



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## EMISE PEVNÝCH ČÁSTIC Z KOLEJOVÉ DOPRAVY

PARTICLE EMISSIONS FROM RAILWAY TRANSPORT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Vilém Šperlich**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Radovan Galas, Ph.D.**

**BRNO 2025**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Vilém Šperlich</b>
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Radovan Galas, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2024/25

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:

## Emise pevných částic z kolejové dopravy

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kolejová doprava je obecně považována za ekologicky šetrný způsob přepravy. Jedním z aktuálně diskutovaných rizik v městské kolejové dopravě je však šíření pevných částic do ovzduší, které mohou negativně ovlivňovat lidské zdraví. Tyto částice se uvolňují zejména v důsledku opotřebení kontaktních ploch nebo jako vedlejší produkt pískovacího procesu. Kvantifikace tohoto problému by mohla vést k vývoji materiálů s vyšší odolností vůči otěru a k optimalizaci pískovacího procesu a dalších metod friction managementu.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je zmapovat podmínky, za kterých dochází k nadměrnému uvolňování pevných částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí.

Dílčí cíle diplomové práce:

- provést rešerši vědeckých publikací zabývajících se emisí pevných částic,
- navrhnout metodologii experimentu pro testování na dvoudiskovém zařízení,
- realizovat experimenty simulující běžné provozní podmínky a různé metody friction managementu,
- příprava podkladů pro publikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

**Seznam doporučené literatury:**

FRUHWIRT, Daniel; STURM, Peter; NÖST, Thomas; LEONHARDT, Philip; BODE, Gina et al., 2023. PM emissions from railways – Results of tests on a wheel-rail test bench. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Roč. 122. ISSN 13619209.

OLOFSSON, Ulf; ZHU, Yi; ABBASI, Saeed; LEWIS, Roger; LEWIS, Stephen et al., 2013. Tribology of the wheel–rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion. Vehicle System Dynamics. Roč. 51, č. 7, s. 1091-1120. ISSN 0042-3114.

LEE, HyunWook; NAMGUNG, Hyeong-Gyu a KWON, Soon-Bark, 2018. Effect of train velocity on the amount of airborne wear particles generated from wheel–rail contacts. Wear. Roč. 414-415, s. 296-302. ISSN 00431648

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Vystavení zvýšené koncentraci poléťavých pevných částic, vznikajících v kontaktu mezi kolem a kolejnicí představuje závažné zdravotní riziko, spojované s řadou respiračních a kardiovaskulárních onemocnění. Tato práce je zaměřena na experimentální testování emise částic při použití různých produktů pro řízení tření. Měření probíhalo na dvoudiskovém zařízení, které umožňuje simulaci skluzně-valivého kontaktu za řízených podmínek. Porovnávány byly účinky produktů pro mazání temene kolejnice (TOR) a procesu pískování. Při testování TOR produktů bylo dosaženo snížení emise částic až o 67,8 %, což potvrzuje jejich potenciál pro zmírnění environmentálních i zdravotních dopadů železničního provozu. Oproti tomu aplikace písku vedla k výraznému nárůstu emisí. Součástí práce je rovněž návrh metodiky pro hodnocení TOR produktů z hlediska jejich schopnosti redukovat emisi částic.

## KLÍČOVÁ SLOVA

emise částic, kontakt kolo-kolejnice, návrh metodiky, opotřebení, Top-of-Rail, pískování

## ABSTRACT

Exposure to elevated concentrations of airborne particles generated at the wheel–rail contact poses a significant risk for the development of respiratory and cardiovascular diseases. This thesis presents an experimental investigation of particle emissions associated with the use of Top-of-Rail (TOR) products and sanding processes. A twin-disc testing rig was used to simulate the rolling–sliding contact under controlled conditions. The application of TOR products resulted in a reduction in particle emissions of up to 67.8%, confirming their potential to reduce the environmental and health impacts of railway transportation. In contrast, the application of sand caused a sharp increase in emissions. A novel methodology for comparing TOR products in terms of their emission-reduction performance is proposed.

## KEYWORDS

particle emissions, wheel-rail contact, methodology, wear, Top-of-Rail, sanding



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠPERLICH, Vilém. *Emise pevných částic z kolejové dopravy*. Diplomová práce. Radovan GALAS (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu této práce, doc. Radovanu Galasovi, za jeho vstřícný přístup a cenné rady, které mi poskytl při jejím řešení. Poděkování patří také mé rodině a přátelům za jejich podporu během celého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Radovana Galase, 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>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Kontakt mezi kolem a kolejnicí	14
2.2	Opotřebení	16
2.3	Produkty pro řízení tření	19
2.4	Pevné částice	21
2.5	Emise částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí	23
2.6	Metodologie měření emise částic	27
2.7	Souhrn hlavních zjištění	28
2.8	Mezera v poznání	30
<b>3</b>	<b>CÍL PRÁCE</b>	<b>31</b>
3.1	Výzkumné otázky	31
3.2	Cíl práce	31
3.3	Hypotézy	32
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>33</b>
4.1	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	33
4.2	Metodika	36
4.3	Materiál	39
4.4	Testované predikce	41
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>43</b>
5.1	Úpravy zařízení	43
5.2	Ladění metodiky	45
5.3	Suchý kontakt	49
5.4	Vliv aplikace produktů na emisi částic	52
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>64</b>
6.1	Vývojová část	64
6.2	Výzkumná část	67

<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>81</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>83</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>86</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>87</b>

# 1 ÚVOD

Poletavý prach je jednou z nejvýznamnějších znečišťujících látek v městském prostředí. Jemné a ultrajemné částice, které pronikají hluboko do dýchacích cest, jsou spojovány s řadou negativních dopadů na lidské zdraví, od zánětlivých reakcí, přes respirační potíže až po kardiovaskulární onemocnění. V současnosti je pozornost soustředěna především na emise z dopravy, zejména částice obsažené ve výfukových plynech automobilů se spalovacími motory a částice opotřebením brzdového obložení. Jedním z potenciálních zdrojů poletavých částic je však i kolejová doprava, která je často vnímaná jako ekologičtější.

Tramvaje a metro představují v českých metropolích klíčový prvek veřejné dopravy. Jen pražské metro denně přepraví téměř milion cestujících [1], brněnská tramvajová doprava obsluhuje statisíce obyvatel [2]. Tento druh dopravy však generuje velké množství poletavého prachu, a to zejména v hustě obydlených centrech měst a tunelech metra. Studie [3] dokázaly, že částice obsažené v ovzduší metra mohou být několikanásobně toxičtější než částice z běžného uličního prostředí. Jedním ze zdrojů emise částic z kolejové dopravy je kontakt mezi kolem a kolejnici. Z tohoto kontaktu se může vlivem opotřebením uvolňovat velké množství různě velkých částic v závislosti na jeho zatížení.

Jedním z moderních nástrojů kolejové dopravy jsou produkty pro řízení tření v kontaktu kola a kolejnice. Benefity použití těchto produktů jsou různé – některé zajišťují dostatečnou trakci v kontaktu pro účely rozjezdu či náhlého brždění, jiné snižují riziko vykolejení a zvyšují komfort cestujících, velká část produktů se však aplikuje především za účelem snížení opotřebením kontaktních povrchů kol a kolejníc, čímž je dosaženo snížení provozních nákladů.

Ačkoliv jsou dnes tyto produkty v kolejové dopravě používány na denní bázi, jejich vlivu na uvolňování pevných částic z kontaktu kola a kolejnice nebyla věnována patřičná pozornost. Proto je hlavním záměrem této práce identifikovat kritické způsoby aplikace a složení produktů pro řízení tření, které mohou vést k výraznému nárůstu emise částic.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

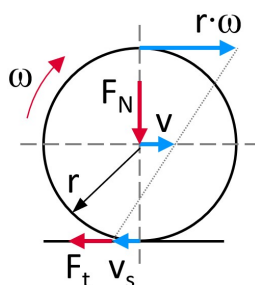
Kapitola současného stavu poznání čtenáře v krátkosti seznámí s problematikou přenosu sil v rámci kontaktu kola a kolejnice a různými způsoby opotřebení, které vzniká vlivem zatížení kontaktu. Tyto náležitosti je nutné vysvětlit, jelikož jsou úzce spjaté s problematikou uvolňování částic z kontaktu do ovzduší. V další části jsou uvedeny používané přístupy pro řízení adheze v kontaktu a jejich možný vliv na emisi částic. V závěru této kapitoly jsou zjištění shrnuta a je vymezeno bílé místo v poznání.

### 2.1 Kontakt mezi kolem a kolejnicí

Přenos silových působení pro akceleraci při rozjezdu či brždění vlakové soupravy je v kolejové dopravě realizován pomocí kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Problematika tohoto kontaktu je komplikovaná nejen pro jeho valivě-skluzovou charakteristiku, ale také kvůli skutečnosti, že se jedná o otevřený tribologický systém. Do kontaktu tak běžně vstupují třetí tělesa ovlivňující jeho třecí vlastnosti. V praxi se jedná o různé kontaminanty (ranní rosa, spadané listy, únik oleje), které mohou negativně ovlivnit hodnotu součinitele tření, nebo se jedná o látky zavedené do kontaktu záměrně za účelem řízení tření. Kontaminanty či látky pro řízení tření následně významně ovlivňují různé faktory kontaktu spojené s bezpečností, účinností a udržitelností kolejové dopravy, ale také např. komfortem cestujících a kolemjdoucích [4].

#### Tření v kontaktu mezi kolem a kolejnicí

Kontakt mezi kolem a kolejnicí je svou charakteristikou valivě-skluzový. Myšleno je tím to, že při akceleraci či udržování rychlosti vlakové soupravy dochází k rozdílu obvodové rychlosti na povrchu kola a rychlosti samotné soupravy. Tento rozdíl se projevuje skluzem v kontaktu, který je vyobrazen na schématu na Obr. 2-1, jehož hodnota se počítá podle vztahu 2.1 a udává se v procentech [5].



Obr. 2-1 – kinematika kontaktu kolo-kolejnice

$$\xi = \frac{v - \omega r}{0.5 \cdot (v + \omega r)} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Kde:

$\xi$  (%) ..... skluz

$v$  (m·s<sup>-1</sup>)..... rychlost soupravy

$\omega$  (rad·s<sup>-1</sup>)..... úhlová rychlost kola

$r$  (m)..... poloměr kola

Míra skluzu v kontaktu rovněž souvisí s velikostí třecí síly, vedoucí na akceleraci nebo udržování rychlosti soupravy. Na základě třecí a normálové síly je podle vztahu 2.2 určena hodnota součinitele adheze (CoA, *Coefficient of Adhesion*).

$$CoA = \frac{F_t}{F_N} \quad (2.2)$$

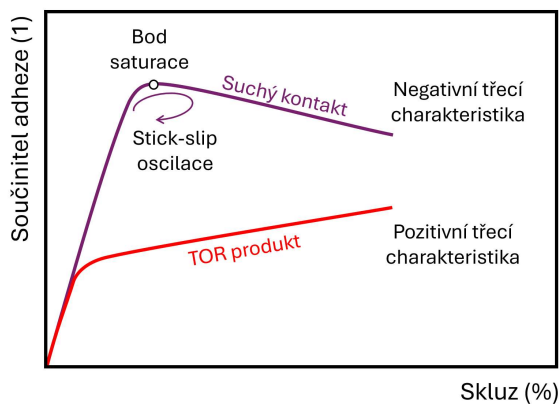
Kde:

$CoA$  (1)..... součinitel adheze

$F_t$  (N)..... třecí síla

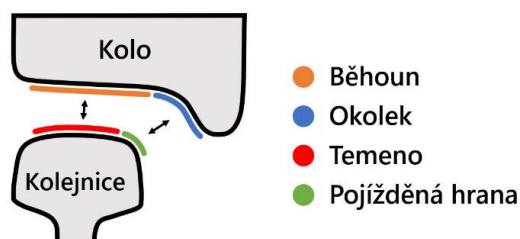
$F_N$  (N)..... normálová síla

Pro suchou kolejnici hodnota součinitele adheze s rostoucí hodnotou skluzu roste do bodu saturace. Od bodu saturace může vznikat negativní třecí charakteristika, viz Obr. 2-2, vedoucí na tzv. *stick-slip* oscilace, kdy dochází ke kolísání hodnoty součinitele adheze v kontaktu. Tento jev může vést na různé problémy, především na vznik vlnkovitého opotřebení povrchu kolejnice. Předějit vzniku negativní třecí charakteristiky je možné využitím TOR (*Top-of-Rail*, temeno kolejnice) produktů, které třecí charakteristiku upravují [6].



Obr. 2-2 – trakční křivka (upraveno) [6]

Při popisu kontaktu je nutné brát v úvahu, že při jeho provozu dochází ke kontaktu různých částí povrchu kola a kolejnice, viz Obr. 2-3. Dvěma hlavními kontaktními páry jsou kontakt mezi temenem kolejnice a běhounem kola, a kontakt oblastí pojížděné hrany kolejnice a okolku kola. Podmínky z hlediska mechanického zatížení se v těchto oblastech významně liší. Zatímco v oblasti temene kolejnice dosahuje kontaktní tlak hodnot kolem jednoho GPa, v oblasti pojížděné hrany může nabývat až 2.6 GPa [4]. Rovněž zde může docházet ke vzniku výrazně vyšších hodnot skluzu. Tyto skutečnosti jsou zásadní pro pochopení souvislosti tření a opotřebování kontaktu s uvolňováním pevných částic do ovzduší.

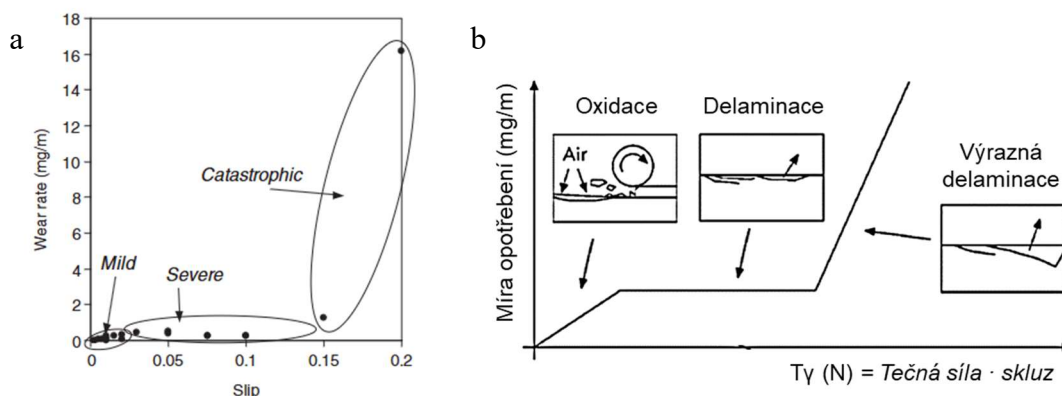


Obr. 2-3 – kontaktní oblasti rozhraní kolo-kolejnice

## 2.2 Opotřebení

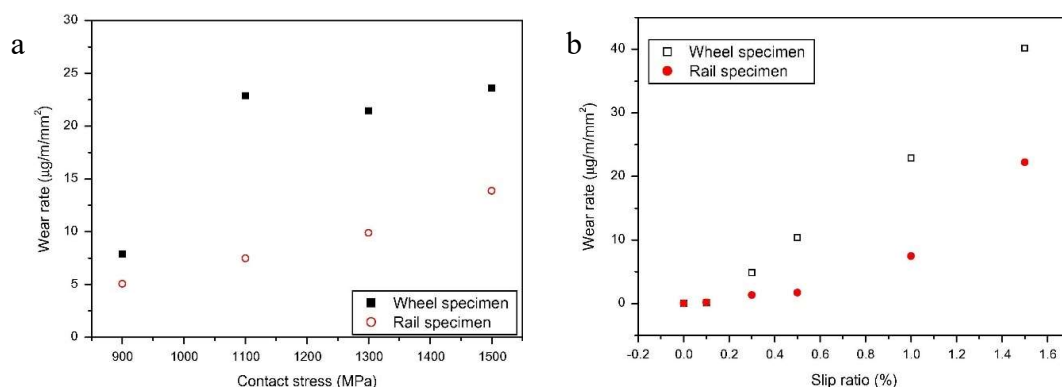
Zásadní roli v problematice emise pevných částic z kontaktu kola a kolejnice hraje opotřebení povrchů vstupujících do kontaktu. Opotřebení je definováno jako ztráta materiálu z kontaktních povrchů kola a kolejnice, přičemž se část tohoto opotřebení může uvolňovat do ovzduší v podobě pevných částic.

V provozu i v laboratorních podmínkách se opotřebení projevuje v několika podobách. Kromě materiálů kontaktní dvojice úzce souvisí také s podmínkami zatížení, tedy skluzu, kontaktním tlaku a teplotě v kontaktu. V praxi se opotřebení nejčastěji klasifikuje do tří režimů – mírné, výrazné a katastrofální opotřebení, viz Obr. 2-4 (a). Důležitou skutečností je, že při navyšování zatížení kontaktu dochází k poměrně náhlým skokům v opotřebení povrchů [5]. Dáno je tomu tím, že překročením určité hranice zatížení může dojít ke změně mechanismu opotřebení, viz Obr. 2-4 (b).



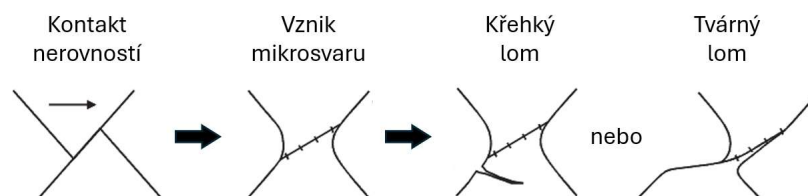
Obr. 2-4 – míra opotřebení v závislosti na skluzu (a) [7], na  $T\gamma$  (b, upraveno) [8]

Závislost výskytu různých režimů opotřebení na zatížení kontaktu dokazuje i souvislost výskytu mírného opotřebení v kontaktech temene kolejnice a běhounu kola, kde kontaktní tlak a skluz zpravidla nabývají poměrně nízkých hodnot, ve srovnání s kontaktem okolku a pojízdné hrany kolejnice, kde se častěji setkáváme s opotřebením výrazným, případně katastrofálním, která vznikají vlivem vyššího zatížení [4]. Vznik vyšší míry opotřebení za podmínek vyššího mechanického zatížení je zobrazen na Obr. 2-5.



Obr. 2-5 – míra opotřebení rostoucí s rostoucím kontaktním tlakem (a) a skluzem [9] (b)

Při nízkém zatížení kontaktu dominuje opotřebení povrchů vlivem jejich oxidace, v menší míře se může projevovat opotřebení adhezivní. Oxidativní opotřebení se projevuje oddělováním zoxidované vrstvy z kontaktních povrchů. Adhezivní opotřebení vzniká na základě mikro svarů vznikajících při kontaktu nerovností na povrchu těles. Při vzájemném pohybu povrchů následně dochází k odtržení vrcholků těchto nerovností z měkčího tělesa. Takto oddělený materiál může následně vstupovat do třecí vrstvy, kde může vést na abrazivní opotřebení. Mechanismus adhezivního opotřebení je zobrazen na Obr. 2-6.



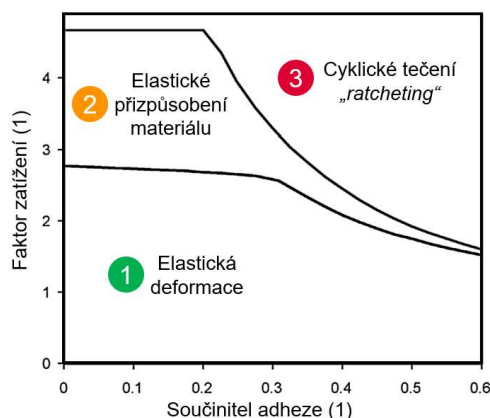
Obr. 2-6 – princip adhezivního opotřebení (upraveno) [5]

Abrazivní opotřebení vzniká buď zarýváním tvrdých nerovností jednoho z kontaktních těles do měkčího protějšího povrchu, nebo se do kontaktních povrchů zarývá tvrdé třetí těleso obsažené ve třecí vrstvě. Toto těleso může vznikat přímo v kontaktu vlivem oxidace, nebo zde může být zavedeno z vnějška, nejčastěji v podobě křemičitého písku.

V režimu výrazného opotřebenění zpravidla dominuje adhezivní opotřebenění. Adhezivní opotřebenění je za podmínek zvýšeného zatížení urychleno zvýšenou teplotou v kontaktu. Navýšení teploty vede k poklesu tvrdosti materiálu. Zvyšování teploty v kontaktu může vést až k přechodu do režimu katastrofálního opotřebenění, spojeného se vznikem trhlin, výrazné delaminaci, případně až k natavení materiálu kontaktních těles.

