studie z roku 2011 (G. Squicciarini)[20], která se snažila porovnat předešlé teoretické předpoklady a počítačové modely s daty naměřenými na tramvajových vozech. Motivací práce byla snaha snížit hlučnost složených (obručových) kol, která se v praxi dle autorů vyznačují pouze částečným účinkem. Měřeny byly vibrace kol i kolejnice a na nich závislý vyzářený hluk v průjezdu moderní tramvaje o sedmi podvozcích se složenými koly obloukem o rádiu 17,5 m. Nejprve byla provedena modální analýza kol modálním (vyvěšených ve volném prostoru i v kontaktu s kolejnicí), pak následovala série měření v oblouku. Porovnávána byla vnitřní a vnější kola, test probíhal nejprve v suchém kontaktu, pak v kontaktu s vodou. V obou případech byla rychlost vozu 10 km/h.

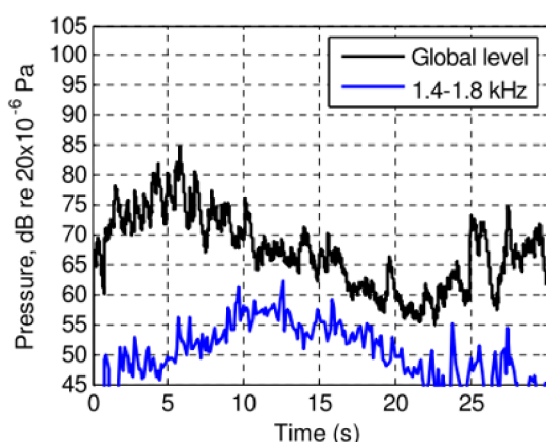


Figure 17. Left curve,  $V=10$  km/h, sensor M2 reduced friction coefficient (wet track).

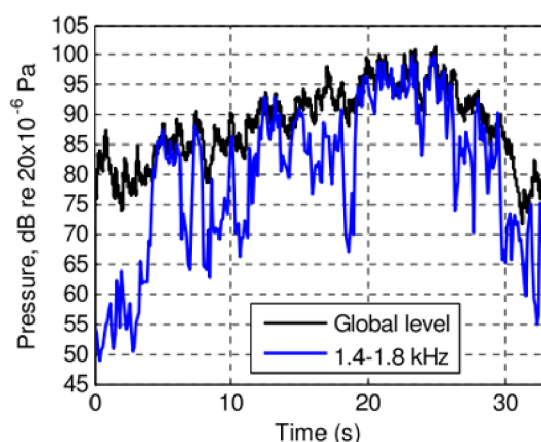


Figure 16. Left curve,  $V=10$  km/h, sensor M2 dry friction.

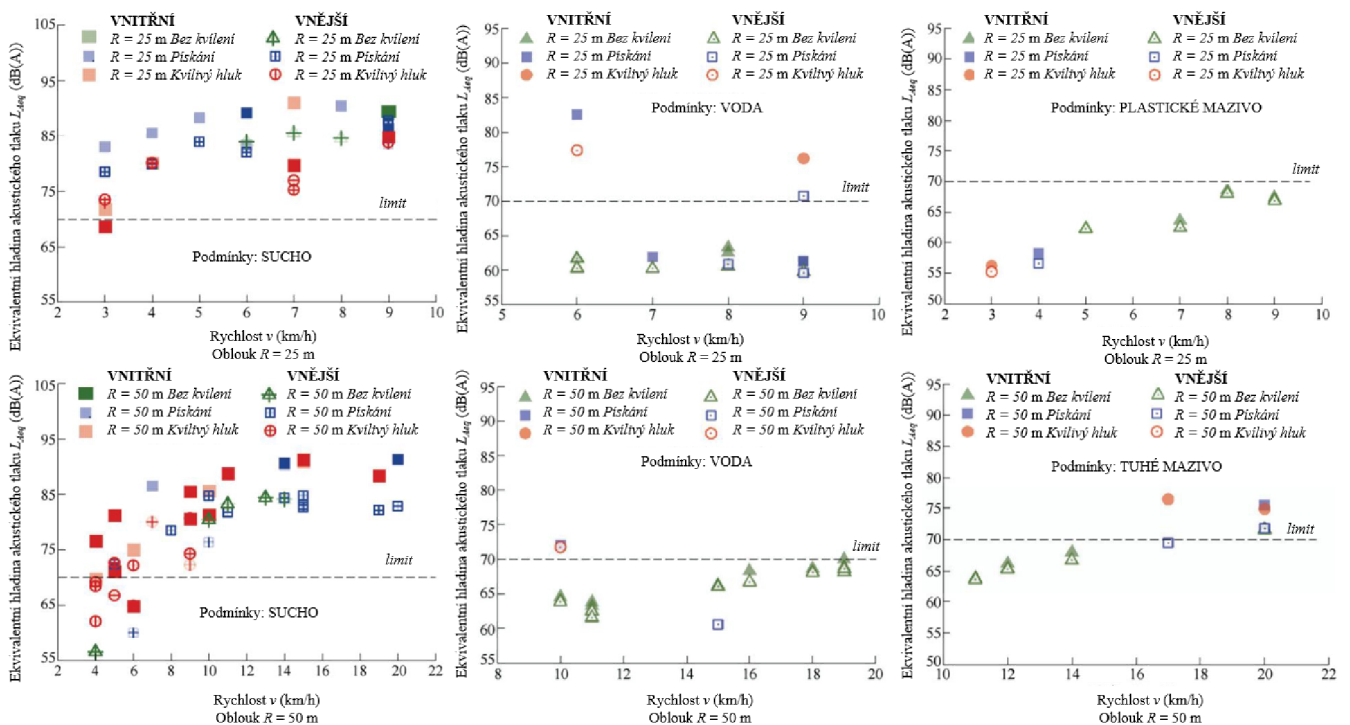
Obrázek 2-9 Squicciarini et al. – porovnání frekvenčního spektra pro suchý a mokrý kontakt kola a kolejnice[20]

Experiment také dokázal okamžité zmizení kvilivého hluku aplikací vody do kontaktu. Při suchém kontaktu bylo možné změřit vyšší SPL pro vnitřní kolo a maximální SPL byla zaznamenána v pásmu kolem 1500 Hz, což odpovídá 3. módu kmitání složeného kola.[20]

## 2.5.2 Experimentální studie vlivu rychlosti

Terénním měřením hluku ve dvojici traťových oblouků ( $R_1 = 25$  m;  $R_2 = 50$  m) se zabíral Y. Zhao.[21] Testovány byly tramvaje se třemi pevnými podvozky (1. a 3. podvozek byl trakční) osazené složenými koly. Vůz byl osazen dvěma mikrofony přímo na podvozku pro každou stranu, další dvojice mikrofonů byla umístěna 7,5 m od středu oblouku ve výšce 1,2 m (Výslednou hluk by porovnáván s hygienickým limitem 70 dB) [22]. Měřicí řetězec uzavírala dvojice akcelerometrů měřících vibrace umístěných na vnější a vnitřní koleji.

Experiment pracoval s modifikací adheze. Kontrolní test byl proveden na suchém kontaktu, dále byly obě kolejnice (vnitřní i vnější) nejprve testovány s přítomností vody, pak s plastickým i tuhým mazivem na každé zvlášť i dohromady. Tento test probíhal na společné trati, kdy vůz projížděl nejprve užším, pak širším obloukem. Rozsah rychlostí byl od 3 do 9 km/h pro úzký a od 4 do 20 km/h pro širší oblouk.



Obrázek 2-10 Zhao et al. – výsledky vlivu rychlosti na SPL kvilivého hluku za různých podmínek [21]

Levá dvojice grafů pro oblouky velikosti  $R = 25$  m a  $R = 50$  m ukazují rostoucí závislost SPL pro kvílivý hluk při rostoucí rychlosti vozu. Rostoucí trend lze vypožorovat i u pískání (hluk o vyšších frekvencích než pásmo kvílivého hluku), ovšem závislost není stejně výrazná, jako v předchozím případě. Měřená data potvrzují, že nejhluchnějším kolem podvozku je vnitřní kolo přední nápravy.

Měření dále prokázalo, že i nanesení menšího množství vody pomocí rozprašovače na koleje snížilo ve většině případů SPL pod daný limit 70 dB. Ukazuje se, že hluk při přítomnosti vody v kontaktu se stává konstantním a neklesá pod 60 dB, což již bude zkresleno valivým, mechanickým a aerodynamickým hlukem.

Pro úplnost lze dodat, že vliv obou typů maziv snížil hluk na oblouku  $R = 25$  m ve všech případech pod mez 70 dB, s výjimkou nejnižší rychlosti (3 km/h), zcela eliminovalo vznik kvílivého hluku. Oproti tomu měření z oblouku  $R = 50$  m ukazuje, že do limitu rychlosti 15 km/h nedocházelo ke vzniku kvílivého hluku ani hluku o vyšších frekvencích, po překonání této hranice se však vyskytuje dvojice obou hluků nad hodnotou 70 dB a vykazuje spíše slabší závislost na rychlosti.

### 2.5.3 Dlouhodobé pozorování – Vídeň

Nejrozsáhlejší terénní studií hluku kolejových vozidel (vlaků) v traťovém oblouku je práce T. Maleho [23] z Technické univerzity Vídeň. Měření po dobu 11 měsíců přineslo 20 000 vzorků. Pro měření byl použit mikrofon umístěný, obdobně jako v předchozí práci, 7,5 m od oblouku do výšky 1,2 m nad trať (dle předpisu normou DIN EN ISO 3095)[22]. Meteorologické podmínky trati měřil komerční systém Acramos. Dle počtu náprav snímaných indukčními senzory na kolejích byly vlaky rozděleny do dvou skupin (příměstský vlak A, příměstský vlak B), jednotlivé vozové jednotky dále nebyly rozlišovány.

Měřena a posouzena byla následující data:

- Typ soupravy (A nebo B)
- SPL pro hluk okolku (dB)
- SPL pro kvílivý hluk (dB)
- Teplota vzduchu ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Teplota kolejnice ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Teplota rosného bodu ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Relativní vlhkost vzduchu (%)
- Přítomnost deště (-)
- Velikost kol soupravy a odchylky (mm)
- Rozměry okolku (mm)

Pro posouzení vlivu byly použity binární logistické regresní analýzy. Vlivy provozních podmínek (viz výše) byly posuzovány pouze pro soupravy typu A. Těchto 11 souprav nejprve bylo posuzováno zvlášť, ale finální prezentované závislosti používají data smíšená. Vliv rychlosti byl zahrnut pouze pro třídění záznamů. Posuzovány dále byly pouze události souprav pohybujících se rychlostí od 55 do

65 km/h. (Rychlost je výrazně větší oproti předchozí studii, avšak je důležité, uvědomit si, že se jedná o vlakové soupravy v oblouku  $R = 230$  m)

Jelikož se jedná o první významnou studii, která používá dlouhodobé měření v terénu, tak je důležité zmínit i rozložení vstupních podmínek (zejména počasí), které nemohlo být pro měření vybíráno libovolně, ale je k dispozici pouze v časovém okně trvání měření. Data byla třízena do tabulky na obrázku níže. Červenou barvou jsou obsaženy buňky, které obsahují méně, než 10 průjezdů. Tato data dále nebyla posuzována studií.

suburban train type A												
	rain		air humidity [%]								dew point	
	no	yes	30	40	50	60	70	80	90	100	> rail temp	< rail temp
air temp. [°C]	0	569	23	3	23	38	47	51	300	107	458	111
	10	3466	423	29	160	390	837	909	851	290	1346	2120
	20	2673	249	42	166	418	437	638	490	404	78	314
	30	1279	18	9	216	428	355	196	73	2		1279
	40	3				3						3
rail temp. [°C]	-10	54	3		2	14	18	3	11	6	29	25
	0	1373	127	3	35	110	229	249	560	187	918	455
	10	3001	407	29	126	327	723	847	726	223	1015	1986
	20	1832	149	7	70	288	312	495	342	259	59	1676
	30	1093	26	29	163	274	309	235	82	1		1093
	40	499	1	15	114	209	143	18				499
50	138		35	98	5						138	

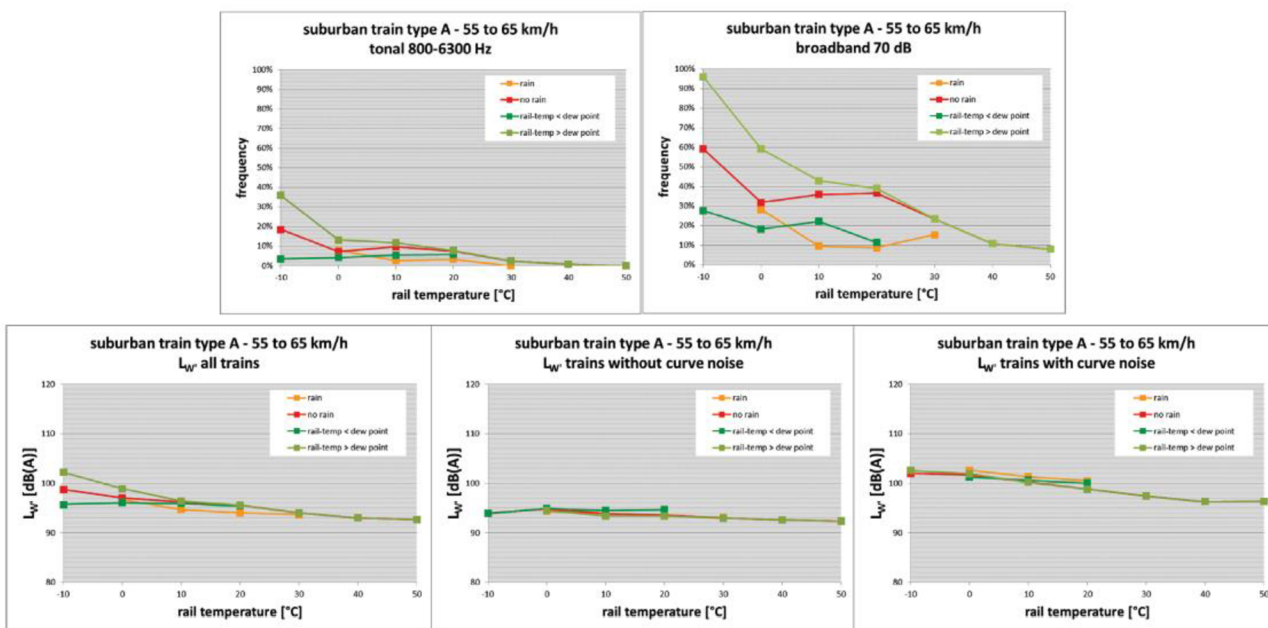
suburban train type B												
	rain		air humidity [%]								dew point	
	no	yes	30	40	50	60	70	80	90	100	> rail temp	< rail temp
air temp. [°C]	0	103	6				6	18	56	23	93	10
	10	798	97	4	34	75	173	207	231	74	377	421
	20	358	49	2	16	34	62	74	79	78	13	299
	30	249	5	1	26	104	76	29	13			249
	40	2				2						2
rail temp. [°C]	-10	7							6	1	7	
	0	319	36		1	23	55	71	137	32	227	92
	10	651	87	4	30	61	129	182	178	67	273	378
	20	238	28	9	25	35	68	50	41	10	22	216
	30	158	6	2	20	40	52	27	14	3		158
	40	108		1	11	51	42	3				108
50	29			2	27						29	

Obrázek 2-11 Maly et al. – rozložení terénních dat [23]

### Zkoumaný vliv meteorologie

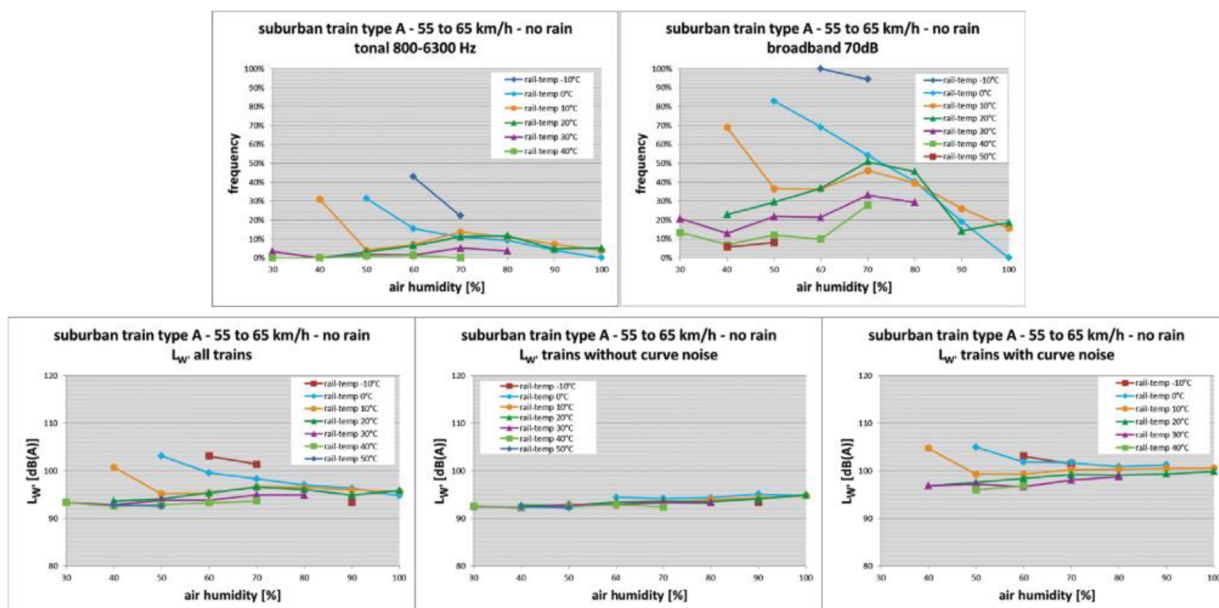
Data o vlivu meteorologie byla zanesena do grafů s ohledem na porovnání různé skladby naměřeného hluku. Horní dvojice grafů vykresluje závislost procentuálního zastoupení hluku o daných parametrech (frekvenční pásmo 800 až 6300 Hz, nebo SPL vyšší než 70 dB, což je podobně jako v předchozí studii stanoveno jako limit). Následná trojice grafů popisuje závislost SPL při rozlišení událostí s kvilivým hlukem a bez něj.





Obrázek 2-12 Maly et al. – závislosti kvilivého hluku na teplotě [23]

Z grafů je patrné, že při porovnání závislosti teploty vzduchu a teploty dochází pouze k menším odchylkám. Maximum výskytu hluku na obou pásmech je při nižších teplotách, ale lokální maximum vzniká také v intervalu 10 °C až 20 °C. Dvojice zelených křivek zobrazuje porovnání teploty s teplotou rosného bodu. Ukazuje se, že v případě teploty vzduchu nižší než rosný bod dochází ke snížení hluku (viz tmavozelená) na širokém pásmu, méně výrazně tomu je v případě frekvenčního pásma kvilivého hluku.

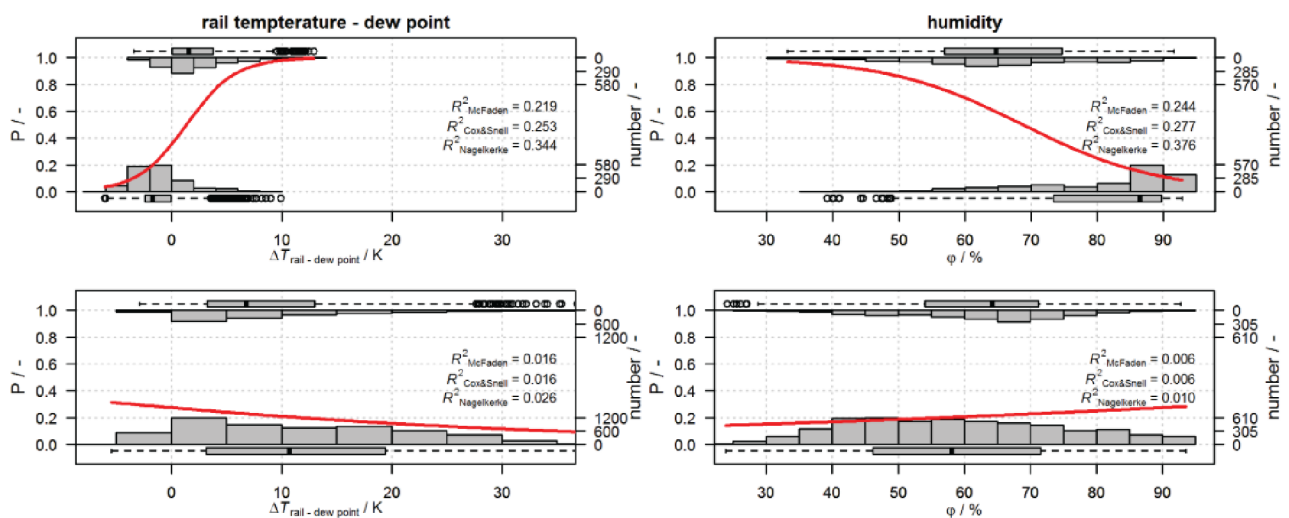


Obrázek 2-13 Maly et al. – závislosti kvilivého hluku na vlhkosti [23]

Porovnáním grafů závislostí na vlhkosti je patrný rozdíl mezi vlhkostí vzduchu do teploty 10 °C, kdy hlučnost i procentuální zastoupení stoupá s klesající vlhkostí. Oproti tomu data pro vzduch teplejší než 10 °C při porovnání hladin akustického tlaku ukazují pouze slabě rostoucí závislost hluku na zvyšující se vlhkosti.

Podobně jako v předchozích pracích se potvrzuje snížení hluku při meteorologických srážkách, tato studie navíc dodává, že tento efekt je nejvýznamnější na intervalu 0 °C až 20 °C.

Data byla dále rozdělena na dva meteorologické celky (listopad až leden; březen až září) ohraničené pouze na základě kalendářního data. Na těchto dvou celcích byla provedena regresní analýza ukazující spíše slabé závislosti. V grafu se nachází histogram celkových průjezdů v dolní části grafu, v horní části pak histogram průjezdů detekovaným hlukem. V horním řádku jsou grafy pro zimní období, v dolním pak grafy pro období od jara do podzimu.



Obrázek 2-14 Maly et al. – regresní analýzy vlivu teploty a vlhkosti [23]

Pro zlepšení výsledků regrese porovnávali i autoři studie jednotlivé soupravy zvlášť, ale nedosáhli lepších výsledků, proto jsou prezentovány pouze grafy s průměrovanými hodnotami pro celou statistickou populaci.

#### Vliv provozních parametrů

Obdobně byla provedena regresní analýza pro vliv sledovaných parametrů kol, rovněž nebylo nalezeno statisticky významné vysvětlení vlivů hluku.

### 2.5.4 Dlouhodobé pozorování – Stockholm

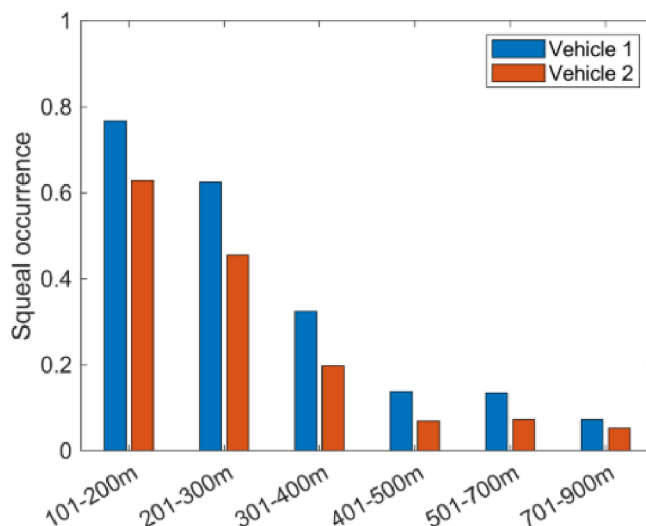
Poslední významnou prací zpracovávající data z terénního měření je studie P. Torsterssona.[24] Tato studie probíhala od ledna 2019 do listopadu 2021 na zelené lince Stockholmského metra. Oproti předchozím studiím bylo využito palubního měřicího systému vyvinutého ve spolupráci se

společností Tyréns Solutions AB umístěném na prvním, resp. posledním podvozku vozu (kvůli jízdě soupravy v obou směrech). Měřen byl hluk prostřednictvím dvou vozů metra.

Data byla zaznamenána, pokud byly splněny tyto požadavky:

- Vůz se pohybuje v oblouku
- Hluk přesáhne hodnotu SPL 95 dB
- Rozdíl SPL vnitřního a vnějšího kola podvozku je vyšší než 3 dB

Jelikož toto měření probíhalo na celé trati, další proměnou, která do analýzy závislosti přibývá, je rádius daného oblouku. Ty se různily od 100 do 900 m. Rovněž inovativní bylo také zahrnutí vlivu, zda se oblouk nachází uvnitř tunelu, nebo na povrchu, jelikož se tyto vozy pohybují také v nadzemní dráze. Sledována byla i rychlost vozu, avšak nebyla nalezena závislost a výsledky dále nebyly v článku publikovány.



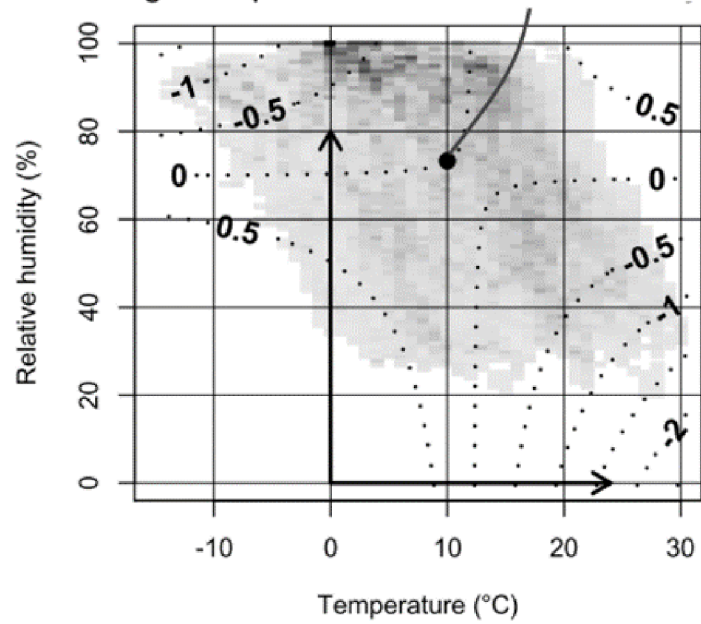
Obrázek 2-15 Torsterson et al. – vliv poloměru oblouku na kvílivý hluk [24]

Porovnání procentuálního výskytu kvílivého hluku v závislosti na rádiu oblouku prokázalo rozdíl mezi dvěma vozy na hladině významnosti  $p_s < 0,001$ .

Vliv teploty a vlhkosti zobrazuje graf níže, sytost šedé barvy značí vyšší výskyt naměřených dat. Odezva systému kvílivého hluku na meteorologické podmínky byla získána binární logistickou regresní analýzou. Vrstevnice grafu pak ukazují regresní koeficienty.

Z analýzy vyplývá, že pro pásmo teplot nad 10 °C stoupá pravděpodobnost vzniku kvílivého hluku s rostoucí relativní vlhkostí, obrácená závislost se nachází v teplotním pásmu pod 10 °C.

Average temperature and relative humidity



Obrázek 2-16 Torsterson et al. – pravděpodobnost výskytu kvílivého hluku na základě meteorologie [24]

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Z rešerše je patrné, že terénní měření je relativně mladým způsobem analyzování vnějších vlivů na vznik kvílivého hluku. Metodologicky jednodušší systém analýzy je terénní experiment, podobně, jak jej provedl Y. Zhao. Pro přesné vyhodnocení hluku na základě hygienických norem je třeba mít přesně ustaven vhodný mikrofón, jak to popisuje (dnes již neplatná) norma DIN EN ISO 3095 [23], avšak pro potřeby dlouhodobé analýzy jsou hodnoty SPL spíše relativní veličinou. Dlouhodobá měření nezaznamenávají celý průběh hlukové události, ale pouze vyhodnotí na základě pásmové propusti, zda se jedná o daný typ hluku. Zaznamenána pak vždy bývá hodnota SPL.

Z porovnání vstupních parametrů studie, kterou vedl Y. Zhao ( $R = 25$  m,  $v = 3\text{--}9$  km/h;  $R = 50$  m;  $v = 4\text{--}20$  km/h)[21] a vídeňské studie T. Maleho ( $R = 230$  m,  $v = 55\text{--}65$  km/h)[23] je patrné, že poznatky naměřené ve Vídni pro kvílivý hluk vlakové soupravy mohou prokazovat odlišnosti oproti tramvajovým vozům. Nejblíže se tramvajím blíží stockholmská studie P. Torstersona, ale v tomto případě šlo o výrazně odlišnou metodologii využívajícího palubního měření. Tato práce vzniká pro potřeby DPMB v rámci dlouhodobé spolupráce, metodologicky tedy navazuje na diplomovou práci V. Navrátila, která se zabývala vývojem modulu na automatické stacionární měření meteorologických vlivů a hlukových projevů v lokalitě dané točny.

V případě meteorologické analýzy tato studie tedy navazuje na práci T. Maleho se snahou prokázat zobecněné výsledky v klimaticky podobných podmínkách Brna, ale na výrazně strmějších tramvajových obloucích, kde bývá kvílivý hluk častějším problémem.

Jev snížení kvílivého hluku za přítomnosti vody v kontaktu je dlouhodobě prokázáný, laboratorní práce U. Olofssona [19] však ukázala rozdílné adhezni chování při vzniku oxidické vrstvy při pozvolném odpařování, na analýzu tohoto jevu skrze terénní data se však zatím žádná studie nezaměřila.

Vliv rozdílných konstrukcí vozu nebyl v žádné uvedené studii více analyzován, zpravidla byla měřena data vždy pro jeden konkrétní typ vozu (respektive podvozku). Odlišnost mezi jednotlivými vozy byla v případě vídeňského dlouhodobého pozorování zmíněna pouze okrajově, místo toho byla analyzována velice podrobná data rozměrů kol daných podvozků sledovaných souprav. Zajímavé porovnání přinesl stockholmský výzkum, který však porovnával mezi sebou pouze dvě soupravy metra. Z praktických příčin by tedy bylo snazší provést nejprve analýzu hluku jednotlivých vozů téhož typu a na základě těchto výsledků teprve přikročit k náročnému měření fyzických rozměrů kol.

Vliv rychlosti zůstává neuspokojivě popsán, T. Maly tento parametr obešel výběrem pouze těch vozů, které se pohybovaly v intervalu  $v = 55\text{--}65$  km/h. Práce Y. Zhao prokázala na menším vzorku v kontrolovaných podmínkách závislost hluku na rychlosti vozu, ovšem P. Torstensen [24] tuto

závislost dlouhodobým (rok a půl) palubním měřením neprokázal. Zůstává tedy otázka, zda je možné z nahodilých terénních dat tuto závislost vysledovat pro tramvajové vozy.

## 3.2 Výzkumné otázky

Zkoumané téma (závislosti kvilivého hluku tramvajové dopravy v Brně) přineslo na základě systematické rešerše článků tyto otázky, kterými se moje práce bude dále zabývat:

### O1: Jak citlivé je vyzářování kvilivého hluku na meteorologické podmínky?

*V poslední době vznikly ve střední Evropě dvě terénní studie, jedna při Technické univerzitě ve Vídni [23] a druhá v rámci téhož projektu, jako tato práce, na VUT [25], avšak v některých detailech se výsledky rozcházejí. Otázka tedy je, zda je skutečně odlišné chování tramvají oproti vlakové dopravě (které se věnovala ona rozsáhlá vídeňská studie).*

### O2: Jak citlivé je vyzářování kvilivého hluku na vysychání kolejí?

*Voda v kontaktu sice snižuje adhezi a tlumí vznik kvilivého hluku, ale může také přispívat ke vzniku oxidických povlaků při pomalém vypařování.[19] Lze tedy účinky této změny tribologických podmínek analyzovat pouze na základě pohledu zvenčí (měřením hluku)?*

### O3: Jak závislé je vyzářování kvilivého hluku na typu vozu a stavu jeho kol?

*Tramvajové vozy DPMB procházejí periodickou kontrolou a údržbou podvozku (reprofilace kol, kontrola ložisek), také složení vozového parku tramvají v Brně je rozsáhlé. Předchozí studie se zaměřovaly pouze na jeden typ daného kolejového vozidla.[21][23][24] Otázkou tedy je, zda lze vypožorovat konkrétní vozy, které jsou náchylnější na vznik kvilivého hluku v úzkých traťových obloucích. Je možné tyto odlišnosti vysvětlit obdobně jako T. Malý [23] ovšem pouze na základě dat z periodických kontrol prováděných DPMB?*

### O4: Jak ovlivňuje rychlost soupravy vznik a parametry kvilivého hluku?

*Na tramvajových točnách zpravidla bývá maximální rychlost snížena (10 km/h v případě zkoumané tramvajové smyčky) kvůli bezpečnosti vozu proti vykolejení. Předchozí evropské studie [23][24] oproti studii Y. Zhaa [21] neprokázaly významný vliv rychlosti. Můžeme tedy prokázat závislost vzniku kvilivého hluku i na vzorku nahodilých dat získaných měřením, nikoli experimentem?*

## 3.3 Cíle výzkumu

Hlavním cílem výzkumu určit provozní a meteorologické vlivy a jejich významnost pro mechanismus tvorby hluku průjezdem tramvaje úzkým traťovým obloukem. Vlivy budou posuzovány na ročním vzorku dat z tramvajové smyčky v Brně-Komíně.

Dílčí cíle diplomové práce:

- Posoudit vliv meteorologických podmínek (teplota, vlhkost, srážky)
- Posoudit vliv provozních podmínek (typ kol, doba po reprofilaci, konstrukce vozu)
- Posoudit vliv rychlosti průjezdu tramvajovou točnou
- Vyhodnotit, interpretovat a publikovat výsledky

## 3.4 Hypotézy

### H1.1: Zvýšená vlhkost, případně srážky budou snižovat SPL průjezdu tramvaje.

*Na základě předpokladu, že hlavní příčinou vzniku kvilivého hluku v obloucích je adhezní odtrhávání v příčném směru, lze uvažovat závislost hluku na velikosti adheze kontaktu kolo-kolejnice.[1] Lze tedy tvrdit, že adheze je závislá na teplotě [19] a přítomnosti vody [26], ať už jako vzdušné vlhkosti, nebo vodních srážek.*

### H1.2: Zvýšená teplota bude snižovat SPL průjezdu tramvaje.

*Na základě podobnosti chování vlakové a tramvajové soupravy v oblouku lze očekávat srovnatelnou závislost jako v práci T. Maleho.[23] Výsledky pro tramvajové vozy mohou být významnější, jelikož se vůz pohybuje na výrazně užším oblouku.*

### H2.1: Měření prokáže snížení SPL při trvání meteorologických srážek.

*Na základě prací, které provedli Squicciarini [26], T. Maly [23] a Zhao [21], lze tvrdit, že s přítomností vody v kontaktu dojde ke snížení SPL kvilivého hluku.*

### H2.2: Měření prokáže zvýšení SPL po ustání meteorologických srážek.

*Po vyplavení většiny vody z kolejnic dojde k postupnému vysychání (vlivem předpokladu vyšší relativní vzdušné vlhkosti) a vzniku korozních produktů.[19] Přítomnost těchto produktů bude možné předpokládat na základě odlišné SPL při podobné vlhkosti za sucha.*

### H3.1: Měření prokáže rozdílné průměry hlukových parametrů různých konstrukcí vozů.

### H3.2: Měření prokáže rozdílné průměry hlukových parametrů různých vozů téže konstrukce.

*Vídeňská studie T. Maleho [23] rozlišovala pouze dva druhy vlaků, avšak vyzorovala rozdílné chování souprav. Brněnská studie v rámci BP K. Lounka [25] zcela jasně pojmenovala rozdílné hlukové účinky průjezdu různých tramvajových vozů téhož typu.*

### H4: Při vyšších rychlostech bude narůstat SPL ve frekvenčním pásmu kvilivého hluku.

*Zhao [21] prokázal významný vliv rychlosti vozu na hladinu akustického tlaku v laboratorní studii i v kontrolovaném terenním měření.*



## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Materiál

Tato práce jako vstupní materiál zpracovává dvě skupiny dat. Automatické měření hluku probíhalo dlouhodobě, avšak tato data již mají omezenou výpovědní hodnotu, jelikož známe pouze maximální a střední hodnotu SPL v daném frekvenčním pásmu (viz níže) a dobu trvání události. Druhou skupinu tvoří ručně sbíraná data sloužící pro druhotné verifikace hypotéz, které se nepodařilo prokázat na dlouhodobém měření. Výhodou této skupiny dat jsou i poznámky k průjezdu vozu a také záznamy hluku ve formátu WAV, který umožňuje opětovné přehrání a analyzování.

#### 4.1.1 Data z měření na tramvajové smyčce v Brně-Komíně

První skupinou je rozsáhlý soubor dat automatizovaných terénních měření pořízených na tramvajové smyčce v Brně-Komíně. Měření probíhalo od 23. července do 23. listopadu 2022. Data byla sbírána na základě kritérií, která musel hluk tramvaje splnit. Celkový statistický soubor této skupiny se skládá ze dvou nezávislých zdrojů:

- Výhybkový modul před točnou v Brně-Komíně
  - Čas vjezdu vozu do měřené oblasti
  - Číslo vozu tramvaje pro rozlišení
- Hlukový a meteorologický modul VUT, FSI, ÚK
  - Údaje o počasí (teplota, relativní vlhkost, přítomnost srážek)
  - Údaje o hluku (maximální a střední SPL, doba trvání)

#### 4.1.2 Data z měření na tramvajové smyčce Technologický park

Tato měření proběhla v rámci několika dnů, nebyl použit modul pro záznam meteorologických údajů, ale měření jsou opatřena časovou značkou a je možné jim zpětně přiřadit tyto údaje získané z nejbližší meteostanice. Měření postihlo celkem 103 průjezdů, hlavními zdroji dat jsou:

- Hlukoměr SVANTEK SV 977 – záznam hluku
- Dopplerovský radar OmniPresence OPS243-C – rychlost vozu



## 4.2 Přístrojové vybavení

### 4.2.1 Výhybkový modul

Modul DPMB bezdrátově komunikuje s tramvají při volbě polohy výhybky. Zaznamenanými údaji relevantními pro tuto práci jsou číslo tramvaje, zvolený směr výhybky a časová značka.

### 4.2.2 Měřicí modul VUT

Předchůdce tohoto zařízení navrhl a vytvořil Ing. V. Navrátil v rámci své diplomové práce. [3] Současný systém pracuje na základě programovatelného automatu značky BR oproti svému předchůdci používajícího kontrolery Arduino. Modul je umístěn na trolejovém stožáru v bezprostřední blízkosti traťového oblouku smyčky, tedy cca 11 m od vrcholu oblouku ve výšce 4 m. Měření hluku tedy není normalizované, jelikož není umístěn dle planých hygienických předpisů, ovšem cílem této studie není přesně měřit úroveň akustické hladiny.

Senzoriku modulu tvoří:

- Piezoelektrický (IEPE) Mikrofon Roga MI-21 pro venkovní použití od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , frekvenční rozsah od 5 Hz do 20 kHz, maximální špičková SPL 130 dB ( $p_{ref} = 20\text{ }\mu\text{Pa}$ ). [27]
- Detektor deště značky B + B Thermo-Technik – měření zajišťuje elektrolytické čidlo na vyhřívané ploše pro snížení zkreslení vlivem pomalého odparu vody. [28]
- Venkovní teploměr s vlhkoměrem firmy Loxone s měřícím rozsahem teploty od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  a rozsahem 0 až 100 % pro relativní vlhkost. [29]

Výstupní záznamy jsou rozděleny do dvou výpisů o různých vzorkovacích frekvencích. První skupinou záznamů je dlouhodobé měření s pravidelnou periodou zápisu 1 minuta. Zaznamenávány jsou meteorologické údaje (teplota vzduchu, relativní vlhkost a přítomnost srážek) a také údaje o hluku (střední a maximální SPL hodnota na daných pásmech, viz níže). Druhou skupinou výstupních dat jsou záznamy kvílivého hluku, které jsou spouštěny při překročení akustické hladiny 70 dB.

Hluk je zapisován ve třech veličinách: průměrná hladina akustického tlaku (dále SPL\_Mean), maximální hladina akustického tlaku (dále SPL\_Max) a doba trvání hlukové události (tedy čas, kdy hluk přesáhl dané parametry). Modul signál rozkládá a zaznamenává do třech frekvenčních pásem na základě terénních testů v rámci diplomové práce Navrátila. [3]

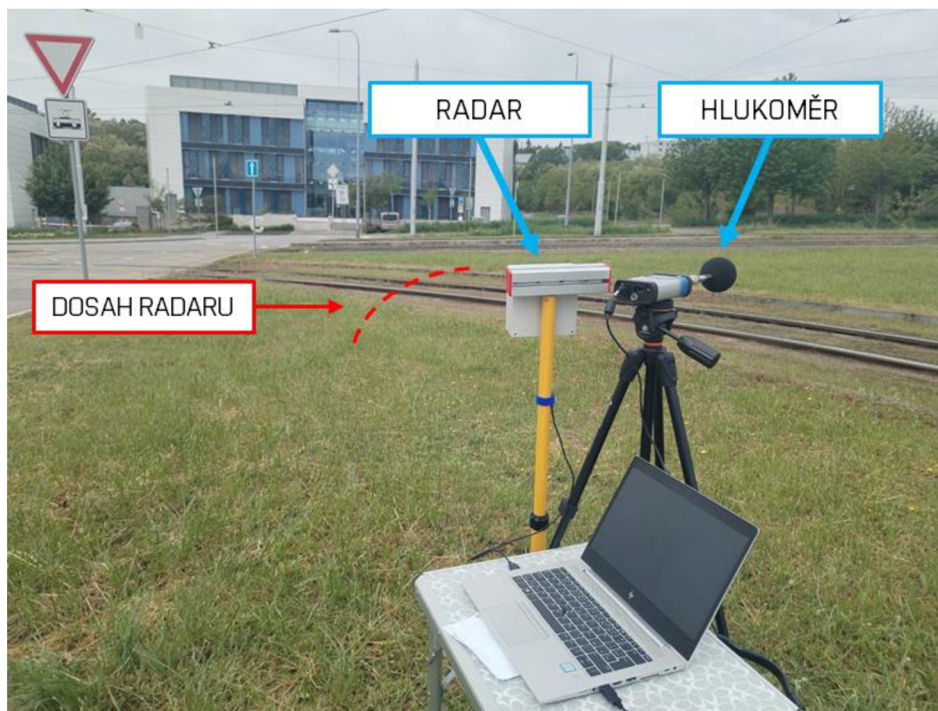
1. pásmo pro kvílivý hluk temene kola 400–2000 Hz (práh 70 dB)
2. pásmo pro skřipavý hluk okolku 4000–12.500 Hz
3. široké pásmo 20–20.000 Hz (práh 60 dB)

Pro vyhodnocení závislosti kvílivého hluku tramvají budou dále používána pouze data z 1. frekvenčního pásma podobně, jako tomu bylo v práci K. Lounka. [25]

Jediný průjezd vozu obloukem může obsahovat mnoho hlukových událostí, obsahem následující kapitoly proto bude samotný proces agregace dat pro jediný průjezd.

### 4.2.3 Dopplerovský radar

Pro zahrnutí vlivu rychlosti bylo zvažováno více způsobů měření, zvolena nakonec byla nejméně invazivní varianta, která nezasahuje do kolejiště či nejbližšího průjezdového obrysu vozů. Radar firmy OmniPresence OPS243-C má rozsah snímání až 60 m v rámci kužele vrcholového úhlu 20°. Je schopen měřit vzdálenost, rychlost a směr objektu. S maximálním rozsahem jsou však data již silně zarušena, proto se zpravidla používá menšího dosahu měření. Užitečným údajem pro strojové zpracování dat je také velikost tzv. magnituda, tedy síly signálu měřeného tělesa. Takto lze separovat různá rušení, která při výšené citlivosti mohou nastat. Již vlastní systém umožňuje vypisovat do sběrnice pouze daný interval rychlostí, magnituda signálu a směru pohybu (k senzoru nebo od senzoru). Pro přesnou velikost rychlosti se objekt musí pohybovat v ose senzoru, při pohybu vozu



Obrázek 4-1 Umístění hlukoměru a radaru na tramvajové smyčce Technologický park

v oblouku tedy senzor nesnímá skutečnou rychlost, ale pouze její složku v odpovídající tečně. Tento problém je vyřešen obdobně jako nenormalizované měření hluku, hodnota rychlosti má pouze porovnávací význam. Při měřeních na točně v Technologickém parku byl senzor umístěn vždy na stejné místo (viz dále). V době řešení práce se nepodařilo modifikovat stávající modul VUT připojením tohoto radaru, proto byla data ručně vybírána z výpisu v terminálu PUTTY z připojeného notebooku.

Z fotografie je patrné nasměrování radaru do oblouku proti projíždějícím tramvajím, je naznačena také přibližná vzdálenost, odkud již radar měří rychlost projíždějícího vozu, právě proto je hlukoměr nastaven mikrofonom do až následující části oblouku, takže měření zvýhodní hlukové účinky při průjezdu měřeným úsekem.

#### 4.2.4 Hlukoměr

Hlukoměr Svantek byl umístěn na stativ v blízkosti radaru, záznamy byly ručně spouštěny při výjezdu tramvaje ze zastávky. Naměřená data pak byla hromadně zpracována v programu SvanPC++. Výstupem zpracovaných dat je pak třetinooktávová analýza maximálních hodnot SPL pro daná pásma, dále byla pro posouzení použita data o z pásma 500 Hz pro kvílivý hluk a doplňkově 3150 Hz, jelikož byly tyto složky v daných výskytech nejdominantnější.

### 4.3 Testované točny

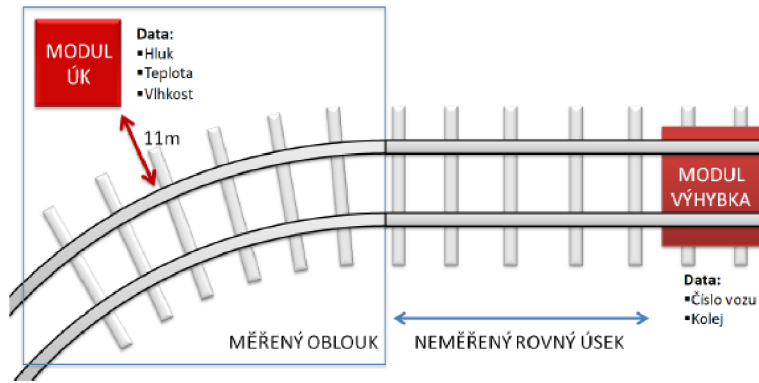
#### 4.3.1 Brno-Komín

Dlouhodobé měření probíhalo od 23. července do 23. listopadu na tramvajové smyčce Brno-Komín, tato točna byla používána pouze za doby dostavby Žabovřeského tunelu tramvajové linky 11. Smyčka v Brně-Komíně je dlouhodobě problematickou lokalitou a hlukové projevy průjezdu tramvaje mohou přímo ovlivnit až 70 osob v přilehlé městské zástavbě, jak informuje již v roce 2019 Akční plán protihlukových opatření pro aglomeraci Brno.[30] Dle tohoto plánu je třeba do roku 2021 osadit koleje tlumicími bokovnicemi pro snížení vyzařování hluku. Poloměr tramvajové smyčky je 21 metrů. [25] Rychlostník před vstupem tramvaje do oblouku smyčky upravuje rychlost průjezdu na 10 km/h [31], viz Obrázek 2-4. [25]

Na obrázku níže se nachází schéma situace, kdy je měření pořizováno. Trať začíná výhybkou, která je dálkově ovládána z vozu. Je proveden záznam o čísle projíždějící tramvajové soupravy a zvolené koleji (záznamy mimo oblouk neuvažujeme). Následně vůz musí překonat rovný úsek, který není zahrnut do měření hluku. Po překonání rovného úseku vůz projíždí traťovým obloukem a probíhá měření. Tramvaje po točně jezdí podle jízdního řádu nezměněně. Nahodilosti měření je dosaženo různorodým vozovým parkem a také zkoumáním velkého vzorku dat.

Pro lepší prostorovou představu o situaci je k dispozici i letecký snímek. V dolní straně vidíme zakroužkovanou výhybku, která je klíčová při tvorbě časového okna pro agregaci hlukových událostí jednotlivých průjezdů (viz dále), taktéž slouží k rozlišování jednotlivých tramvajových vozů. Po vnější straně oblouku na nejbližším sloupu je umístěn modul VUT. Lze vidět, že měřený oblouk trati (vnitřní dráha) je zasazen mezi obytnou výstavbou, což problém kvílivého hluku ještě umocňuje.





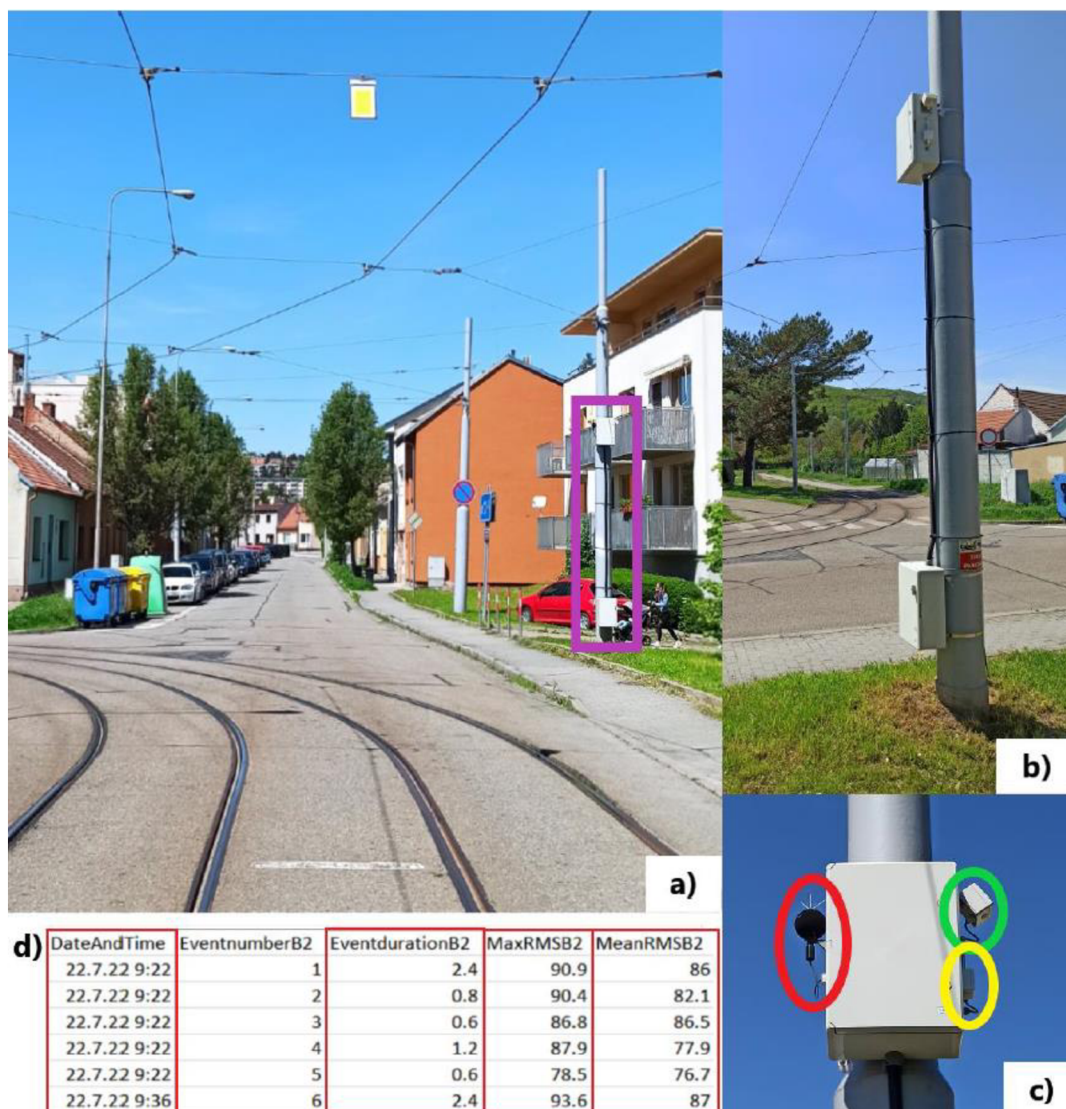
Obrázek 4-2 Schéma měřicího řetězce – smyčka Brno-Komín



Obrázek 4-3 Letecký snímek, smyčka Brno-Komín [32]

Jelikož je točna vybavena dvojicí kolejí v témže oblouku, je nutné předpokládat také jízdu v druhém (vnějším) oblouku, což se musí projevit ve filtrování naměřených dat, jelikož bude pozorován pouze vnitřní oblouk, který je využíván výrazně častěji. Další komplikace strojového zpracování dat bude nájezd dvou vozů do smyčky v těsné návaznosti. Rovný úsek je dost dlouhý na to, aby vozy projely v jiném pořadí, než projely výhybkou, popřípadě aby projely společně. Tato data nemůžeme zpětně již rozlišit a je nutné je vyřadit z další analýzy. V neposlední řadě je zde úskalí v podobě popojíždění vozů v rovném úseku, které jsme schopni strojovým zpracováním dat pouze částečně zohlednit v širším časovém oknu (viz dále) pro měření průjezd smyčkou.

Na následujícím obrázku z bakalářské práce K. Lounka [25] lze vidět umístění modulu v blízkosti oblouku, na trolejích je patrný žlutý rychlostník „Pomalů“ [31] (a), detail měřicího modulu (b), detail na senzoru (c) – červeně mikrofon, zeleně detektor srážek, žlutě kombinovaný senzor vlhkosti a teploty. Část tabulky ukazuje výstupní data z měření kvílivého hluku aktivovaná prahem 70 dB (d).



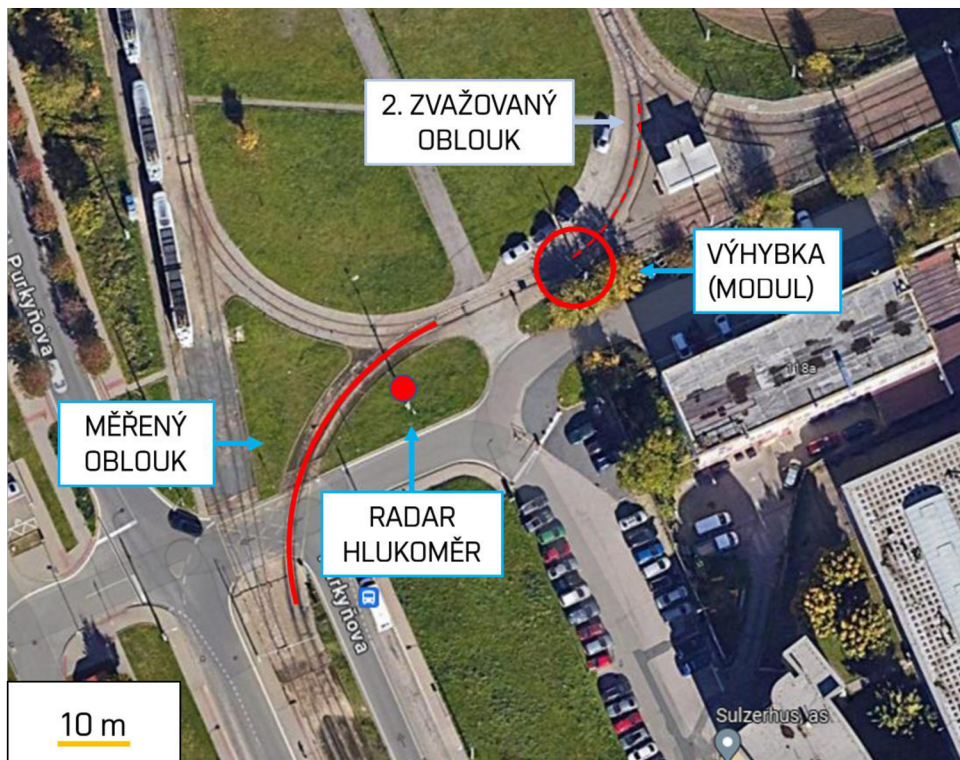
Obrázek 4-4 K. Lounek – umístění měřicího modulu [25]



### 4.3.2 Technologický park

Tramvajová smyčka při Technologickém parku je jednou z dalších lokalit vytipovaných v rámci diplomové práce V. Navrátila [3]. Jelikož je tento oblouk vzdálenější rezidentním čtvrtím, není problém kvilivého hluku zde tak závažný, aby byl obsažen ve výše zmiňovaném akčním plánu, ovšem hluk šířící se z této smyčky je slyšet na větší vzdálenosti. Dle map společnosti Google[33] je velikost sledovaného oblouku  $R = 30$  m, což je více, než v případě smyčky Brno-Komín. Rychlost vozu je návštěvidlem před obloukem omezena na 20 km/h, tedy více než v Brně-Komíně.