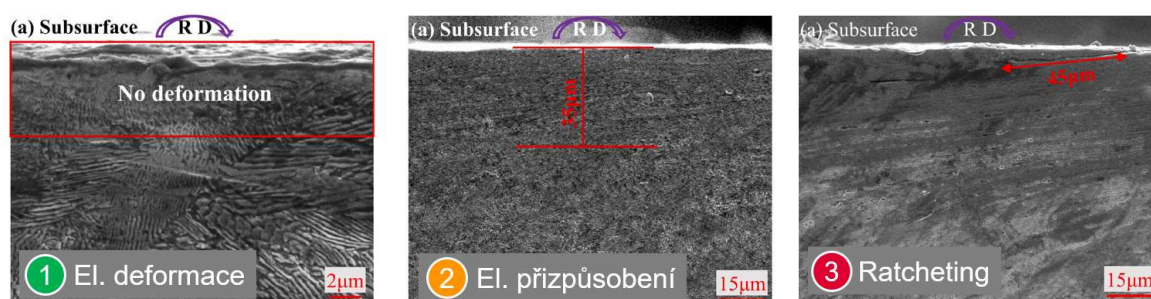
### Kontaktní únava

Vzhledem k vysokým kontaktním tlakům, často přesahujícím 1 GPa [10], a velkému množství cyklů zatížení, kterým je kontakt kola a kolejnice v provozu vystaven, je kontaktní únava tohoto rozhraní jednou z hlavních oblastí zájmu v problematice kolejové dopravy. Tento druh opotřebenění s sebou zároveň nese výrazně vyšší riziko ohrožení bezpečnosti cestujících a obsluhy vlaku, jelikož může vést na únavový lom materiálu kola či kolejnice a vykolejení vlakové soupravy [5]. Pro popis kontaktní únavy v kontaktu mezi kolem a kolejnici byla sestrojena tzv. shakedown mapa (*shakedown* – přizpůsobení materiálu), která je zobrazena níže na Obr. 2-7.



Obr. 2-7 – shakedown mapa (upraveno) [10]

Shakedown mapa je na základě zatížení kontaktu rozdělena do tří oblastí, popisujících tři různé typy vznikající deformace. Za podmínek nízkého zatížení dochází pouze k elastické deformaci a povrchovému opotřebení, pod povrchem trvalá deformace nevzniká. Za podmínek vyššího normálového zatížení, nebo vyššího součinitele adheze vzniká deformace s elastickým přizpůsobením materiálu. Zde dochází v prvních několika cyklech zatížení ke vzniku plastické deformace pod povrchem kontaktních povrchů, vedoucí na jeho deformační zpevnění. Díky tomu dochází ke zvýšení meze elasticity a nevzniká další plastická deformace. Nejkritičtější je oblast cyklického tečení materiálu, kde dochází k akumulaci plastické deformace. Právě v této oblasti může docházet ke vzniku únavových trhlin a jejich postupnému růstu [5]. Jednotlivé typy deformace pod povrchem materiálu jsou vidět na řezu vzorků simulovaného kontaktu mezi kolem a kolejnicí na Obr. 2-8 [11].



Obr. 2-8 – typy deformace vlivem kontaktní únavy (upraveno) [11]

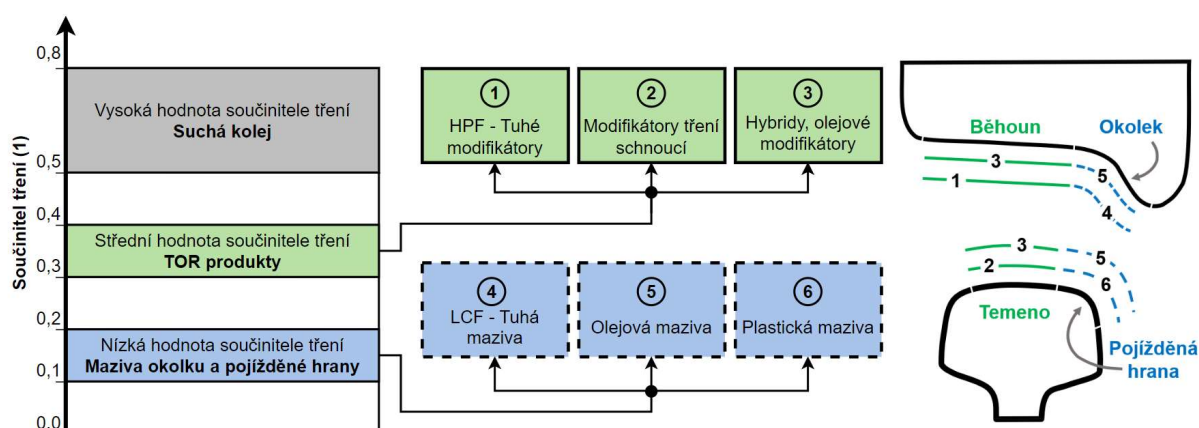
## 2.3 Produkty pro řízení tření

Za účelem dosažení několika benefitů, zejména redukce opotřebení v kontaktu kola a kolejnice, se v provozu používají produkty pro řízení tření. Z hlediska emise částic je vhodné dělit je podle jejich účelu a podle skupenství, v jakém se aplikují. Jejich dělení je shrnuto na Obr. 2-9.

Podle účelu mohou být produkty pro řízení tření klasifikovány do tří kategorií. Maziva temene kolejnice, nebo také TOR produkty, aplikované do oblasti kontaktu temene kolejnice a běhounu kola, snižují hodnotu součinitele tření z původní hodnoty suché koleje na střední hodnotu, typicky 0,3-0,4 [4]. Snižováním součinitele tření je dosaženo redukce opotřebení, eliminace stick-slip efektu, vedoucího na vlnkovité opotřebení kolejnic, ale také např. snížení celkové spotřeby vlakové soupravy. Při jejich aplikaci je však nutné dbát na vhodnou aplikaci a složení těchto produktů, aby nevznikalo riziko přemazání kontaktu a příliš nízkou hodnotu součinitele tření, která může vést na problémy s brzděním [22].

Dále jsou používána maziva okolku a pojížděné hrany kolejnice, kde je žádoucí dosahovat nižších hodnot součinitele tření, obvykle kolem 0,1 [4]. Použití těchto maziv opět vede zejména k redukci opotřebení, mj. však mohou redukovat hlukové projevy kontaktu při průjezdu traťovým obloukem [6], a snižují riziko vykoľežení vyšplháním kola po pojížděné hraně kolejnice [23].

Posledním typem produktů, které se v problematice kontaktu kolo-kolejnice používají jsou látky pro obnovení součinitele tření. Ty používáme v situacích, kdy došlo ke snížení součinitele tření v kontaktu na příliš nízkou hodnotu. Například spadané listí rozdrcené průjezdem kolejového vozidla může vytvářet na povrchu kolejnice třecí film s velmi nízkou hodnotou součinitele tření. Při brždění je nutné obnovit hodnotu součinitele tření na vyšší hodnotu [4]. Nejčastější látkou používanou pro tento účel je křemičitý písek.



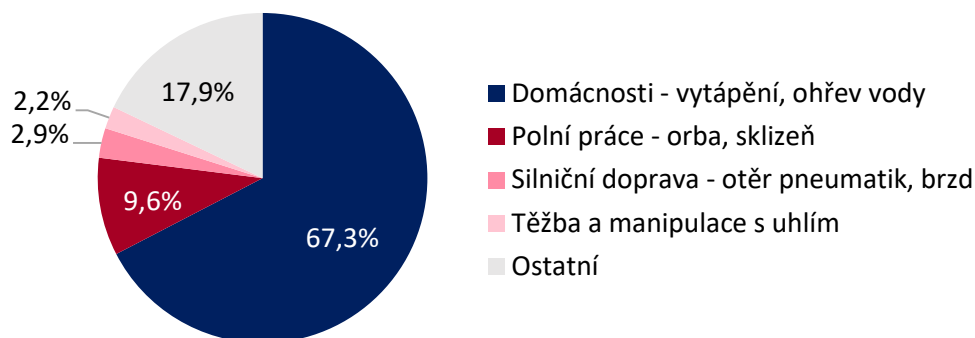
Obr. 2-9 – dělení produktů pro řízení tření

Důležité z hlediska emise částic je také skupenství aplikovaných látek. Hojně používaná jsou maziva na bázi oleje, případně plastická maziva. Na temeno kolejnice se aplikují schnoucí modifikátory tření na bázi vody a olejové modifikátory obsahující pevné částice pro modifikaci tření v kontaktu. Poněkud moderním přístupem je využití tuhých produktů, kde jsou částice pro modifikaci tření obsaženy v tuhé polymerní matrici. Ty poskytují různé benefity, např. snazší manipulaci a skladování, ale také zamezení migrace maziva mezi jednotlivými oblastmi kontaktu.

Ačkoliv je nejpoužívanější látkou pro obnovu nízké hodnoty součinitele tření křemičitý písek, existují také alternativní způsoby obnovy adheze. Tím může být aplikace aluminu (oxid hlinitý  $Al_2O_3$ ) [24], která za určitých podmínek může vést na výraznější efekt obnovy adheze [25], nebo aplikace písku v kombinaci s vodou [26], což se jeví jako potenciální způsob redukce emise částic při pískování. Z hlediska emise částic jsou právě písek a tuhé produkty pro řízení tření rizikové vůči zvýšené koncentraci částic po aplikaci, kvůli uvolňování částic rozdrceného produktu.

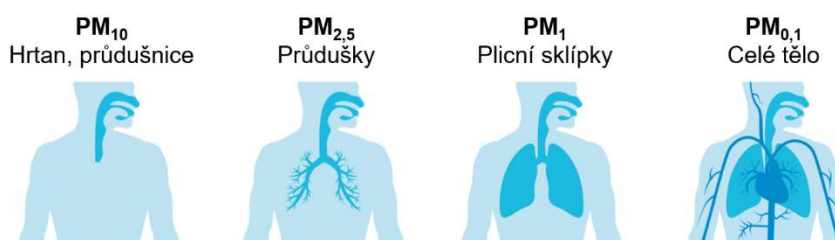
## 2.4 Pevné částice

Pevné částice, anglicky *particulate matter* – PM, jsou drobné částice rozptýlené ve vzduchu, které mohou být díky svým malým rozměrům volně unášeny větrem. Jejich zdrojem mohou být přírodní procesy, např. větrné bouře nebo požáry, ale také lidská činnost. Za jejich hlavní zdroje vlivem lidské činnosti se považují vytápění domácností, zemědělství, a silniční doprava [12]. Na Obr. 2-10 jsou zobrazeny jejich hlavní zdroje v rámci ČR. Částice mohou být problematické zejména po vdechnutí, kdy se stávají potenciálně zdraví škodlivé [13].



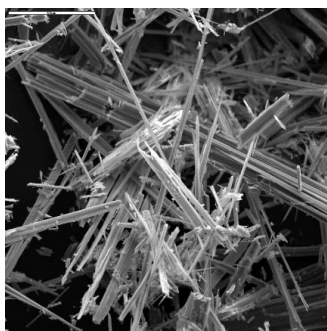
Obr. 2-10 – zdroje pevných částic v ovzduší v ČR za rok 2023 [12]

Vdechnutí pevných částic působí škody zejména na kardiovaskulárním a plicním systému. Velký vliv na škodlivost představuje jejich velikost. Částice dělíme na základě jejich velikostí na částice hrubé ( $PM_{10}$ ), jemné ( $PM_{2.5}$ ) a ultrajemné ( $PM_{0.1}$ ), jejich pronikavost je zobrazena na Obr. 2-11. Hrubé částice, s velikostí od 2,5 do 10  $\mu m$  se po vdechnutí usazují v nose, hrtanu a na průduškách. Zde mohou způsobovat např. bronchitidu. Menší částice z jemné frakce s aerodynamickým průměrem menším než 2,5  $\mu m$  pronikají hlouběji dýchací soustavou, a mohou se usazovat až v plicních sklípcích. Částice menší než 0,1  $\mu m$  z ultrajemné frakce mohou přes plicní sklípky pronikat až do krevního oběhu, čímž jsou rozšířeny po celém těle včetně mozku a srdce [14].



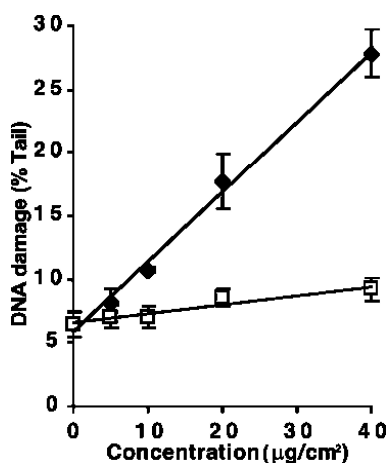
Obr. 2-11 – pronikavost částic v závislosti na velikosti (upraveno) [15]

Vliv na škodlivost mají i tvar a materiál uvolněných částic. Hranaté částice jsou obecně považovány za nebezpečnější, jelikož mají ve srovnání se zaoblenými částicemi větší povrch, který vede na vyšší chemickou reaktivitu a s ní spojeným vlivem na zdraví [14]. I z tohoto důvodu jsou menší částice považovány za škodlivější, jelikož velké množství částic ultrajemné frakce má mnohem větší povrch než menší množství částic frakce PM<sub>10</sub>. Extrémním případem škodlivosti je azbest. Částice azbestu, zobrazené pomocí elektronové mikroskopie na Obr. 2-12, nabývají jehlovitého tvaru, kvůli kterému se mohou zabodnout do tkáně plicních sklípků, kde mohou vést na rakovinné bujení [16].



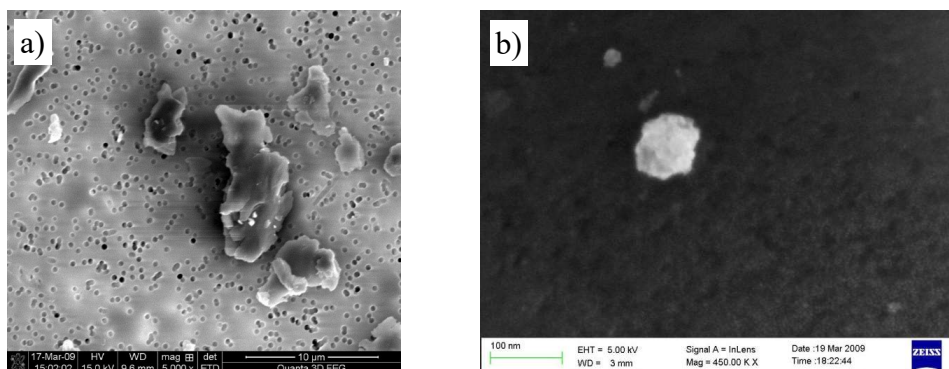
Obr. 2-12 – vlákna azbestu zobrazená pomocí SEM [16]

Částice generované kolejovou dopravou mohou kvůli zmíněným důvodům být rizikem vůči zdraví. Dokazuje to i studie [3], kde bylo zjištěno, že částice odebrané z prostředí stanice metra jsou osmkrát více genotoxické, a vedou až na čtyřnásobně vyšší riziko vzniku oxidativního stresu v plicních buňkách než částice získané na rušné ulici. Zvýšená škodlivost těchto částic, s ohledem na jejich koncentraci, vůči DNA je zobrazena na grafu na Obr. 2-13. Autor v článku diskutuje, že důvodem je pravděpodobně materiál částic. Částice z metra totiž obsahovaly násobně vyšší podíl těžkých kovů, především železa. Zároveň je ve studii zmíněno, že zatímco ve složení částic z prostředí ulice dominoval hematit Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, v metru se vyskytovaly částice železa především v podobě magnetitu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, který má vyšší oxidační kapacitu, a vede k vyšší míře uvolňování volných radikálů.



Obr. 2-13 – škodlivost pouličních částic (□) a částic z metra (◆) vůči DNA [3]

Částice vznikající opotřebením kontaktních povrchů kola a kolejnice nabývají různých tvarů a velikostí. Ve studii [17] zabývající se vlivem kontaktní teploty na opotřebení kontaktu simulovaného na zařízení v konfiguraci pin-on-disc autor uvádí, že s rostoucí skluzovou rychlostí docházelo ke vzniku většího množství kulatých částic ultrajemné frakce. Částice, viz Obr. 2-14 (b), za těchto podmínek vznikají pravděpodobně vlivem adhezivního opotřebení spojeného se zvýšenou teplotou v kontaktu. Nižší skluzové rychlosti naopak vedly na vznik větších částic, viz Obr. 2-14 (a), kde se jedná o produkt abrazivního opotřebení.

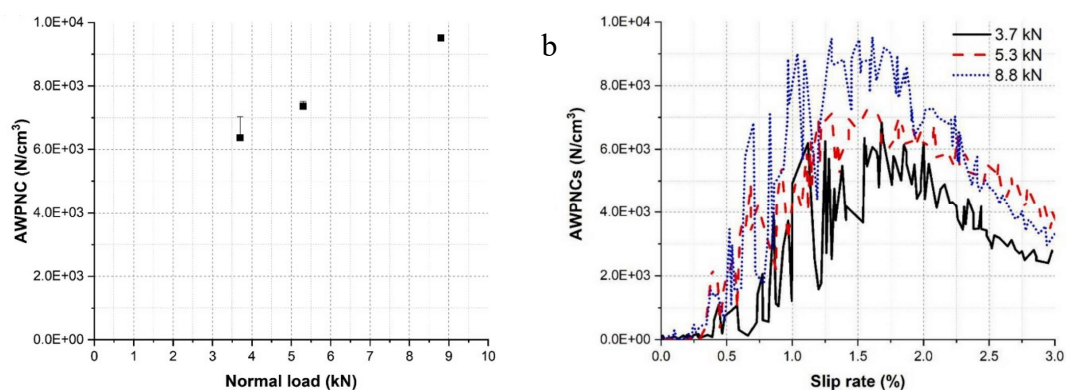


Obr. 2-14 – SEM snímky částic z frakce PM<sub>10</sub> (a) a částice z frakce PM<sub>0.1</sub> (b) [17]

## 2.5 Emise částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí

Vlivem opotřebení se při provozu kontaktu kola a kolejnice uvolňují do ovzduší částice, které mohou být po vdechnutí zdraví škodlivé [13]. Obzvláště rizikové jsou částice z jemného a ultrajemného spektra s aerodynamickým průměrem do jednoho mikrometru. Velké riziko z hlediska emise částic představuje provoz metra, kde dochází k jejich hromadění, a vdechnutí částic je vystaven velký počet lidí [13].

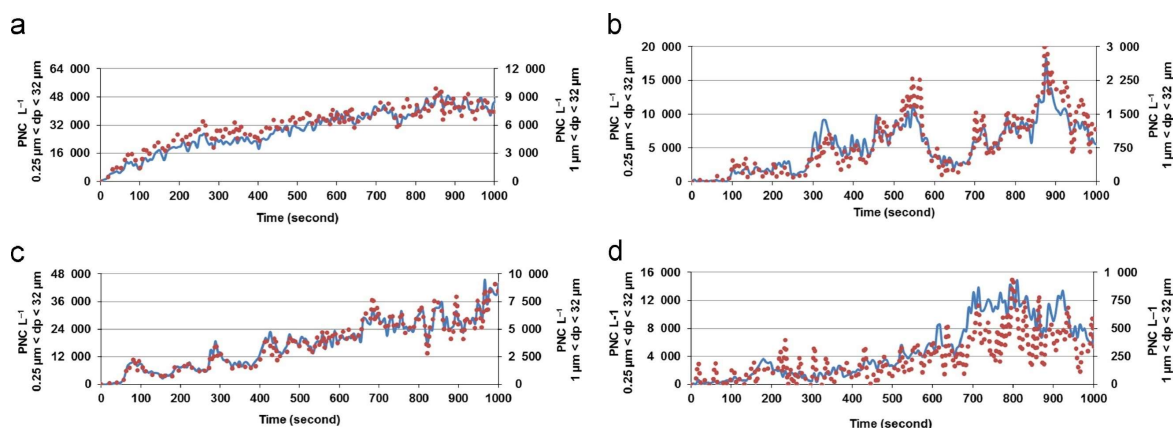
Největším faktorem, který ovlivňuje množství uvolňovaných částic z kontaktu kola a kolejnice je zatížení kontaktu [18]. Vlivu normálové síly a velikosti skluzu v kontaktu simulovaném na dvoudiskovém zařízení se ve studii [19] věnoval Lee. Z jeho experimentů plyne, že s rostoucí hodnotou normálové síly množství uvolňovaných částic rostlo. Na Obr. 2-15 (a) jsou zobrazeny výsledky testování emise částic v závislosti na zatížení normálovou silou vedoucí na kontaktní tlaky o velikosti 751, 847 a 1 003 MPa. Dále byla testována závislost emise částic na hodnotě skluzu v rozsahu 0-3 %. Zajímavým zjištěním bylo, že s rostoucí hodnotou skluzu nejprve rostlo i množství uvolňovaných částic do skluzu o hodnotě 1,5 %, přičemž při dalším navyšování hodnoty skluzu docházelo k postupnému poklesu emise částic, viz Obr. 2-15 (b). Zde autor udává, že okolo této hodnoty dochází k přechodu kontaktu ze stavu valivě-skluzového do čistého skluzu. Zajímavým zjištěním je i nejběžnější velikost částice s průměrem 0,16  $\mu\text{m}$ . Tato špička se objevila u všech zkoumaných parametrů zatížení.