Smyčka v Technologickém parku byla vytipována také na základě poznatků metodiky automatického měření na smyčce v Brně-Komíně. Cílem bylo přenést měřicí modul a bez významnějších konstrukčních úprav jej přenést na novou lokaci. Nutnou podmínkou pro výběr umístění tohoto modulu je přítomnost výhybky, která bude sloužit jako základ pro rozpoznávání vozů a výběr hlukových událostí v časovém okně. Schéma měřicího řetězce tedy zůstává stejné, jako Obrázek 4-2. Jak může být patrné z obrázku níže, hlavní výhodou je, že se dlouhý úsek pro řazení tramvají nachází až za měřeným obloukem. Další výhodou je vyšší dovolená rychlost vozu kvůli stoupání do terénu, takto bude měření schopné postihnout širší vzorek rychlostí vozu. Tento oblouk má hned dvě hlavní nevýhody. Za prvé zvolená výhybka slouží také pro návrat vozů do vozovny a nastává situace, že zajišťující vůz zbrzdí průjezd vozu následujícího, hluková data jsou při automatickém zpracování zkreslena a je nutné vymazat záznamy obou vozů. Dalším úskalím je, že se hned za sledovaným obloukem nachází zázemí pro řidiče tramvají a některé vozy tedy zastavují hned v následujícím oblouku (na obrázku čárkovaně).



Obrázek 4-5 Letecký snímek, smyčka Technologický park [33]

Druhý zvažovaný oblouk je strmější než měřený, ale metodologicky je pro daný typ automatického pozorování méně vhodný, jelikož průjezdy jsou často zastavované. Dále by modul musel být umístěn na sloupu blíže začátku oblouku, což může tvořit legislativní problém kvůli minimální vzdálenosti, která je vyhrazena pro průjezd vozu (tzv. průjezdný průřez). Rychlostník tohoto oblouku stanovuje rychlost průjezdu na 15 km/h, což také snižuje rozsah očekávatelných výsledků.

V době řešení této diplomové práce nebyl modul osazen pro měření ve smyčce Technologický park, jelikož bylo nutné provést některé konstrukční modifikace, opravy a rozšíření pro měření rychlosti. Původně zamýšlené porovnání mezi automaticky a ručně měřenými daty tedy nebylo provedeno. Přesto bylo ruční měření provedeno právě v prvním oblouku vytipovaném pro budoucí osazení modulem, takže budou k dispozici referenční data pro kalibraci a následná budoucí automatická měření probíhající v rámci projektů s DPMB na ÚK VUT.

## 4.4 Metody

### 4.4.1 Zpracování dat – smyčka Komín

K posouzení vzniklých závislostí naměřených automaticky spouštěným modulem je nejprve potřeba spojit dohromady 3 hlavní datové soubory obsahující následující naměřené veličiny:

Hlukový modul (.csv) [BAND1 – pásmo pro kvílivý hluk]

- Časová značka události (RRRR MM DD HH:mm:ss:FFF) [Datum]
- Číslo události (1) [No]
- Délka události (s) [Duration\_1]
- Maximální hodnota SPL (dB) [Band\_1\_Max\_RMS]
- Průměrná hodnota SPL (dB) [Band\_1\_Mean\_RMS]

Meteorologické senzory (.csv)

- Časová značka události (RRRR MM DD HH:mm:ss:FFF) [Datum]
- Teplota (°C) [temperature\_calibrated\_C]
- Relativní vlhkost (%) [humidity\_calibrated\_\_\_]
- Přítomnost deště (0/1) [rain\_calibrated\_\_\_]

Data z výhybek (.txt)

- Časová značka události (DD.MM.RRRR HH:mm:ss) [Datum]
- Číslo vozu (1) [Var5]

Zde je vhodné připomenout, že každý soubor má svůj vlastní systém vzorkování. Meteorologické senzory zapisují data každou minutu, výhybka запиše každou načtenou tramvaj, která jí projede.

Hlukový modul však může udělat několik záznamů hlukové události při jediném průjezdu. Data je tedy nutné agregovat podle časového okna průjezdu tramvaje obloukem. Tomuto zpracování však předchází pre-processing, kdy jsou vymazány zjevně chybné záznamy, data jsou upravena podle následujících podmínek.

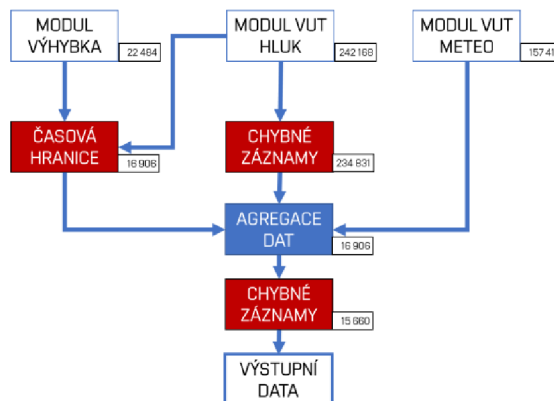
- Data s průměrnou SPL < 70 dB jsou vymazána (chyba kalibrace)
- Data s maximální SPL > 110 dB jsou vymazána (cizí rušení na pozadí záznamů)
- Data s délkou trvání větší než 10 s jsou vymazána (cizí rušení na pozadí záznamů)
- Data z výhybky pro jízdu v pravé koleji jsou vymazána
- Data z výhybky při nenačtení tramvaje jsou vymazána
- Data z modulu výhybky jsou časově ořezána podle dostupných dat z modulu VUT

### Časové okno

Redukovaná data jsou agregována podle řídicích dat z výhybkového modulu, tento algoritmovaný proces, stejně jako další zpracování a vyhodnocení dat, je provedeno programem MATLAB (Použité kódy jsou v příloze práce.). K časové značce průjezdu se přičte doba latence (30 s), po kterou se vůz pohybuje na rovném úseku trati. Tento časový údaj otevírá časové okno, po kdy jsou počítány délky trvání události, průměrovány průměrné hodnoty SPL a jsou vybírána maxima SPL. Z druhého datového souboru je vybrána průměrná teplota pro daný interval a průměrná vlhkost. Pokud se v časovém okně zaktivuje detektor deště, je událost označena jako průjezd s přítomností deště. Časové okno se uzavírá po uplynutí doby průjezdu (60 s). Hodnoty pro dobu latence i dobu průjezdu byly vytipovány empiricky, na základě optimálního množství výchozích dat. Na závěr agregace je provedena kontrolní filtrace pro odstranění souborů s agregovaným trváním události delším, než je průjezd obloukem (60 s).

Výstupní data jsou uložena jako hlavní datový balíček (dále MAIN) ve formátu .xlsx do vlastní složky. Následně je ještě provedeno základní třídění na soubory s přítomností deště (dále RAIN) a bez přítomnosti deště (dále NO\_RAIN), které jsou též uloženy jako tabulky formátu .xlsx do vnořené složky. Nakonec jsou uloženy soubory pro každou z 10 nejčastějších tramvají stejným způsobem.

Celý algoritmus shrnuje následující schéma:



Obrázek 4-6 Schéma zpracování dat z dlouhodobého měření



#### 4.4.2 Zpracování dat – smyčka Technologický park

Data byla ručně zapisována do tabulky, která obsahuje následující údaje:

- Číslo souboru z měření hlukoměrem
- Čas události (HH:mm)
- Rychlost vozu (km/h)
- Číslo vozu (1)
- Poznámky – nejčastěji o přítomnosti kvílivého hluku

Data z hlukoměru byla zpracována pomocí software SvanPC++, byla provedena třetinooktávová analýza. Na základě znalosti frekvenčního pásma hluku od temene, resp. okolku, byla vybrána pásma 500 Hz pro kvílivý hluk a 3150 Hz pro hluk od okolku. Tato pásma se projevovala nejvýznamněji na daném datovém vzorku. Výstupy z třetinooktávové analýzy byly uloženy do programu Microsoft Excel, kde k nim byla doplněna další data z měření (rychlost, čas, poznámky). Soubor tabulky úplných i zpracovaných dat ze zvukoměru je přílohou práce.

Pro vytvoření podobných podmínek, jako byly pro zpracování dat ze smyčky v Brně-Komíně, byl nalezen práh (60 dB) pro indikaci hluku okolku pro danou točnu a vzdálenost hlukoměru od oblouku. Zde byl využit poznámkový aparát tak, aby měření s poznámkou o hluku byla vyhodnocena jako události s kvílivým hlukem. V případě nejasností poznámky posloužilo přehrání zvukových záznamů. Obdobně byla vyhodnocena i mez hluku pro hluk okolku (55 dB).

#### 4.4.3 Zpracování dat – dodatečná data o vozech

Z předchozích dvou datových souborů vyšla množina tramvajových souprav, které je třeba identifikovat na základě identifikačního čísla vozu. Pro první roztřídění posloužily informace volně dostupné na neoficiálních internetových stránkách brněnské MHD ([www.bmhd.cz](http://www.bmhd.cz)). Zde jsou uvedeny údaje o konstrukci, datu výroby, historii modernizací (mimo podvozků) atd.

Na vyžádání byla od DPMB poskytnuta data o 10 nejčastějších vozech, které byly zachyceny při dlouhodobém měření na tramvajové smyčce v Komíně. Dotaz byl směřován na intervaly kontrol podvozku a reprofilací kol. Kromě těchto dat jsou díky panu Janu Kopřivovi k dispozici také údaje o hlášených poškozeních podvozku (závady brzd, utržená kola atd.). Klíčovou informací je typ kol, kterým je daný vůz osazen. Devět vozů bylo osazeno po dobu měření standardními koly od původního výrobce tramvají ČKD, pouze tramvaj číslo 1738 měla osazena odpružená kola BONATRANS.

Z dat byla vytipována pouze ta, která spadají do období pozorování. Relevantní údaje jsou k dispozici pro vozy 1737 a 1738. Pro všechny pak bude posuzován údaj o poslední velké prohlídce, případně reprofilaci kol.

## 4.5 Metody

Pro prvotní hledání závislostí mezi meteorologickými jevy a bude použita regresní matice. Hlavní parametry budou posuzovány, zda společně nekorelují, pomocí lineární regrese. Tento pohled bude dále posouzen vykreslením do náležitých grafů (viz níže), a to jak pro naměřené hodnoty, tak pro jejich průměry. Analýzu uzavře graf procentuálního výskytu hluku pro diskretizovaná data teploty a relativní vlhkosti.

Posuzování závislosti vzniku kvílivého hluku na meteorologických srážkách bude porovnávat parametry hluku zvlášť pro data bez deště a zvlášť s přítomností deště. Data budou tříděna pomocí (dalšího) časového okna tak, že hodnoty do 30 minut po skončení deště budou označeny příznakem vysychání (dále DRYING) a budou porovnány samostatně. Budou srovnány grafy skutečných hodnot a průměrované hodnoty. Rozdíly mezi daty na závěr rozliší graf procentního výskytu a dílčí grafy, které sledují vývoj hluku po skončení srážek v daném časovém okně. Tato dlouhodobá data (Brno-Komín) budou doplněna daty z pozorování (Technologický park) s osobním komentářem.

Vliv typu vozu bude posuzován zvlášť pro 10 nejčastějších tramvají (jediného typu) z dlouhodobého měření (Brno-Komín) na základě souhrnu průměrných parametrů. Data z pozorování na smyčce Technologický park budou posuzována pro dva nejčastější typy vozů na základě porovnání hlukových závislostí. Vliv servisních zásahů bude posuzován sledováním vývoje hlukového chování vozů v intervalech před a po servisním zásahu. Data o reprofilaci i typ použitých kol budou posouzena v kombinaci se souhrnným grafem hlukových parametrů.

Vliv rychlosti bude posuzován pouze na datech z pozorování na smyčce Technologický park. Porovnávána bude průměrná SPL pro pásmo kvílivého hluku (500 Hz) i dodatečně pro pásmo skřípavého hluku okolku (3 150 Hz)

Následuje podrobnější popis testu každé dané hypotézy:

### 4.5.1 H1.1 – Zvýšená vlhkost snižuje SPL hluku tramvaje

Budou sestaveny grafy závislosti hluku (střední SPL, maximální SPL) na relativní vlhkosti, respektive na teplotě a vlhkosti. Vždy bude použit graf naměřených hodnot a zprůměrovaných hodnot. Mírou pro posouzení významnosti daného parametru bude počet procent výskytu z celé populace pro daný interval vlhkosti, respektive teploty. Budou využita pouze data bez srážek.

### 4.5.2 H1.2 – Zvýšená teplota sníží SPL hluku tramvaje

Budou sestaveny grafy závislosti hluku (střední SPL, maximální SPL) na teplotě, respektive na teplotě a vlhkosti. Vždy bude použit graf naměřených hodnot a zprůměrovaných hodnot. Mírou pro posouzení významnosti daného parametru bude počet procent výskytu z celé populace pro daný interval vlhkosti, respektive teploty. Budou využita pouze data bez srážek.

#### 4.5.3 H2.1 – Meteorologické srážky snižují SPL hluku tramvaje

Budou sestaveny grafy závislosti hluku (trvání, střední SPL, maximální SPL) na relativní vlhkosti, respektive na teplotě a vlhkosti, za přítomnosti srážek, bez přítomnosti srážek a také v intervalu vysychání (DRYING) o délce 90 minut od posledního záznamu s deštěm. Vždy bude použit graf naměřených hodnot a zprůměrovaných hodnot. Mírou pro posouzení významnosti daného parametru bude počet procent výskytu z celé populace pro daný interval vlhkosti, respektive teploty.

Z pozorování na smyčce Technologický park budou porovnány průměrné hodnoty SPL při mokřích kolejnicích a při suchém referenčním měření.

#### 4.5.4 H2.2 – Vysychání kolejí dočasně zvýší SPL hluku tramvaje

Bude použita shodná metodika jako v bodu 4.5.3, navíc bude zobrazen průběh dlouhodobého záznamu meteorologie společně s výběrem agregovaných dat pro zvolený interval začínající přechodem dat s deštěm do dat bez deště. Zobrazováno bude časové okno 30 minut před prvním záznamem bez deště až po 180 minut po prvním záznamu bez deště.

Z pozorování na smyčce Technologický park budou porovnány průměrné hodnoty SPL při mokřích kolejnicích a při vysychání.

#### 4.5.5 H3.1 – Různé konstrukce vozů se liší v hlukových parametrech

Bude porovnán průměr hluku (střední SPL) z pozorování (Technologický park) bez přítomnosti deště pro dva typy vozů. Posouzeny budou také ruční poznámky z pozorování pro zdůraznění rozdílů mezi dvěma skupinami vozů.

#### 4.5.6 H3.2 – Různé vozy téže konstrukce se liší v hlukových parametrech

Budou porovnány průměry hluku (trvání, střední SPL, maximální SPL) z dlouhodobých dat (Brno-Komín) bez přítomnosti deště pro každou soupravu zvlášť. Tyto hodnoty budou průměrovat pouze data s SPL vyšší než 70 dB, jinak by průměr pozměnily nulové hodnoty, kdy kvilivý hluk nenastal. Pro každou tramvaj bude vypočítán procentní poměr jízd s přítomností hluku a bez něj.

#### 4.5.7 H4 – Při vyšších rychlostech bude narůstat SPL hluku tramvaje

Naměřená data z pozorování na tramvajové smyčce Technologický park (bez přítomnosti vody) budou zobrazena v grafu závislosti SPL (dB) na rychlosti vozu (km/h) včetně proložení přímkou.

## 5 VÝSLEDKY

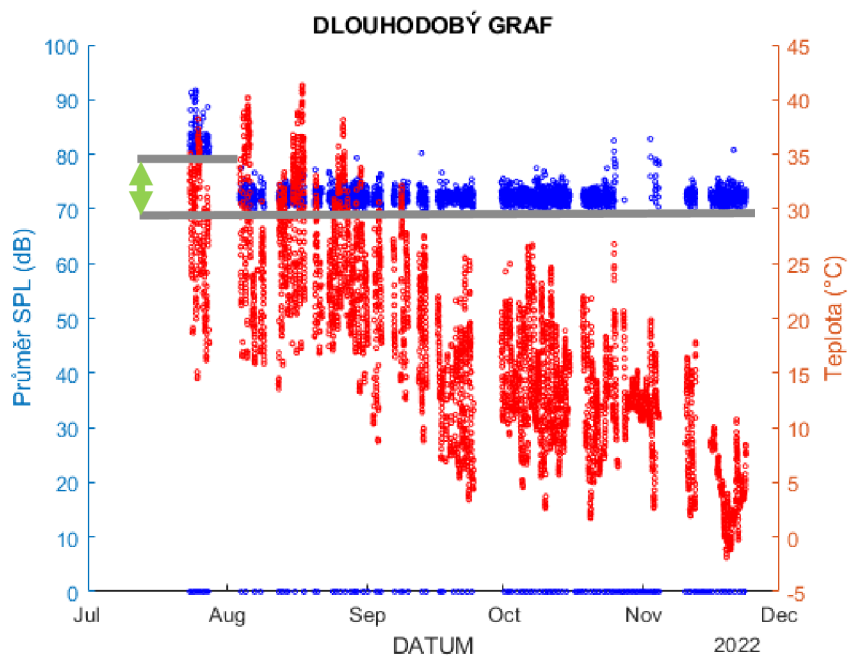
Než budou představeny výsledky po kapitolách pro jednotlivé výzkumné otázky, tak bude představen souhrn zkoumaných dat. Pomocí popisné statistiky budou popsána dlouhodobá data z měření v Brně-Komíně a popsána skladba vozů zachycených měření.

Data z pozorování v Technologickém parku budou popsána detailněji, jelikož mají nízkou populaci a byla sbírána ručně.

Data dlouhodobého měření – Brno-Komín

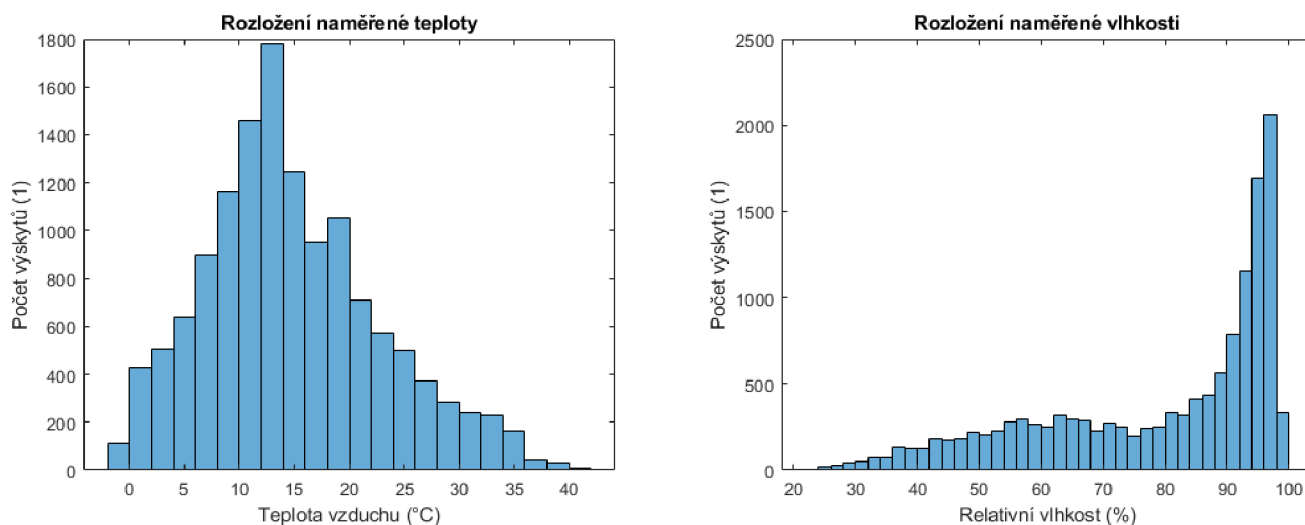
Měření probíhalo od 23. července 2022 do 23. listopadu 2022, podařilo se tedy zachytit jak letní suché a horké dny, tak i podzimní vlhké a studené počasí. Datový soubor obsahuje informace o 15 660 průjezdech.

Pro prvotní náhled na vzorek dat může sloužit dlouhodobý graf, kde je na časové ose vynesena teplota vzduchu (červeně), na sekundární ose pak střední hodnota hladiny akustického tlaku (modře). Z pohledu na první shluk dat před začátkem měsíce srpna je vidět, že jsou hodnoty SPL vyšší o přibližně 15 dB (sic!), než pak pro další data od srpna dále. Lze předpokládat, že během této výrazné proluky mohl být modul servisován a byla provedena změna kalibrace. Nové nastavení nebylo měněno do konce měření. Hodnoty prvotní kalibrace by sice bylo možné zpětně přepočítat, ale už by došlo k výraznějšímu zásahu do dat, proto nadále budou v práci vyhodnocovány údaje naměřené až po 1. srpnu. Takto zmenšený datový soubor nyní obsahuje záznamů 15 210.



Obrázek 5-1 Dlouhodobý graf – chyba kalibrace

Rozložení dat relativní vlhkosti a teploty zobrazují diagramy níže doplněné tabulkou maximálních a minimálních hodnot.



Obrázek 5-2 Histogramy teploty a relativní vlhkosti – dlouhodobá data

Tabulka 5-1 Extrémní hodnoty teploty a relativní vlhkosti – dlouhodobé měření

	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
Teplota vzduchu (°C)	-1,9	41,3
Relativní vlhkost (%)	24,9	99,7

Další vyhodnocování pracuje zvlášť (pokud není určeno jinak) s daty za sucha nebo za deště, jejich poměr i počet výskytů je uveden níže.

Tabulka 5-2 Počet výskytů meteorologických srážek – dlouhodobé měření

	<b>Počet výskytů (1)</b>	<b>Poměr (%)</b>
Data bez srážek	13 558	<b>89</b>
Data se srážkami	1 652	<b>11</b>

Z vypsaných statistik vyplývá, že měření teploty má očekávané normální rozložení hodnot s nejčastější hodnotou kolem 17 °C. Měření obsáhlo extrémní letní teploty i první

podzimní mrazivé dny. Vlhkost má hojně zastoupené hodnoty blízké 100 %, což však není chyba měření, ale data zahrnují vyšší vlhkost při nízkých ranních teplotách a také po dešti.

I když měření zahrnuje podzimní deštivé období, poměr dat s deštěm je pouze 11 % celých dat. To však odpovídá trendům současného počasí a změny klimatu.

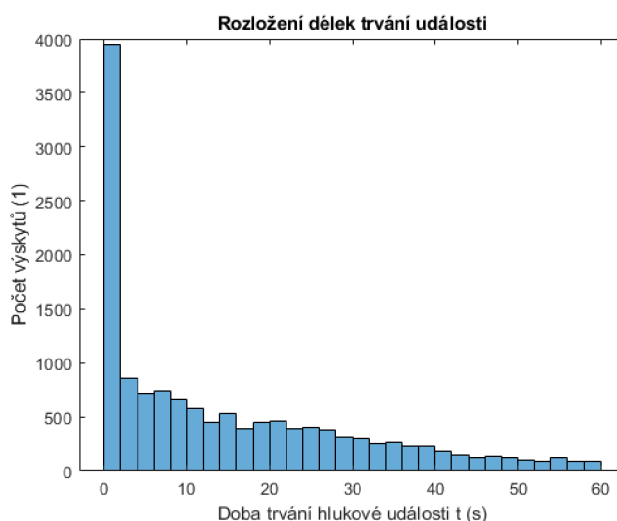
Mírou, zda lze hlukovou událost považovat za projev kvilivého hluku, je přesáhnutí střední hodnoty SPL hladiny 70 dB ve vyhodnocovaném frekvenčním pásmu, následující tabulka popisuje tato dvě rozdělení dle počtu i procentního poměru.

Tabulka 5-3 Zastoupení dat s kvilivým hlukem – dlouhodobé měření

	Počet výskytů (1)	Poměr (%)
Data s kvilivým hlukem	12 108	80
Data bez kvilivého hluku	3 102	20

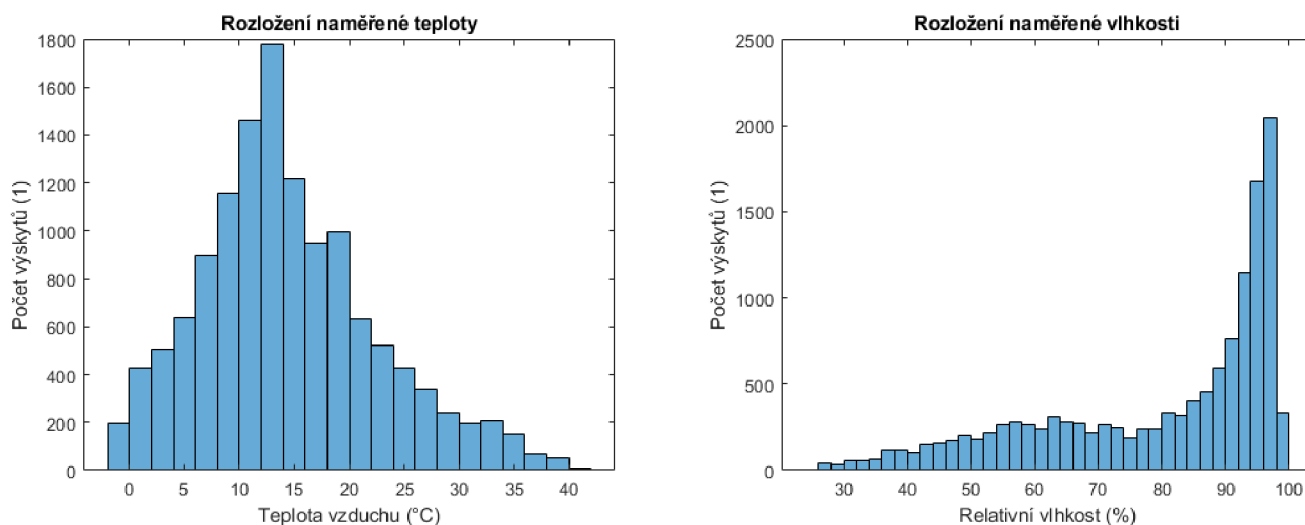
Je zřejmé, že dat průjezdů, kdy nebyla zaznamenána hluková událost, je přibližně dvakrát víc než dat s přítomností srážek.

Další mírou posuzování váhy hlukové události je agregované trvání hluku. Tyto údaje mohou být kvůli hluku pozadí značně nespolehlivé, proto byly při pre-processingu dohromady agregovány pouze události o době trvání kratší než 10 sekund a celkový agregovaný čas musí být kratší, než 60 sekund. Tím jsou dány hraniční hodnoty doby trvání hluku: od 0 do 60 sekund. Rozložení dat ukazuje následující histogram:



Obrázek 5-3 Histogram délek hlukové události – dlouhodobé měření

Nejčastěji zastoupenou skupinou jsou data s nulovým hlukem (tedy i dobou trvání), dále následuje výrazný propad počtu pod 1 000 výskytů pro interval doby trvání do 2 sekund, který je sledován pozvolným snižováním až k mezi 60 sekund.



Obrázek 5-4 Histogramy teploty a vlhkosti – dlouhodobé měření

Jednotlivé průjezdy se významně nelišily v rozložení středních hodnot SPL. Je dobré připomenout, že průměrná hodnota vznikla průměrováním průměrů SPL každého záznamu o hluku ve vytyčeném časovém okně. Oproti tomu maximální hodnota byla vždy vybírána, jako maximum maximálních hodnot SPL v daném časovém okně, což zapříčiňuje výrazně větší rozptyl hodnot. Pro odstranění záznamů s hlukem pozadí byla odebrána data o hladině akustického tlaku vyšší než práh 110 dB.

Za celou dobu měření projelo točnou celkem 68 různých souprav, pro práci je však důležitá pouze množina 10 nejčastějších tramvají, přičemž počet průjezdů jednotlivých vozů je zaznamenán v tabulce. Jsou rozlišeny počty průjezdů s deštěm a bez deště:

Tabulka 5-4 Nejčastější tramvajové vozy – dlouhodobé měření

Číslo vozu	Počet průjezdů – celkem (1)	Počet průjezdů – celkem (%)	Počet průjezdů – srážky (1)	Počet průjezdů – srážky (%)	Typ vozu
1738	5632	41,1	551	9,8	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1737	4543	33,1	618	13,6	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1710	813	5,9	114	14,0	ČKD Tatra KT8D5R.N2

1719	785	5.7	48	6,1	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1709	476	3.5	77	16,2	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1716	431	3.1	48	11,1	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1702	288	2.1	0	0,0	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1712	257	1.9	14	5,4	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1724	253	1.8	58	22,9	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1708	228	1.7	0	0	ČKD Tatra KT8D5R.N2

K určení typu vozu byla určena rozsáhlá databáze stránek bmhd.cz [34]. Do deseti nejčtenějších vozů v datech dlouhodobého měření spadá pouze jediný typ tramvaje, proto z těchto dat nebude možné srovnání různých konstrukcí vozů. Za poznámku stojí dodat, že vozy 1702 (odstaven v srpnu 2023) a 1712 (odstaven v říjnu 2022) byly sešrotovány v roce 2024.

#### Data krátkodobého pozorování – Technologický park

Tento malý datový vzorek se skládá z několika dílčích měření v tabulce níže. Data o teplotě jsou pouze orientační, proto byla použita měření meteorostanice Brno-Židenice[35]. Takto získaná data o vlhkosti ztrácí na relevanci, a proto nebyla zahrnuta.

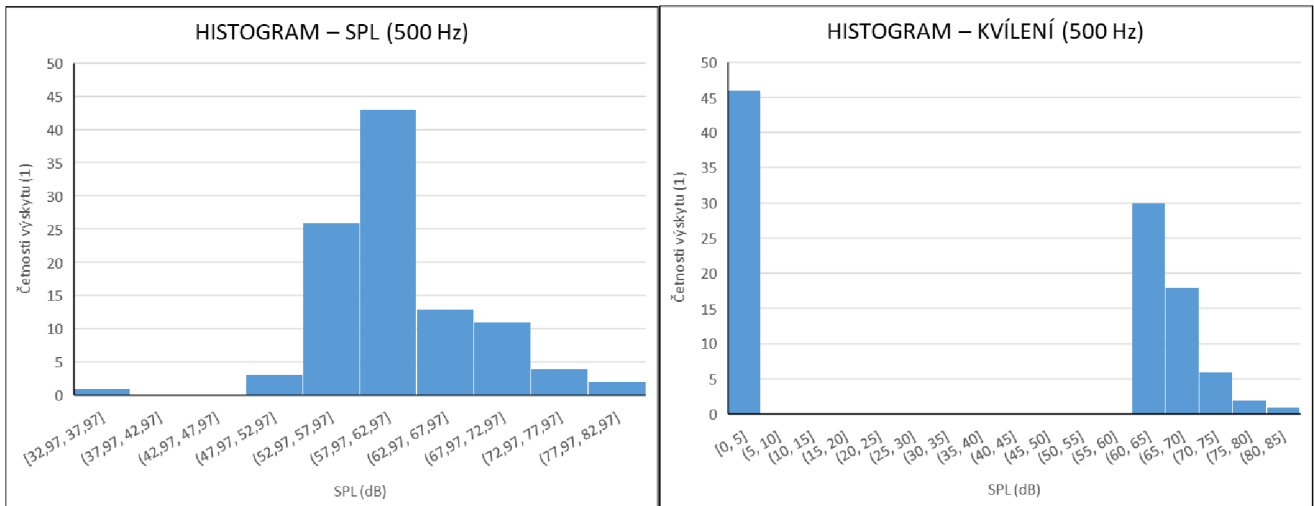
Tabulka 5-5 Seznam dílčích měření – smyčka Technologický park

Datum	Počet průjezdů (1)	Hluk. události (1)	Poměr (%)	Průměrná teplota (°C)	Poznámka
20. března 2024	15	14	93	14	Chladný jarní den
6. května 2024	12	12	100	17	Vlhké koleje, vysychání kolejí
7. května 2024	5	5	100	14	Mokré koleje, srážky



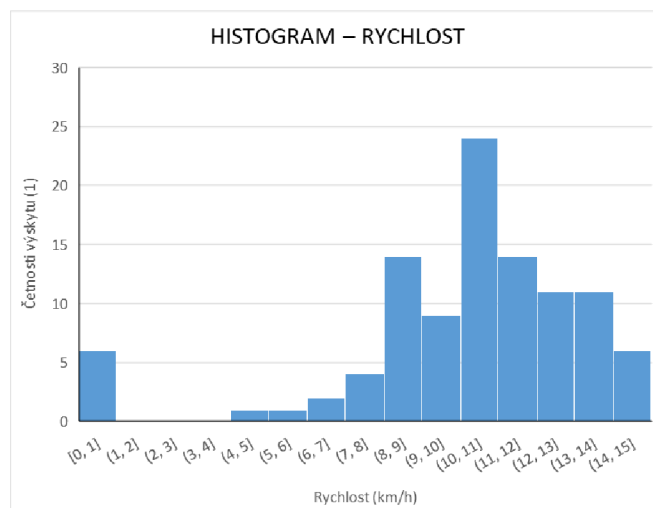
8. května 2024	43	9	21	14	„Sobotní“ provoz
13. května 2024	27	17	63	15	Všední provoz

Zpracovaný vzorek byl taktéž zobrazen v histogramu, nejprve pro všechny průměrné hodnoty SPL v frekvenčním pásmu okolku (500 Hz, viz výše), ale pro lepší porovnatelnost bylo provedeno prahování (práh 60 dB určen empiricky) jako u dlouhodobého měření.



Obrázek 5-5 Histogramy naměřené hladiny akustického tlaku – smyčka Technologický park

Hlavním zájmem pozorování bylo určit závislost SPL na rychlosti, proto je zde uveden také histogram naměřených rychlostí pro smyčku Technologický park:



Obrázek 5-6 Histogram naměřených rychlostí – smyčka Technologický park

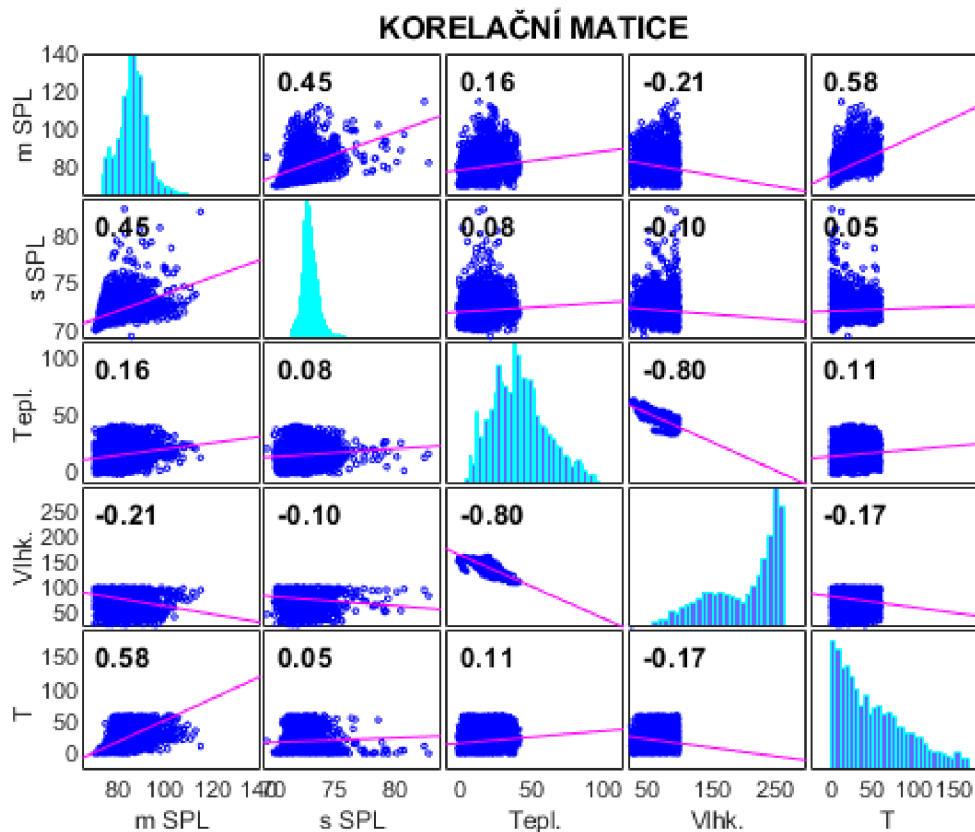
Měření neproběhlo bezchybně, jak je patrné z prvního intervalu, kde jsou zakresleny průjezdy bez vyhodnocení rychlosti, kdy radar nefungoval. Zbytek histogramu však připomíná normální rozložení dat, proto lze uvažovat tento malý vzorek za reprezentativní.

Měření na točně zachytilo průjezdy hlavně dvou typů vozu (Škoda 13T6, Pragoimex VarioLF2R.E), celkové složení konstrukcí shrnuje tabulka níže. Pro nízký počet zástupců jiných konstrukcí budou dále porovnávány pouze výše zmíněné typy.

Tabulka 5-6 Naměřené tramvajové vozy – smyčka Technologický park

	Počet výskytů (1)	Poměr (%)
Pragoimex VarioLF2R.E	45	43,7
Škoda 13T6	43	41,7
ČKD DST6A5	10	9,7
ČKD Tatra T3R	2	1,9
ČKD Tatra KT8D5R.N2	1	0,97
Tatra T2	1	0,97
Pragoimex EVO 2	1	0,97

Prvotní vhled do závislostí nám umožní korelační matice, tedy přehledová tabulka závislostí vybraných veličin (teplota vzduchu, relativní vlhkost, doba trvání hlukové události, střední a maximální hladina akustického tlaku hluku okolku). Mírou spolehlivosti lineární regrese, kterou tato tabulka u daného páru porovnává, je pak číslo  $R_c$ . Čím bližší je 1, tím vyšší je možná míra spolehlivosti korelace dat. Například teplota a vlhkost jsou ze znalostí meteorologie závislé veličiny a jejich korelační koeficient je roven  $R_c = 0,80$ . Další zjevnou závislostí je dvojice maximální a střední hodnoty hladiny akustického tlaku, vlivem velkého rozptylu maximálních hodnot (viz výše) akustické veličiny korelují pouze s  $R_c = 0,45$ . Podstatně větší korelaci lze nalézt u dvojice doby trvání hlukové události a maxima hladiny akustického tlaku ( $R_c = 0,55$ ), oproti tomu střední hodnota a doba trvání korelují nejméně z celé matice ( $R_c = 0,05$ ).

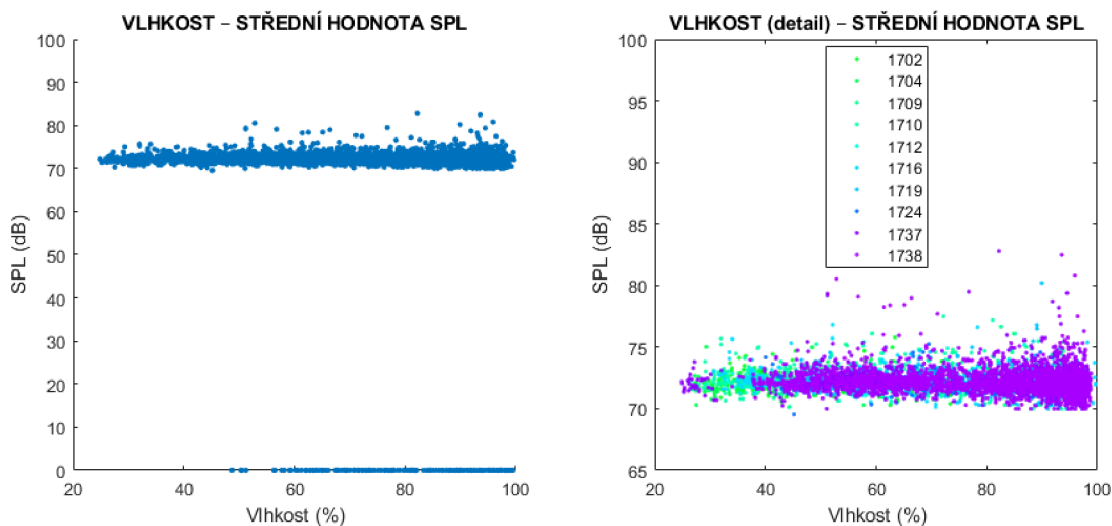


Obrázek 5-7 Korelační matice – dlouhodobé měření

Zkoumané závislosti teploty, resp. vlhkosti na hlukových veličinách (střední a maximální hodnota SPL) prokazují slabou korelační závislost od  $R_c = 0,08$  do  $R_c = 0,20$ . Tato hodnota může však znamenat složitější trend, který nejsme schopni vystihnout lineární regresí, proto bude vhodné se zaměřit detailněji na posledně zmiňované závislosti.

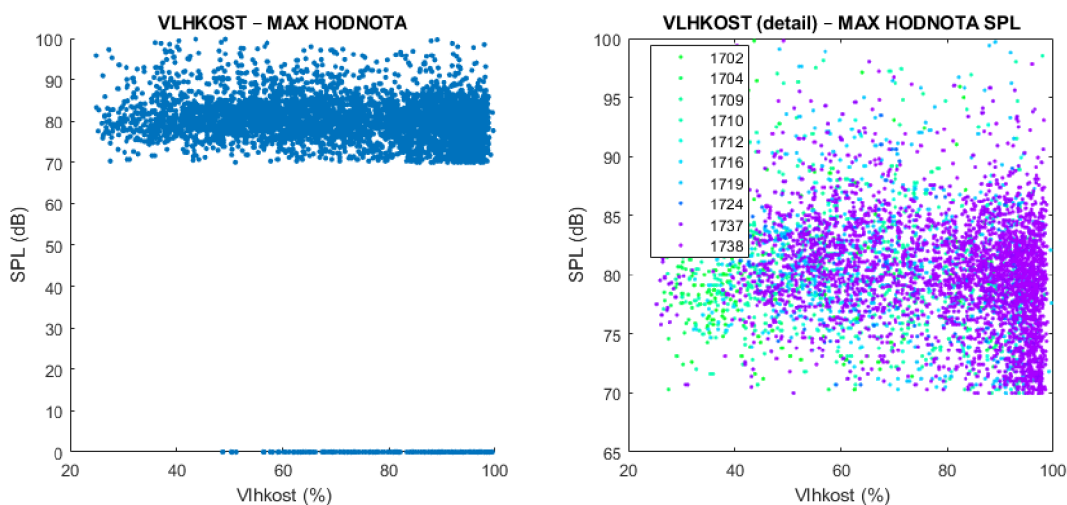
#### 5.1.1 H1.1 – Zvýšená vlhkost snižuje SPL hluku tramvaje

První dvojice grafů zachycuje závislost střední hodiny akustického tlaku na vlhkosti, nulové hodnoty SPL odpovídají záznamům pod mezí 70 dB. Data se převážně shlukují v pásmu 70 dB až 75 dB. Při detailnějším pohledu (bez vynulovaných hodnot SPL) můžeme vidět téměř rovnoměrné rozložení dat různých tramvají, dle očekávání jsou nejpočetnější záznamy vozů 1737 a 1738.



Obrázek 5-8 Závislost střední SPL na vlhkosti

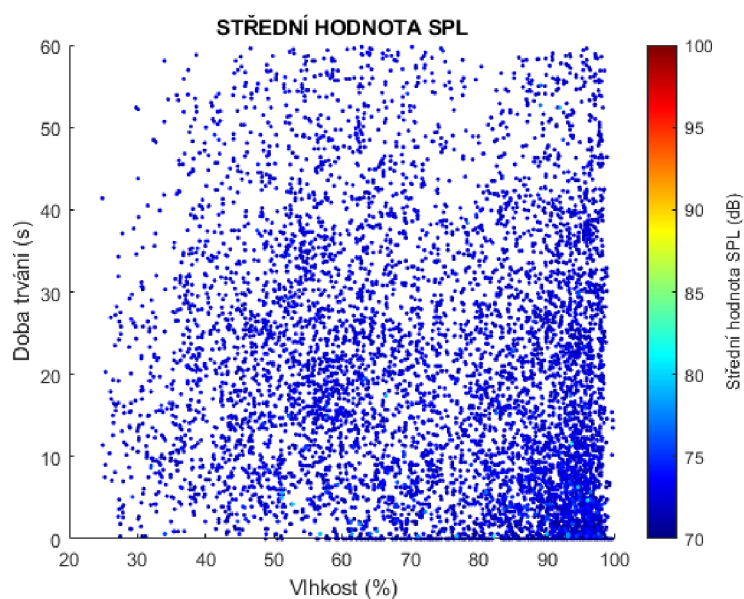
Další dvojice grafů ukazuje ve stejném zobrazení závislost maximální hodnoty SPL hluku na vlhkosti. Data jsou více rozptýlená, rozptyl roste směrem s rostoucí vlhkostí. Většina hodnot se nachází v pásmu kolem hladiny 80 dB. Zvláště detailní pohled ukazuje, že v intervalu vlhkosti 90 % až 100 % se rozložení dat posouvá blíže k limitu 70 dB. Tato oblast tedy bude nadále zajímavá pro bližší pohled.



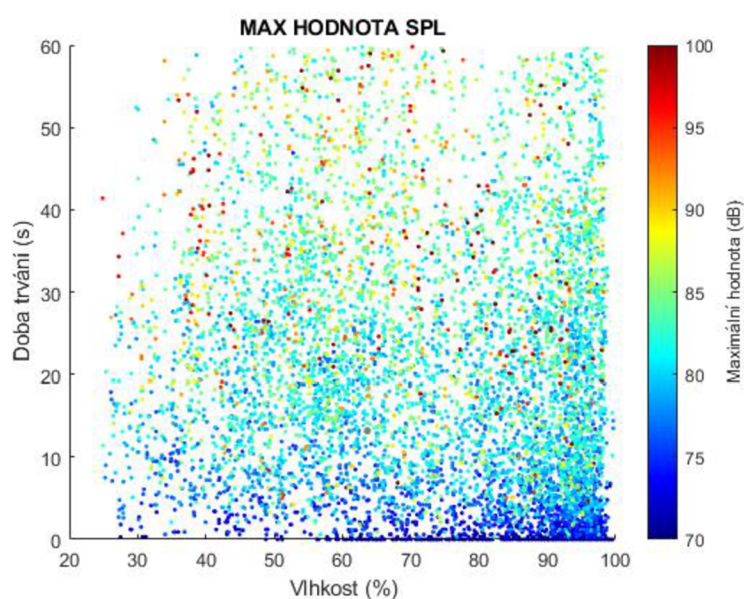
Obrázek 5-9 Závislost maximální SPL na vlhkosti

Doplňkovým pohledem na vliv vlhkosti je zahrnutí délky trvání hlukové události. Na grafu střední hodnoty zobrazené barevnou škálou v souřadnicích vlhkosti a doby trvání lze vypořadovat rovnoměrné rozložení středních hodnot hladiny akustického tlaku blízkých limitu 70 dB. Oproti tomu lze z grafu s maximální hodnotou SPL Obrázek 5-11 vypořadovat, že pro krátké hlukové události je SPL spíše blízké prahové hodnotě 70 dB. Špičkové záznamy hluku (nad 90 dB) jsou rovnoměrně rozptýleny v celém grafu, zvláště

nápadné jsou v oblasti delšího trvání hlukové události (více než 30 s). Zásadou tvorby grafu bylo vynášení hodnot podle velikosti (SPL), takže jsou vždy dobře patrná maxima.



Obrázek 5-10 Závislost střední SPL na vlhkosti a době trvání



Obrázek 5-11 Závislost maximální SPL na vlhkosti a době trvání

Vzhledem k silné korelaci teploty a vlhkosti vycházející z principů fyziky a meteorologie přesahující rámec této práce je vhodné zobrazit hodnoty SPL barevnou škálou do grafu,

jehož osy tvoří relativní vlhkost a teplota vzduchu (dále jen meteorologické souřadnice). Opět platí, že maximální hodnoty jsou vynášeny jako poslední pro lepší zřetelnost.

Oblasti na výše zmiňovaných grafech jsou však složeny z mnoha partikulárních případů, pro postižení celkového trendu byly tedy vypočítány matice průměrných hodnot hluku (střední a maximální SPL, trvání), kde je teplota diskretizována od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  s krokem  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vlhkost v celém procentním rozsahu po kroku  $0,25\text{ }%$ . Nutno podotknout, že průměrovány byly pouze nenulové hodnoty měření (tedy vyšší než  $70\text{dB}$ ). Grafy naměřených a průměrovaných hodnot budou pro přehlednost představovány vždy společně (proto jsou grafy nejprve popsány, ale zobrazeny až na následujících stranách).

První graf, který do meteorologických souřadnic vynáší data o střední hodnotě hladiny akustického tlaku, ukazuje celkem tři zajímavé oblasti. Maximální hodnoty se soustředí mezi  $20\text{ }%$  až  $45\text{ }%$  vlhkosti při teplotách od  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nenápadnější oblast vyšších hodnot SPL se nachází mezi  $90\text{ }%$  až  $100\text{ }%$  relativní vlhkosti při teplotě od  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oproti tomu ve stejném intervalu vlhkosti se nachází oblast globálního minima SPL (tmavomodrá) při teplotách od  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

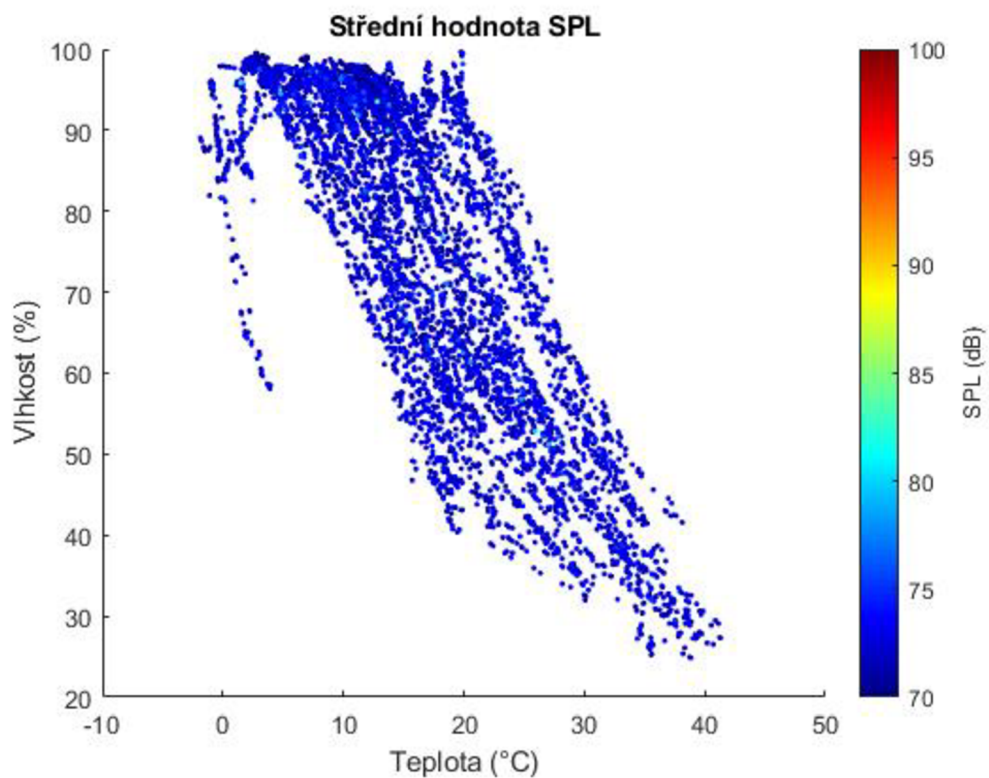
Posledně vzpomínaná oblast je ještě lépe patrná na grafu maximální SPL v meteorologických souřadnicích (viz dále), oblasti vyššího SPL z předchozího grafu jsou výrazně méně patrné.

Pro úplnost je dodána i dvojice grafů v meteorologických souřadnicích pro dobu trvání hlukové události, i když úvodní korelační matice nepředpokládá silnou závislost.

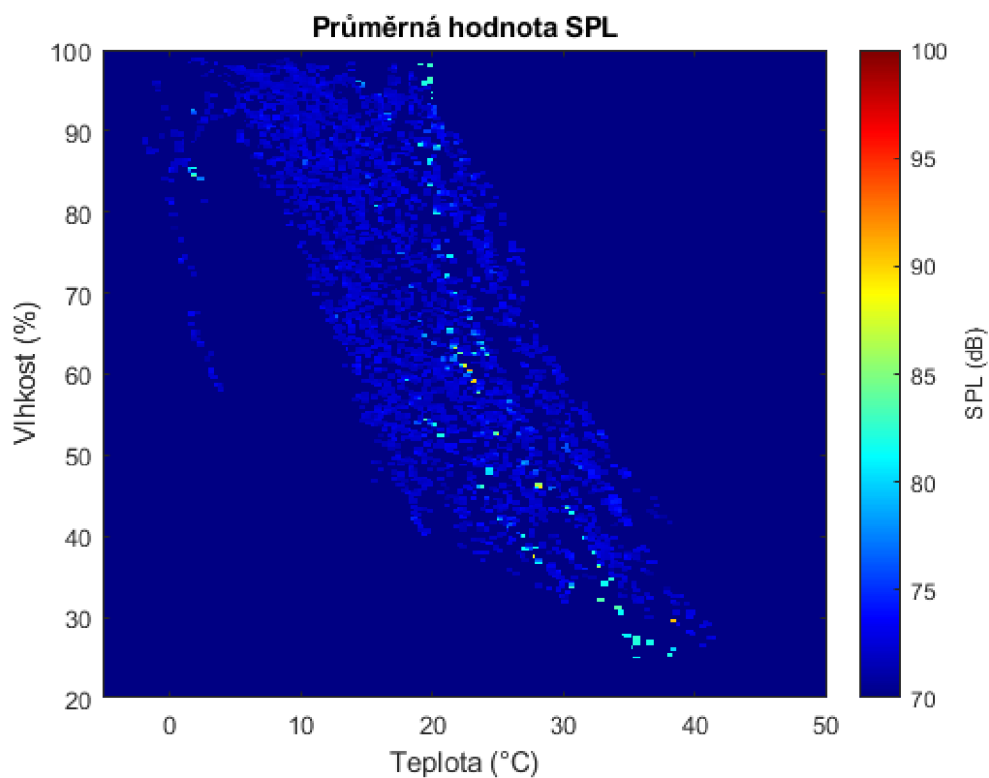
K posouzení, zda docházelo ke vzniku kvílivého hluku v závislosti na vlhkosti (resp. teplotě) bude opět použit graf v meteorologických souřadnicích, matice tohoto grafu bude sestavena z procentního podílu všech nad prahem  $70\text{ dB}$  (základ tedy obsahuje také nulové hodnoty) pro jednotlivé diskretizované kombinace teploty a vlhkosti.

#### Dílčí závěr – H1.1

Na základě výše zmíněných grafů (zejména Obrázek 5-19) lze tvrdit, že pravděpodobnost výskytu kvílivého hluku je nižší pro vysoké vlhkosti ( $90\text{ }%$  až  $100\text{ }%$ ) při teplotách do  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při nižších vlhkostech je pravděpodobnost stejně vysoká, jako pro většinu teplotních intervalů, avšak při kombinaci vyšší teploty a nízké vlhkosti dochází k zvýšení střední hodnoty SPL kvílivého hluku. Trend pro závislost délky trvání hlukové události nebylo možné stanovit.