Obr. 2-15 – závislost emise částic na normálovém zatížení (a) a skluzu (b) (částice 0,3 – 10  $\mu\text{m}$ ) [19]

Testování různých rychlostí, nápravového zatížení a rádiusu traťového oblouku se věnovala studie [20] využívající simulátoru s nápravou a koly reálného měřítka. Ze studie vyplývá, že zvýšením nápravového zatížení docházelo ke zvýšení emise částic, a to zejména v traťových obloucích. Právě rádius traťových oblouků měl na množství uvolňovaných částic dominantní vliv, přičemž nejvyšší hodnoty emise částic  $\text{PM}_{10}$  bylo dosaženo při kombinaci nejvyššího zatížení a nejmenšího poloměru traťového oblouku. V traťových obloucích s malými rádiusy dochází ke vzniku vyšší hodnoty skluzu. Data z této studie jsou tedy v souladu s testy provedenými na simulátorech kontaktu ve zmenšeném měřítku, kde vyšší hodnoty skluzu zpravidla také vedou na vyšší hodnoty emise částic. Tyto výsledky potvrzuje i polní studie [21], kde bylo zjištěno, že dominantní vliv na emisi částic z kontaktu kola a kolejnice mají především průjezd traťovými oblouky a akcelerace.

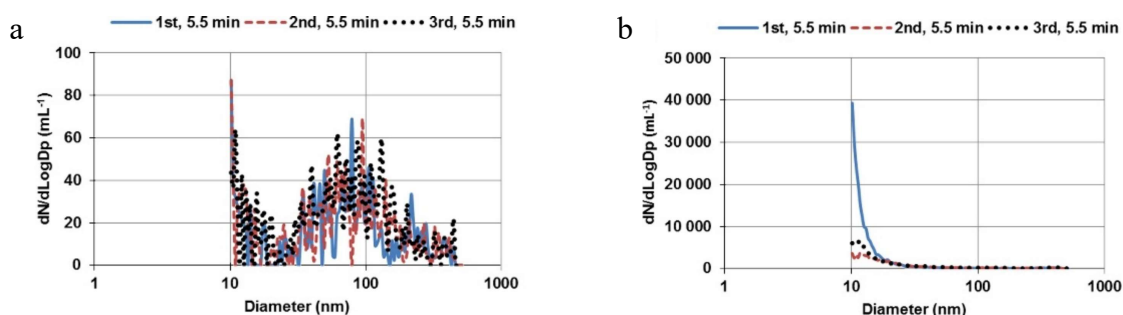
Vlivu aplikace produktů pro řízení tření v kontaktu kola a kolejnice se věnoval Abbasi. Ve studii [27] byl kontakt simulován pomocí zařízení v konfiguraci pin-on-disk v uzavřené komoře. Komořou byl pomocí ventilátoru s filtrem hnán čistý vzduch, na výstupu z komory byla pozorována koncentrace částic. Ve studii byl sledován vliv schnoucího a neschnoucího modifikátoru (tedy modifikátoru na bázi vody, resp. oleje), a plastického maziva na emisi částic z kontaktu. Aplikace těchto produktů byla srovnávána vůči stavu suchého kontaktu.



Obr. 2-16 – množství uvolněných částic při simulaci provozu (a) suchého kontaktu, nebo aplikaci (b) neschnoucího TOR produktu, (c) schnoucího TOR produktu, (d) plastického maziva okolku [27]

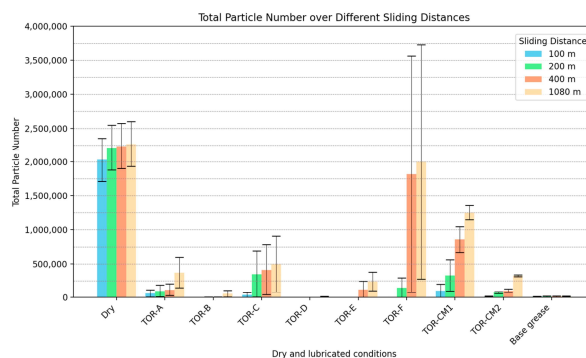
Z grafů na Obr. 2-16 je zřejmé, že vhodnou aplikací produktů pro řízení tření v kontaktu kola a kolejnice je možné dosáhnout výrazné redukce emise částic. Autor uvádí redukci množství uvolněných částic velikostí 0,25-32  $\mu\text{m}$  o více než 70 % při aplikaci neschnoucího modifikátoru, snížení množství částic o 30 % užitím schnoucího modifikátoru a redukci o 85 % při aplikaci plastického maziva. Těto redukce je dosaženo přechodem do režimu mezního mazání a skutečností, že částice mohou být zachyceny v kapalinovém filmu, a nedochází tak k jejich uvolnění do ovzduší.

Problematická situace nastala při aplikaci schnoucího produktu, kdy došlo k výraznému nárůstu emise částic z ultrajemného spektra s velikostí 10 nm, jak je vidět na grafu viz Obr. 2-17. Autor argumentuje, že se pravděpodobně jedná o částice vodní páry vznikající vlivem výrazného zahřívání kontaktu a odpařování vodního základu modifikátoru tření. Tomu odpovídá i rozdělení velikostí naměřených částic, jelikož počet částic vodní páry zpravidla exponenciálně narůstá s jejich klesajícím rozměrem.



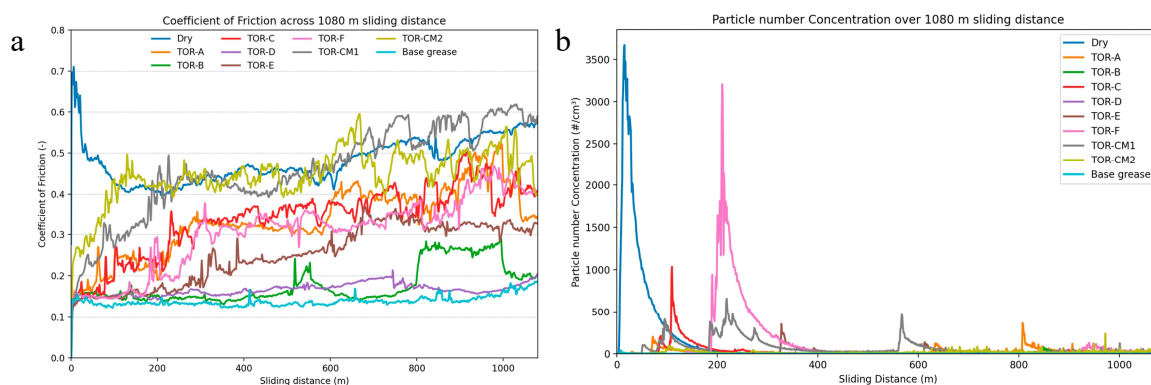
Obr. 2-17 – nárůst emise částic o velikosti 10 nm při aplikaci schnoucího produktu (b), ve srovnání se suchým kontaktem (a) [27]

Studie [28] poskytuje srovnání osmi TOR produktů z hlediska emise částic. Pro simulaci kontaktu mezi kolem a kolejnicí je zde využito zařízení pin-on-disc. Jak je patrné z grafu na Obr. 2-18, aplikace TOR produktů zpravidla vedla k redukci emise částic ve srovnání se suchým kontaktem. Autor dokonce uvádí, že při aplikaci produktů TOR-B a TOR-D na bázi oleje byly hodnoty emise částic z kontaktu zanedbatelné. Při srovnání komerčních produktů TOR-CM1 na vodní bázi a TOR-CM2 na bázi oleje bylo také dosaženo větší redukce emise částic použitím produktu TOR-CM2 na bázi oleje.



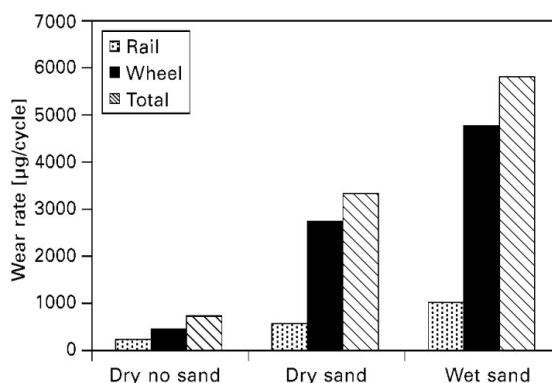
Obr. 2-18 – srovnání TOR produktů podle vlivu na emisi částic [28]

Nejzajímavější výsledky však vykazuje produkt TOR-F, jehož průběhy součinitele tření a emise částic jsou na Obr. 2-19 zobrazeny růžovou barvou. Ač použití tohoto produktu vedlo na udržování střední hodnoty tření srovnatelné s ostatními produkty, tak naměřené hodnoty emise částic byly výrazně vyšší. To naznačuje, že emise částic nemusí nutně souviset pouze se součinitelem tření. Na Obr. 2-19 (b) jsou dále vyobrazeny průběhy emise, z nichž je patrné, že v úvodní fázi testu krátce po aplikaci produktů, je emise částic nízká, po určité době nastává prudký nárůst její hodnoty, následovaný pozvolným poklesem na nízké hodnoty. Tento jev ukazuje především výraznou nestabilitu emise částic v čase.



Obr. 2-19 – (a) průběh součinitele tření, (b) průběh emise částic [28]

Přestože se proces pískování jeví jako kritický z hlediska emise částic, nebyla nalezena žádná studie, která by se touto problematikou zabývala. Při aplikaci písku totiž dochází kromě obnovy součinitele tření z příliš nízké hodnoty také k zásadnímu nárůstu opotřebení, které může následně vést na zvýšenou míru emise částic [29]. Emise částic může být dále výrazně navýšena procesem drcení částic písku v kontaktu [26].



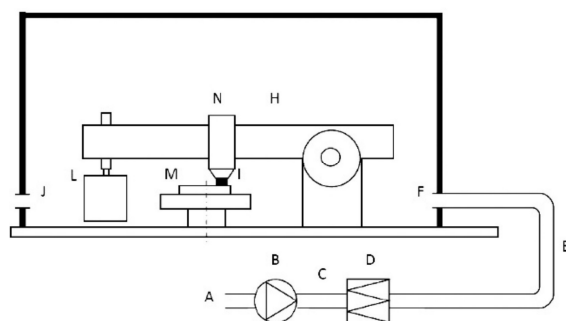
Obr. 2-20 – zvýšená míra opotřebení při aplikaci písku [29]

## 2.6 Metodologie měření emise částic

Problematika uvolňování částic z kontaktu mezi kolem a kolejničí momentálně není důkladně probádána. Zejména vlivu aplikace produktů pro řízení tření v kontaktu je věnována pouze omezená pozornost. Předchozí kapitoly však nastínilly, že se jedná o relevantní problém. Výrazně podrobněji zmapovanou oblastí je problematika emise částic z brzdových systémů, proto je vhodné si i z této oblasti vzít inspiraci z hlediska metodologie výzkumu [30].

Pro experimentální výzkum emise částic je nutné simulovat zkoumaný kontakt v kontrolovaných podmínkách a sledovat množství uvolňovaných částic z kontaktu. Ačkoliv jsou kontakt mezi kolem a kolejničí a kontakt brzdového obložení a kotouče z hlediska vzájemného pohybu kontaktních ploch odlišné, pro jejich simulaci se poměrně často používá zařízení v konfiguraci pin-on-disc [8], [31], [32], [27]. Pro účely testování kontaktu mezi kolem a kolejničí však může docházet ke zkreslení z důvodu eliminace valivé složky pohybu a cyklického zatěžování. Proto se v problematice kontaktu kolo-kolejnice používají častěji dvoudisková zařízení, která umožňují simulovat valivě-skluzný kontakt s definovanou rychlostí valení a skluzem [33].

Z nastudované literatury je zřejmé, že je nutné provádět experimenty v rámci uzavřené testovací komory [34]. Tato komora zpravidla izoluje zkoumaný kontakt od okolního prostředí. Skrze komoru je hnán vzduch pomocí ventilátoru, přičemž je tento vzduch na vstupu filtrován pro snížení rizika kontaminace a ovlivnění měřených výsledků. Díky ventilátoru vzniká v komoře přetlak, který zamezuje vniku kontaminovaného vzduchu skrze netěsnosti. V některých studiích je uplatněn kontrolní čítač částic na vstupu do komory, pro kontrolu čistoty proudícího média [27]. Příkladem může být zařízení z univerzity KTH ve Stockholmu schematicky vyobrazené na Obr. 2-21, které se objevuje v dostupných publikacích nejčastěji [5], [17], [18], [28], [31], [27], [34].



Obr. 2-21 – pin-on-disc (I) simulátor v testovací komoře, čítače částic na vstupu (F) a výstupu (J) [31]

Pro studium emise částic se používají čítače částic, které měří koncentraci částic ve vzduchu proudícím komorou. Pro sledování ultrajemných částic se nejčastěji používá počítadel zkondenzovaných částic (CPC, *Condensation Particle Counter*) nebo počítadel částic na základě elektrické mobility (FMPS, *Fast mobility Particle Sizer*) [20], [28], [35]. Tato zařízení umožňují sledovat množství částic s typickým rozsahem přibližně 10-1 000 nm. Ke sledování větších částic, nejčastěji v rozsahu 0,3-10  $\mu\text{m}$ , se zpravidla používá optických čítačů částic [13], [20], [27], které měří množství částic na základě rozptylu laserového světla částicemi v proudícím vzduchu.

## 2.7 Souhrn hlavních zjištění

Z nastudované literatury je zřejmé, že zvýšená koncentrace částic uvolňujících se z kontaktu kola a kolejnice může být rizikem pro lidské zdraví [3]. Zejména důležité jsou částice z jemného a ultrajemného spektra, které mohou pronikat hluboko do plic, případně vstupovat do krevního oběhu [14]. Proto je nutné se tímto procesem zabývat, a to zejména v případě lehké kolejové dopravy a metra, jelikož emise částic vznikajících při jejich provozu je denně vystaveno velké množství lidí.

V první části textu byl popsán vliv zatížení kontaktu na vznikající opotřebení, které s emisí částic úzce souvisí. Opotřebení probíhá vlivem několika mechanismů (oxidační, abrazivní, adhezivní, popř. kontaktní únava) a generuje různě velké množství částic různých velikostí [4]. Vlivem zahřívání kontaktu za podmínek vyšších kontaktních tlaků a většího skluzu může dojít k režimu opotřebení, kde dominuje adhezivní opotřebení. Adhezivní opotřebení se projevuje ztrátou materiálu v podobě velkého množství částic s velikostí několika nanometrů [5]. Tyto částice spadají do ultrajemné frakce a představují pro lidský organismus zdravotní riziko. Z toho důvodu je při studování emise částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí uvažovat i podmínky s vysokým kontaktním tlakem a velkým skluzem.

Ve studii [19] bylo zjištěno, že s rostoucím normálovým zatížením kontaktu roste i emise částic. Emise částic rostla i s rostoucím skluzem do hodnoty 1,5 % skluzu, přičemž s dalším nárůstem skluzu emise postupně klesala. Autor argumentuje, že to může být způsobeno přechodem kontaktu do režimu čistého skluzu. Rostoucí emise částic při vyšších hodnotách kontaktních tlaků a skluzu potvrzují i laboratorní studie [20] se simulátorem nápravy v reálném měřítku a polní studie [21] měřená v reálných podmínkách.

Podmínkám se zvýšenou emisí částic se dá předejít aplikací produktů pro řízení tření [27], [28]. Při aplikaci TOR produktů a maziv okolku dochází k poklesu hodnoty součinitele tření v kontaktu a přechodem suchého kontaktu do režimu mezního mazání je dosaženo snížení míry opotřebení. Redukcí opotřebení následně může dojít ke snížení emise částic. Ve studii [21] bylo dosaženo až 85 % redukce emise částic o velikosti 0,25-32  $\mu\text{m}$ . Při aplikaci modifikátoru tření na bázi vody však došlo k extrémnímu nárůstu emise částic s aerodynamickým průměrem kolem 10 nm. Autor zde diskutuje, že se jedná o částice vodní páry vzniklé odpařením vodní báze modifikátoru tření vlivem zahřívání kontaktu. Ve studii [28] bylo při aplikaci komerčního produktu na vodní bázi dosaženo podobného jevu. Žádná studie však netestuje stav vyschlého filmu vodního produktu, kdy může být jev odpařování vodní báze potlačen.

Poslední část textu se zabývala metodikou experimentu pro studování emise částic. Z Tab. 1 je patrné především to, že se studie z hlediska metodiky liší zejména v délce provedených experimentů s trváním v rozmezí 2-60 min a provozovanými kontaktními tlaky od 0,3 do 1,2 GPa. V rámci testování rovněž není zavedena sjednocená metodika pro srovnávání produktů pro řízení tření v kontaktu z hlediska jejich vlivu na emisii částic. Proto zde byla brána inspirace i ze článků, zabývajících se uvolňováním částic z brzdových systémů [30], [31]. Z literatury plyne, že je vhodné studovaný kontakt sledovat v rámci testovací komory, skrze kterou je hnán filtrovaný vzduch pro snížení rizika kontaminace [31]. Dále je zřejmé, že použití dvoudiskového zařízení vede na menší zkreslení, než zařízení v konfiguraci pin-on-disc, díky věrnější reprezentaci valivě-skluzného kontaktu [33].

Tab. 1 – souhrnná tabulka článků se zaměřením na emisii částic z kontaktu kola a kolejnice

Problematika	Zaměření	Citace	Zařízení	Vel. částic, (počet snímačů)	Délka testu (min)	Tlak (GPa)	Testovací komora
Kolo-kolejnice	Suchý kontakt	 [17]	Pin-on-Disc	20 nm - 32 $\mu\text{m}$ , (2S)	5-60	-	Ano
Kolo-kolejnice	Suchý kontakt	 [20]	Twin-disc (full-scale)	6 nm - 35 $\mu\text{m}$ , (2S)	15-50	-	Ne
Kolo-kolejnice	Produkty FM	 [27]	Pin-on-Disc	10 nm - 32 $\mu\text{m}$ , (2S)	17	0,55	Ano
Kolo-kolejnice	Produkty FM	 [28]	Pin-on-Disc	7 nm - 1 $\mu\text{m}$ , (1S)	20	0,3	Ano
Kolo-kolejnice	Mazání vodou	 [13]	Twin-disc (R300)	6 nm - 10 $\mu\text{m}$ , (2S)	2	1,2	Ano
Kolo-kolejnice	Suchý kontakt	 [19]	Twin-disc (R300)	6 nm - 10 $\mu\text{m}$ , (2S)	2	0,75-1	Ano
Kolo-kolejnice	Suchý kontakt	 [35]	Twin-disc (R300)	6 nm - 10 $\mu\text{m}$ , (2S)	2	1,1	Ano
Kolo-kolejnice	Mazání vodou	 [36]	Twin-disc (R300)	6 nm - 10 $\mu\text{m}$ , (2S)	2	1-1,2	Ano
Ocel-ocel	Suchý kontakt	 [34]	Pin-on-Disc	10 nm - 32 $\mu\text{m}$ , (2S)	9-30	0,8-1,6	Ano
Brzdy	Suchý kontakt	 [30]	Brzdový třmen (1:5)	6 nm - 10 $\mu\text{m}$ , (2S)	30	-	Ano
Brzdy	Suchý kontakt	 [31]	Pin-on-Disc	10 nm - 32 $\mu\text{m}$ , (2S)	60	0,001	Ano

## 2.8 Mezera v poznání

Přestože je velké množství cestujících metra a obyvatel městských oblastí denně vystaveno potenciálně škodlivým pevným částicím v ovzduší, problematika emise částic z kontaktu kola a kolejnice dosud nebyla podrobně prozkoumána [13]. Ačkoliv v odborné literatuře existují studie zabývající se emisí částic ze suchého kontaktu [17],[19],[20],[36] a kontaktu mazaného vodou [13], [35], vlivu aplikace produktů pro řízení tření v kontaktu se věnují pouze dvě studie [27], [28]. Studie [27] porovnávala se suchým kontaktem aplikaci TOR produktů na bázi vody a oleje a aplikaci plastického maziva. Publikace dále [28] srovnává vliv aplikace osmi různých TOR produktů na emisi částic. Závěrem těchto studií je, že vhodnou aplikací produktů pro řízení tření je možné podstatně snížit emisi částic.

Články [27] a [28], zaměřené na aplikaci TOR produktů, však používají pro simulaci kontaktu zařízení pin-on-disc, které kvůli zjednodušení skluzně-valivého kontaktu na čistě skluzný mohou vést na zkreslení [33]. Naopak Lee ve studiích [13] a [35] testuje na dvoudiskovém zařízení se skluzně-valivým kontaktem podmínky mazaného kontaktu, netestuje však aplikaci TOR produktů, ale pouze mazání vodou.

Z dostupných zdrojů dále nebyla nalezena žádná studie zaměřená na pískování či jiné látky pro obnovení součinitele tření a tuhé TOR produkty. Jsou to však právě tyto produkty, které představují z hlediska emise částic největší riziko, jelikož neumožňují redukovat emisi částic zachycením částic v kapalinovém filmu, tak jako to umožňují kapalné produkty [21]. Při pískování, které vede k vyšší míře opotřebení [29], zde může docházet k uvolňování částic rozdrčeného produktu, který přispěje ke zvýšené koncentraci uvolňovaných částic [26].

## 3 CÍL PRÁCE

### 3.1 Výzkumné otázky

**O1:** Jaký vliv má aplikace produktů pro řízení tření (vodních, olejových a tuhých TOR produktů a pískování) na množství a velikost částic uvolňovaných do ovzduší?

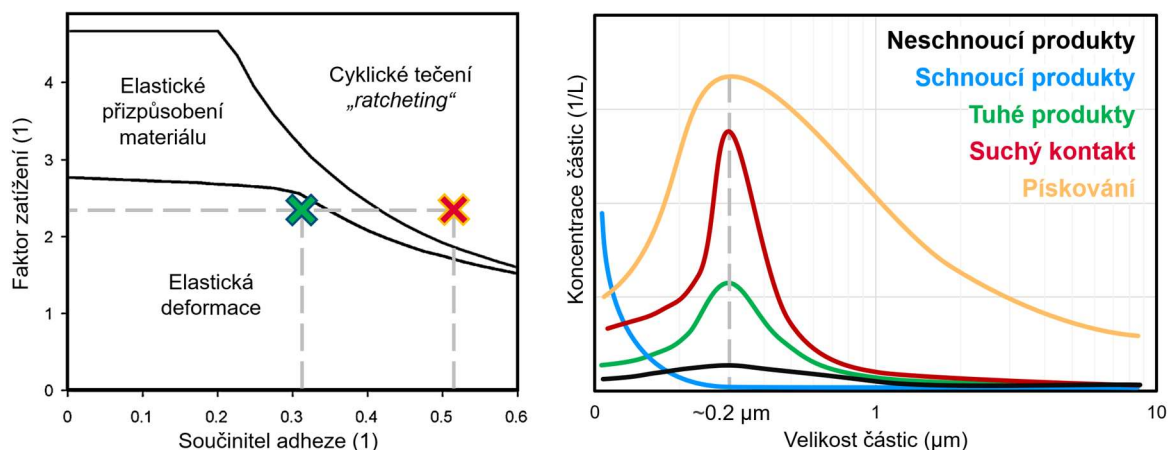
### 3.2 Cíl práce

Cílem práce je popsat vliv aplikace produktů pro řízení tření v kontaktu mezi kolem a kolejnicí na množství a velikost částic uvolňovaných do ovzduší při jeho provozu.

#### **Dílčí cíle práce:**

- Návrh metodologie experimentu zaměřeného na testování emise částic na dvoudiskovém zařízení,
- Experimentální výzkum emise pevných částic z kolejového kontaktu,
- Úprava testovací komory experimentálního zařízení pro umožnění testování emise částic při souběžné aplikaci produktů,
- Experimentální výzkum emise pevných částic při aplikaci různých produktů pro řízení tření
- Identifikace potenciálně rizikových produktů a jejich aplikačních parametrů z hlediska emise částic,
- Analýza výsledků,
- Příprava podkladů pro publikaci výsledků.

### 3.3 Hypotézy



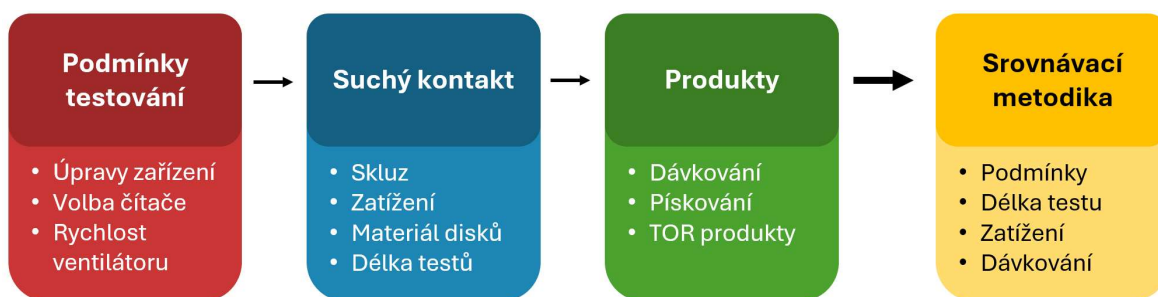
Obr. 3-1 – shakedown mapa a předpokládané charakteristiky emise částic

- H1:** Emise pevných částic z kolejového kontaktu úzce souvisí s mírou jeho opotřebení [18]. Nejvyšší hodnoty emise částic se tedy dají očekávat za podmínek velkého mechanického zatížení, které je na shakedown mapě reprezentováno oblastí cyklického tečení [19].
- H2:** Použitím TOR produktů dojde k redukci součinitele adheze, čímž se na shakedown mapě posuneme do oblasti elastické deformace. Dojde rovněž k redukci opotřebení, která se projeví snížením emise částic. Nejvýznamnější redukce bude dosaženo aplikací tekutých produktů, u nichž dojde k zachycení částic v kapalinovém filmu [26], [32]. U schnoucích produktů vzniká riziko výrazného zvýšení emise ultrajemných částic vlivem odpařování vody [21].
- H3:** Při pískování či použití jiné látky pro obnovu součinitele adheze dojde k výraznému nárůstu emise částic vlivem zvýšeného opotřebení kontaktních ploch [29] a rozptýlením částic rozdrčeného produktu [26].

## 4 MATERIÁL A METODY

### Postup řešení

Tato práce řešila relační výzkumný problém a pro jeho řešení použila vědecké metody založené na experimentu. Ačkoliv zpravidla probíhala práce na několika úkonech souběžně, celkový postup řešení se dá rozdělit do tří fází zobrazených na schématu v Obr. 4-1. První fáze se zabývala zejména hledáním vhodných podmínek pro testování emise částic a úpravami experimentálního zařízení. Důraz zde byl kladen především na nalezení podmínek s dobrou opakovatelností experimentů. Následovala fáze zabývající se emisí částic ze suchého kontaktu, a to především při proměnných podmínkách zatížení. Poslední fáze se zabývala aplikací různých produktů pro řízení tření v kontaktu a jejich vlivem na emisi částic. Na základě informací získaných provedením těchto kroků je možné definovat vhodné podmínky testování, zatížení kontaktu a způsob dávkování produktů pro řízení tření za účelem jejich srovnávání z hlediska emise částic.



Obr. 4-1 – schéma postupu řešení práce

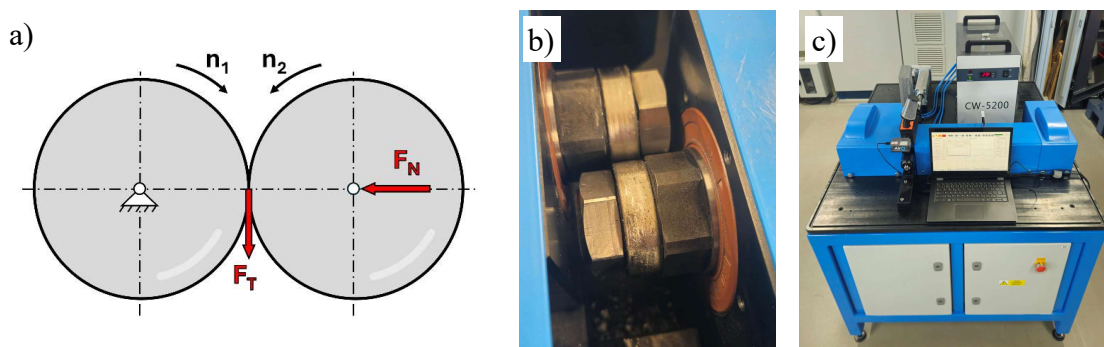
### 4.1 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

#### Dvoudiskové zařízení

Experimenty probíhaly na dvoudiskovém zařízení vyvinutém na VUT, viz Obr. 4-2 (c). Toto zařízení slouží pro simulaci třecích procesů a procesů opotřebení mezi kolem a kolejnicí. Předností tohoto zařízení, a zároveň důvodem proč bylo zvoleno pro testování, je možnost simulovat kontakt mezi kolem a kolejnicí dvěma válci s liniovým kontaktem. Liniový kontakt zde poskytuje větší kontaktní oblast, která svými rozměry blíže odpovídá reálnému kontaktu, a rovněž nabízí ve srovnání se zařízeními s bodovým kontaktem vyšší stabilitu, jelikož jeho opotřebení v průběhu testu nevede na výraznou změnu geometrie.

Dále zařízení díky většímu kontaktu umožňuje snazší aplikaci různých látek do kontaktu. Proces aplikace je rovněž usnadněn díky horizontální konfiguraci disků vedle sebe, což umožňuje jednodušší aplikaci produktů shora a poskytuje vyšší jistotu, že aplikované látky vstoupí do kontaktu. Na Obr. 4-2 (b) je zobrazena jeho fotografie.

Válcové vzorky mají průměr 46 mm a šířka liniového kontaktu je 10 mm. Disky jsou vyrobeny z oceli, přičemž jeden z disků je široký 11 mm, aby bylo dosaženo stanovené šířky kontaktu. Kontakt vyobrazený na Obr. 4-2 (a) je zatěžován pomocí lineárního aktuátoru přes vinutou pružinu normálovou silou až 4 000 N, což vede k vyvození maximálního kontaktního tlaku o hodnotě 1 130 MPa. Zařízení dále umožňuje měřit a zaznamenávat hodnotu třecí síly. Na základě poměru třecí a normálové síly následně vyhodnocuje hodnotu součinitele adheze v kontaktu. Hlavními řídicími parametry pro provoz kontaktu jsou velikost normálové síly, skluz a obvodová rychlost.

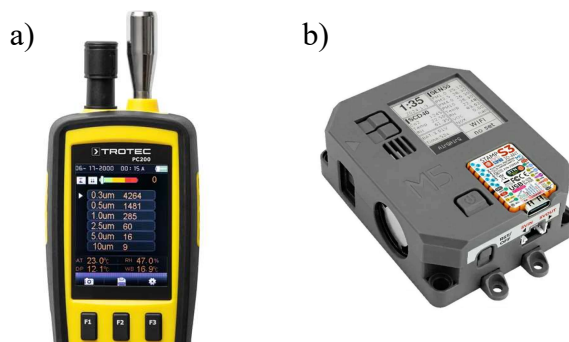


Obr. 4-2 – dvoudiskové zařízení – (a) schéma kontaktu, (b) foto kontaktu, (c) foto zařízení

### Čítače částic

Pro měření koncentrace pevných částic proudících komorou bylo využito čítačů částic *Trotec PC220* [37] a *AirQuality kit* [38], zobrazených na Obr. 4-3. Oba snímače fungují na principu optické metody počítání a umožňují sledování částic o velikosti od 0,3 do 10  $\mu\text{m}$ . Čítač *Trotec PC220* zapisuje hodnoty emise do šesti kanálů v závislosti na jejich velikosti. Hlavním omezením tohoto čítače je složitá práce s naměřenými daty a nízká frekvence měření. Zařízení ukládá data v podobě textového dokumentu s hodnotami emise z jednotlivých kanálů jednou za patnáct sekund.

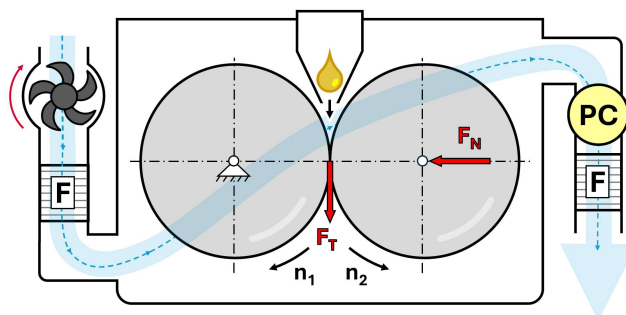
Výrazně vyšší snímkovací frekvenci 1 Hz poskytuje zařízení *AirQuality*. Snímkovací frekvence je velice důležitá zejména při experimentech s krátkodobými jevy, jako je např. pískování. Pro použití tohoto zařízení však bylo nutné naprogramovat skript pro jeho oživení, ovládání a ukládání dat.



Obr. 4-3 – čítače částice (a) *Trotec PC220*, (b) *AirQuality kit*

## Testovací komora

Za účelem dosažení dobré opakovatelnosti měření a udržení čistoty v laboratoři jsou experimenty provozovány v testovací komoře, viz Obr. 4-4. Komořou je pomocí ventilátoru ovládaného potenciometrem hnán vzduch, který je na vstupu a výstupu filtrován pomocí HEPA filtrů. Komořou byla navržena tak, aby proudící vzduch obtékal simulovaný kontakt, a aby umožňovala při uzavřeném stavu simulovat aplikaci produktů pro řízení tření. Kvůli geometrické složitosti komory nebylo dosaženo jejího úplného utěsnění. Při zapnutém ventilátoru však uvnitř komory vzniká přetlak, který zamezuje vstupu nefiltrovaného vzduchu netěsnostmi.



Obr. 4-4 – testovací komora

## Vedlejší měřicí přístroje

V rámci ladění metodiky bylo často nezbytné provést jednoduchá měření nepřímo spojená s experimentem. K těmto účelům bylo využito následujících přístrojů.

Tab. 2 – použité vedlejší měřicí přístroje

Přístroj	Označení	Jednotka	Účel
Anemometr	CEM DT-620	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost proudění vzduchu
Multimetr	UNI-T UT107	V	Různé účely
Posuvné měřítko	Neoznačeno	mm	Různé účely
Bezkontak. teploměr	Meztek IR02C	$^{\circ}\text{C}$	Měření teploty disků
Termočlánek	Typ K	$^{\circ}\text{C}$	Měření teploty disků
Analytická váha	MyWeigh iM01	g	Vážení produktů

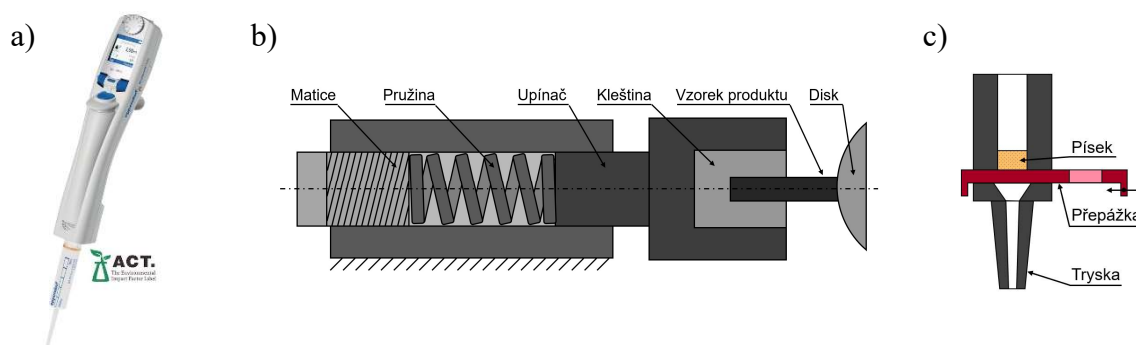
## Aplikátory látek

Pro aplikaci kapalných látek do kontaktu byla využita mikropipeta *Eppendorf Multipipette E3x* [39], viz Obr. 4-5 (a). Toto zařízení umožňuje aplikaci přesného množství kapaliny do kontaktu. V použitých testech byly použity nástavce s objemem 200  $\mu\text{l}$ , s nimiž je možné aplikovat dávku o velikosti 2  $\mu\text{l}$ . V technické dokumentaci výrobce mikropipety je pro tento nástavec uvedena maximální chyba  $\pm 5,5\%$  aplikovaného objemu [40].

Pro aplikaci tuhých modifikátorů tření byl využit aplikátor s kleštinovým upínačem, viz Obr. 4-5 (b). Toto zařízení umožňuje upnout válcový vzorek tuhého modifikátoru tření do kleštinového upínače, který pomocí pružiny přitlačuje produkt k povrchu jednoho z disků, čímž dochází k jeho aplikaci. Přitlačná síla produktu vůči disku je dána šroubováním matice stlačující pružinu.

Nastavení přitlaku produktu probíhalo tak, že bylo nejdříve dosaženo doteku produktu vůči disku. Následně, díky známé tuhosti pružiny ( $2,7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ), je možné stlačit pružinu na takovou délku, aby byla vyvolána konkrétní velikost přitlačné síly. V úvodních experimentech byla přitlačná síla nastavena na 5,4 N, odpovídající stlačení pružiny o 2 mm. V průběhu testu dochází ke zkrácení vzorku vlivem jeho aplikace, což vede ke snižování přitlačné síly. Tato práce však řeší relativně krátké časové testy, při nichž je zkrácení vzorku produktu ve srovnání se stlačením pružiny zanedbatelné.

Simulování pískování bylo realizováno pomocí aplikátoru sypkých látek, viz Obr. 4-5 (c). Sypání písku probíhalo gravitačně. Nejprve se do komory aplikátoru nachystala přesná dávka písku, která se v určitý moment přesunutím přepážky do druhé polohy aplikovala do kontaktu.



Obr. 4-5 – aplikátory látek: (a) mikropipeta, (b) aplikátor tuhých produktů, (c) aplikátor sypkých látek

## 4.2 Metodika

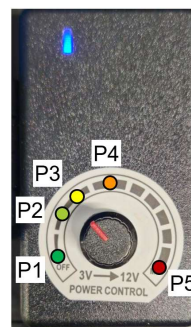
### Podmínky testování

Před začátkem měření je důležité zajistit vhodné okolní podmínky. Jako zásadní parametr ovlivňující stabilitu naměřených dat se ukázala být rychlost otáčení ventilátoru, která byla regulována pomocí potenciometru, viz Obr. 4-6. Nejlepších výsledků z hlediska stability dat a opakovatelnosti experimentu bylo dosahováno při nastavení potenciometru do polohy P2, kdy komorou proudí vzduch rychlostí  $2,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  při napájení ventilátoru napětím 7,31 V. Ostatní používané polohy potenciometru jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 – nastavení potenciometru

Označení	Rychlost proudění vzduchu ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Napětí (V)
P1	1,13	3,56
P2	2,52	7,31
P3	2,86	8,17
P4	3,56	9,72
P5	4,18	12,12

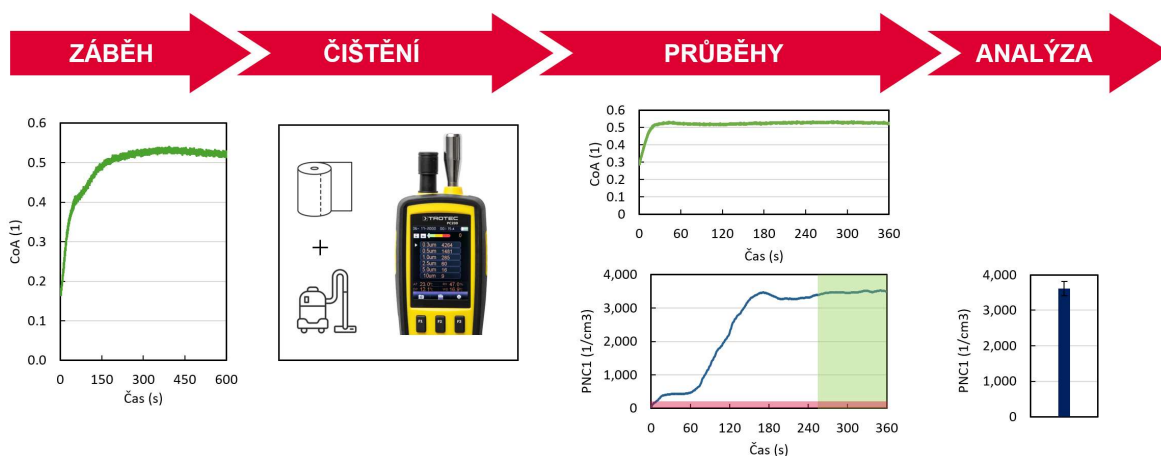
Obr. 4-6 – nastavení potenciometru



Důležité je také kontrolovat hodnotu koncentrace částic v pozadí proudícího vzduchu před spuštěním experimentu. Tato hodnota může za určitých podmínek nabývat vysokých hodnot. Při důkladném vyčištění komory a pravidelné výměně filtru na vstupu do komory a řádném větrání vzduchu v laboratoři se koncentrace v pozadí zpravidla ustálila na hodnotě 5-35 částic  $\text{PM}_{2,5} \text{ cm}^{-3}$ .

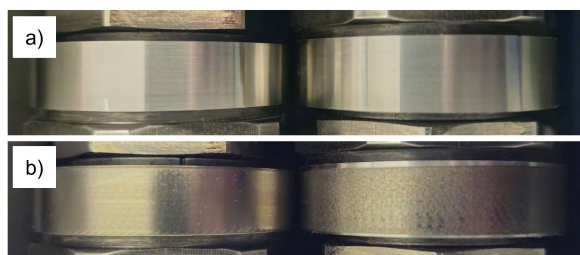
### Postup experimentu

Testování emise částic se skládá ze čtyř kroků. Prvním krokem je záběh kontaktních povrchů vzorků, který má za cíl poskytnout stabilní hodnoty součinitele adheze. Ta se při normálové síle o velikosti 2 000 N a jednoho procenta skluzu pohybuje okolo hodnoty 0,5.



Obr. 4-7 – metodika experimentu

Při použití nového páru disků je nutné kromě hodnoty součinitele adheze rovněž kontrolovat stav kontaktních povrchů, jelikož ke stabilizaci hodnoty součinitele adheze dochází zpravidla podstatně dříve, než dojde ke stabilizaci emise částic. Obr. 4-8. Jelikož jsou disky při uskladnění konzervované proti korozi, tak je rovněž nutné kontaktní povrchy před prvním použitím odmastit.