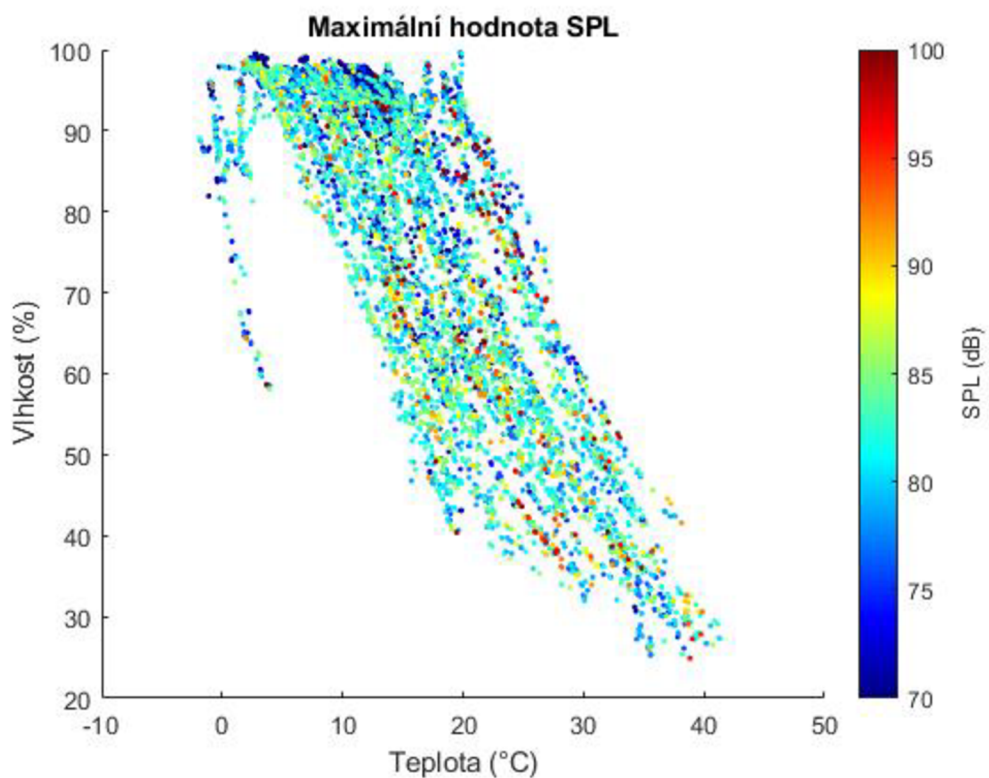


Obrázek 5-12 Střední hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – měřeno

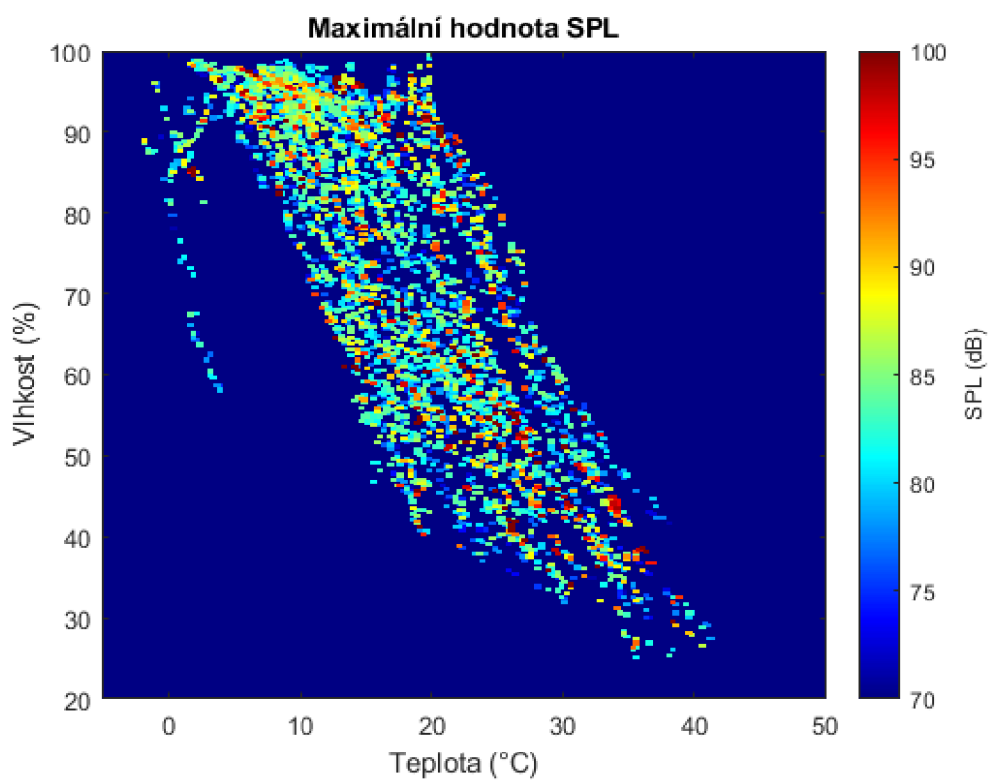


Obrázek 5-13 Střední hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – průměrováno



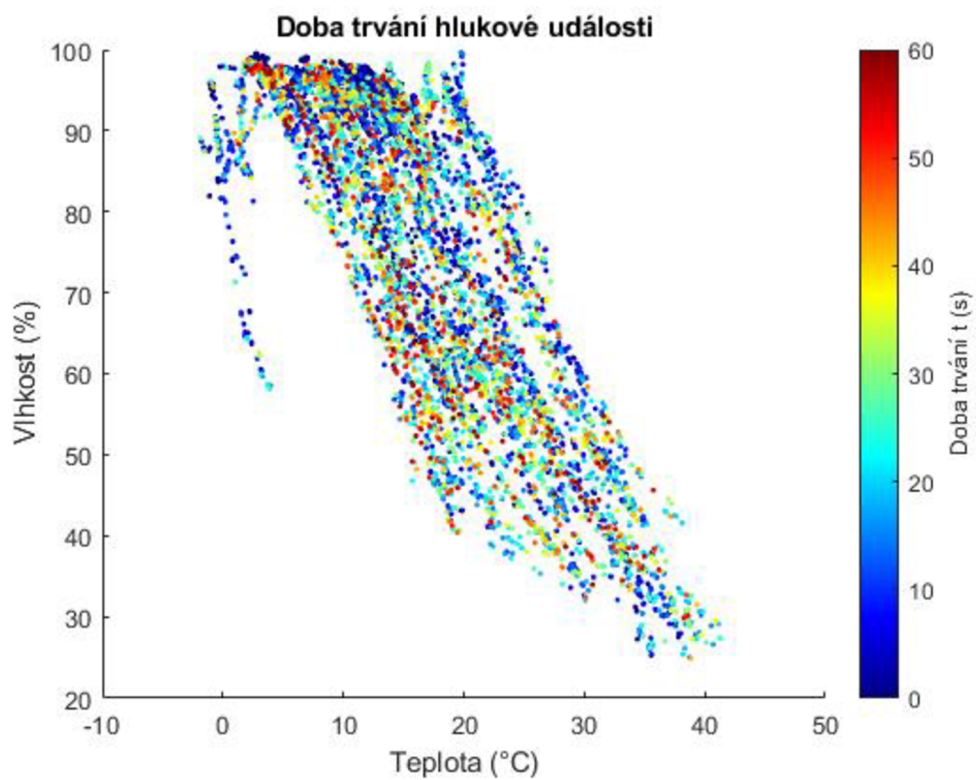


Obrázek 5-14 Maximální hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – měřeno

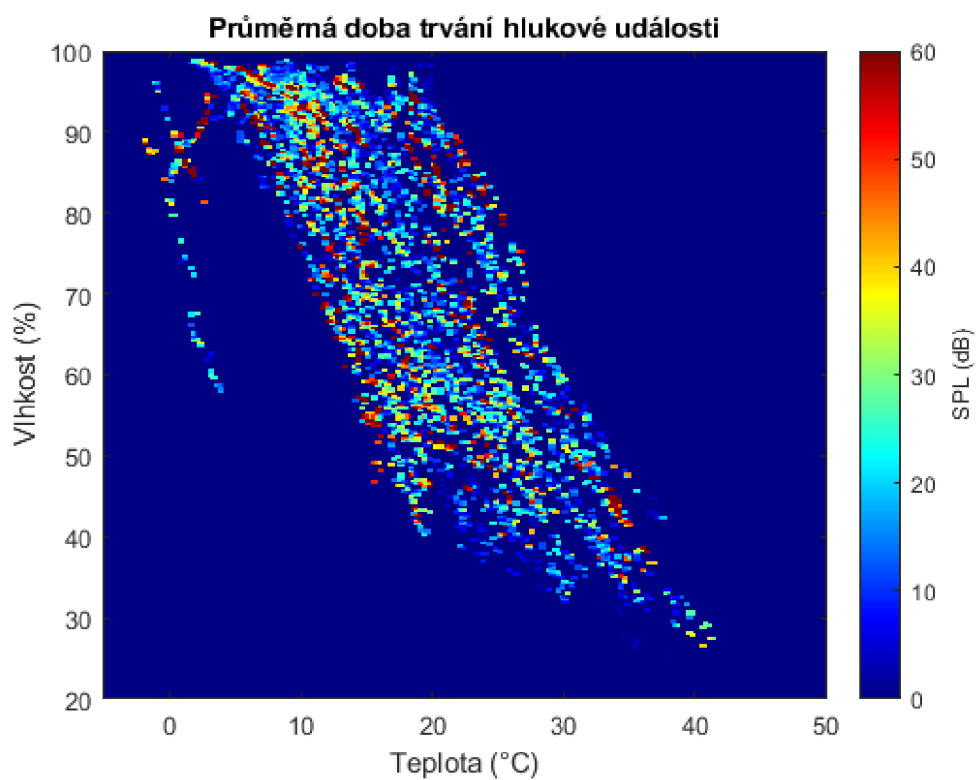


Obrázek 5-15 Maximální hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – průměrováno

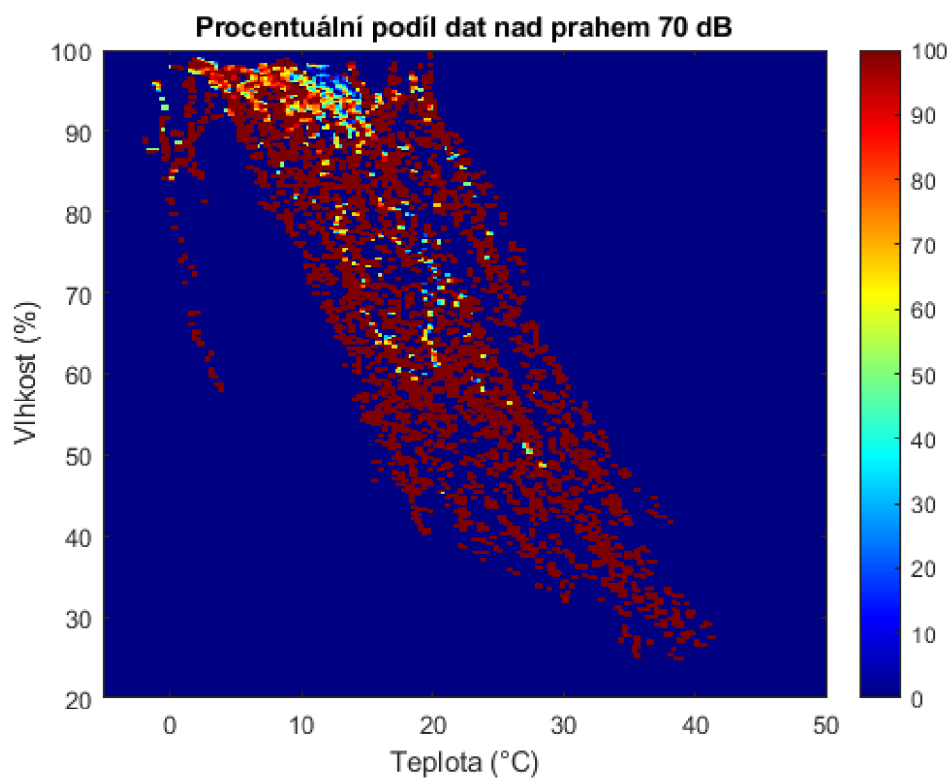




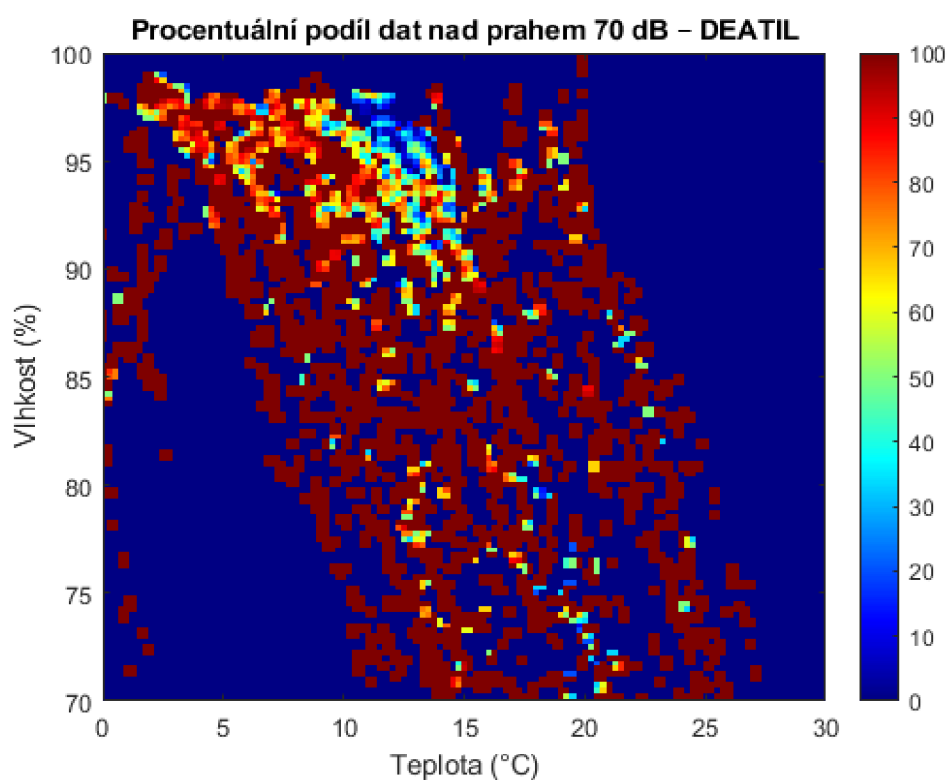
Obrázek 5-16 Doba trvání v meteorologických souřadnicích – měřeno



Obrázek 5-17 Doba trvání v meteorologických souřadnicích – průměrováno



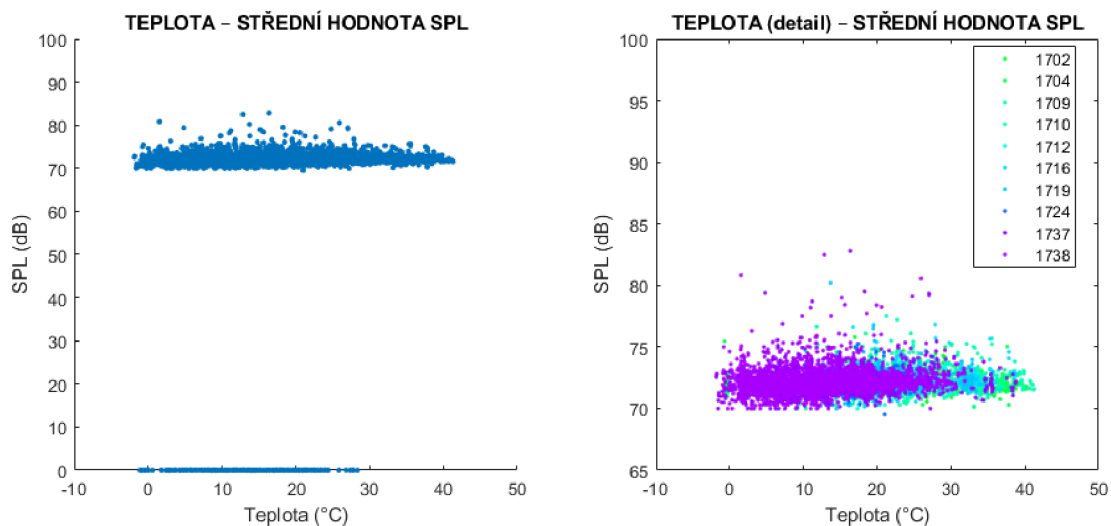
Obrázek 5-18 Pravděpodobnost výskytu kvilivého hluku



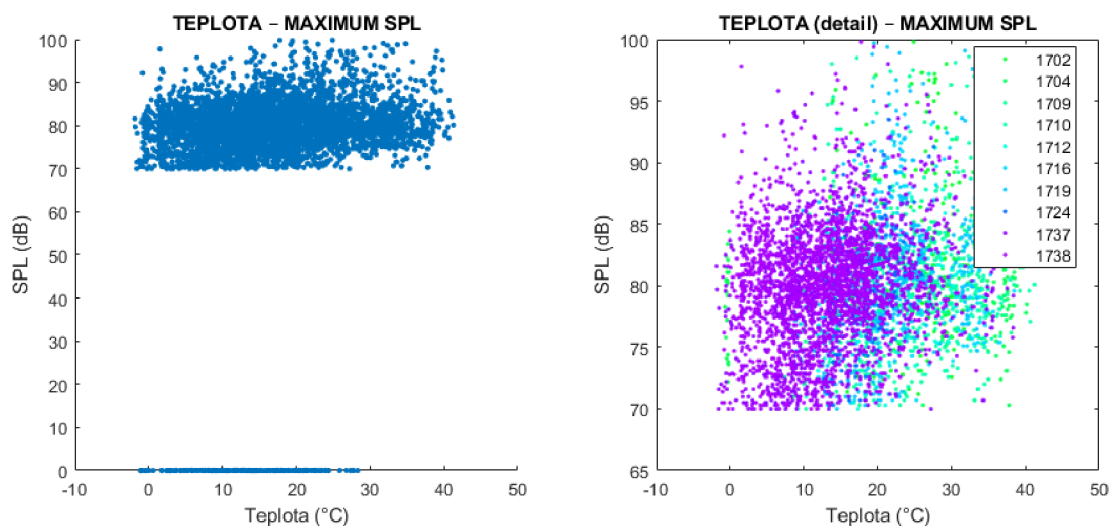
Obrázek 5-19 Pravděpodobnost výskytu kvilivého hluku – detail

## 5.1.2 H1.2 – Zvýšená teplota sníží SPL hluku tramvaje

Obdobně jako v předchozím oddíle jsou sestaveny grafy, které představují rozložení střední resp. maximální hodnoty hladiny akustického tlaku. Opět platí, že data 10 vozů jsou zastoupena rovnoměrně, ovšem nejvyšší zastoupení mají vozy 1737 a 1738. Podobně jako v případě vlhkosti při porovnání dat středních hodnot a maxim SPL lze pozorovat vyšší rozptýlení dat pro maxima SPL.



Obrázek 5-21 Závislost střední SPL na teplotě



Obrázek 5-20 Závislost maximální SPL na vlhkosti

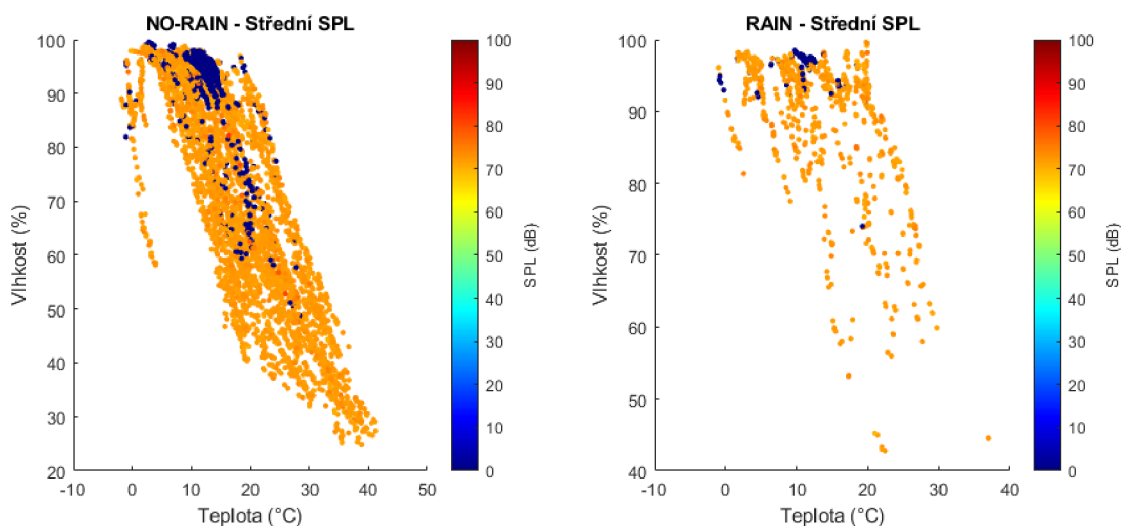
## Dílčí závěr – H1.2

Z dříve uvedeného grafu (Obrázek 5-15) je patrné, že při teplotě vyšší než 25 °C jsou častější vyšší maxima SPL, která se však objevují ve spojení s nižší vlhkostí. Tyto špičkové hodnoty však nelze přenést do grafu pravděpodobnosti projevení kvilivého hluku (Obrázek 5-19), místo toho lze vidět, že se v pásmu vlhkosti 90 % až 100 % nachází oblast nižší pravděpodobnosti (až 40 %) kvilivého hluku okolo teploty 15 °C. Tato zóna je ohraničena oblastmi s výrazně vyšší pravděpodobností (až k 100 %).

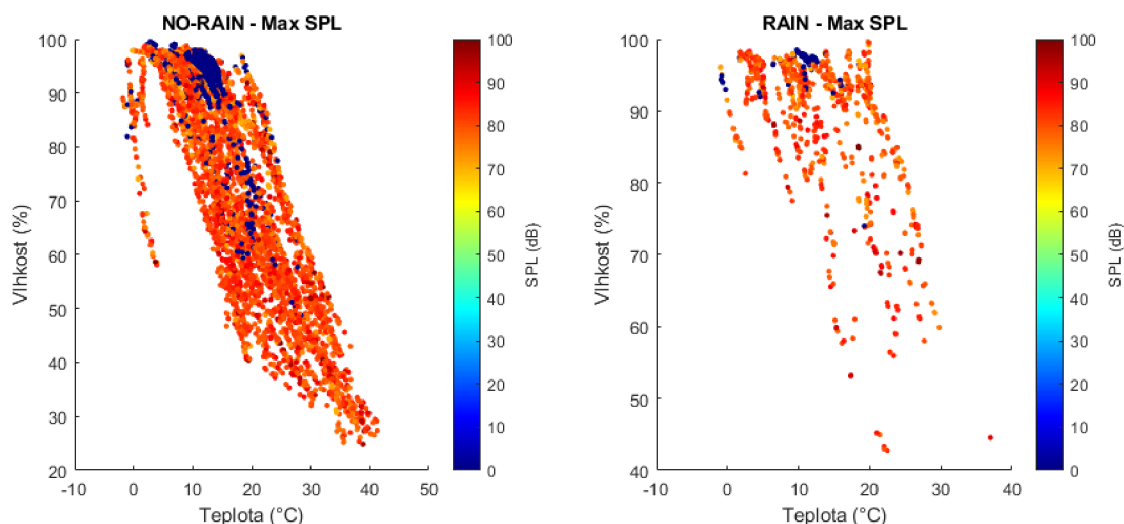
### 5.1.3 H2.1 – Meteorologické srážky snižují SPL hluku tramvaje

Z šetření předchozích dvou hypotéz vyplývá, že nejučinnějším nástrojem pro zobrazení dat a vyhledání trendu je zobrazení v meteorologických souřadnicích. Vycházíme-li z původní rešerše, lze očekávat snížení kvilivého hluku, případně jeho ustání, proto je pro začátek vhodné porovnat grafy střední hodnoty hladiny akustického tlaku pro data se srážkami a bez nich. Budou použita data v plném rozsahu (včetně vynulovaných hodnot pod prahem 70 dB), a proto stupnice grafů budou nyní začínat již na 0 dB. Data nyní nejsou průměrována, ale zobrazena jsou skutečné údaje z měření. Pro rychlou orientaci jsou skupiny dat s deštěm a bez deště pojmenovány jako RAIN a NO-RAIN (dále již takto).

Na první dvojici grafů lze snadno rozeznat oranžovou plochu se střední hodnotou SPL kolem 70 dB a tmavomodře uvedenou oblast bez přítomnosti kvilivého hluku. U skupiny RAIN lze vidět zónu bez přítomnosti kvilivého hluku v oblasti vysoké vlhkosti (více než 95%) kolem teploty 15 °C. Tento trend potvrzují i data maximálních hodnot SPL, navíc lze pozorovat mírně vyšší hodnoty hladiny akustického tlaku pro vlhkosti nižší než 75%.

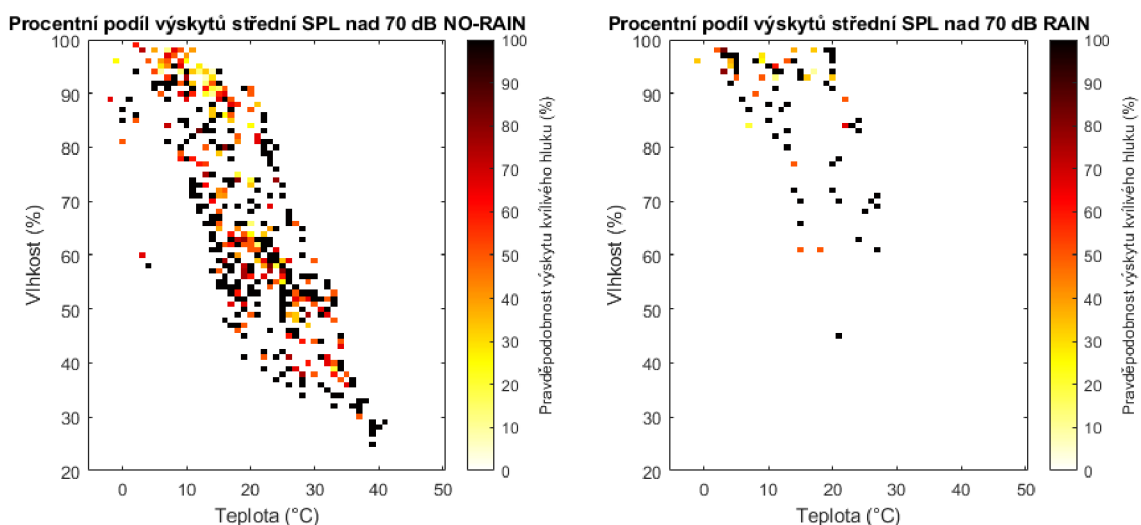


Obrázek 5-22 Porovnání střední SPL pro data s deštěm a bez deště



Obrázek 5-23 Porovnání maximální SPL pro data s deštěm a bez deště

Data průměrování zde postrádají význam, jelikož se operuje i s nulovými hodnotami, kdy nenastala událost kvilivého hluku. Také vypočtená pravděpodobnost hluku vlivem řídkého zastoupení dat ztrácí výpovědní charakter. Lze říci, že data se nacházejí v oblasti vyšších vlhkostí vzduchu (což vyplývá ze samotné přítomnosti srážek), pravděpodobnost hluku se zdá být nižší.



Obrázek 5-24 Porovnání pravděpodobnosti výskytu kvilivého hluku za sucha, resp. přítomnosti deště

Pro globální pohled je možné vyčíslit počet kvilivých událostí (překročení prahu 70 dB) a také vypočíst procentní zastoupení. Z tabulky níže je možné pozorovat vyšší procentní zastoupení hluku pro data RAIN oproti očekáváním, hodnoty pravděpodobnosti jsou však srovnatelné, liší je pouze o necelých 7 %.

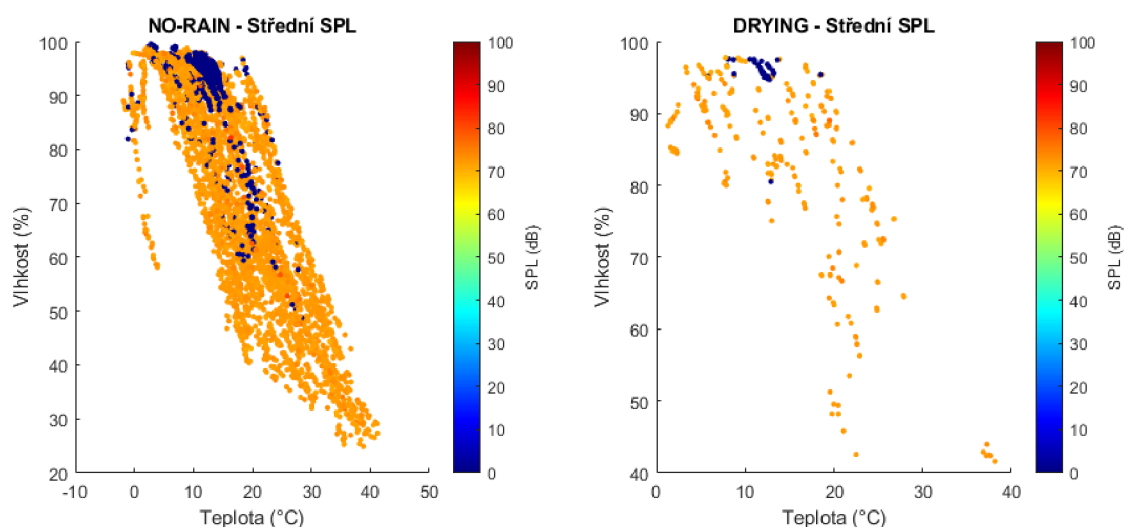
Tabulka 5-7 Poměr hlukových událostí dle meteorologických srážek

Datový soubor	Počet záznamů	Počet výskytů hluku	(%)
RAIN	1 652	1 413	<b>85,5</b>
NO-RAIN	13 558	10 695	<b>78,9</b>

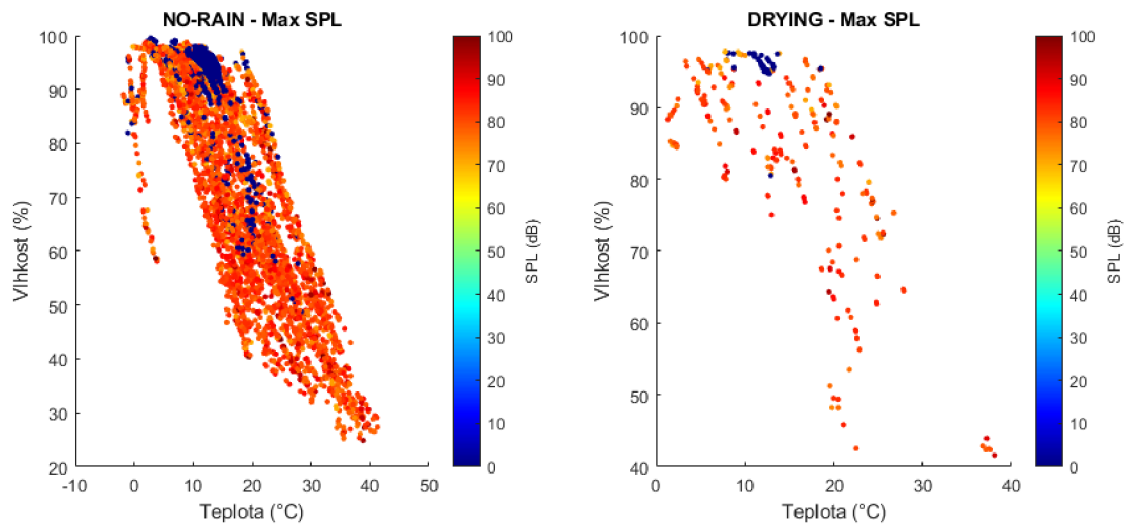
#### 5.1.4 H2.2 – Vysychání kolejí dočasně zvýší SPL hluku tramvaje

Podobně jako v předchozí hypotéze se použije zobrazení do meteorologických souřadnic a budou porovnávány výběry NO-RAIN a DRYING. Druhý zmiňovaný výběr vznikl z dat NO-RAIN výběrem z časového okna 90 minut po posledním záznamu deště.