Obr. 4-8 – a) povrch nových disků, b) povrch zaběhnutých disků

## Čištění

Po záběhu je nutné důkladně vyčistit prostory komory a kontaktní povrchy vzorků. Povrchy vzorků jsou čištěny vysavačem a papírovým ubrouskem, dokud po čištění nezůstane ubrousek čistý. Prostory testovací komory jsou čištěny vysavačem se zúženou hubicí, aby bylo možné vyčistit i hůře přístupná místa. Po vyčištění komory je čistota komory ověřena odečítáním hodnoty koncentrace částic. Při této kontrole je komora zavřená, disky jsou v kontaktu, ale nedochází k jejich odvalování.

## Časové testy

Samotný experiment probíhá formou časového testu. Při těchto testech jsou zaznamenávány hodnoty součinitele adheze a koncentrace částic v proudícím vzduchu. Hodnoty součinitele adheze jsou zaznamenávány především jako nástroj pro kontrolu správnosti provedeného testu. Při měření emise ze suchého kontaktu jsou testy dlouhé šest minut, při testu produktů trvají dvacet minut. Na základě hodnot měřených čítačem částic a dvoudiskovým zařízením je možné vykreslit průběhy emise částic a součinitele adheze v čase.

## Zpracování dat

Data z dvoudiskového zařízení i čítače částic jsou ukládána v podobě číslíkových souborů na počítači. S těmito soubory je následně možné pracovat v prostředí programu *Microsoft Excel*. Zde je nejprve potřeba provést kompenzaci emise částic z pozadí. Toho je dosaženo odečtením nejnižší hodnoty naměřené čítačem v rámci testování od každé měřené hodnoty.

Pro přehledné srovnání konkrétních stavů z hlediska emise částic je žádoucí vyjádřit emisi částic jedním číslem tak, aby bylo možné tento stav zavést do sloupcových grafů. Pro suchý kontakt byla touto hodnotou průměrná hodnota emise částic z posledních 100 sekund testu, kde zpravidla došlo ke stabilizaci emise. Při testování TOR produktů je vypočtena hodnota průměrné emise za dobu od aplikace do momentu, kdy součinitel adheze dosáhne hodnoty 0,35. Tato doba vyjadřuje oblast, kdy je udržována střední hodnota tření, která reprezentuje typické provozní podmínky. V rámci testů pískování jsou srovnávány maximální měřené hodnoty koncentrace částic. Chybové úsečky následně vykreslují velikost jedné směrodatné odchylky v kladném i v záporném směru.

## 4.3 Materiál

### Materiál disků

Za účelem testování bylo využito dvou různých materiálů zkušebních vzorků. Zejména v úvodní části testování byly převážně využívány disky z ložiskové kalené oceli 100Cr+AC+SH. Disky jsou kaleny a popouštěny na 59-61 HRC. Díky vysoké tvrdosti vykazují vzorky dobrou životnost a stabilní chování z hlediska adheze i emise, díky čemuž jsou vhodné pro zaškolení personálu a uskutečnění průvodních testů.

V pozdější fázi byly využity disky vyřezané přímo z kola a kolejnice. Vzorky reprezentující kolo jsou vyřezány z kola z materiálu 12 036.7. Tvrdost oceli těchto kol se pohybuje v rozmezí 273-311 HB, což odpovídá přibližně 27-34 HRC. Kolejnice, z níž je vyrobena druhá sada disků, je z oceli R260, která má tvrdost přibližně 260 HB nebo 26 HRC. Použití vzorků z reálných materiálů kola a kolejnice by mělo vést na věrnější reprezentaci emisního chování simulovaného kontaktu. Disky však poskytují menší životnost, a jsou dostupné pouze v omezeném počtu, proto byly použity až v pozdější fázi experimentů.

### TOR produkty

Testováno bylo pět různých TOR produktů, jeden tuhý, dva na bázi vody a dva na bázi oleje. Před použitím byly tekuté produkty důkladně promíchány, aby došlo k opětovnému spojení sedimentovaných složek. Každý produkt byl aplikován pomocí vlastního nástavce na mikropipetu, aby nedošlo ke kontaminaci látek. Všechny testované produkty jsou určeny k aplikaci na temeno kolejnice nebo běhoun kola. Použité zkratky vyjadřují anglické termíny „*water based*“, „*oil based*“ a „*solid*“ – na vodní bázi, olejové bázi a tuhé.

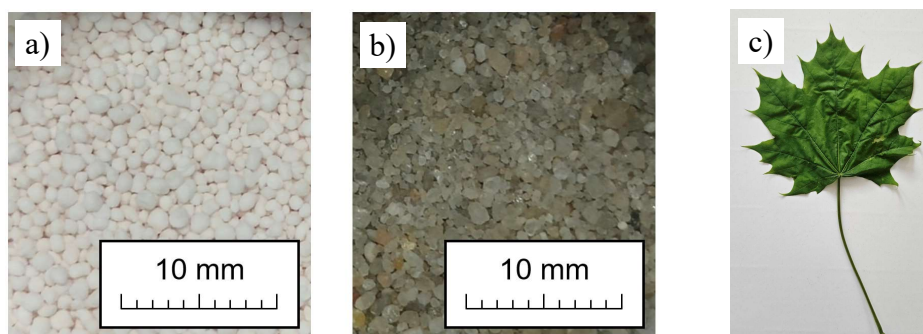
Tab. 4 – testované TOR produkty

Označení	Typ	Účel
WB1	vodní TOR	redukce hluku a opotřebení, řízení tření bez ztráty adheze
WB2	vodní TOR	stabilní tření, potlačení hluku a vibrací
OB1	olejový TOR	redukce hluku a opotřebení
OB2	olejový TOR	redukce hluku a opotřebení
S1	tuhý TOR	redukce hluku, opotřebení a zamezení vzniku vlnkovitosti

### Produkty pro obnovu součinitele adheze

Tradičně se při vzniku kriticky nízké hodnoty adheze v kontaktu používá za účelem obnovení její hodnoty aplikace křemičitého písku. I v této práci byl testován křemičitý písek. Z důvodu snazší aplikace a menšího opotřebení experimentálního vybavení byl pro testování zvolen jemný písek S4 s velikostí zrn 0,7 mm. Druhým zkoumaným produktem pro obnovu adheze je spěkaná alumina (oxid hlinitý) v podobě bílých kuliček s průměrem 1,0 mm.

Za účelem věrohodné reprezentace podmínek kriticky nízké adheze byly do kontaktu vneseny listy javoru, viz Obr. 4-9 (c). Jedná se o suché listy nasbírané v den testování. Do kontaktu jich bylo vneseno takové množství, dokud nedošlo ke vzniku dostatečně nízké hodnoty součinitele adheze, standardně nižší než 0,18.



Obr. 4-9 – (a) spékaná alumina, (b) písek S4, (c) použité listí

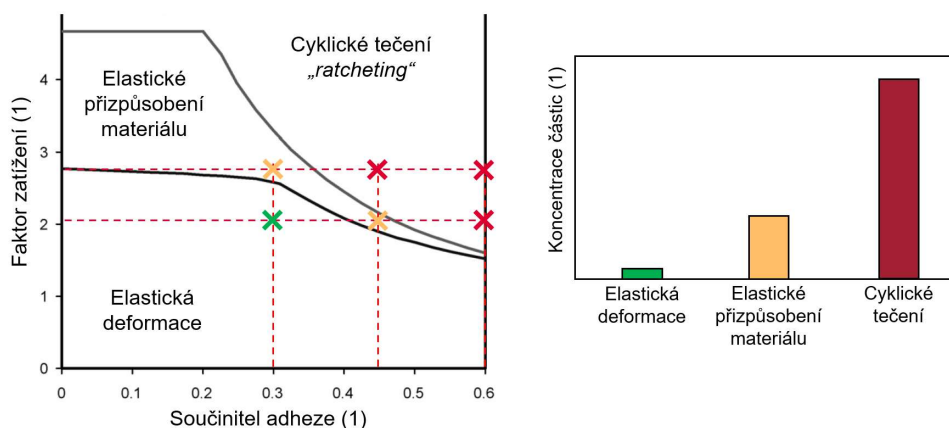
V Tab. 5 jsou uvedeny použité parametry v jednotlivých experimentech, jejichž výsledky vstupují do této práce. V tabulce jsou vypsány konkrétní hodnoty normálové síly, skluzu a obvodové rychlosti v kontaktu, poloha nastavení potenciometru, kterým jsou ovládány otáčky, následně zda se jedná o vzorky z ložiskové oceli nebo materiálů kola a kolejnice a délky dílčích experimentů. Kromě účelu testu jsou v posledním sloupci uvedeny i jednotlivé grafy, do nichž data vstupují. Pro větší přehlednost zbytku práce lepší plynulost textu budou v následujících kapitolách zmíněny vždy jen zásadní parametry z hlediska experimentu.

Tab. 5 – použité parametry experimentů

Účel testu	$F_N$ (kN)	Skluz (%)	$v_o$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	Ventilátor (otáčky)	Disky (materiál)	Délka (min)	Obr. (kap-obr.)
Vliv polohy a otáček ventilátoru	2	2	1	P1, P4, P5	ložisk. o.	2	5-3, 5
Srovnání čítačů částic	2	0-2	1	-	ložisk. o.	11	5-7
Ověření spolehlivosti měření	2	0-2	1	P1, P3, P4	ložisk. o.	12	5-8
Úvodní testy závislosti skluz-emise	2	0-2	1	P1	ložisk. o.	6	5-9, 10
Vysoké hodnoty skluzu	2	0-9	1	P1	ložisk. o.	6	5-11, 12; 6-10
Úvodní testy pískování	2	1	1	P1, P3	kolo-kolej.	6	5-14
Závislost emise na skluzu pro tlak 0.8-1 GPa	2; 3,1	0-2	1	P2	kolo-kolej.	6	6-7
Závislost emise na skluzu pro tlak 0.8-1 GPa	2; 3,1	0-2	1	P2	kolo-kolej.	6	5-13; 6-5
Dlouhý časový test, test dávkování písku	2	1	1	P2	kolo-kolej.	60	6-6, 12
Testy pískování	2	1	1	P2	kolo-kolej.	6	5-15
Tuhý TOR produkt	2	1	1	P2	kolo-kolej.	20	5-18
Suchý a mokrý film WB1	2	1	1	P2	kolo-kolej.	20	5-20
Retentivita TOR produktů	2	1	1	P2	kolo-kolej.	20	5-19
Srovnávací testy tekutých TOR produktů	2	1	1	P2	kolo-kolej.	20	5-21, 22, 23; 6-9
Alternativy pískování	2	1	1	P4	kolo-kolej.	20	5-17; 6-4

## 4.4 Testované predikce

**P1:** Množství částic uvolňovaných ze simulovaného kontaktu bude odpovídat oblastem zatížení na shakedown mapě. Emise částic bude růst se zvyšujícím se faktorem zatížení i s rostoucí hodnotou součinitele adheze. Graficky znázorněno viz Obr. 4-10.



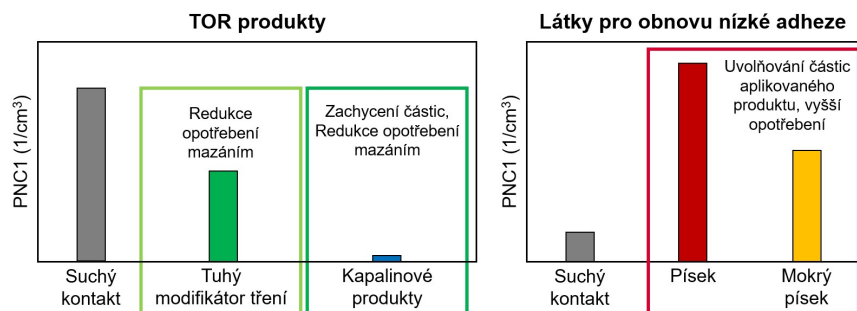
Obr. 4-10 – P1: emise částic bude odpovídat oblasti zatížení na shakedown mapě

**P2:** Množství částic uvolňovaných z kontaktu může být sníženo mechanismy mazání kontaktu a zachycením částic opotřebením v kapalinovém filmu, nebo může být zvýšeno uvolňováním částic samotného produktu.

K největší redukci emise částic dojde při použití kapalných produktů díky redukci opotřebením kontaktních povrchů a schopnosti mazacího filmu zachytit částice opotřebením.

K redukci emise bude docházet i při aplikaci tuhých TOR produktů a provozu kontaktu s vyschlým filmem schnoucího modifikátoru tření. Při jejich aplikaci však bude docházet k redukci pouze vlivem mazání. Určité kompozice tuhých TOR produktů však mohou vést na vyšší hodnoty emise částic v důsledku uvolňování částic samotného produktu.

Uvolňování částic samotného produktu se však nejvýrazněji projeví při pískování, kdy se do ovzduší budou rozptylovat částice rozdrčeného písku (či jiného produktu), čímž dojde k výraznému vzrůstu emise pevných částic. Zároveň při jejich aplikaci bude docházet k nárůstu emise vlivem vyššího opotřebením



Obr. 4-11 – P2: vliv aplikace produktů pro řízení tření na emisi částic

Tab. 6 – kontrolované, závislé a nezávislé proměnné

Proměnné	Predikce 1	Predikce 2
Kontrolované	Součinitel adheze	Součinitel adheze, skluz, normálová síla
Nezávislé	Normálová síla, skluz	Typ produktu, dávka
Závislé	<b>Koncentrace částic</b>	

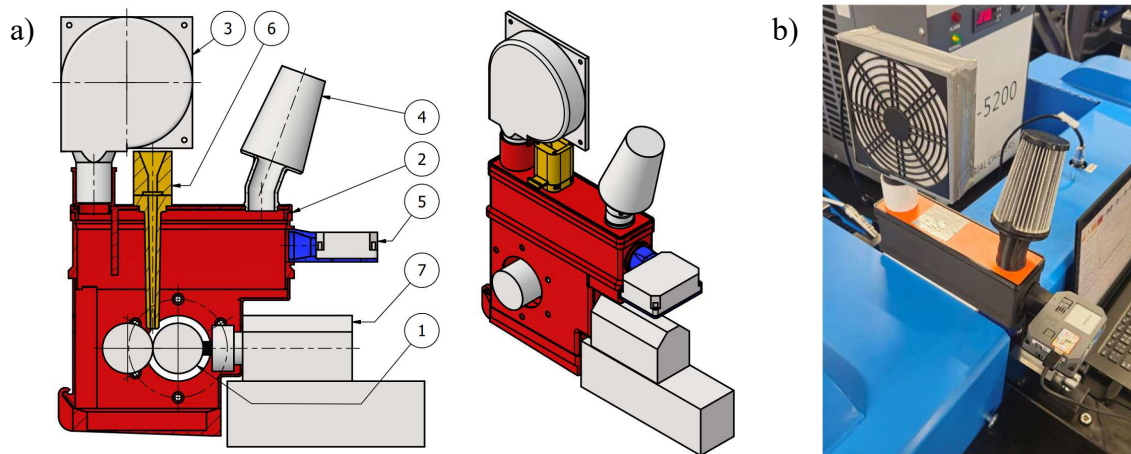
## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Úpravy zařízení

Vzhledem ke skutečnosti, že zatím na VUT problematika emise částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí nebyla zkoumána, bylo nutné provést jisté úpravy zařízení a měřicího řetězce, a to zejména úpravy testovací komory a programování čítačů částic.

#### Testovací komora

Ačkoliv ke dvoudiskovému zařízení testovací komora existovala, její původní varianta nebyla uzpůsobena k testování emise částic, a proto pro zamýšlené experimenty vykazovala několik nedostatků. Z toho důvodu byla ve značné míře upravena. Její finální podoba je zobrazena na Obr. 5-1. Červená komora (2) zde uzavírá prostor okolo simulovaného kontaktu (1). Vzduch je hnán pomocí ventilátoru s filtrem (3) a proudí skrze komoru směrem k HEPA filtru (4). Poblíž výstupu z komory je umístěn čítač částic (5). Kromě úpravy trajektorie proudícího vzduchu bylo nutné rovněž upravit obecnou geometrii komory tak, aby bylo možné souběžně aplikovat různé látky do kontaktu ve stavu zavřené komory. Zde byla největší kolize s aplikátorem tuhých produktů (7). Horní část komory byla upravena tak, aby bylo možné shora aplikovat kapalně nebo sypké látky, např. pomocí aplikátoru písku (6).



Obr. 5-1 – (a) upravená testovací komora, (b) foto komory v provozu

Dalším důvodem k úpravám bylo postupné ladění rozměrů dosedacích ploch. Komora se skládá z několika dílů kvůli vzájemnému pohybu ložiskových domků, na kterých je uložena. Komora a její dílčí části musely být často kvůli čištění mezi jednotlivými testy rozebrány. Proto bylo nutné navrhnout dosedací rozměry dílčích celků s takovým přesahem, aby po zasunutí do komory těsnily. Výroba geometricky složité komory s poměrně přesnými rozměry byla umožněna díky aditivní výrobě z plastu.

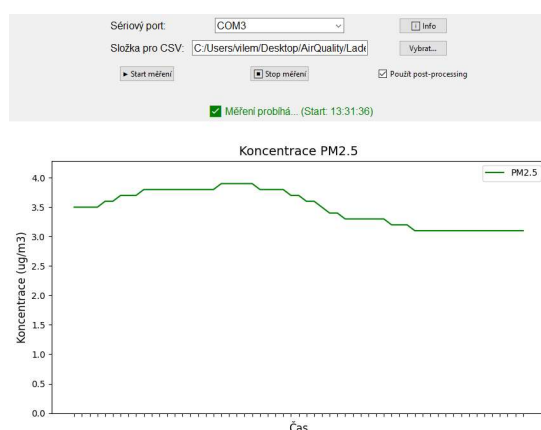
Dalšími výrobky byly aplikátor písku, unašeč mikropipety a unašeč čítače částic. Aplikátor písku a unašeč mikropipety byly navrženy tak, aby bylo možné aplikovat jednotlivé látky za běhu experimentu a bez nutnosti otevření komory. K tomu bylo nutné je umístit co nejbližší ke kontaktu. U aplikátoru písku bylo nutné najít vhodný rozměr trysky a geometrii přepážky, aby nedocházelo k zaseknutí písku. Výroba těchto součástí probíhala rovněž formou 3D tisku.

## Programování čítačů

Práce s oběma používanými čítači částic vyžadovala programování skriptů pro zvýšení efektivity práce s měřenými daty. Čítač částic *Trotec PC220* využívá velice jednoduché metody zápisu dat. Zařízení po zahájení testu po předem nastavenou dobu počítá částice v proudícím vzduchu. Po skončení testu vypočítá koncentraci částic a zapíše ji do číslicového souboru (.csv).

Tento způsob zápisu znamená, že zařízení nativně neumožňuje zaznamenávat průběh emise částic v čase. Čítač částic však umožňuje nastavit opakování testů ve smyčce. S využitím této funkce bylo možné zaznamenávat průběh emise částic v čase opakovaním relativně krátkých 15sekundových testů. To však vedlo na tvorbu velkého množství .csv souborů s naměřenými daty. V prostředí *Matlab Online* byl sepsán skript, který umožnil tyto soubory přečíst a převést do přehledné tabulky pro následující práci v *Microsoft Excelu*.

Pro zprovoznění zařízení *AirQuality* bylo nutné vytvořit dva skripty – jeden skript v prostředí *Arduino IDE*, který měl za úkol zařízení oživit tak, aby měřilo a posílalo měřená data s frekvencí 1 Hz, a druhý *Python* skript, na kterém běží ovládací aplikace, a pomocí něhož jsou zpracovaná data ukládána do číslicového souboru pro další zpracování v *Microsoft Excelu*. Tato aplikace je přenosná, což umožňuje např. ovládání počítačem dvoudiskového zařízení. Prostředí ovládací aplikace *AirQ\_Logger.exe* je zobrazeno na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 – ovládací prostředí *AirQuality Logger*

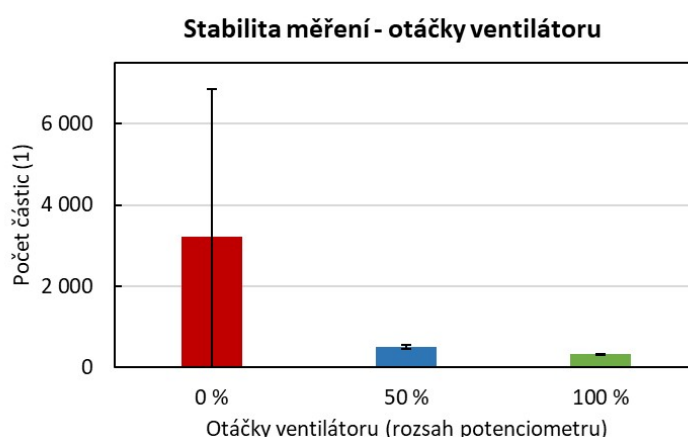
## 5.2 Ladění metodiky

Významnou částí této práce bylo nalezení vhodného postupu a experimentálních podmínek pro testování emise částic na dvoudiskovém zařízení. V rámci úvodních testů byly identifikovány tři hlavní parametry ovlivňující spolehlivost měření, kterým byla věnována pozornost. Jsou jimi rychlost otáčení ventilátoru, poloha čítače částic a finální volba čítače částic. Veškeré testy v této podkapitole jsou prováděny na kalených discích z ložiskové oceli.

### Rychlost otáčení ventilátoru

Jako zásadní parametr ovlivňující stabilitu naměřených dat se ukázala být rychlost otáčení ventilátoru. Otáčky ventilátoru byly regulovány pomocí potenciometru. Proto byly tomuto parametru věnovány dvě sady experimentů. První testování proběhlo v úplném počátku řešení práce s využitím čítače *Trotec PC220*. Jednalo se o dvouminutové časové testy s konstantním zatížením normálovou silou 2 kN a 2% skluzu, při nichž se porovnával průměrný počet detekovaných částic. Testovány byly stavy s vypnutým ventilátorem, nastavení potenciometru do polohy P4 odpovídající 50 % jeho rozsahu a polohy P5 odpovídající 100 % rozsahu.

Z naměřených dat na Obr. 5-3 vychází najevo skutečnost, že je nutné testy provozovat se zapnutým ventilátorem. V opačném případě je chybovost mnohonásobně vyšší než bez něj. Zároveň byla naměřena klesající závislost množství napočítaných částic s rostoucími otáčkami ventilátoru. Ta je způsobena skutečností, že se z kontaktu uvolňuje nezávisle na otáčkách ventilátoru stále stejné množství částic, ale komorou proudí více vzduchu, což vede na menší výslednou koncentraci částic.

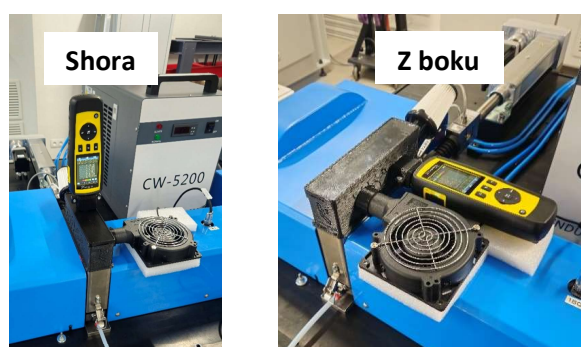


Obr. 5-3 – vliv otáček ventilátoru na stabilitu dat měřených čítačem *Trotec PC220*

Důležité je zde rovněž podotknout nežádoucí chování zařízení *Trotec PC220*, kdy zejména při situacích s vysokou koncentrací částic běžně docházelo k přetečení jeho maximální měřené hodnoty, což vedlo k zápisu nereálně vysoké hodnoty počtu částic. V těchto situacích byla zapsaná hodnota blízko maximální hodnoty 32bitového čísla, tedy  $2^{32}$  částic, přičemž běžné hodnoty se pohybovaly řádově v tisících. To je rovněž jeden z podstatných důvodů ovlivňující výsledky v neprospěch vypnutého ventilátoru z hlediska stability měřených dat.

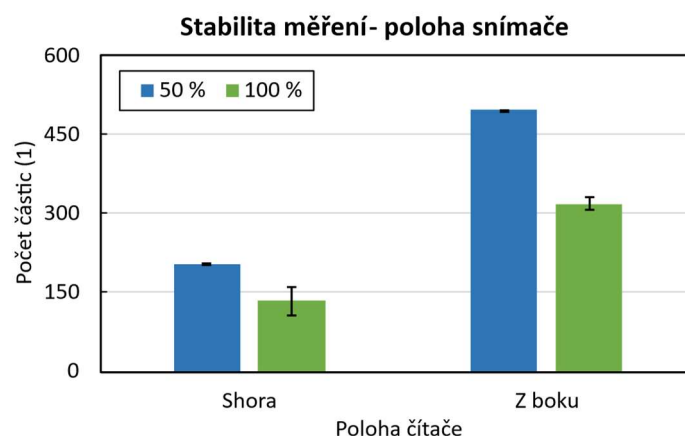
### Poloha čítače částic

V rámci předchozího experimentu byl rovněž ověřován vliv polohy čítače částic na měřená data. Byly testovány dvě polohy čítače, v jedné byl umístěn čítač shora, kolmo nad kontaktem, v druhém případě byl umístěn z boku do horní části původní testovací komory, viz Obr. 2-1.



Obr. 5-4 – testované polohy čítače částic

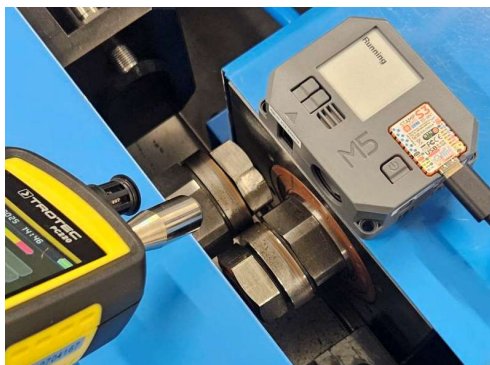
Pro lepší přehlednost byla z těchto výsledků vyřazena data s vypnutým ventilátorem. Z naměřených dat na Obr. 5-5 je možné vyvodit, že při umístění čítače v horní části komory byly ve srovnání s umístěním z boku měřeny nižší hodnoty. Zejména pro nastavení otáček ventilátoru do 50 % rozsahu potenciometru (P4) vedlo na dobrou stabilitu měřených dat. Na základě tohoto experimentu bylo rozhodnuto pro pokračování s 50 % otáčkami a umístěním čítače z boku tak, aby byl uvolněn prostor pro budoucí aplikaci různých látek shora.



Obr. 5-5 – vliv polohy čítače částic na stabilitu měřených dat

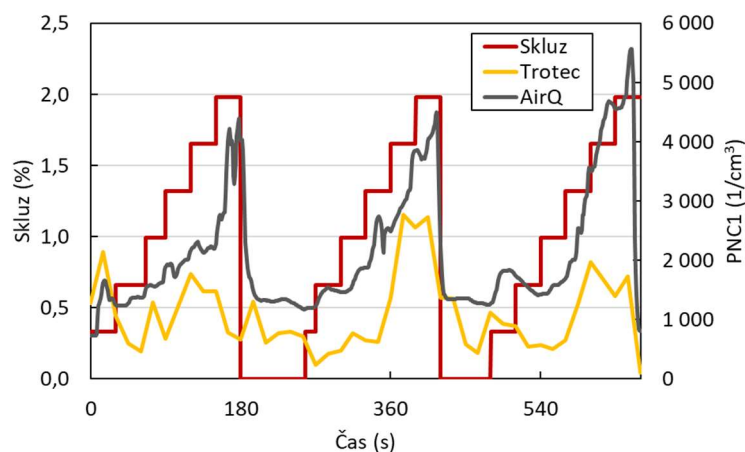
## Volba čítače častic

Dostupné čítače častic majú rôzne vlastnosti. Hlavní prednosť čítače *Trotec PC220* je skutočnosť, že sa jedná o profesionálnu laboratornú výbavu, čo ho predurčuje k vyššej spoľahlivosti a verohodnosti merených dát. Oproti tomu je zariadenie *AirQuality* určené len ako prístroj na sledovanie kvality ovzdušia. Zásadnou výhodou zariadenia *AirQuality* je však jeho schopnosť zaznamenávať dáta s výrazne vyššou frekvenciou 1 Hz, na rozdiel od meriacej frekvencie 1/15 Hz zariadenia *Trotec PC220*.



Obr. 5-6 – poloha snímačov pro vzájemné srovnání

Proto byla tato zařízení podrobena testům určeným k porovnání měřených dat. Test spočíval ve třech opakováních postupně rostoucího skluzu 0-2 % v rámci 180 s, načez následovalo 80 s čistého valení. Závislost skluzu je vyobrazena červenou křivkou na Obr. 5-7. Test byl proveden bez testovací komory s čítači umístěnými ve stejné vzdálenosti od kontaktu, viz Obr. 5-6.

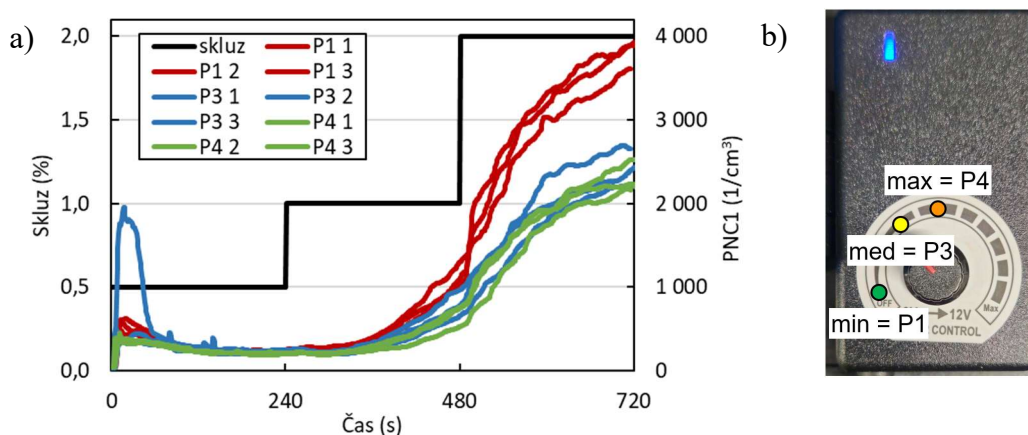


Obr. 5-7 – srovnání čítačů častic

Ačkoliv je na průběhu koncentrace částic měřené čítačem *Trotec PC220* vidět snaha kopírovat průběh rostoucího skluzu např. v momentech od 360 s a od 540 s, kdy měřená koncentrace částic zdánlivě roste, měřené hodnoty nejsou stabilní. Oproti tomu hodnoty měřené čítačem *AirQuality* utváří spojitou křivku, která poměrně přesně odpovídá rostoucímu skluzu, a náhlému poklesu na nižší hodnoty při snížení skluzu a přechodu na čisté valení. Právě z tohoto důvodu bylo rozhodnuto v dalších experimentech pokračovat výhradně se zařízením *AirQuality*. Zároveň je vhodné podotknout, že nízká stabilita dat měřených čítačem *Trotec PC220* je částečně způsobena i testováním bez komory, při testech s komorou byla měřená data výrazně stabilnější. Toto testování však poskytuje nejspravedlivější porovnání obou snímačů díky testování ve stejný moment a za stejných podmínek.

### Ověření vhodných otáček ventilátoru

Vzhledem k velkému vlivu rychlosti proudícího vzduchu na stabilitu měřených dat bylo rozhodnuto pro zhotovení dalšího experimentu zaměřeného na stabilitu měřených dat při různých otáčkách ventilátoru. Tyto testy rovněž sloužily pro ověření spolehlivosti čítače *AirQuality*. V rámci dvanáctiminutových testů byl postupně zvyšován skluz, viz černá křivka na Obr. 5-8 (a), od 0,5 do 2 %. Srovnávány byly tři rychlosti otáčení ventilátoru – minimální, střední a maximální hodnota odpovídající nastavení potenciometru na Obr. 5-8 (b).



Obr. 5-8 – (a) vliv otáček ventilátoru na stabilitu dat, (b) používaná nastavení potenciometru

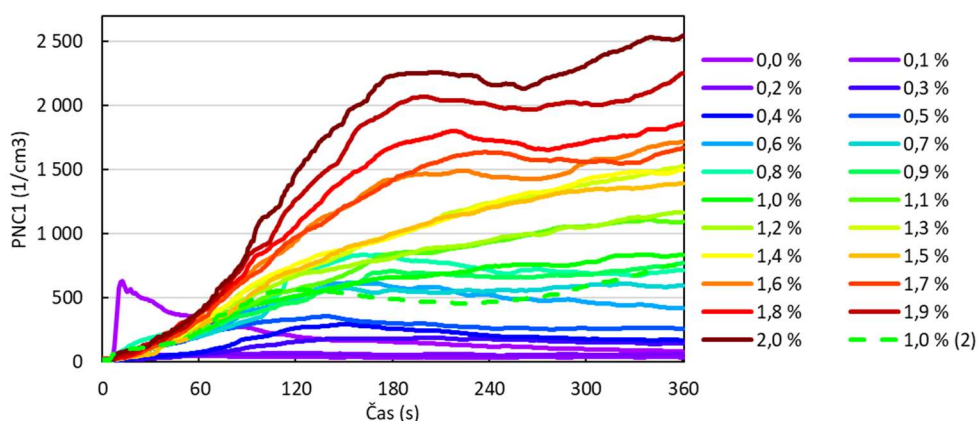
Z naměřených dat na Obr. 5-8 (a) je zřejmé, že jsou průběhy stabilní a testy poskytují dobrou opakovatelnost. S výjimkou testu P3 2, kdy pravděpodobně došlo k nedostatečnému očištění povrchu disků, následují všechny křivky stejný trend. Při testech došlo k potvrzení závislosti, kdy měřená koncentrace částic klesá s rostoucími otáčkami ventilátoru. Tohoto jevu bylo následně využito při testování písku, jehož aplikace vede ke vzniku extrémně vysoké hodnoty koncentrace částic, kdy dochází k přetečení maximální hodnoty měřené čítačem částic. V těchto situacích je možné testovat při vyšších otáčkách, kdy vzniká nižší koncentrace částic, a dochází k minimalizaci nežádoucího jevu přetečení snímače.

## 5.3 Suchý kontakt

Po nalezení vhodných podmínek pro testování bylo dalším krokem ověřit chování simulovaného kontaktu mezi kolem a kolejnicí z hlediska emise pevných částic. Tyto testy byly zaměřené na ověření vlivu zatížení normálovou silou, skluzu a materiálu testovacích vzorků.

### Úvodní testy závislosti emise a skluzu

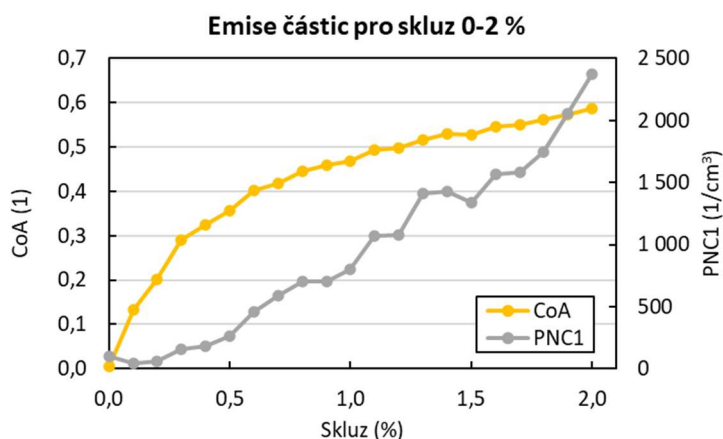
První testy zaměřené již přímo na emisi částic byly věnovány závislosti na skluzu. Jednalo se o šestiminutové testy při konstantním kontaktním tlaku 0,8 GPa dle *Hertzovy teorie*, což odpovídá tlaku v kontaktu mezi kolem a kolejnicí lehké kolejové dopravy, pro kterou nese testování emise částic velký význam. Rychlost valení  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  byla zvolena jako maximální hodnota rychlosti, která je šetrná vůči dvoudiskovému zařízení. Otáčky ventilátoru byly nastaveny na minimální hodnotu (poloha P1), pro její snadné nastavení a nízké riziko chyby. Testovány byly hodnoty 0-2 % skluzu. Tento rozsah pokrývá hodnoty skluzu kontaktu kola a kolejnice za běžných provozních podmínek. Pro testování bylo použito disků z kalené ložiskové oceli pro jejich vyšší tvrdost, která vede ke stabilnějšímu chování a delší životnosti vzorků.



Obr. 5-9 – emise částic pro 0-2 % skluzu

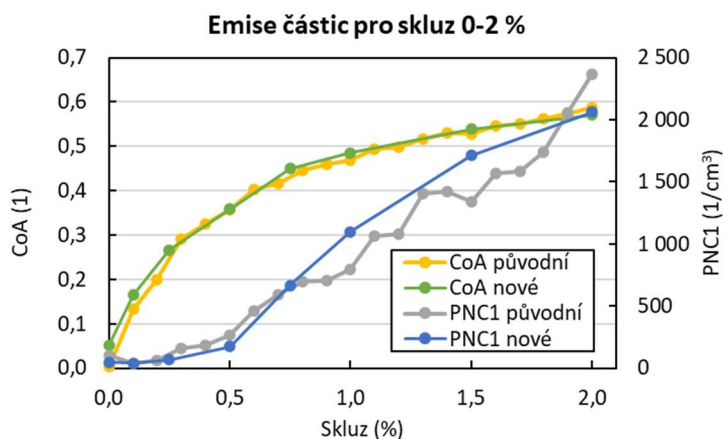
Z naměřených hodnot na grafu v Obr. 5-9 jednoznačně vyplývá, že s rostoucí hodnotou skluzu roste i emise částic. Zároveň se projevuje jev, kdy především v první polovině testu emise nejprve pozvolna roste a v závěrečné fázi se až na výjimky ustálí na poměrně stabilních hodnotách. Proto bylo na základě naměřených dat rozhodnuto dále pokračovat se šestiminutovými testy a zpracovávat data pomocí průměrné hodnoty za posledních sto sekund.

Po vynesení průměrných hodnot do grafu, viz Obr. 5-10, vyplývá poměrně lineární závislost rostoucí emise s rostoucí hodnotou skluzu. Zanesením hodnot součinitele adheze byla v grafu rovněž vykreslena trakční křivka pro 0-2 % skluzu. Z této křivky je patrné, že v rámci dvou procent nebylo dosaženo bodu saturace. Testování v tomto rozsahu je rovněž velice časově náročné, proto bylo pro další testování zvoleno pouze osm hodnot skluzu (0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 a 2,0 %).



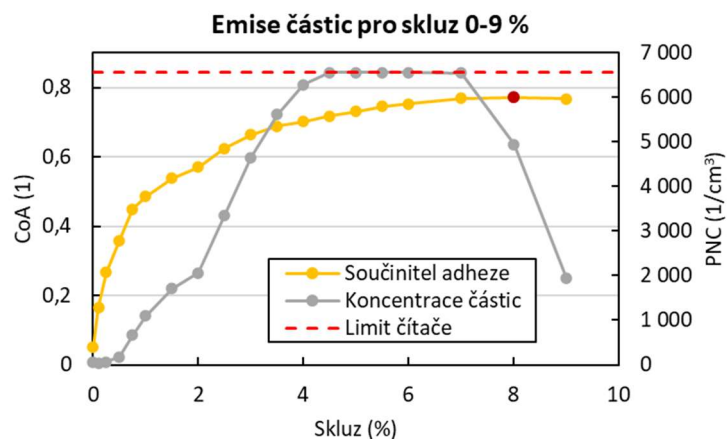
Obr. 5-10 – trakční křivka a závislost emise na skluzu pro 0-2 %

Testování pro těchto osm bodů bylo v následujícím experimentu zopakováno a bylo na něj navázáno až do hodnoty 9 % skluzu. Pro srovnání s předchozími výsledky je na Obr. 5-11 zobrazena část rozsahu pro 0-2 % skluzu. Nominální hodnoty mezi měřeními zde vykazují mírné odchylky, trendově však data odpovídají. Mírný rozdíl se vyskytuje v oblasti 0-0,5 % skluzu, kde dochází k pozvolnějšímu nárůstu emise s rostoucím skluzem.



Obr. 5-11 – trakční křivka a závislost emise na skluzu pro 0-2 % v rámci osmi bodů

Zbytek dat pro 0-9 % skluzu je zobrazen na Obr. 5-12. Zde byla hodnota skluzu postupně navyšována, dokud nebyl nalezen bod saturace při 8% skluzu. Z těchto dat vyplývá pokračující lineární nárůst emise s rostoucím skluzem do hodnoty 4% skluzu. Od této hodnoty bohužel naráží čítač částic *AirQuality* na limit z hlediska přetečení maximální měřené hodnoty koncentrace částic, která odpovídá  $6553 \text{ cm}^{-3}$ . Zajímavou skutečností je klesající emise částic s rostoucím skluzem pro hodnoty vyšší než 7 %. Postupně klesající emise částic pro vysoké hodnoty skluzu je v souladu se studií [19].