Data DRYING vypadají srovnatelně s daty RAIN, časové okno pro děj vysychání může být proměnlivé, proto by vybraná data měla být zobrazena v závislosti na čase.

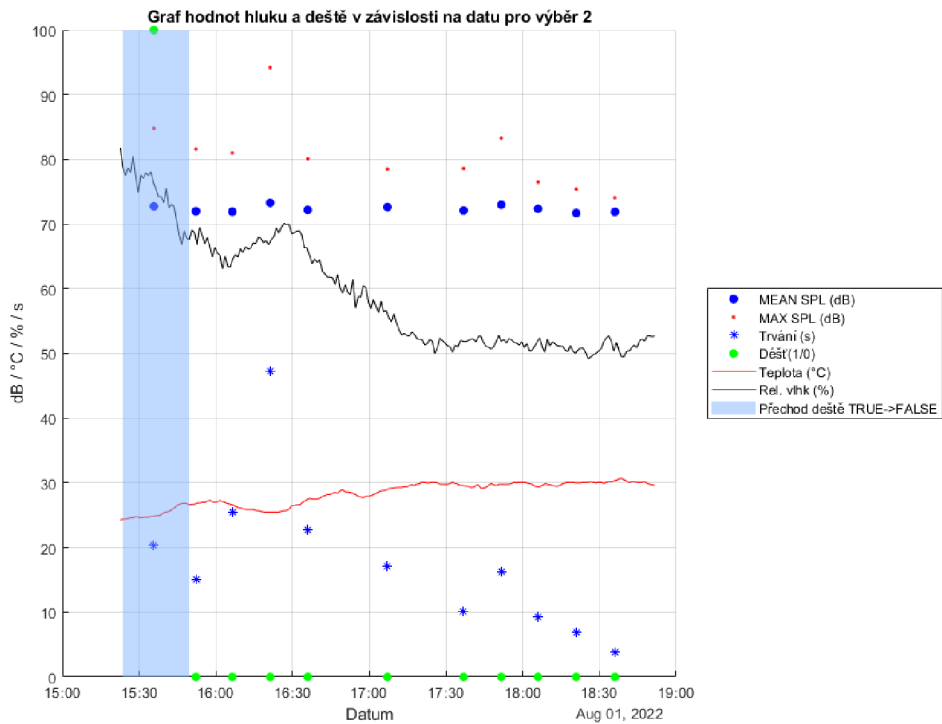


Obrázek 5-25 Porovnání střední SPL pro data bez deště a s vysycháním

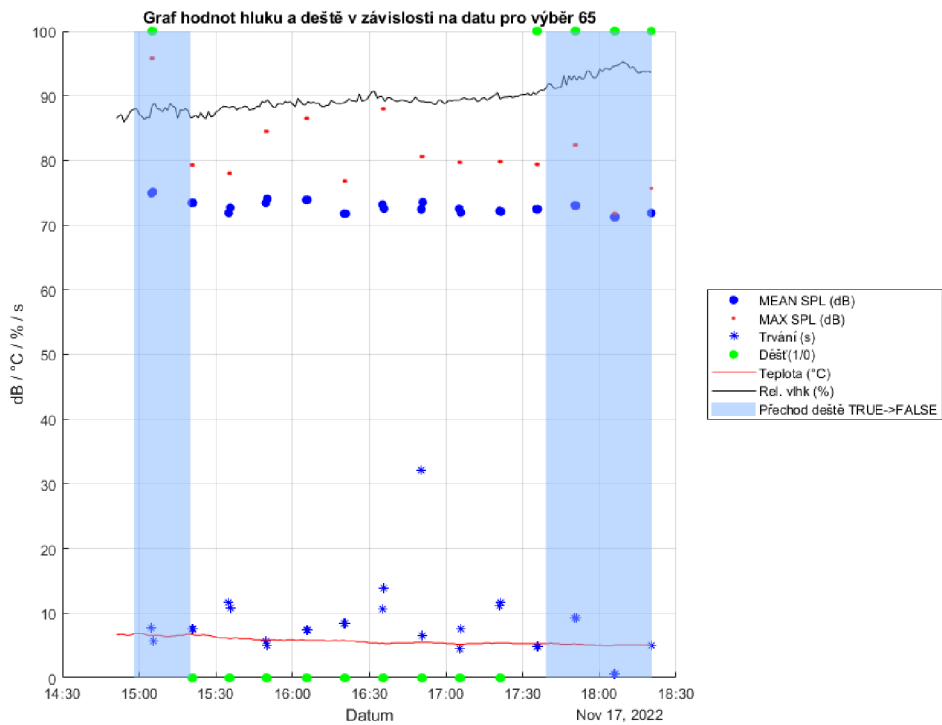


Obrázek 5-26 Porovnání maximální SPL pro data bez deště a s vysycháním

Dvojice následujících grafů jsou zástupci početnější skupiny (viz přílohy práce) grafů, které automaticky vznikají z dat dlouhodobého měření. Vytvoří se vždy při přechodu logického signálu detektoru deště do hodnoty nepravda (bez srážek). Vykreslují průběh vlhkosti a teploty z dlouhodobého měření a bodově vypisují hlukové události (trvání, střední a maximální hodnota).



Obrázek 5-27 Vysychání v čase – klesající vlhkost

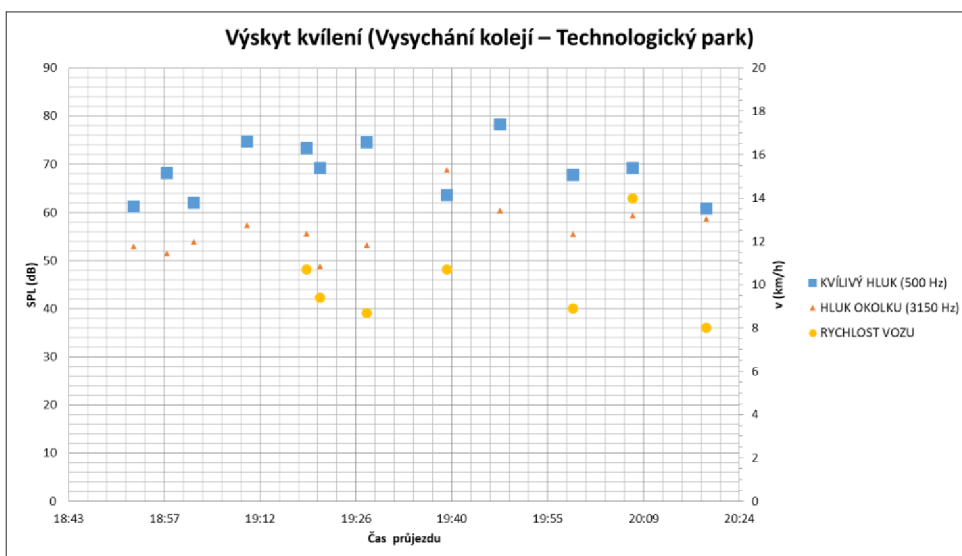


Obrázek 5-28 Vysychání v čase – stoupající vlhkost



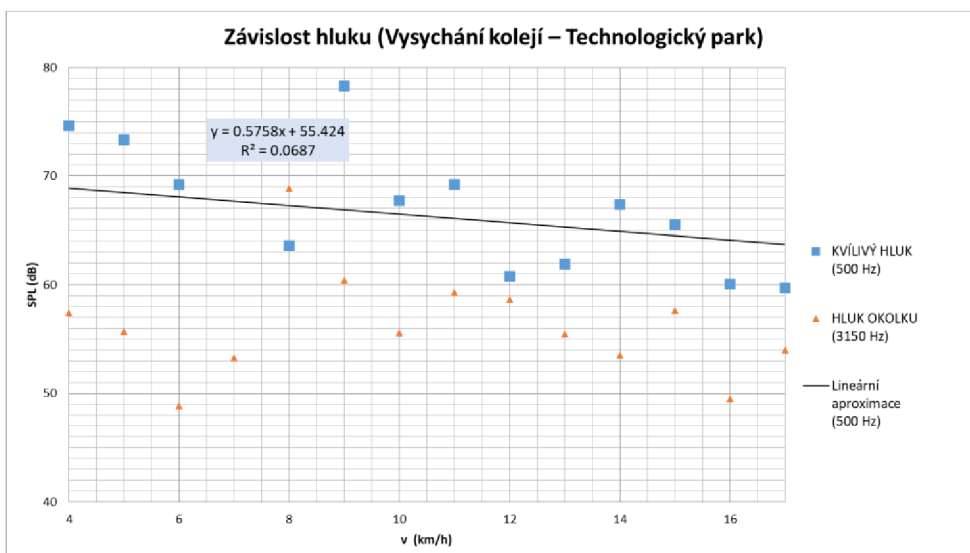
Na těchto dvou typických zástupcích lze pozorovat náhlé zvýšení maximální hodnoty SPL při klesajícím průchodu relativní vlhkosti intervalem 78 % až 80 %. Na grafu maximální SPL v meteorologických souřadnicích však tento trend vypořádat nemůžeme, hlavně proto, že při zpětném (rostoucím) průchodu intervalem 78 % až 80 % vlhkosti již tento efekt nenastává a v globálním zobrazení je vyrušen průměrováním (Viz Obrázek 5-15).

Data z pozorování na smyčce Technologický park (bylo měřeno pouze jedno vysychání) ovšem mají podobný charakter. Pro úplnost tento graf také nese údaj o rychlosti vozu, jelikož byla měřena (hodnoty se pohybují kolem 9 km/h)



Obrázek 5-29 Vysychání v čase – smyčka Technologický park

I když se jedná o malý datový soubor, je dobré povšimnout si trendu výskytu vyšší SPL kvílivého hluku při nižších rychlostech. S rostoucí rychlostí SPL klesá.



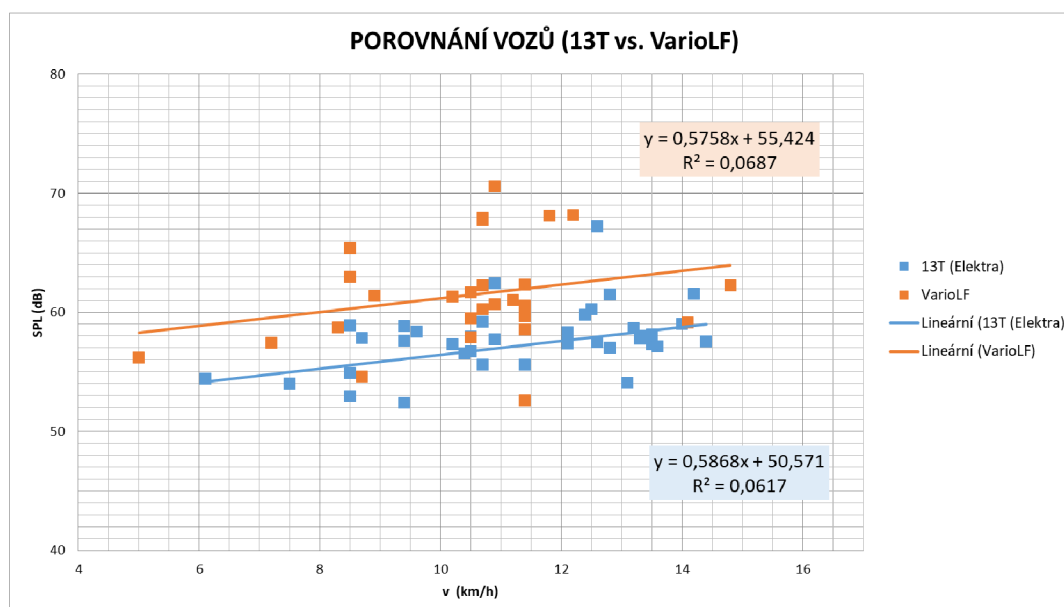
Obrázek 5-30 Vliv rychlosti při vysychání – smyčka Technologický park

### 5.1.5 H3.1 – Různé konstrukce vozů se liší v hlukových parametrech

Porovnávají jsou dvě kategorie vozů z pozorování na smyčce Technologický park:

- Pragoimex VarioLF2R.E 45 průjezdů obloukem
- Škoda 13T6 (Elektra) 43 průjezdů obloukem

Do společného grafu jsou zaneseny závislosti hladiny akustického tlaku na rychlosti vozu v oblouku. Lze vysledovat v obou případech mírně rostoucí trend ( $R^2$  jsou pro obě lineární aproximace nízká, ale se srovnatelnými směnicemi). Dle porovnání lineárních aproximací i naměřených hodnot lze tvrdit, že vozy Škoda 13T6 mají hladinu akustického tlaku o 5 dB nižší, než vozy VarioLF2R.E.



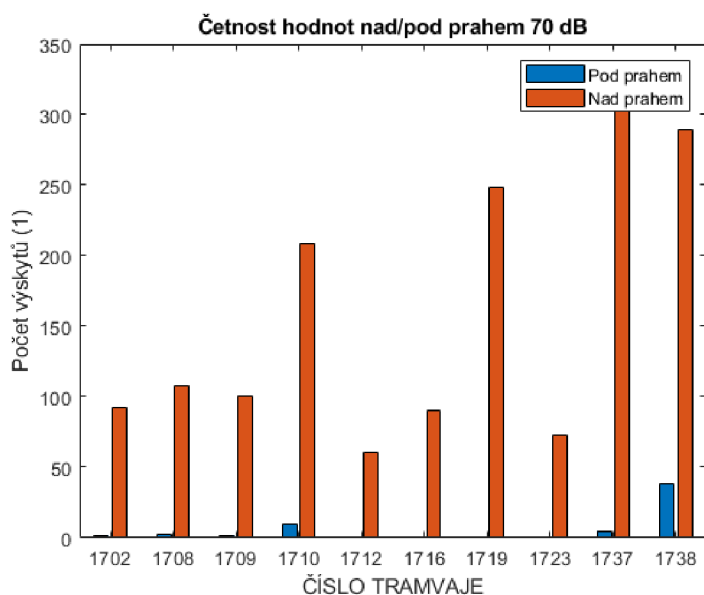
Obrázek 5-31 Porovnání vozů – smyčka Technologický park

### 5.1.6 H3.2 – Různé vozy téže konstrukce se liší v hlukových parametrech

Z celkového souboru dat měření na smyčce v Brně-Komíně jsou vytipovány nejčastěji projíždějící tramvaje. Pro tyto vozy je nejprve zobrazen poměr jízd s kvilivým hlukem a bez jeho projevu. Aby měření bylo porovnatelné, jsou započítána pouze data z teplotního intervalu společného všem 10 vozům (40 % až 70 % relativní vlhkost, teplota 20 °C až 30 °C), použita byla data bez deště. Absolutní počty byly převedeny na procentní body. V tabulce jsou uvedeny také termíny poslední velké prohlídky podvozku a typ kol.[5]

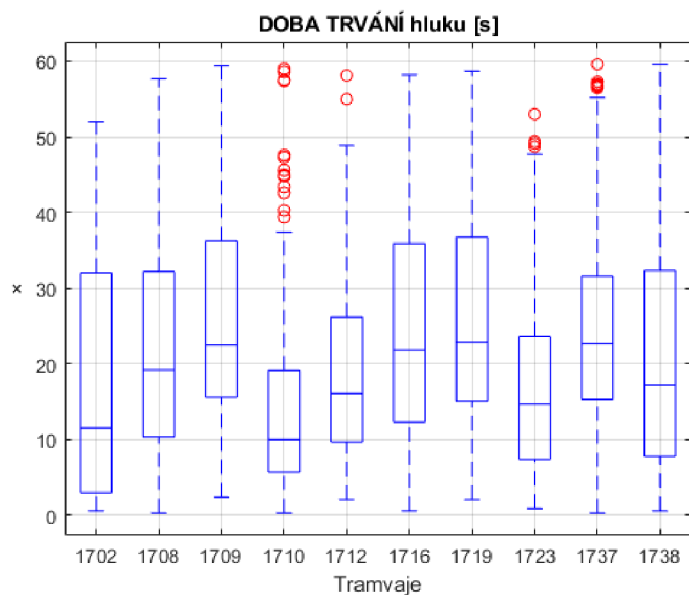
Tabulka 5-8 Porovnání vozů KT8D5R.N2

Číslo vozu	Celkový počet průjezdů (1)	Počet průjezdů – s kvílením (%)	Datum poslední velké kontroly (reprofilace kol)	Typ kol	Typ vozu
1702	94	97,3	21. 12. 2016 (18. 01. 2021)	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1708	111	97,3	20. 07. 2016 (20. 01. 2021)	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1709	103	98,1	31. 03. 2021	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1710	219	95,4	11. 01. 2021	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1712	61	100,0	03. 10. 2013 (03. 09. 2020)	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1716	90	100,0	03. 05. 2016 (21. 12. 2020)	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1719	249	99,6	26. 06. 2018	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1723	73	100,0	Není k dispozici	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1737	325	98,5	27. 09. 2018	ČKD	ČKD Tatra KT8D5R.N2
1738	327	88,4	13. 12. 2021	BONATRANS	ČKD Tatra KT8D5R.N2

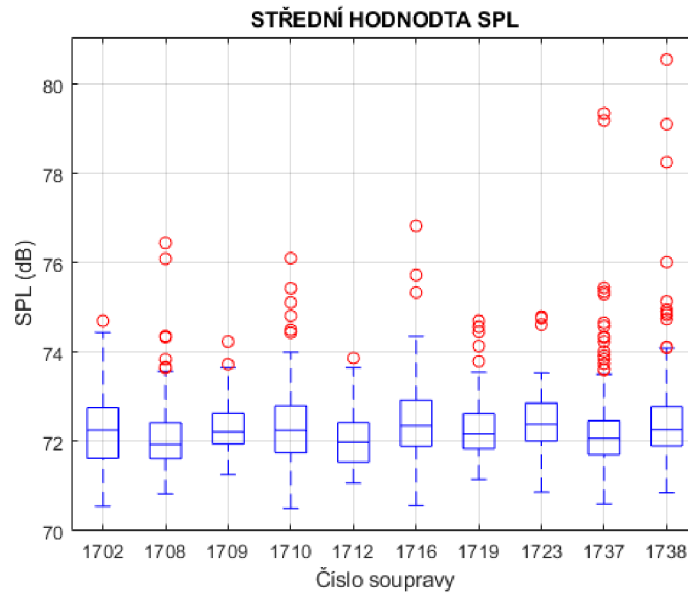


Obrázek 5-32 Porovnání vozů KT8D5R.N2

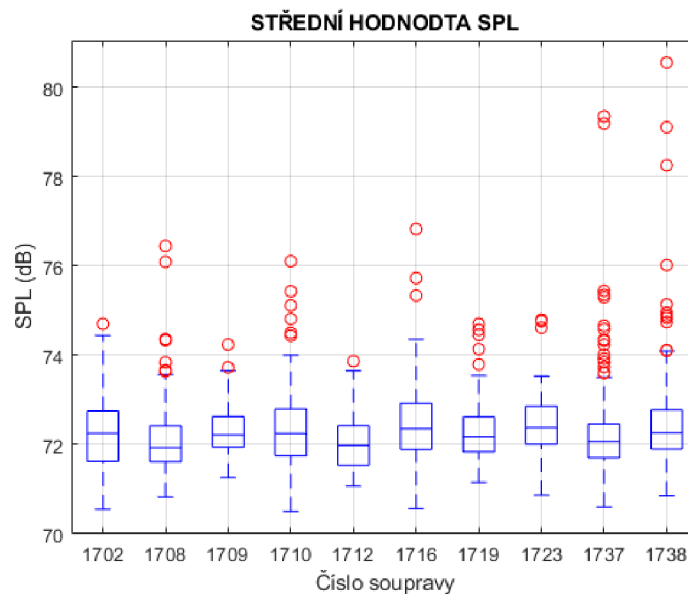
Tramvajové vozy byly srovnány také pomocí popisné statistiky a výsledky pro (nenulové hodnoty) trvání, střední a maximální hodnoty hladiny akustického tlaku jsou vyjádřeny následnou trojicí grafů:



Obrázek 5-33 Porovnání vozů KT8D5R.N2 – doba trvání hlukové události

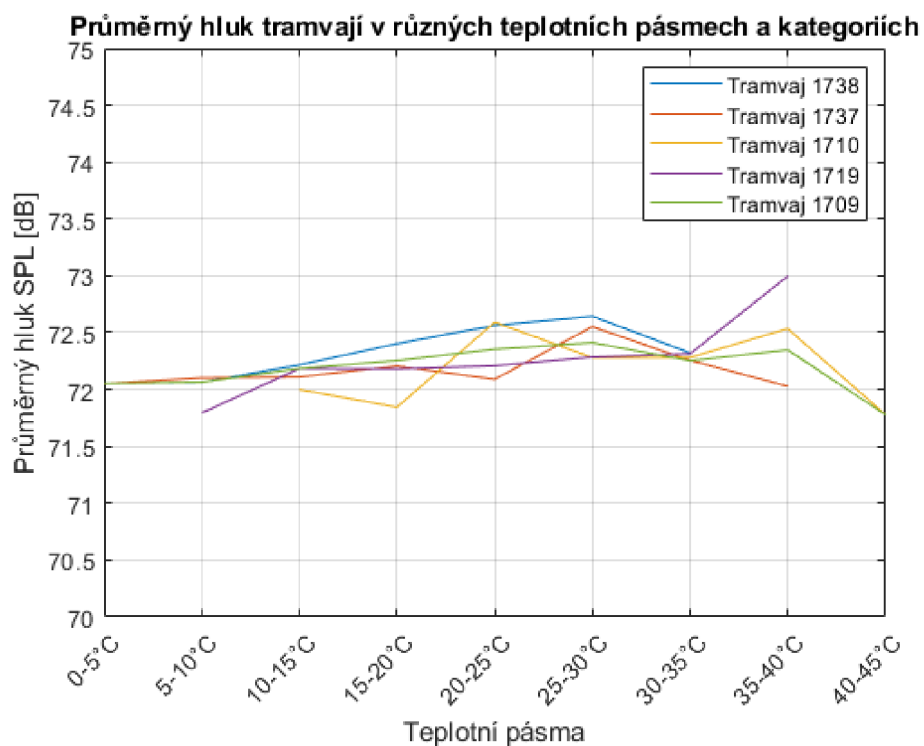


Obrázek 5-34 Porovnání vozů KT8D5R.N2 – střední SPL

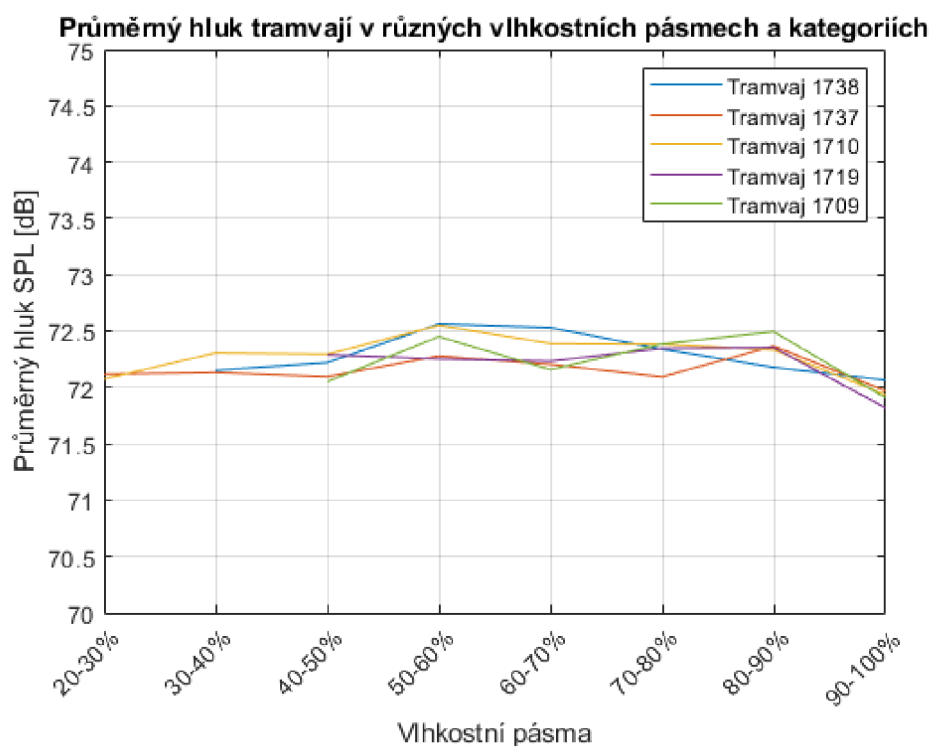


Obrázek 5-35 Porovnání vozů KT8D5R.N2 – maximální SPL

O různém chování tramvají stejného druhu může také vypovídat dvojice grafů, která průměrují střední hodnotu hladiny SPL po jednotlivých intervalech vlhkosti, resp. teploty pro každý vůz zvlášť. Průměrné hodnoty byly vypočítány z celého používaného datového vzorku pro 5 nejčastějších vozů. V teplotních pásmech lze pozorovat společný rostoucí SPL s rostoucí teplotou, také slabý pokles SPL pro vlhkosti mezi 90 % a 100 %.