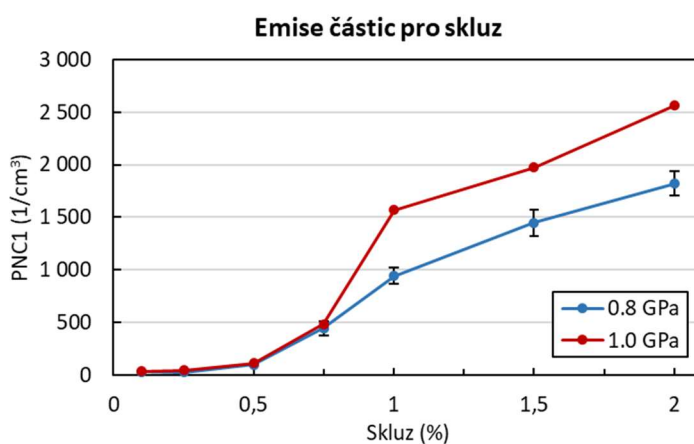


Obr. 5-12 – trakční křivka a závislost emise na 0-9 % skluzu

### Vliv skluzu a kontaktního tlaku na emisi částic

Další testování již probíhalo na discích vyrobených z kola a kolejnice. Experiment byl zaměřen na vyhodnocení závislosti emise částic na skluzu pro dvě hodnoty kontaktního tlaku, 0,8 GPa a 1,0 GPa dle *Hertzovy teorie*. Vzhledem k plánu testovat v budoucnu vliv aplikace produktů pro řízení tření při zatížení normálovou silou 2 kN, která odpovídá tlaku 0,8 GPa, byla celá závislost emise na skluzu za tohoto zatížení změřena třikrát, závislost s vyšším zatížením normálovou silou 3,1 kN, odpovídající tlaku 1,0 GPa, byla pro srovnání naměřena pouze jednou. Zároveň při tomto testování došlo k navýšení otáček ventilátoru do polohy P2 za účelem snížení rizika přetečení maximální hodnoty měřené čítačem částic. To bohužel znamená, že nominální hodnoty koncentrace částic nejsou přímo srovnatelné s předchozími výsledky.

Na grafu v Obr. 5-13 jsou vidět naměřené závislosti. Při zatížení silou 2 kN zde, podobně jako na discích z ložiskové oceli, dochází k postupnému nárůstu emise částic při rostoucím skluzu. Projev pomalejšího tempa nárůstu emise s rostoucím skluzem pro nízké hodnoty skluzu je zde však ještě patrnější. Zajímavý rozdíl vykazuje emise při zatížení silou 3,1 kN. Ta vedla ke zvýšení měřených hodnot koncentrace, ale výhradně pro hodnoty skluzu vyšší, než 0,75 %.



Obr. 5-13 – závislost emise na skluzu pro dvě hodnoty kontaktního tlaku na discích z kola a kolejnice

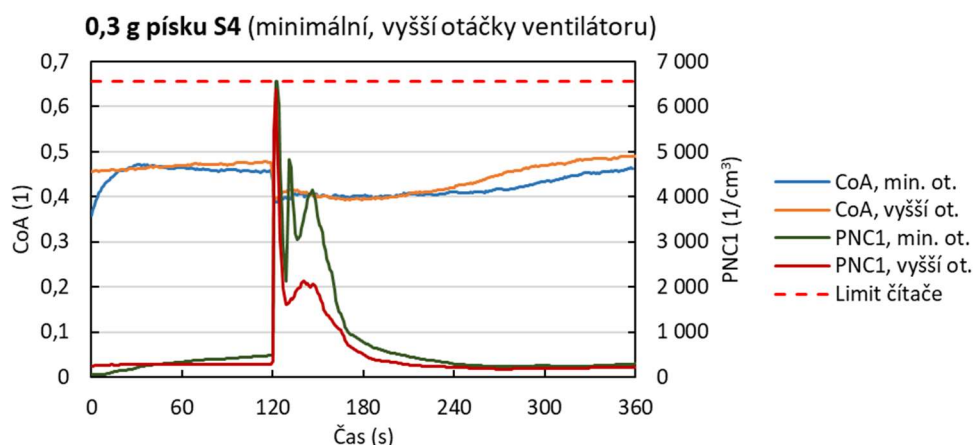
## 5.4 Vliv aplikace produktů na emisi částic

Jedním z hlavních cílů této práce je identifikovat potenciálně nebezpečné situace s kriticky vysokou hodnotou emise částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí a otestovat možné přístupy pro její redukci. Za účelem zodpovězení otázek spjatých s vytyčenými cíli byly testovány různé produkty pro řízení tření v rozhraní kolo-kolejnice. Obecným předpokladem před experimentálním ověřením bylo, že aplikace produktů pro obnovu nízkého součinitele tření, tedy nejčastěji pískování, povede ke zvýšení emise částic vlivem drčení částic aplikované látky a zvýšením míry opotřebení kontaktu. Naopak při aplikaci TOR produktů, jejichž hlavním účelem je redukce opotřebení, se dá očekávat opačný efekt. Aplikace TOR produktů může rovněž vést na vznik mazacího filmu, který může zachycovat částice opotřebení, jež by se bez něj mohly uvolňovat do ovzduší.

### Produkty pro obnovu nízké hodnoty součinitele tření

Z hlediska experimentů se zaměřením na emisi částic je testování produktů pro obnovu nízké hodnoty součinitele tření nejkomplikovanější. Při jejich aplikaci dochází k extrémnímu nárůstu emise částic v rámci krátkého časového úseku. Tyto momenty s vysokou hodnotou koncentrace částic v proudícím vzduchu představují problém pro čítače částic, které v tomto režimu nepracují tak spolehlivě, a často dochází k přetečení jejich maximální měřitelné hodnoty. Komplikovaná je i otázka ohledně aplikovaného množství produktu a jeho způsobu aplikace.

Před finálními experimenty pískování byly provedeny předběžné testy. Test spočíval v aplikaci 0,3 g písku S4 do suchého kontaktu v čase 120 s. Účelem testu bylo odhalit, zda dojde k přetečení limitu čítače částic. Jak je patrné z grafu na Obr. 5-14, při minimálních otáčkách ventilátoru s potenciometrem v poloze P1 došlo po dobu jedné sekundy i při takto nízké dávce písku k přetečení maximální hodnoty měřené čítačem. Při zvýšení otáček ventilátoru do polohy P3 zůstala maximální měřená hodnota těsně pod limitem. Koncentrace částic v tomto momentě vzrostla na hodnotu 6377,6 cm<sup>-3</sup>, což je přibližně 22násobek hodnoty před aplikací s koncentrací 286,9 cm<sup>-3</sup>.



Obr. 5-14 – úvodní testy pískování

Množství aplikovaného produktu pro další testy bylo zvoleno na základě srovnání reálného kontaktu kolo-kolejnice a jeho kontaktu ve zmenšeném měřítku simulovaném na dvoudiskovém zařízení. Za modelovou situací byl zvolen průjezd tramvaje zastávkou rychlostí 30 km·h<sup>-1</sup>. Vlivem kontaminace koleje spadáním listím dochází ke snížené adhezi a aktivaci pískování. Typické množství aplikovaného písku se u moderních systémů pro pískování pohybuje v rozmezí 300-1 200 g za 30 s [41] a typická velikost kola tramvaje je 650 mm [42].

Pro účely výpočtu byla zvolena střední hodnota aplikačního množství 700 g za 30 s. Na základě výpočtu rychlosti tramvaje (5.1) a obvodu kola (5.2) bylo odvozeno množství písku aplikované za jednu otáčku kola (5.4). Toto množství bylo následně přepočítáno na disk ve zmenšeném měřítku v poměru jejich velikostí (5.5). Výsledná dávka písku odpovídající jedné otáčce disku je přibližně 0,4 g.

$$v = \frac{30}{3,6} = 8,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.1)$$

$$O_k = \pi \cdot D_k = \pi \cdot 0,65 = 2,042 \text{ m} \quad (5.2)$$

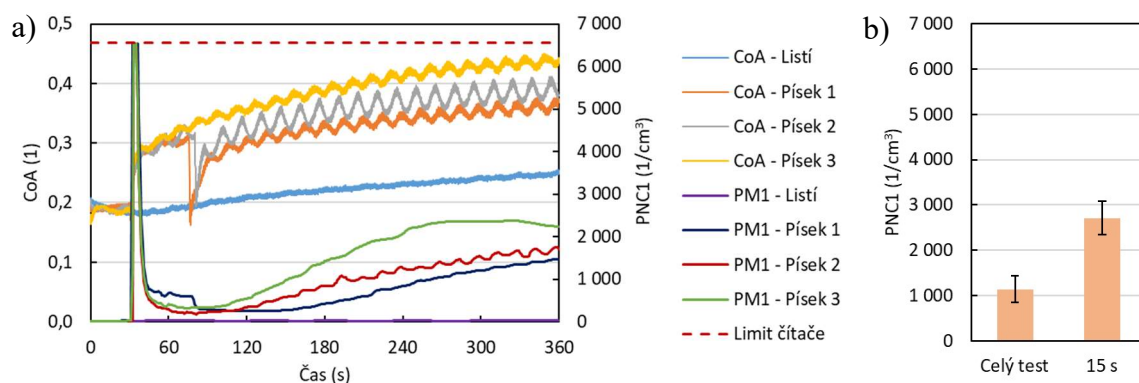
$$t_o = \frac{O_k}{v} = \frac{2,042}{8,33} = 0,245 \text{ s} \quad (5.3)$$

$$M_{1ok} = m_{30s} \cdot \frac{t_o}{30} = 700 \cdot \frac{0,245}{30} = 5,72 \text{ g} \quad (5.4)$$

$$M_{1od} = M_{1ok} \cdot \frac{D_d}{D_k} = 5,72 \cdot \frac{0,046}{0,65} = 0,405 \text{ g} \quad (5.5)$$

Následující testy pískování jsou již realizovány na discích z kola a kolejnice. Za účelem ověření účinku pískování byl před aplikací písku vytvořen mazací film z listů, který má za úkol simulovat situaci s nízkou adhezí. Před testy pískování byl mazací film tvořen vkládáním čerstvých javorových listů do kontaktu za podmínek čistého valení s nízkou rychlostí  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Po aplikaci listů vznikl na povrchu disků bezbarvý, mírně zmatňující film, viz Obr. 5-16 (b).

Po tvorbě mazacího filmu vznikl v kontaktu součinitel adheze s hodnotou přibližně 0,18. Pro srovnání, suchý kontakt za těchto podmínek vykazuje součinitele adheze o hodnotě přibližně 0,5. Na Obr. 5-15 jsou zobrazeny tři průběhy emise částic z testování aplikace jedné dávky 0,4 g písku S4 v čase 30 s a jeden zobrazující průběh součinitele adheze a emise částic při tvorbě mazacího filmu bez pískování. Z grafu je patrné, že v krátkém čase po aplikaci písku došlo k nárůstu součinitele adheze z původní hodnoty 0,18 na 0,29. V rámci delšího času pak také docházelo vlivem aplikace písku k rychlejší obnově adheze. V testech č. 1 a č. 2 rovněž došlo asi minutu po aplikaci písku k náhlému poklesu součinitele adheze, v případě všech testů je hodnota součinitele adheze nestabilní a její průběh kolísá.

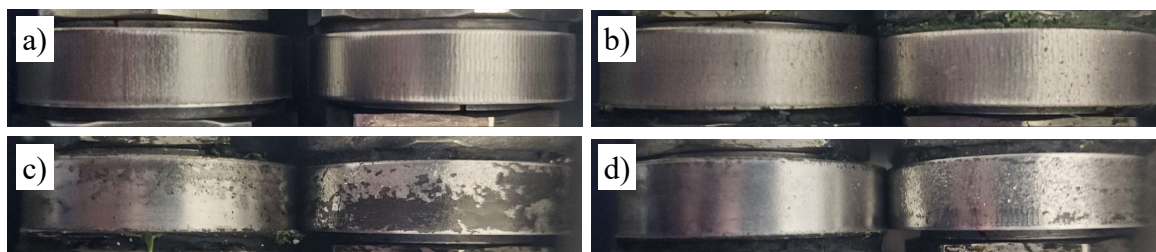


Obr. 5-15 – (a) průběhy emise částic a součinitele adheze při pískování, (b) vyhodnocené průměry

Z hlediska emise částic vzniká na začátku testu za podmínek nízkého tření vlivem mazacího listu velmi nízká emise částic s hodnotami na úrovni hodnoty emise částic v pozadí, viz Obr. 5-15 (a). V momentu aplikace písku dochází k náhlému nárůstu koncentrace částic na extrémní hodnoty, kdy dochází na dobu asi tří sekund k přetečení maximální hodnoty měřené čítačem částic. V následujících sekundách pak emise částic klesne na poměrně nízké hodnoty s koncentrací přibližně  $330 \text{ částic PM}_1 \text{ cm}^{-3}$ , opětovnému nárůstu emise s vysokými hodnotami v závěrečné části testu.

Na Obr. 5-15 (b) jsou vyhodnoceny průměrné hodnoty emise částic pro celou délku testu od aplikace písku a pro prvních 15 s po aplikaci. Průměrná hodnota v rámci celého testu dosahuje hodnoty koncentrace 1 141,7 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ , 15 s po aplikaci nabývá koncentrace hodnoty 2 711,1 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ . Suchý kontakt při stejném zatížení v rámci těchto experimentů vedl na koncentraci 731,0 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ .

Po skončení testu zůstala na povrchu disků černá vrstva, viz Obr. 5-16 (c). Vrstva je pravděpodobně směsí zbytku rozdrceného listí, písku a kovových částic opotřebení. Tato vrstva může být důvodem pro sníženou emisi částic krátce po aplikaci písku, kdy může docházet ke vzniku souvislého filmu, který může částečně poskytovat ochranu před opotřebením. Vznik souvislého filmu však není možné s jistotou potvrdit, jelikož za chodu testu není do komory vidět. Po očištění zbývající vrstvy je zejména na povrchu měkkého disku kola odhaleno výrazné poškození povrchu. Nerovnost měkkého povrchu také souvisí s vyšší mírou ulpívání tohoto filmu právě na disku kola.



Obr. 5-16 – povrch disků při testu – levý disk představuje kolejnici, pravý kolo, (a) kontakt před aplikací, (b) film z listí před testem, (c) vrstva po pískování, (d) poškození disků

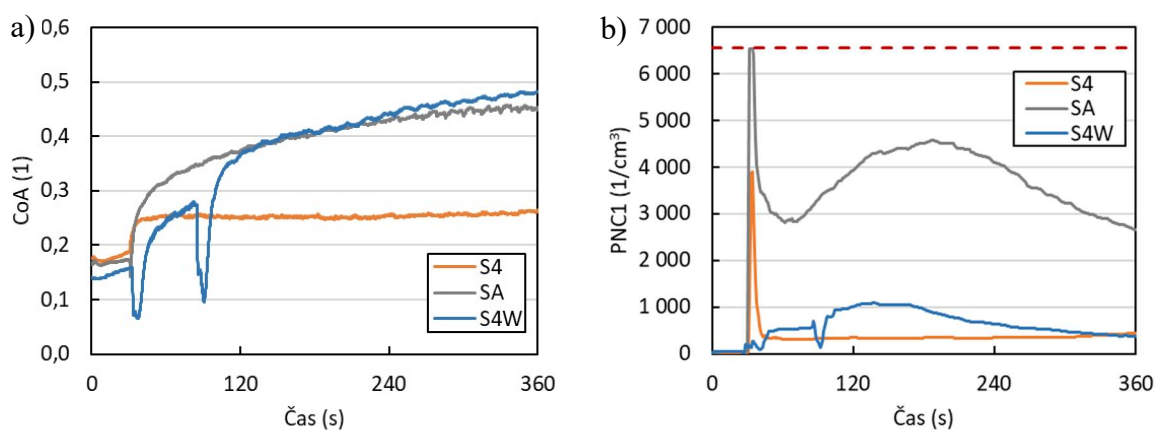
Poslední sada testů zaměřených na obnovu nízké adheze se zabývala možnými alternativami pískování a emisí částic při jejich používání. Za tímto účelem byla testována aplikace spékané aluminy a písku s vodou vůči aplikaci samotného písku S4. Jejich aplikace probíhala 30 s po začátku testu s mazacím filmem utvořeným vnášením listí do kontaktu pro simulaci podmínek nízké adheze s aplikačními parametry uvedenými viz Tab. 7. Za účelem redukce jevu přetečení limitu čítače částic byly testy provozovány s vyššími otáčkami ventilátoru odpovídající poloze P4.

Tab. 7 – aplikační dávky látek pro obnovu adheze

Označení	Látka	Dávka
S4	Písek S4	0,4 g
SA	Spékaná alumina	0,4 g
S4W	Písek S4 + voda	0,4 g + 1 ml

Naměřená data na Obr. 5-17 vykazují zásadní rozdíly v chování všech testovaných produktů, a to jak z hlediska emise částic, tak schopnosti zvyšovat nízkou hodnotu součinitele adheze. Z provedených testů bylo dosaženo nejlepší obnovy adheze použitím spékané aluminu. Pět sekund po její aplikaci došlo ke zvýšení součinitele adheze z hodnoty 0,17 na 0,25 a ve zbytku testu pokračovala ve stabilním růstu a obnově na hodnotu 0,46 během 330 s. Ve srovnání s aluminou zde aplikace písku vedla k podstatně menšímu účinku s nárůstem hodnoty součinitele adheze z 0,18 na 0,25 během 5 s, ale zanedbatelným nárůstem ve zbytku testu, kdy zůstala hodnota součinitele adheze téměř konstantní. Zajímavý průběh adheze vykazovala aplikace písku s vodou. Zde došlo v prvních sekundách po aplikaci k propadu adheze z hodnoty 0,16 na 0,07, který byl následován poměrně strmým nárůstem hodnoty jejího součinitele. V závěru testu bylo dosaženo hodnoty 0,48, v průběhu testu však nebyl její nárůst zcela stabilní.

Testované produkty vykazují odlišné chování i z hlediska emise částic. Jak je patrné z výsledků na Obr. 5-17 (b), aplikace SA vedla ke vzniku nejvyšších hodnot koncentrace částic, a je to také jediný produkt, který po dobu tří sekund vedl na přetečení limitu čítače. I ve zbytku experimentu zde vznikaly vysoké hodnoty koncentrace částic. Pro srovnání byly provedeny tři referenční testy suchého kontaktu, při jehož provozu docházelo ke vzniku koncentrace 631,8 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$  se směrodatnou odchylkou 24,3. Průměrná hodnota emise částic od momentu aplikace SA do skončení testu byla 3 722,0 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ . Naopak nejnižších hodnot bylo naměřeno při aplikaci písku s průměrnou hodnotou 390,4 a maximem naměřeným v momentě aplikace o hodnotě 3 887,7 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ . Zajímavého efektu bylo dosaženo při aplikaci písku s vodou, kdy v momentě aplikace nedocházelo k typickému extrémnímu nárůstu emise. Ve zbytku testu byla naměřena průměrná koncentrace 648,9 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ .



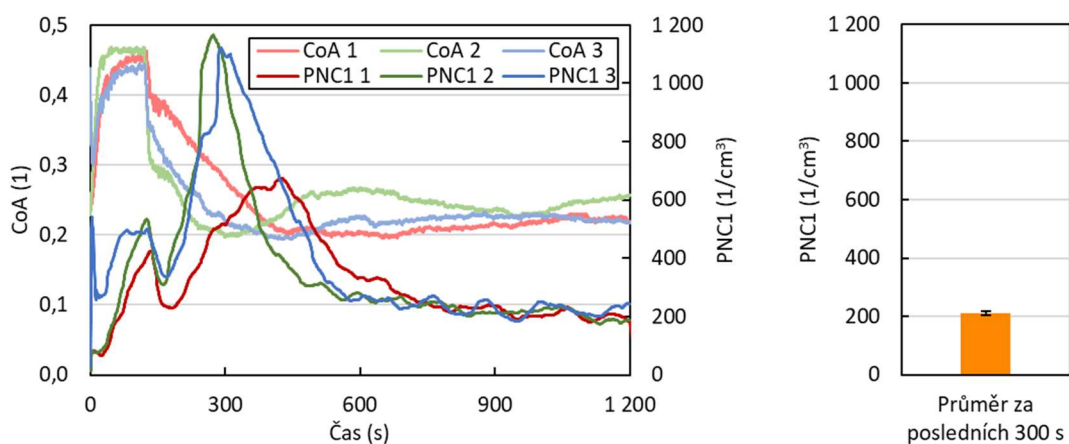
Obr. 5-17 – průběhy (a) součinitele adheze a (b) koncentrace částic při testování alternativ pískování

## TOR produkty

Využití TOR produktů se nabízí jako jeden z možných přístupů redukce emise částic. Jejich použití může vést na redukci opotřebení kontaktních povrchů a zároveň vedou na vznik mazačím filmu, který může zachycovat částice opotřebení. V rámci této práce bylo testováno pět produktů – jeden tuhý, dva na bázi vody a dva na bázi oleje.

Prvním testovaným produktem byl tuhý TOR produkt určený k redukci opotřebení a zamezení vzniku vlnkovitosti díky pozitivní třecí charakteristice. Aplikace tohoto produktu probíhala za chodu experimentu přitlačením vůči jednomu z disků. Přítlačná síla byla nastavena na 5,4 N a k jejímu vyvození došlo v čase 120 s. Do té doby byla testovaná tyčinka prisunuta co nejbližší k disku, proto se nedá vyloučit, že v úvodní části experimentu došlo vlivem vibrací k jejímu posunutí a kontaktu s diskem. Tomu by odpovídaly i mírně nižší hodnoty součinitele adheze před začátkem aplikace, kdy nabýval hodnot přibližně 0,45, ve srovnání s typickou hodnotou suchého kontaktu okolo 0,5.