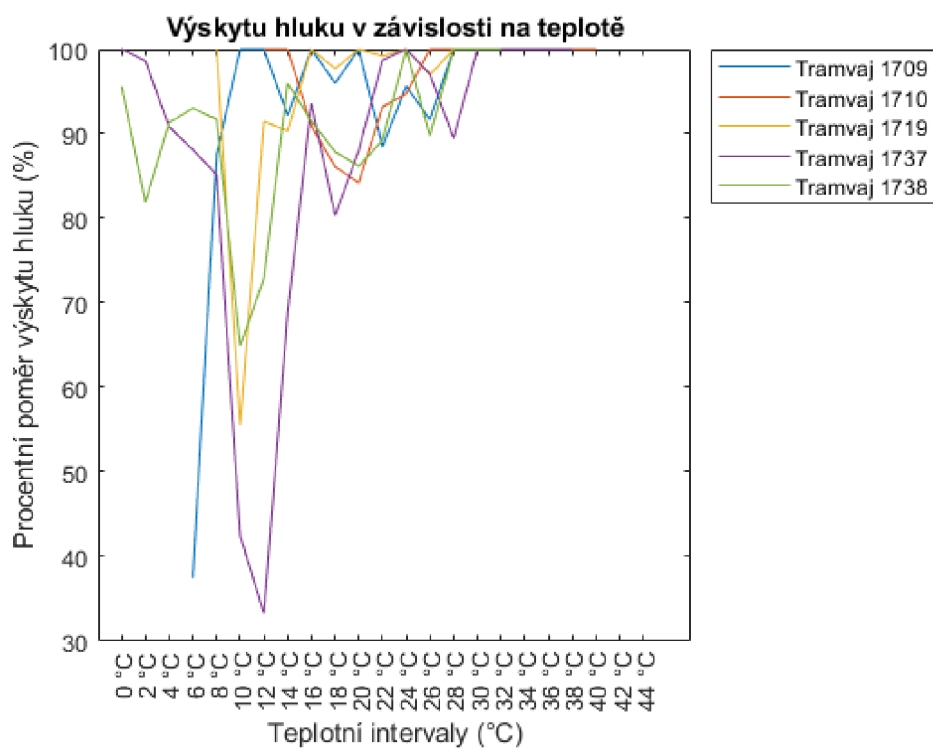


Obrázek 5-36 Průměrovaná diskretní data pro 5 tramvají – teplotní pásma

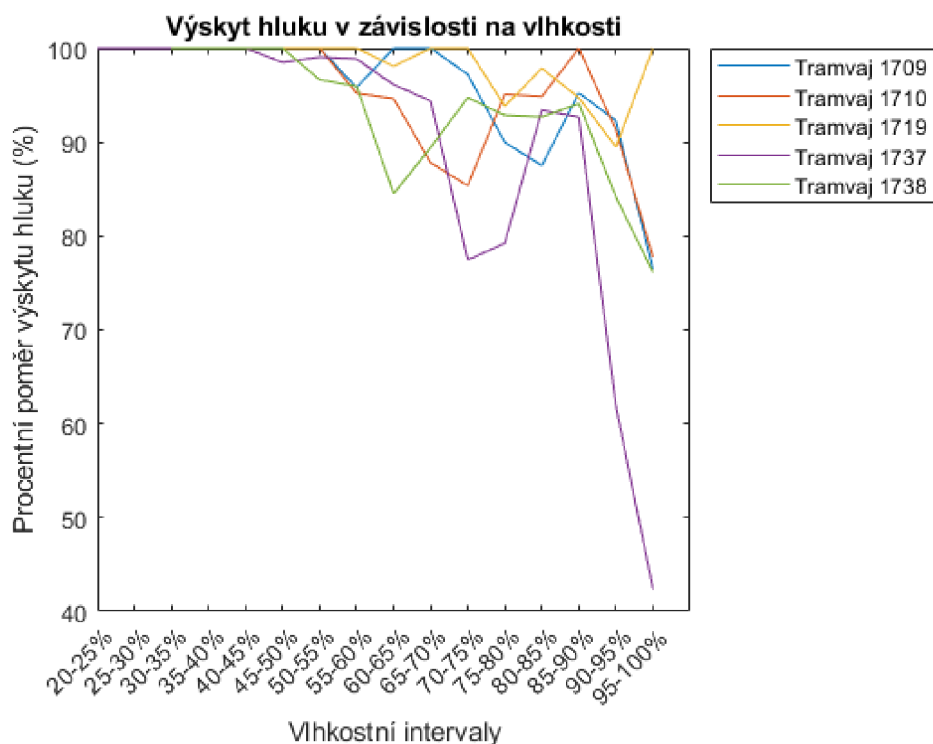


Obrázek 5-37 Průměrovaná diskretní data pro 5 tramvají – pásma vlhkosti

Předchozí grafy se však zaměřují pouze na parametry hluku pro události nad prahem pro kvílivý hluk (70 dB), proto jsou ještě uvedeny grafy pravděpodobnosti kvílivého hluku, tedy procentní poměr událostí nad prahem. Vypočítány jsou pouze pro 5 nejčastějších vozů, datový vzorek byl použit bez záznamů s deštěm pro čitelnější závislost za vzájemně srovnatelných podmínek.



Obrázek 5-38 Průměrovaná data pro 5 tramvají – pravděpodobnost vzniku kvílivého hluku – teplotní pásma

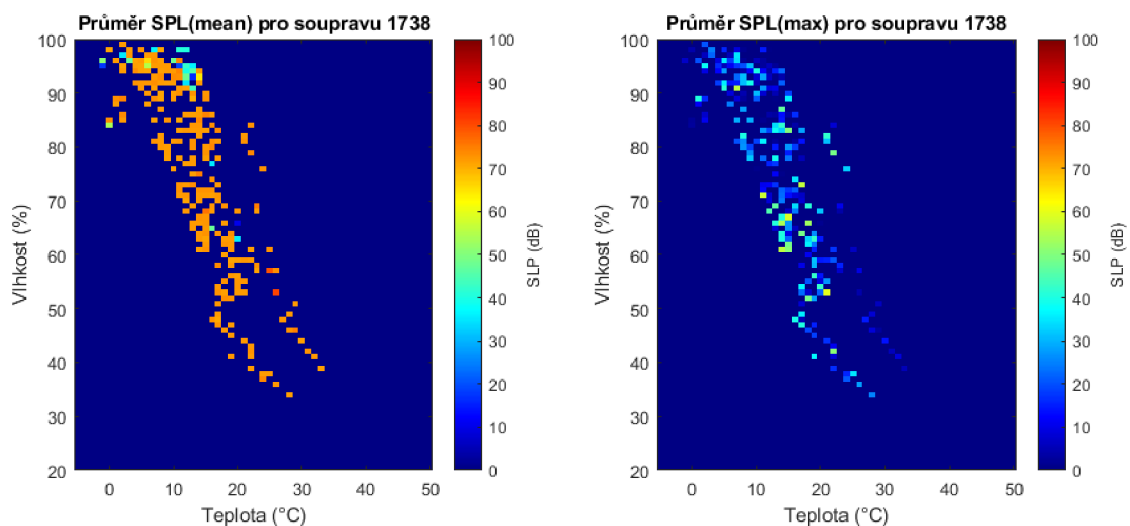


Obrázek 5-39 Průměrovaná data pro 5 tramvají – pravděpodobnost vzniku kvilivého hluku – pásma vlhkosti

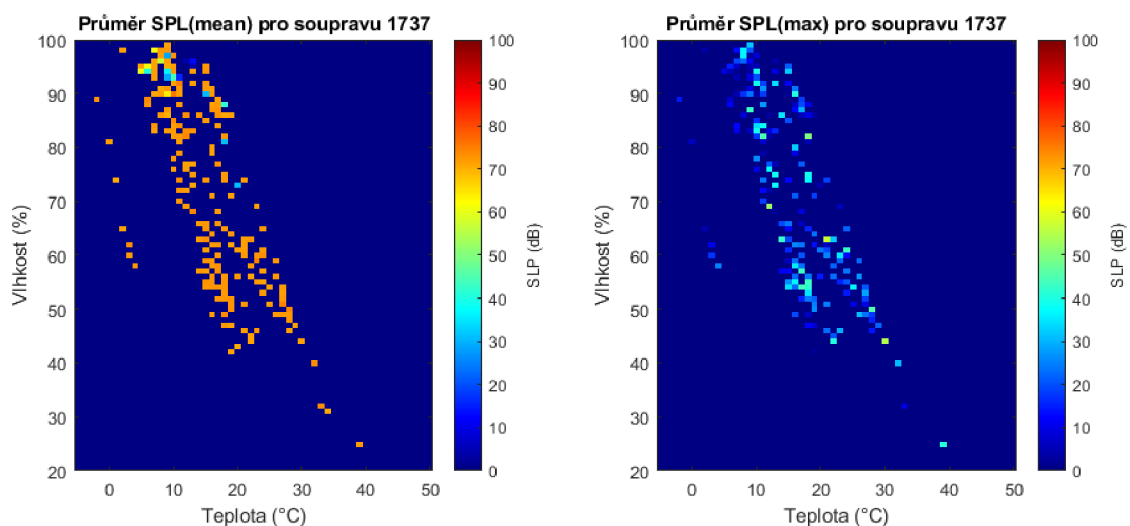
Lze pozorovat téměř 100 % výskyt kvilivého hluku nad teplotou 30 °C, resp. do 30 % vlhkosti a to pro všechny vozy. V grafu závislosti na teplotě je nápadný, ale také podezřelý propad pravděpodobnosti výskytu kolem 10 °C pro tramvaje 1719, 1737 a 1738. V případě vozů 1738 a 1719 lze brát v úvahu, že snížení výskytu o cca 30 % je relevantní, jelikož spadá do oblasti snížené pravděpodobnosti hluku (viz Obrázek 5-19), propad o více jak 60 % pro vůz 1737 je značně podezřelý, je možné, že v teplotním intervalu 8 °C až 12 °C bylo k dispozici málo dat k výpočtu průměru. Podobné chování lze pozorovat i u tramvaje 1709, avšak pod teplotou 6 °C. Pro ostatní vybrané vozy nejsou k dispozici v pásmu nízkých teplot. V grafu závislosti na vlhkosti lze pozorovat klesající trend vzniku hluku směrem k vyšším vlhkostem, každý vůz však reaguje odlišně, proto tento jev není postižitelný v celkovém průměru.

Pro doplnění jsou uvedeny grafy v meteorologických souřadnicích pro dva nejčastější vozy (1737 a 1738) bez omezení rozsahu teploty a vlhkosti (Zbýlých 8 grafů tvoří přílohu práce, ale pro nižší počet průjezdů točnou nemají patřičnou vypovídající hodnotu). Porovnání hlukových parametrů vozů 1737 a 1738 před a po nahlášených opravách nepřineslo uchopitelné výsledky, jelikož byly vozy déle odstaveny a změnil se zatím meteorologické podmínky.





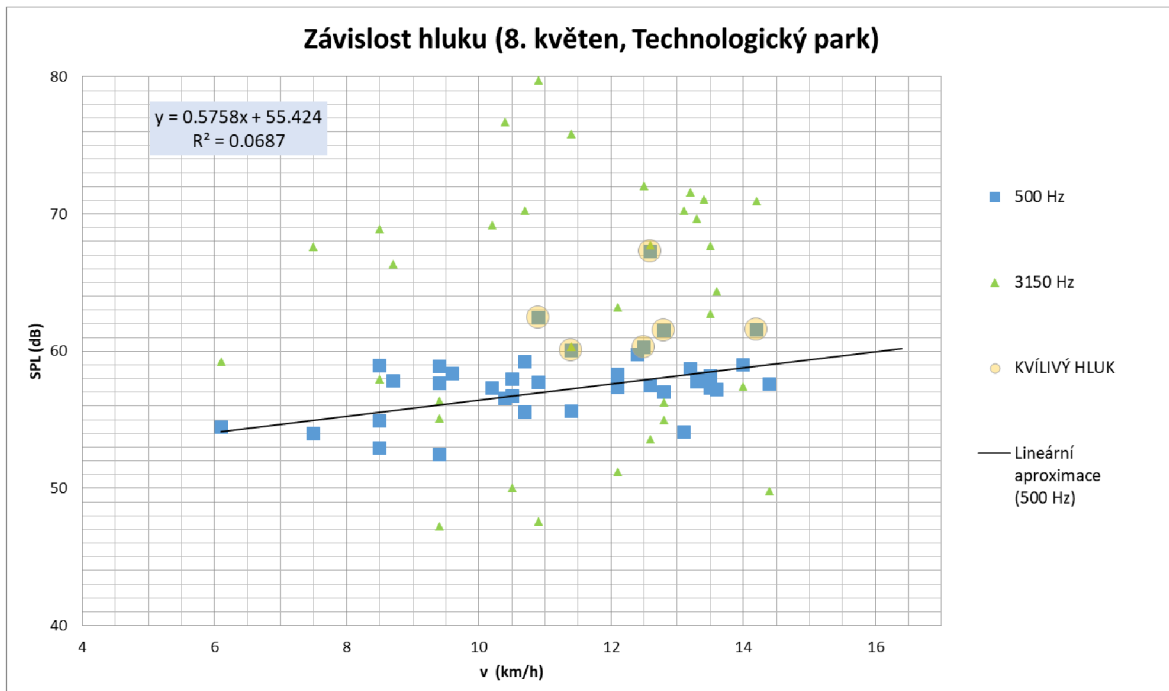
Obrázek 5-40 Pravděpodobnost hluku v meteorologických souřadnicích pro vůz 1738



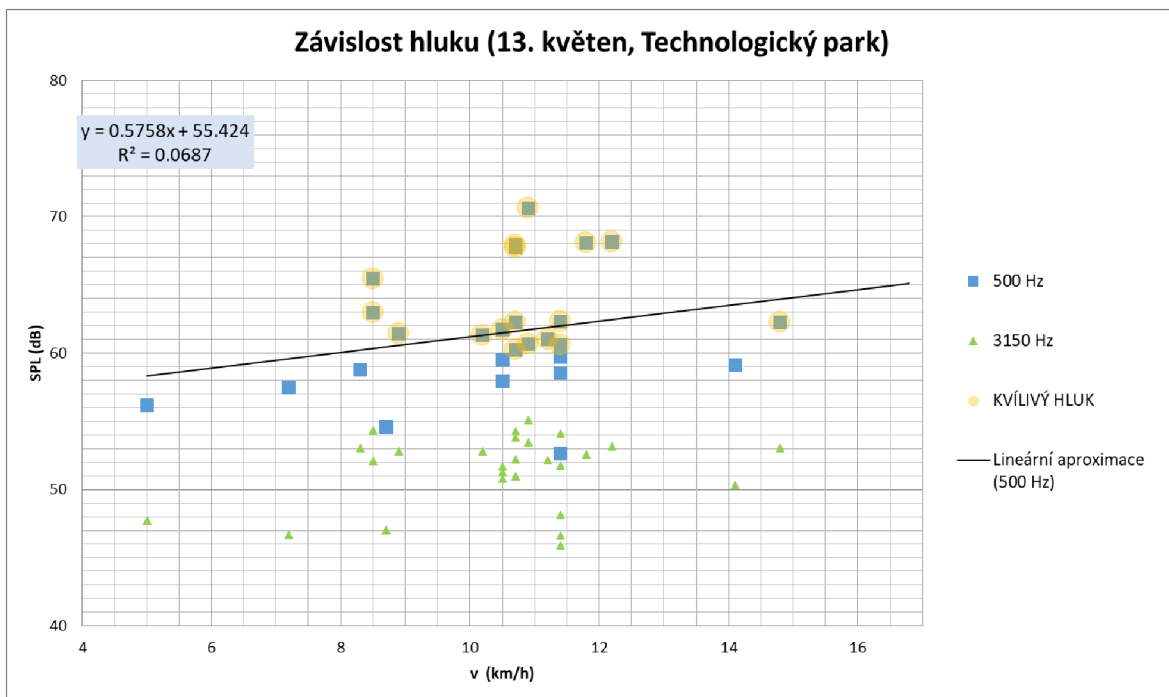
Obrázek 5-41 Pravděpodobnost hluku v meteorologických souřadnicích pro vůz 1737

### 5.1.7 H4 – Při vyšších rychlostech bude narůstat SPL hluku tramvaje

Naměřená data z pozorování na tramvajové smyčce Technologický park (bez přítomnosti vody) budou zobrazena v grafu závislosti SPL (dB) na rychlosti vozu (km/h) včetně proložení přímkou. Nejprve následují data z 8. května pro vozy Škoda 13T6 (s pevnými podvozky), následně graf pro 13. května pro vozy Pragoimex VarioLF2R.E (s otočnými podvozky). Lze pozorovat rostoucí trend hluku na rychlosti. Datový vzorek je však příliš malý, než aby poskytl potvrzení a zobecnění hypotézy. Zajímavý fenomén, který se objevil je výrazně vyšší náchylnost tramvajů 13T6 tvořit hluk okolku o vyšších SPL.



Obrázek 5-42 Závislost hluku na rychlosti – vozy VariolF2R.E



Obrázek 5-43 Závislost hluku na rychlosti – vozy 13T6

## 6 DISKUSE

Prvním zvoleným způsobem náhledu do závislostí byla regresní matice pro rychlé zorientování v problematice, avšak bylo zřejmé, že terénní data budou zkreslená. Po vzoru výsledků dlouhodobých měření, která prováděli T. Maly [23] a P. Torsterson [24], šlo již předem předpokládat statisticky slabé závislosti meteorologických veličin. Práce se proto více zaměřuje na přehledné grafické zobrazení a slovní popis komplikovaných dějů. Některé závislosti proto pomohla lépe pochopit série pozorování na tramvajové smyčce Technologický park (viz dále), jelikož tato data obsahují podrobnější záznam kvílivého hluku s doprovodným komentářem.

Diskuse tedy bude rozdělena na dvě hlavní části – analýzu výsledků a analýzu měření.

### 6.1 Analýza výsledků

#### 6.1.1 Vliv vlhkosti

Z rešerše vyplývá, že vlhkost sehrává v mechanismu tvorby hluku dvojí úlohu. Tou první je ovlivnění součinitele adheze, který, dle práce týmu Y. Zhu [19], klesá po překročení hodnoty 50 % relativní vlhkosti. Snížená adheze by tedy měla snížit dynamiku odtrhávání kontaktu kola a kolejnice v příčném směru (stick-slip efekt). T. Maly [23] a P. Torsterson [24] proto dlouhodobě plošně měřili vlhkost pro vypořádání trendu snížení výskytu kvílivého hluku. Obě tato pozorování prokázala spíše slabou globální závislost. V případě měření kvílivého hluku vlakových souprav [23] se dokonce jeví, že s rostoucí vlhkostí má hladina akustického tlaku pro pásmo kvílivého hluku spíše mírně rostoucí trend. Hypotézu, že při rostoucí vlhkosti dochází ke kondenzaci na kolejích a tím tedy ke snížení adheze kontaktu, prověřoval T. Maly dvojím měřením teploty (zvláště pro vzduch a kolejnici) a porovnáním s rosným bodem. Tato úvaha se částečně potvrdila, avšak stále nebyla vysvětlena slabě rostoucí tendence SPL hluku v závislosti na vlhkosti. Odpovědí může být právě druhá úloha, kterou relativní vlhkost sehrává při ovlivnění tvorby kvílivého hluku. U. Olofsson [19] totiž pozoroval vývoj součinitele adheze v čase ve vazbě na tvorbu oxidické vrstvy hematitu. Ukazuje se, že vyšší vlhkost znamená pomalejší odpařování vody, a tedy vhodnější podmínky pro vznik oxidů. Takovýmto způsobem si lze vysvětlit, proč je průměrný trend závislosti akustické hladiny kvílivého hluku mírně rostoucí. Dohromady jdou proti sobě dva mechanismy: vysychání po meteorologických srážkách při klesající vlhkosti a kondenzace vody na kolejích při stoupající vlhkosti. Cílem této práce bylo se zaměřit na oba tyto dílčí mechanismy.

Jelikož bylo operováno s velkým množstvím dat bez přítomnosti meteorologických srážek, nejsou závislosti vlhkosti tolik zarušené fenoménem vysychání. Tak bylo možné vypočítat v meteorologických souřadnicích oblast snížené pravděpodobnosti výskytu hluku při vysokých vlhkostech (viz Obrázek 5-19) a dále pak v průměrovaných datech nalézt trend snižování pravděpodobnosti pro vznik kvílivého hluku (viz Obrázek 5-39). Graf pravděpodobnosti výskytu z průměrovaných dat pro 5 tramvají ukazuje rozdílné chování pro každý vůz, i když všech pět průběhů závislostí nese podobné znaky. Globálním průměrováním se však tyto slabé trendy skryjí. Slabé až nevýrazné trendy také projevil vliv vlhkosti přímo na hladinu akustického tlaku (viz Obrázek 5-37) podobně, jako tomu bylo ve vídeňské studii T. Maleho (viz Obrázek 2-13). Kde se však výrazně odchylojí zjištěná data z měření brněnských tramvají od vídeňských vlaků, jsou procentní body výskytu hluku pro dané pásmo vlhkosti. Pro tramvaje byla zjištěna téměř 100% pravděpodobnost do 50% relativní vlhkosti, kdežto nejvyšší hodnoty procent výskytu, které byly zaznamenány u vlakových souprav, jsou méně než 50 % výskytů (pro teploty pod bodem mrazu). Zde však lze argumentovat vlivem velikosti porovnávaných traťových oblouků. P. Tostersson pro oblouky (vozů stockholmského metra) zaznamenává až 50% snížení výskytu kvílivého hluku pro oblouk o poloměru 230 metrů (viz Obrázek 2-15), jako byl sledován vídeňskou studií. Vysoké procento výskytů kvílivého hluku na úzkém oblouku ( $R = 21$  m) tramvajové smyčky v Brně-Komíně tedy z pohledu hygienického představuje závažný problém, pro poskytnutí lepšího vzhledu do odezvy na změněnou vlhkost se však nezdá optimální.

Počáteční hypotézu H1.1 „Zvýšená vlhkost, případně srážky budou snižovat SPL průjezdu tramvaje.“ nelze jednoznačně potvrdit, jelikož je celý problém komplikovanější. Při posouzení průměrných dat vozů samostatně však lze říci, že procento výskytu kvílivého hluku s rostoucí vlhkostí klesá. Pro jednoznačnější závěr by bylo vhodné zkoumat vedle prahovaných dat frekvenčního pásma kvílivého hluku také původní hodnoty SPL na tomto pásmu k prokázání klesající tendence. Zajímavý pohled by mohlo vnést také komplexnější posouzení širokopásmového hluku nad prahem 70 dB, jelikož z pozorování na smyčce Technologický park vyplývá silná provázanost kvílivého hluku a hluku od okolku, viz dále.

### 6.1.2 Vliv teploty

Průměrované hodnoty závislosti SPL hluku na teplotě (viz Obrázek 5-36) odhalily velmi slabý rostoucí trend průměrné SPL od teploty 10 °C podobně, jak to uvádí P. Torsterson (viz Obrázek 2-16) i méně významně T. Maly pro červeně vyznačená data bez deště (viz Obrázek 2-12). Obě velká zahraniční měření obsáhla i teploty výrazně pod bodem mrazu, naměřená data na smyčce Brno-Komín však nemají tak velký rozsah do záporných teplot,

proto odlišné chování pro nízké teploty nebylo možné vysledovat. Při zobrazení průměrovaného poměru výskytů hluku v teplotních pásmech lze vidět, že ač vozy opět reagují rozdílně, společným trendem je výrazně nižší poměr výskytu kvílivého hluku směrem k nižším teplotám. Je otázkou, zda vůbec sama teplota má tak významný vliv, či spíše napomáhá ke zvýšení vlhkosti (jak bylo ověřeno vídeňskou studií). Data dlouhodobého měření projevila silnou korelaci vlhkosti a teploty. (viz Obrázek 5-7) V současnosti stále nedostatečně prozkoumaným fenoménem je vliv nízkých teplot. Právě při velmi nízkých, zejména záporných, teplotách by více než o ovlivnění součinitele adheze mohlo jít o projev tepelné dilatace (či spíše kontrakce) kolejí a změnu geometrie styku.

Hypotézu H1.2 „*Zvýšená teplota bude snižovat SPL průjezdu tramvaje.*“ Lze za současného intervalu naměřených teplot spíše zamítnout, jelikož se hlavní maximum hluku, od kterého byl vídeňskou studií T. Malého stanoven klesající trend, nachází v záporných teplotách, hluboko pod bodem mrazu, ovšem datový vzorek zkoumaný touto prací končí teplotou necelé  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 6.1.3 Vliv srážek

Porovnáním procentního poměru hlukových událostí s přítomností srážek a bez se nepodařilo prokázat účinek vody v kontaktu, výsledné poměry se liší o pouhých 7 %, což však může být považováno spíše za statistickou chybu, než za závislost. Je dobré též uvést, že dat s přítomností deště je přibližně desetkrát méně. Terénní měření, které vedl Squicciarini [20] prokázalo snížení akustické hladiny kvílivého hluku v celém frekvenčním spektru (viz Obrázek 2-9), rovněž terénní experimenty, které prováděl Y. Zhao s týmem (viz Obrázek 2-10) prokázaly snížení hluku, avšak v případě ostřejšího ze dvou sledovaných oblouků docházelo stále ke vzniku kvílivého hluku (pod sledovanou mezi danou hygienickou normou), dokonce má tento hluk své maximum při nejpomalejším (sic!) průjezdu obloukem. Zdá se tedy, že poloměr daného oblouku tramvajové smyčky v Brně-Komíně sehrává významnější roli než přítomnost srážek na vznik kvílivého hluku.

Hypotézu H2.1 „*Měření prokáže snížení SPL při trvání meteorologických srážek.*“ je nutné za stávajících dat zamítnout, protože grafy (Obrázek 5-22 a Obrázek 5-23) neukazují významnější odchylku od trendu vlhkosti a teploty při srážkách a bez nich.

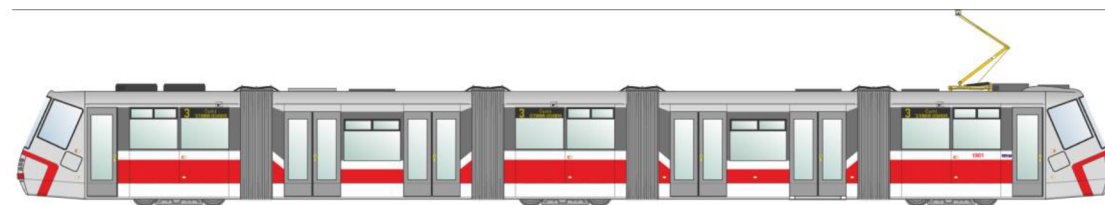
Ač se nepodařilo uspokojivě dokázat vliv srážek v globálním pohledu, v detailním sledování lze pozorovat závislost maximálních špičkových hodnot s časem a klesající vlhkostí. Tento jev se nepodařilo postihnout filtrací dlouhodobých dat pomocí časového okna (viz Obrázek 5-26), protože jak vyplývá z uvedených příkladů (viz Obrázek 5-27 a Obrázek 5-28), ke špičkovému dočasnému navýšení maximální SPL dochází při přechodu určitého pásma vlhkosti, nikoliv pouze fixního časového intervalu. Pozorování

na smyčce Technologický park ukázalo obdobnou závislost (viz Obrázek 5-29), při tomto pozorování jsem byl svědkem postupného smývání tenké vrstvy korozních povlaků, které se na kolejích vytvořily a které mohly přispívat ke zvýšení nestability kontaktu a zvýšení hladiny kvílivého hluku. Jelikož však automatizované měření není vybaveno traťovým tribometrem, nelze v budoucí aplikaci (například při optimálním dávkování modifikátorů adheze) tento efekt měřit přímo. Bylo by však teoreticky možné na základě mnoha měření stanovit optimální nastavení proměnlivého časového okna v závislosti na poklesu vlhkosti a interval skokově zvýšeného maxima aktivně predikovat.

Hypotézu H2.2 „Měření prokáže zvýšení SPL po ustání meteorologických srážek.“ lze potvrdit při pohledu na vývoj vlhkosti (resp. maxima SPL) v čase od ustání meteorologických srážek.

#### 6.1.4 Vliv konstrukce vozu

DPMB má rozsáhlý vozový park tramvajových vozů, avšak dlouhodobé měření (Brno-Komín) postihlo pouze vozy konstrukce ČKD KT8. Krátkodobé pozorování na smyčce Technologický park však ukázalo rozdílné chování při jízdě v oblouku a tento trend bylo možné vysledovat i v grafech závislosti hladiny akustického tlaku na rychlosti. (viz Obrázek 5-31) Porovnávané dvě skupiny vozů tvořily vozy Škoda 13T6 a Pragoimex VarioLF2R.E. U vozů Škoda se daleko méně projevil kvílivý hluk (Obrázek 5-43), celkové hodnoty tohoto frekvenčního pásma byly nižší než u vozu VarioLF2R.E (Obrázek 5-42). Zde ovšem je nutné odhlédnout od hodnocení pouze ve spektru kvílivého hluku, protože vozy Škoda vykazovaly podstatně vyšší hladinu hluku ve frekvenčním spektru okolku. Mechanismus kvílivého hluku vzniká typicky skokovým odtrháváním kontaktu v příčném směru, při kontaktu okolku dochází vlivem vzniku druhého kontaktního bodu (plochy) ke spojitému smýkání, tedy prokluzování kontaktu. Lze říci, že při vzniku hluku okolku v kontaktu s pojezdovou hranou kolejnice kvílivý hluk zaniká.[13] Takovouto systémovou odlišnost však lze vysvětlit hlavní odlišností konstrukce podvozků porovnávaných tramvajů. Oproti otočným podvozkům vozu VarioLF2R.E má tramvaj 13T6 všechny tři podvozky fixní [8] a natáčení je umožněno pomocí vloženého otočného dílu, jak je i patrné z obrázku 6-1.



Obrázek 6-1 Tramvaj Škoda 13T6 [34]

Lze uvažovat, že právě vyšší tuhost ohybu tramvaje 13T6 v oblouku v kombinaci s pevnými podvozky je hlavní příčinou vzniku hluku od okolku a snížení kvílivého hluku. Podobně výrazné snížení SPL v pásmu kvílivého hluku zaznamenaly i některé další výzkumy.[15] I tento důvod (společně s důvodem po studiu odlišností složení hluku v závislosti na teplotě) je podnětem pro budoucí komplexní posouzení nejen hluku kvílivého ale i s ním souvisejícího hluku od okolku.

Hypotézu H3.1 „*Měření prokáže rozdílné dlouhodobé průměry hlukových parametrů různých konstrukcí vozů.*“ lze plně potvrdit. Z rešerše vyplývá, že dalším typem nízkopodlažního vozu s fixními podvozky je tramvaj Anitra[36], v dalším měření by bylo tedy možné hypotézu zobecnit na oba typy vozu s pevnými podvozky.

Zajímavým parametrem, který však nemohl být posouzen pro nízkou různorodost dat z obou měření, by mohlo být porovnání typů vozů třízených do skupin podle rozvoru náprav.

### 6.1.5 Rozdíly mezi vozy

Ukazuje se, že i když je užší výběr datové populace tvořen pouze jedinou konstrukční variantou tramvaje, výsledky hlukového chování se různí. Konstrukční modifikací, která se však u vozů KT8D5R.N2 vyskytuje, je použití obručových pryží odpružených kol. Základní kola dle ČKD začala být systematicky vyměňována za tzv. „rezilientní“ kola od výrobce Bonatrans, která mají snížit hluk způsobený valením, ale i jízdou v oblouku. Z deseti nejčastějších vozů byla však tímto typem osazena pouze jedna jednotka (1738). Je tedy sporné stavět výroky na chování jediného vozu, nicméně tento vůz měl v testovaném rozmezí parametrů nejnižší poměr jízd s kvílivým hlukem (viz Tabulka 5-8 Porovnání vozů KT8D5R.N2). Použití odpružených kol však evidentně samostatně neřeší problém kvílivého hluku, jak lze usuzovat i z toho, že terénní experimenty dvou různých týmů (G. Squicciardini [20] a Y. Zhao [21]) probíhají za použití právě tohoto typu kol.

Lze vyzorovat rozdíly v hlukových parametrech i pro devět zbývajících konstrukčně totožných tramvají, nejvýznamnější rozdíly souvisí s dobou trvání hlukové události (viz Obrázek 5-33), zdanlivě nejsou rozdíly patrné v grafech průměrů střední, resp. maximální hodnoty SPL (viz Obrázek 5-34 a Obrázek 5-35), avšak to může být způsobeno rozdílným chováním vozu v různých pásmech teploty, resp. vlhkosti (viz Obrázek 5-36 a Obrázek 5-37). Nejnápadnější jsou rozdíly mezi vozy v procentech výskytu kvílivého hluku (viz Obrázek 5-38 a Obrázek 5-39).

Hypotézu H3.2 „*Měření prokáže rozdílné dlouhodobé průměry hlukových parametrů téže konstrukce.*“ sice na základě naměřených dat lze potvrdit, nicméně jsou zde ještě dva potenciálně významné parametry: rychlost vozu a interval velké servisní prohlídky.



Rychlosti se bude věnovat následující oddíl. Při pohledu do tabulky lze vidět, že vozy staršího data velké servisní prohlídky mají vyšší procento výskytu kvílivého hluku. Jelikož je však rozdíl jen v řádu jednotek procent, nelze tomuto trendu přisuzovat velkou váhu. Přínosné by mohlo být v budoucí studii sledovat u daného vozu nájezd kilometrů a s ním i změnu hlukových parametrů.

### 6.1.6 Vliv rychlosti

Z rešerše vyvstal rozkol mezi výsledky krátkého experimentu, který vedl Y. Zhao [21] a dlouhodobého stockholmského měření, které vedl P. Torsterson.[24] Zhao na základě kontrolovaného experimentu stanovil závislost rychlosti na kvílivém hluku, avšak Torsterson na dlouhodobých datech tuto závislost neprokázal. Výsledky z krátkodobého měření na smyčce Technologický park (Obrázek 5-42 a Obrázek 5-43) sice vykazují podobný trend jako výsledky, kterých dosáhl Y. Zhao (Obrázek 2-10), dokonce i data na vlhkých kolejnicích (Obrázek 5-30) se podobají vysoké hodnotě kvílení pro aplikaci vody studie, kterou publikoval Y. Zhao. Celkově však lze říct, že trend je spíše slabý, nelze hovořit o silné závislosti. To může být také důvod, proč Torsterson při dlouhodobém měření tuto závislost neodhalil.

Hypotézu H4 „Při vyšších rychlostech bude narůstat SPL ve frekvenčním pásmu kvílivého hluku.“ ze současných dat měření nelze potvrdit, ale ani vyvrátit.

Závislost na rychlosti se nepodařilo nalézt ani při dlouhodobém (rok a půl) měření ve stockholmském metru [24], ale hypotéza je založena na předpokladu excitace vyšší kinetickou energií v kontaktu. Možným vysvětlením by mohl být široký rozptyl jízdní dynamiky v oblouku. I při pozorování na smyčce Technologický park se subjektivně jeví plynulejší průjezdy jako tišší s méně výrazným kvílením. Zdá se tedy, že schopnosti řidiče hrají významnou roli v chování vozu v oblouku. Z metod posouzení je sice možné zavést kategorickou proměnnou řidiče vozu, ovšem i při zachování anonymity zde vyvstává etický problém. Vhodnější metodou tedy může být palubní monitorování trakčních jednotek, případně měření zrychlení při pohybu v oblouku namísto pouhé rychlosti.

Je také důležité přiznat, metodologickou slabinu měření rychlosti osobně. Řidiči tramvají si uvědomovali, že je jejich jízda měřena a podle toho upravili (byť pouze podvědomě) charakter jízdy. Pro širší spektrum dat je vhodné dokončit připojení rychlostního radaru k modulu dlouhodobého měření VUT. Radar v době řešení práce nebyl připojen kvůli řešení problému s kompatibilitou hardwaru.

## 6.2 Analýza měření

Modul VUT pro měření hlukových událostí sám o sobě fungoval spolehlivě a byl robustním zdrojem dlouhodobých dat. Problém vzniká tím, že měřicí řetězec není fyzicky spojen. Spouštěcí data pro časové okno pochází z modulu výhybky, který může pracovat s rozdílným vnitřním časem, než modul VUT. Tento problém řešila původní koncepce hlukového modulu v rámci DP V. Navrátila (NAVRÁTIL), která používala indukčních senzorů projíždějících náprav. Dvojice těchto senzorů by byla i schopná podle počtu průjezdů náprav určit typ vozu a jeho rychlost podobně jako komerční systém Acramos, který využil T. Maly.[23] Výhodou nynější koncepce však je neinvazivní montáž, která nezasahuje do kolejového svršku či průjezdného průřezu.

Další problém způsobila dlouhá vzdálenost výhybky od měřeného oblouku, do měření vstupovala významná nejistota v podobě neměřeného úseku, kterému odpovídala doba latence (30 s) časového okna. Tento problém by měl vyřešit přesun měření na smyčku Technologický park, kde je výhybka umístěna hned za vyústění oblouku. Dalšími výhodami této smyčky jsou větší poloměr křivosti a vyšší dovolená rychlost v oblouku, od toho si lze slibovat vyšší variabilitu dat a lepší možnost vysledovat slabší závislosti.

Na tomto místě je také třeba zmínit, že současný systém měření není schopen zaznamenat vliv dalších kontaminantů vstupujících do kontaktu. Významně mohou kontakt tribologicky ovlivňovat plastická maziva z předřazeného mazníku, mazání a pískování samotného vozu, přítomnost mokrého listí, nebo třeba krystalizace posypové soli na povrchu kolejí. Před začátkem smyčky Technologický park se nachází mazník, který dodával plastické mazivo po celou dobu pozorování. Pro dlouhodobé sledování by bylo vhodné sledovat a zaznamenávat jeho aktivitu, případně měnit cíleně nastavení pro vyhledání optimálního dávkování.

I když je stacionární systém dlouhodobě vyvíjen v rámci projektů ÚK ve spolupráci s DPMB, stockholmská studie P. Torstersona ukazuje, že je výhodné použít systém palubního měření. Mikrofony umístěné v těsné blízkosti mohou mít citlivost snímání nastavenou pro optimální potlačení městského hluku z pozadí, který ovlivnil dlouhodobé stacionární měření na smyčce v Brně-Komíně (takto zkeslená data musela být vymazána). Další výhodou je bezesporu hypotetická možnost přímo odečítat data z ovládání trakčních jednotek pro prověření hypotézy o vlivu zrychlení na vybudění kvílivého hluku. V neposlední řadě tak vzniká pojízdná měřicí stanice, která při stejné kalibraci může kvalitativně porovnat všechny traťové oblouky na dané tramvajové lince. Takto mohou být snadno vytipována nová problematická místa, ale zároveň může být porovnána účinnost aplikovaných opatření proti vzniku a šíření kvílivého hluku.

## 7 ZÁVĚR

Závěrem lze konstatovat, že analýza potvrdila vliv různých konstrukcí vozu na mechanismus vzniku kvílivého hluku. Rovněž se podařilo rozpoznat slabé odlišnosti v chování tramvajových vozů stejné konstrukce při srovnatelných podmínkách. Vliv osazení tramvaje odpruženými koly Bonatrans se projevil pouze částečným snížením procentního výskytu hluku.

Vliv rychlosti se nepodařilo uspokojivě prokázat. Bude potřeba provést dlouhodobé měření s rychlostním radarem pro posouzení významnosti tohoto parametru pro terénní data, která jsou, na rozdíl od prováděných zahraničních experimentů [21], podstatně méně přehledná a mají výrazně deterministický charakter.

Vliv deště se podařilo prokázat v kombinaci se sledováním hladiny akustického tlaku (a vlhkosti) v čase. Byl pozorován náhlý vzrůst maximální hodnoty SPL v závislosti na poklesu vlhkosti při vysychání kolejí. Ustání kvílivého hluku při dešti se výrazně neprojeví, ale lze si to pravděpodobně vysvětlit malým poloměrem měřeného oblouku.

Teplota a vlhkost samostatně mají spíše slabou závislost, jejich projevy jsou významnější, jsou-li posuzovány společně. Byla nalezena oblast nižšího výskytu kvílivého hluku, pro relativní vlhkosti od 90 % do 100 % v okolí teploty 15 °C.

Byla vytipovaná nová lokalita pro instalaci modulu pro dlouhodobé měření. Pro tuto lokalitu byl kalibrován a nastaven rychlostní radar, který doplní stávající měřicí modul. Byla provedena série pozorování v této lokaci, která mohou být po přesunu modulu použita jako referenční pro danou tramvajovou smyčku.

Již stávající naměřená data mohou být předána DPMB za účelem cílenějšího řešení problému kvílivého hluku pomocí vhodného dávkování modifikátoru adheze, volby správné soupravy, osazení odpruženými koly, případně snížením rychlostního limitu daného traťového oblouku. Zařazením či optimalizací některého z vyjmenovaných opatření vycházejících z výsledků této práce může dojít k snížení kvílivého hluku a dílčímu zvýšení životní úrovně v problematických lokalitách Brna.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] THOMPSON, David. Curve Squeal Noise. *Railway Noise and Vibration* [online]. 2009, 315–342 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-045147-3.00009-8
- [2] VÝROČNÍ ZPRÁVA-DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA BRNA, A. S. nedatováno.
- [3] NAVRÁTIL, Václav. Snižování hluku kolejových vozidel v traťových obloucích. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116591>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.
- [4] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakl. CERM, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [5] KOPŘIVA, Jan. *TECHNICKÁ DATA KT8\_VÝMĚNA A REPROFILACE OBRUČÍ\_2022-2024\_3(zakázky).xlsx*. 2024
- [6] *Kola | GHH-BONATRANS* [online]. Dostupné z: <https://www.ghh-bonatrans.com/cs/produkty-a-sluzby/kola/>
- [7] KUBÁR, Bohumil, Jiří PEJŠA, Martin JACURA a Ondřej TREŠL. Městská a příměstská kolejová doprava [online]. 2010, 352. Dostupné z: <https://search.mlp.cz/cz/titul/mestska-a-primestska-kolejova-doprava/3367002/>
- [8] *Elektra | Škoda Group* [online]. Dostupné z: <https://www.skodagroup.com/cs/produkty-a-sluzby/elektra>
- [9] SVOBODOVÁ, Anežka. Materiály a tvary kolejnic v kolejové dopravě. Online, Bakalářská práce, vedoucí Radovan Galas. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/176799>. [cit. 2024-05-24].
- [10] PLÁŠEK, Doc Ing Otto. Úvod do železničních staveb. nedatováno.
- [11] RUDD, M. J. Wheel/rail noise-Part II: Wheel squeal. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 1976, **46**(3), 381–394 [vid. 2023-03-20]. ISSN 10958568. Dostupné z: doi:10.1016/0022-460X(76)90862-2
- [12] THOMPSON, David J., G. SQUICCIARINI, B. DING a L. BAEZA. A state-of-the-art review of curve squeal noise: Phenomena, mechanisms, modelling and mitigation. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*

- [online]. 2018, **139**, 3–41 [vid. 2023-03-20]. ISSN 16122909. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-73411-8\_1
- [13] PÉRIARD, F J. *Wheel-rail noise generation: Curve squealing by trams* [online]. 1998. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ac8dc2574-e837-4c55-98fb-ca2dc2223fb0>
- [14] GALAS, Radovan, Milan OMASTA, Lu-Bing SHI, Haohao DING, Wen-Jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. The low adhesion problem: The effect of environmental conditions on adhesion in rolling-sliding contact. *Tribology International* [online]. 2020, **151**, 106521. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106521
- [15] REMINGTON, P J. WHEEL/RAIL SQUEAL AND IMPACT NOISE: WHAT DO WE KNOW? WHAT DON'T WE KNOW? WHERE DO WE GO FROM HERE? *Journal of Sound and Vibration* [online]. 1985, **116**(2), 339–353. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-460X(87)81306-8
- [16] SQUICCIARINI, G, S USBERTI, D J THOMPSON, R CORRADI a A BARBERA. Curve squeal in the presence of two wheel/rail contact points. nedatováno.
- [17] OLOFSSON, Ulf a Yezhe LYU. Open System Tribology in the Wheel-Rail Contact-A Literature Review [online]. 2017 [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.1115/1.4038229
- [18] ZHU, Y., Y. LYU a U. OLOFSSON. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions. *Wear* [online]. 2015, **324–325**, 122–128 [vid. 2023-04-11]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/J.WEAR.2014.12.028
- [19] ZHU, Yi, Ulf OLOFSSON a Hua CHEN. Friction between wheel and rail: A pin-on-disc study of environmental conditions and iron oxides. *Tribology Letters* [online]. 2013, **52**(2), 327–339. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/S11249-013-0220-0
- [20] SQUICCIARINI, Giacomo, Stefano MANZONI a Politecnico DI MILANO. Experimental investigation on squeal noise in tramway sharp curves SILVARSTAR-SoIL Vibration and AuRalisation Software Tools for Application in Railways View project FRC Bridge View project [online]. 2011 [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/265972049>
- [21] ZHAO, Yue, Yuanpeng HE, Jian HAN, Xinbiao XIAO, Fengyu LIAN a Rui WANG. Measurements and Analyses of Curve Squeal Caused by Tram. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2019, **55**(10),

- 133–141 [vid. 2023-03-20]. ISSN 05776686. Dostupné z: doi:10.3901/JME.2019.10.133
- [22] *ISO 3095:2013 - Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles* [online]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/55726.html>
- [23] MALY, Thomas, Florian BIEBL a Michael OSTERMANN. *The Effects of Weather Conditions and Wheel Wear on Curve Squeal*. 2019.
- [24] ERIKSSON, O, P T TORSTENSSON, A PIERINGER, R NILSSON, M HÖJER, M ASPLUND a A ŚWIERKOSKA. *STATISTICAL ANALYSIS OF CURVE SQUEAL BASED ON LONG-TERM ONBOARD NOISE MEASUREMENTS*. nedatováno.
- [25] 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/zavprace/detail/149710>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Martin Valena.
- [26] SQUICCIARINI, Giacomo, Stefano MANZONI a Politecnico DI MILANO. *Experimental investigation on squeal noise in tramway sharp curves SILVARSTAR-SoIL Vibration and AuRalisation Software Tools for Application in Railways View project FRC Bridge View project* [online]. 2011 [vid. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/265972049>
- [27] *IEPE Mikrofon IP55 Spritzwassergeschützt - ROGA Instruments* [online]. Dostupné z: <https://www.roga-messtechnik.de/messmikrofon-mi21/>
- [28] *B + B Thermo-Technik detektor deště 1 ks REGME24V (d x š x v) 85 x 85 x 60 mm | Conrad Electronic* [online]. Dostupné z: [https://www.conrad.cz/cs/p/b-b-thermo-technik-detektor-deste-1-ks-regme24v-d-x-s-x-v-85-x-85-x-60-mm-2355010.html?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw0ruyBhDuARIsANSZ3wrAdNoS8AkdWcmGSamFHWOGGEDfDnkkWEy8ofSZylrnLCx4zUZvU5UaAhDmEALw\\_wcB](https://www.conrad.cz/cs/p/b-b-thermo-technik-detektor-deste-1-ks-regme24v-d-x-s-x-v-85-x-85-x-60-mm-2355010.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw0ruyBhDuARIsANSZ3wrAdNoS8AkdWcmGSamFHWOGGEDfDnkkWEy8ofSZylrnLCx4zUZvU5UaAhDmEALw_wcB)
- [29] *Senzor teploty a vlhkosti (venkovní) | Loxone e-shop* [online]. Dostupné z: <https://shop.loxone.com/cscz/senzor-teploty-a-vlhkosti-venkovni.html>
- [30] *Portál Jihomoravského kraje - Akční plány - Akční plány* [online]. Dostupné z: <https://www.kr-jihomoravsky.cz/Default.aspx?ID=47662&TypeID=2>
- [31] PŘÁTELÉ, Petr Špitálský &. *Pražské tramvaje. 1801-9994*. 2006. ISSN 1801-9994.

- [32] *Komin, smyčka – Mapy Google* [online]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps/place/Kom%C3%ADn,+smy%C4%8Dka/@49.2162221,16.556188,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x471296a2e9c3868b:0x7996bec06d6c7f96!8m2!3d49.2162221!4d16.556188!16s%2Fg%2F1tfc9xkj?entry=ttu>
- [33] *Technologický park – Mapy Google* [online]. Dostupné z: [https://www.google.com/maps/place/Technologick%C3%BD+park/@49.2319394,16.5742562,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x471296aaccfa61e7:0xdecfab3627ab5a18!8m2!3d49.2319359!4d16.5768311!16s%2Fg%2F1ptx7\\_8ym?entry=ttu](https://www.google.com/maps/place/Technologick%C3%BD+park/@49.2319394,16.5742562,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x471296aaccfa61e7:0xdecfab3627ab5a18!8m2!3d49.2319359!4d16.5768311!16s%2Fg%2F1ptx7_8ym?entry=ttu)
- [34] *Tramvaje - kategorie 30 m | Přehled vozů | MHD Brno* [online]. Dostupné z: <https://www.bmhd.cz/prehled-vozu/tramvaje/kategorie-30-m>
- [35] *Rok 2024 - meteorologické statistiky* [online]. Dostupné z: <http://www.meteo.jankovic.cz/zaznamy/rok-2024/>
- [36] *Plzeňské tramvaje - www.plzensketramvaje.cz - Pilsner trams - tram fans website* [online]. Dostupné z: <https://plzensketramvaje.cz/?page=astra.htm>



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN

### 9.1 Použité veličiny

$f$	frekvence (Hz)
$L$	hladina akustického tlaku (dB)
$p$	tlak (Pa)
$p_s$	hladina významnosti (1)
$R$	radius, poloměr (m)
$R_c$	korelační koeficient (1)
$T$	perioda (s)
$v$	rychlost (km/h)

### 9.2 Formát časové značky

RRRR MM DD HH:mm:ss:FFF

*rok měsíc den hodiny:minuty:sekundy:milisekundy*

DD.MM.RRRR HH:mm:ss

*den.měsíc.rok hodiny:minuty:sekundy*

HH:mm

*hodiny:minuty*

### 9.3 Použité zkratky

atd.	a tak dále
BP	bakalářská práce
ČKD	Českomoravská-Kolben-Daněk
dB	decibel
DP	diplomová práce

DPMB	Dopravní podnik města Brna
DRYING	soubor dat daného časového okna po dešti
et al.	et alii – a jiní
FSI	Fakulta Strojního inženýrství
Hz	Hertz
km/h	kilometr za hodinu
m	metr
MAIN	základní soubor dlouhodobých dat
MHD	městská hromadná doprava
mil.	milion
NO_RAIN	datový soubor bez přítomnosti deště
PCC	Presidents‘ Conference Comitee Car
RAIN	datový soubor s přítomností deště
resp.	respektive
SPL	sound pressure level – hladina akustického tlaku
TOR	top of rail – temeno kolejnice
ÚK	Ústav konstruování
VUT	Vysoké učení technické
.wav	Waveform audio file format
.xlsx	formát souborů Microsoft Excel
°C	stupeň Celsia

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 2-1 Železniční kolo .....	16
Obrázek 2-2 Obručové kolo Bonatrans [6] .....	16
Obrázek 2-3 Žlábková kolejnice .....	17
Obrázek 2-4 Rozklad rychlosti pohybem v oblouku .....	18
Obrázek 2-5 Zhu et al. – závislost součinitele adheze na teplotě a vlhkosti [18] .....	21
Obrázek 2-6 Olofsson et al. – závislost součinitele adheze na relativní vlhkosti [19] .....	22
Obrázek 2-7 Olofsson et al. – vliv vodní páry na součiniteli adheze při vzniku hematitu[19] .....	22
Obrázek 2-8 Zhu et al. – vliv kontaminantů v kontaktu na součinitel adheze [18].....	23
Obrázek 2-9 Squicciarini et al. – porovnání frekvenčního spektra pro suchý a m mokrý kontakt kola a kolejnice[20] .....	23
Obrázek 2-10 Zhao et al. – výsledky vlivu rychlosti na SPL kvílivého hluku za různých podmínek [21] .....	24
Obrázek 2-11 Maly et al. – rozložení terénních dat [22] .....	26
Obrázek 2-12 Maly et al. – závislosti kvílivého hluku na teplotě [22] .....	27
Obrázek 2-13 Maly et al. – závislosti kvílivého hluku na vlhkosti [22] .....	27
Obrázek 2-14 Maly et al. – regresní analýzy vlivu teploty a vlhkosti [22].....	28
Obrázek 2-15 Torstersson et al. – vliv poloměru oblouku na kvílivý hluk [24].....	29
Obrázek 2-16 Torstersson et al. – pravděpodobnost výskytu kvílivého hluku na základě meteorologie [24].....	30
Obrázek 4-1 Umístění hlukoměru a radaru na tramvajové smyčce Technologický park ..	36
Obrázek 4-2 Schéma měřicího řetězce – smyčka Brno-Komín .....	38
Obrázek 4-3 Letecký snímek, smyčka Brno-Komín [33] .....	38
Obrázek 4-4 K. Lounek – umístění měřicího modulu [25] .....	39
Obrázek 4-5 Letecký snímek, smyčka Technologický park [34].....	40
Obrázek 4-6 Schéma zpracování dat z dlouhodobého měření .....	42
Obrázek 5-1 Dlouhodobý graf – chyba kalibrace .....	46
Obrázek 5-2 Histogramy teploty a relativní vlhkosti – dlouhodobá data .....	47

Obrázek 5-3 Histogram délek hlukové události – dlouhodobé měření .....	48
Obrázek 5-4 Histogramy teploty a vlhkosti – dlouhodobé měření .....	49
Obrázek 5-5 Histogramy naměřené hladiny akustického tlaku – smyčka Technologický park .....	51
Obrázek 5-6 Histogram naměřených rychlostí – smyčka Technologický park .....	51
Obrázek 5-7 Korelační matice – dlouhodobé měření .....	53
Obrázek 5-8 Závislost střední SPL na vlhkosti .....	54
Obrázek 5-9 Závislost maximální SPL na vlhkosti .....	54
Obrázek 5-10 Závislost střední SPL na vlhkosti a době trvání .....	55
Obrázek 5-11 Závislost maximální SPL na vlhkosti a době trvání .....	55
Obrázek 5-12 Střední hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – měřeno .....	57
Obrázek 5-13 Střední hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – průměrováno ....	57
Obrázek 5-14 Maximální hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – měřeno .....	58
Obrázek 5-15 Maximální hodnota SPL v meteorologických souřadnicích – průměrováno	58
Obrázek 5-16 Doba trvání v meteorologických souřadnicích – měřeno .....	59
Obrázek 5-17 Doba trvání v meteorologických souřadnicích – průměrováno .....	59
Obrázek 5-18 Pravděpodobnost výskytu kvílivého hluku.....	60
Obrázek 5-19 Pravděpodobnost výskytu kvílivého hluku – detail .....	60
Obrázek 5-20 Závislost maximální SPL na vlhkosti .....	61
Obrázek 5-21 Závislost střední SPL na teplotě .....	61
Obrázek 5-22 Porovnání střední SPL pro data s deštěm a bez deště .....	62
Obrázek 5-23 Porovnání maximální SPL pro data s deštěm a bez deště.....	63
Obrázek 5-24 Porovnání pravděpodobnosti výskytu kvílivého hluku za sucha, resp. přítomnosti deště.....	63
Obrázek 5-25 Porovnání střední SPL pro data bez deště a s vysycháním .....	64
Obrázek 5-26 Porovnání maximální SPL pro data bez deště a s vysycháním.....	65
Obrázek 5-27 Vysychání v čase – klesající vlhkost .....	66
Obrázek 5-28 Vysychání v čase – stoupající vlhkost .....	66
Obrázek 5-29 Vysychání v čase – smyčka Technologický park .....	67

Obrázek 5-30 Vliv rychlosti při vysychání – smyčka Technologický park.....	67
Obrázek 5-31 Porovnání vozů – smyčka Technologický park .....	68
Obrázek 5-32 Porovnání vozů KT8D5R.N2.....	70
Obrázek 5-33 Porovnání vozů KT8D5R.N2 – doba trvání hlukové události .....	70
Obrázek 5-34 Porovnání vozů KT8D5R.N2 – střední SPL .....	71
Obrázek 5-35 Porovnání vozů KT8D5R.N2 – maximální SPL.....	71
Obrázek 5-36 Průměrovaná diskrétní data pro 5 tramvají – teplotní pásma.....	72
Obrázek 5-37 Průměrovaná diskrétní data pro 5 tramvají – pásma vlhkosti .....	72
Obrázek 5-38 Průměrovaná data pro 5 tramvají – pravděpodobnost vzniku kvílivého hluku – teplotní pásma.....	73
Obrázek 5-39 Průměrovaná data pro 5 tramvají – pravděpodobnost vzniku kvílivého hluku – pásma vlhkosti .....	74
Obrázek 5-40 Pravděpodobnost hluku v meteorologických souřadnicích pro vůz 1738...	75
Obrázek 5-41 Pravděpodobnost hluku v meteorologických souřadnicích pro vůz 1737...	75
Obrázek 5-42 Závislost hluku na rychlosti – vozy VarioLF2R.E .....	76
Obrázek 5-43 Závislost hluku na rychlosti – vozy 13T6 .....	76
Obrázek 6-1 Tramvaj Škoda 13T6, Jan Kopřiva [35] .....	80

## 11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 5-1 Extrémní hodnoty teploty a relativní vlhkosti – dlouhodobé měření.....	47
Tabulka 5-2 Počet výskytů meteorologických srážek – dlouhodobé měření .....	47
Tabulka 5-3 Zastoupení dat s kvilivým hlukem – dlouhodobé měření .....	48
Tabulka 5-4 Nejčastější tramvajové vozy – dlouhodobé měření .....	49
Tabulka 5-5 Seznam dílčích měření – smyčka Technologický park .....	50
Tabulka 5-6 Naměřené tramvajové vozy – smyčka Technologický park.....	52
Tabulka 5-7 Poměr hlukových událostí dle meteorologických srážek.....	64
Tabulka 5-8 Porovnání vozů KT8D5R.N2 .....	69

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

EXPORT\_DATA.xlsx

MĚŘENÍ\_TECHNOLOGICKÝ PARK.xlsx

TECHNICKÁ DATA KT8\_VÝMĚNA A REPROFILACE OBRUČÍ\_2022-2024\_3.xlsx

TRAM\_1737.xlsx

TRAM\_1738.xlsx

DESTOVE\_OKNO.mlx

RAIN\_DATE\_CHOOSER\_ENHANCED.mlx

SALINA\_MEANLISER.mlx

SALINA\_PROCESSOR.mlx

SANALYZER\_CHOSEN.mlx

temprange.mlx

TEMPRANGE\_FIXED.mlx

TEMPRANGE\_SALINA.mlx

TRAM\_GROUP\_CHOOSER.mlx

VYSYCHÁNÍ – složka grafů pro vysychání kolejí

TOP 10 – složka grafů pro 10 nejčastějších tramvají