Průběhy součinitele adheze a emise částic jsou zobrazeny na Obr. 5-18. V momentu aplikace následně součinitel adheze nejprve okamžitě klesl, následně v rámci dalších několika minut pokračoval v pozvolném klesání až na hodnotu přibližně 0,22 kde došlo k jeho stabilizaci. Z hlediska emise částic od aplikace produktu nejprve koncentrace částic na cca 50 s klesala, načež začala výrazně růst až na 1 200 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ . Po dosažení tohoto maxima emise klesala, dokud se v rámci posledních 300 s neustálila na koncentraci 210,9 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ . Pro srovnání byla v rámci tohoto testování kontrolována hodnota emise částic bez aplikace produktu, která vedla na typické hodnoty přibližně 700 částic  $\text{PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ .



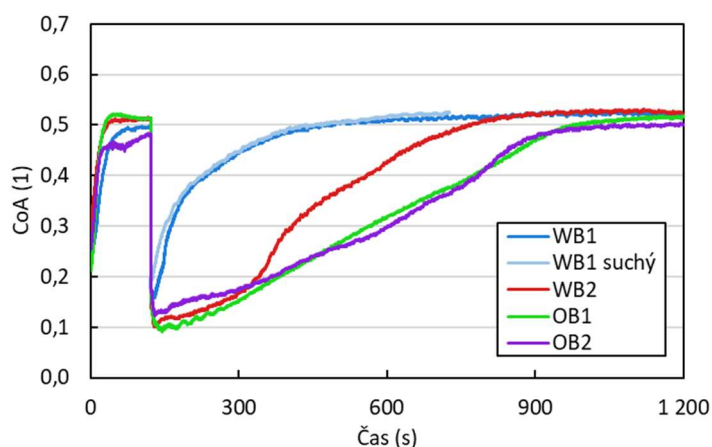
Obr. 5-18 – průběh emise částic a součinitele adheze při aplikaci tuhého TOR produktu

Dalšími zkoumanými produkty byly TOR produkty na vodní a olejové bázi. Tyto produkty byly do kontaktu aplikovány pomocí laboratorní mikropipety. Aplikační dávky produktů byly určeny na základě úvodních testů, kde byla snaha dosáhnout podobné retentivity a jsou uvedeny v Tab. 8. Zejména v případě produktu WB1 však byly omezeny schopností mikropipety aplikovat nízké množství. Při menší dávce než 10  $\mu\text{l}$  docházelo při aplikaci WB1 vlivem vysokého povrchového napětí této látky ke tvorbě kapičky, která ulpěla na špičce aplikačního nástavce, a nepadla do kontaktu. Proto bylo aplikováno 15  $\mu\text{l}$  produktů na vodní bázi a 5  $\mu\text{l}$  produktů na olejové bázi pro jejich vyšší účinnost a retentivitu.

Tab. 8 – aplikační dávky TOR produktů

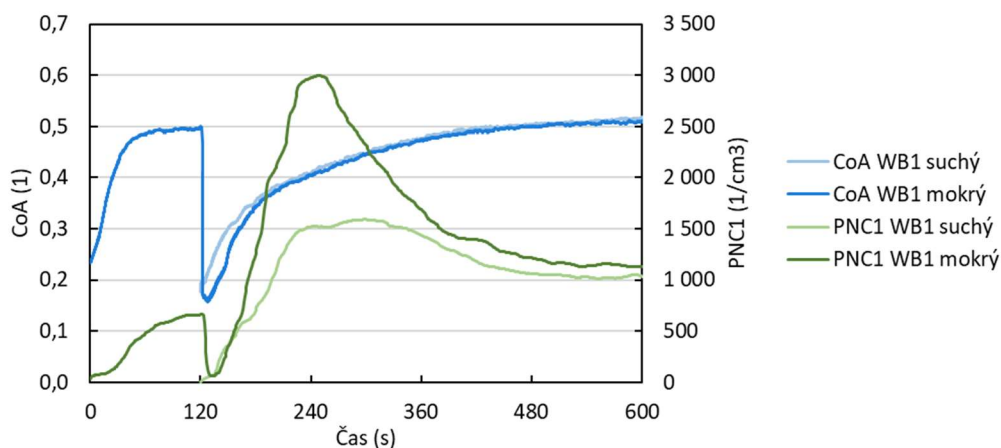
Označení	Typ	Dávka
WB1	Vodní TOR	15 $\mu\text{l}$
WB2	Vodní TOR	15 $\mu\text{l}$
OB1	Olejový TOR	5 $\mu\text{l}$
OB2	Olejový TOR	5 $\mu\text{l}$

Získaná data jsou na Obr. 5-19. Z grafu je patrné, že produkty na bázi oleje vykazují i přes nižší dávku delší retentivitu a stabilnější účinek. Naopak WB1 vykazuje nejkratší retentivitu. U tohoto produktu byl rovněž testován stav, kdy byl produkt nejprve aplikován do kontaktu, rozprostřen po povrchu disků pár otáčkami zařízení s nízkou obvodovou rychlostí a kontaktním tlakem, a následně byl po dobu 10 minut v klidu, aby uschnul. Na Obr. 5-19 jsou pak data z měření suchého filmu WB1 posunuta o 120 sekund, aby odpovídala momentu aplikace ostatních produktů. Z naměřených závislostí se zdá, že produkt poskytuje shodné třecí vlastnosti za mokra i za sucha.



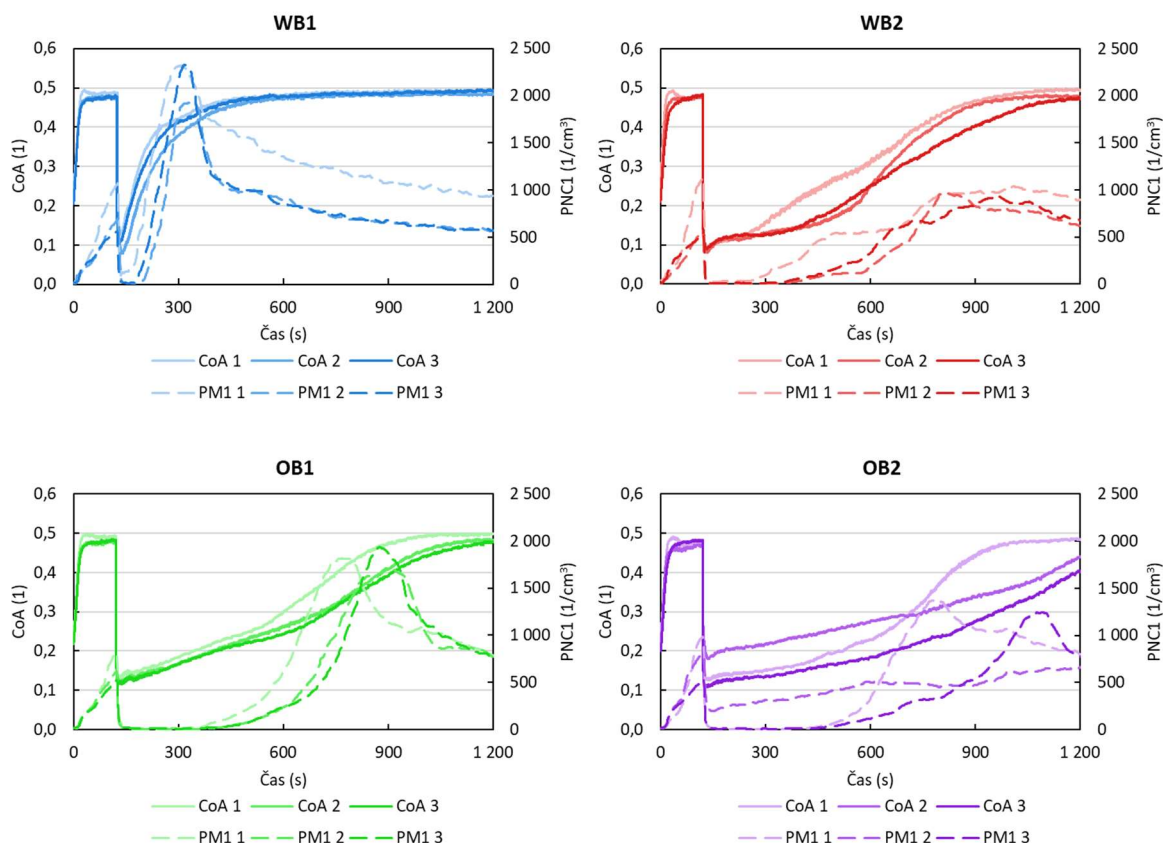
Obr. 5-19 – retentivita produktů na bázi vody a oleje

Při srovnání testů produktu WB1 se suchým a mokrým filmem z hlediska emise částic pak vyplývá zajímavý projev mokrého filmu, kdy ve srovnání se suchým přibližně dvě minuty po aplikaci dochází k výraznému nárůstu koncentrace částic. I v případě zaschlého filmu zde vzniká maximum, dosahuje však pouze přibližně poloviční hodnoty. Obě tyto hodnoty jednoznačně překračují hodnoty suchého kontaktu, při jehož provozu za těchto podmínek dochází k emisi s koncentrací přibližně  $650 \text{ částic PM}_{10} \text{ cm}^{-3}$ .



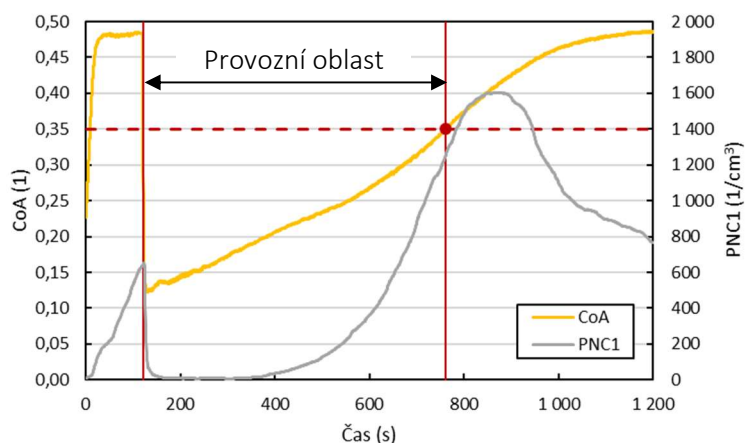
Obr. 5-20 – srovnání emise části suchého a mokrého filmu produktu WB1

V následující fázi již byly tyto produkty zkoumány v rámci 20minutových testů se třemi opakováními. Výsledné průběhy jsou zobrazeny na Obr. 5-21. Měřená data jsou poměrně spolehlivá a vykazují relativně dobrou opakovatelnost. Při aplikaci každého z produktů nejprve dochází k redukcii emise částic. Následně, v oblasti s postupným odbouráváním mazacího filmu a růstem součinitele adheze, dochází k nárůstu emise, která zpravidla nabývá maxima těsně před vyhladověním kontaktu a obnovením původní hodnoty součinitele adheze.



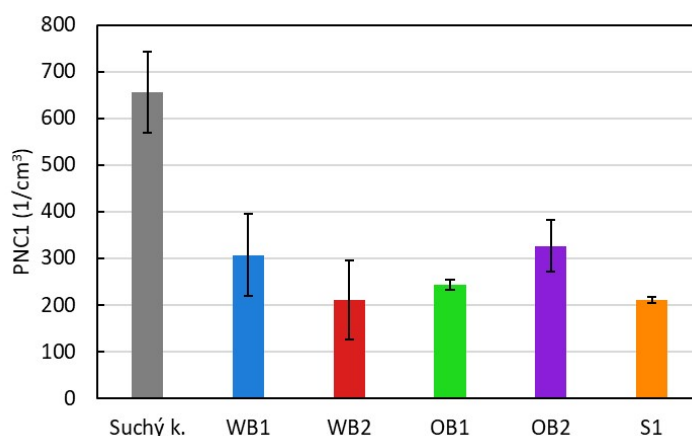
Obr. 5-21 – průběhy emise a součinitele adheze testovaných TOR produktů

Pro přehlednější srovnání testovaných produktů z hlediska vlivu částic byly vypočteny průměrné hodnoty emise částic v rámci provozní oblasti z hlediska adheze se střední hodnotou tření. Tato oblast, vyznačená na Obr. 5-22, pokrývá dobu od aplikace produktu po dosažení součinitele adheze o hodnotě 0,35. Ze stejného časového úseku je následně vypočtena průměrná hodnota emise částic. Tento postup byl zopakován pro každé měření individuálně.



Obr. 5-22 – oblast pro vyhodnocení průměrné hodnoty emise TOR produktů

Na základě provedených experimentů a vyhodnocených dat je možné vzájemně srovnat vliv aplikace TOR produktů na emisi částic ze simulovaného kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Z vyhodnocených dat plyne, že vhodnou aplikací TOR produktů je možné dosáhnout redukce emise částic. Z otestovaných produktů vedly na největší redukci emise částic tuhý produkt S1 a modifikátor tření na vodní bázi WB2. Při jejich aplikaci bylo ve srovnání se suchým kontaktem dosaženo redukce o 67,8 %. Nejnižší redukce emise částic bylo naopak dosaženo aplikací produktu OB2 na olejové bázi, který dosáhl redukce koncentrace o 50,3 %. Konkrétní výsledné hodnoty ostatních produktů jsou uvedeny v tabulce ve vložené příloze A. Přestože vedly všechny testy v rámci provozního intervalu na snížení průměrné hodnoty měřené koncentrace částic  $PM_{10}$ , je důležité brát v úvahu i zvýšenou koncentraci při hladovění kontaktu, která byla popsána výše.



Obr. 5-23 – srovnání vlivu TOR produktů na emisi částic

### Metodika pro srovnávání TOR produktů z hlediska vlivu na emisi částic

Na Obr. 5-24 je schéma navrženého postupu experimentálního srovnávání TOR produktů z hlediska jejich vlivu na emisi částic. Pomocí tohoto postupu je možné hodnotit tuhé a tekuté látky. Výsledkem experimentu je jedna hodnota koncentrace částic, díky které je možné přehledně produkty srovnávat.

Prvním krokem je záběh. Před začátkem testování je nutné dosáhnout dobrého zaběhnutí kontaktních povrchů, v opačném případě se chová kontakt nevyzpytatelně. U zaběhnutých disků zpravidla dochází ke stabilizaci emise i adheze v kontaktu po deseti minutách záběhu při zatížení normálovou silou 2 kN a 1% skluzem. U nových disků může záběh trvat déle než hodinu, a je nutné kontrolovat stav kontaktních povrchů, které musí vykazovat rovnoměrnou míru opotřebení, kdy dochází k rovnoměrnému rozložení napětí v kontaktu.

Před každým dílčím testem je následně nezbytné vyčistit testovací komoru a povrchy disků. Čištění komory je provedeno vysavačem se zúženou hubicí důkladným vysátím zbylých částic ze všech povrchů komory. Disky jsou čištěny papírovým ubrouskem, dokud ubrousek po vyčištění nezůstává nezbarvený. Po vyčištění je možné provést experiment.

Posledním krokem je analýza dat. Vzhledem ke snaze srovnávat produkty na základě jejich chování v rámci provozních parametrů jsou data vyhodnocována pokaždé z jiného časového úseku. Testování suchého kontaktu probíhá v rámci 6minutových experimentů, kde jsou hodnoceny průměrné hodnoty emise částic za posledních 100 s testu, kdy zpravidla dochází ke stabilizaci měřené koncentrace částic. Tyto testy následně slouží pro určení referenční hodnoty pro srovnání schopnosti produktů redukovat emisi částic.

V rámci testování TOR produktů trvá delší dobu, než dojde ke stabilizaci emise částic, proto jsou tyto testy 20minutové. Před aplikací produktu je vhodné provést kontrolní část testu se suchým kontaktem, která může ověřit, zda nedošlo v rámci čištění k chybě, která by se projevila neobvyklým chováním z hlediska adheze nebo emise částic. Doporučená doba kontrolní části testu je 120 sekund. Po skončení kontrolní části dochází k aplikaci produktu.

Vyhodnocení vlivu na emisi částic tuhých produktů probíhá vypočtením průměrné hodnoty koncentrace částic v proudícím vzduchu za posledních 300 sekund testu. Postup vyhodnocení dat po testování tekutých produktů je složitější kvůli různé retivitě testovaných produktů. Proto zde byl navržen postup, kdy se vyhodnocovaná oblast vztahuje k provozní oblasti z hlediska aplikace produktu, kdy je udržována střední hodnota součinitele adheze. Oblast pro vyhodnocení odpovídá rozsahu od momentu aplikace po dosažení součinitele adheze s hodnotou 0,35 pro testování s parametry zatížení normálovou silou 2 kN a 1 % skluzu.

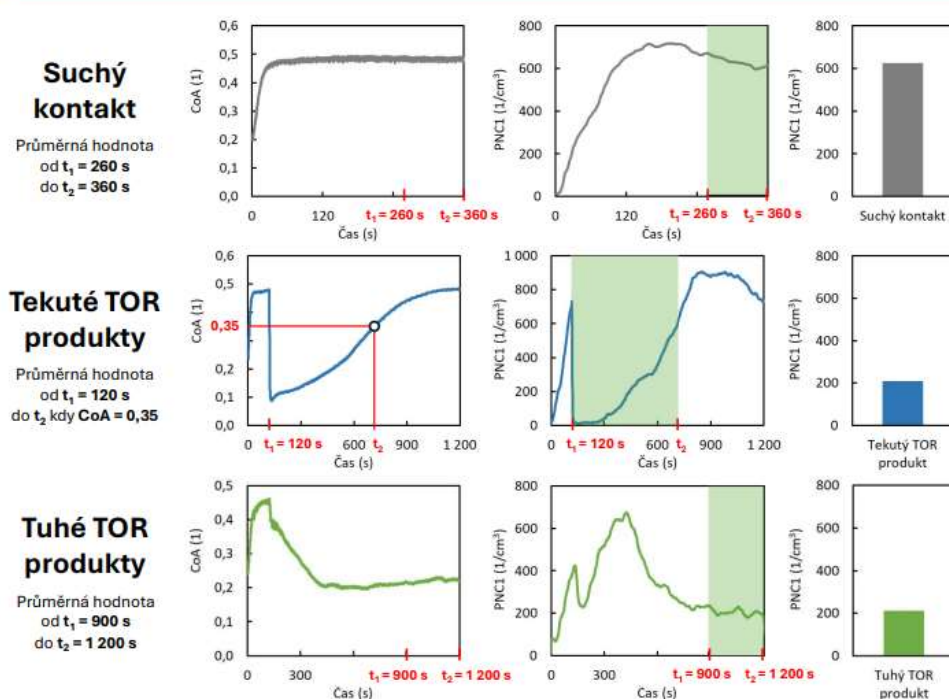
Tyto parametry jsou doporučené i pro případné další testy, jelikož je při jejich testování dosaženo dobré opakovatelnosti a kontakt se chová relativně předvídatelně. Zároveň byly parametry voleny tak, aby reprezentovaly provoz lehké kolejové dopravy, jejíž emisi částic je denně exponováno největší množství lidí. Před testováním jiných parametrů zatížení je nutné zopakovat testy zaměřené na stabilitu měření a opakovatelnost experimentu.

V příloze B je uveden návod k ovládání zařízení a postup pro měření emise částic na dvoudiskovém zařízení, včetně analýzy dat podle uvedené metodiky.

# METODIKA PRO SROVNÁVÁNÍ TOR PRODUKTŮ S OHLEDEM NA EMISI ČÁSTIC



## ANALÝZA PRŮBĚHŮ



Obr. 5-24 – metodika pro srovnávání TOR produktů z hlediska vlivu na emisi částic

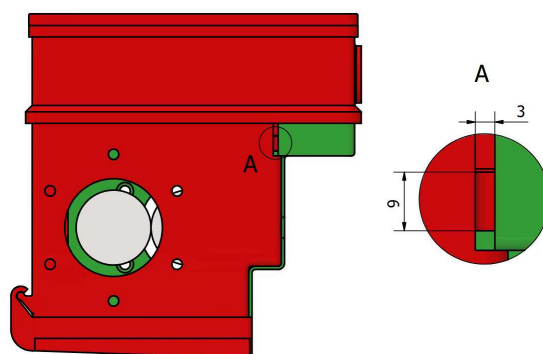
## 6 DISKUZE

### 6.1 Vývojová část

Ačkoliv se jedná o výzkumnou práci, pro dosažení jejích cílů bylo nutné provést několik úkonů vývojového charakteru. Ty se dají rozdělit do tří kategorií – úpravy testovacího zařízení, úpravy měřicího řetězce a návrh metodiky pro měření emise částic jako takové.

Konstrukčně nejsložitější činností v rámci řešení této práce byly úpravy testovací komory a návrh aplikátoru písku. Vyrobena testovací komora umožnila testování vlivu aplikace tekutých, sypkých a tuhých látek na emisi částic bez nutnosti pozastavit experiment nebo komoru otevřít. Výběr technologie výroby této komory významně ovlivnila možnost využít 3D tiskáren ve strojLABu VUT. Proto byly veškeré modifikované díly vyráběny právě touto metodou.

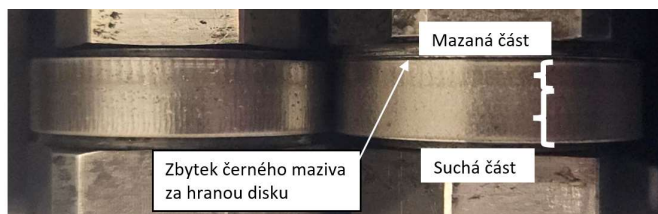
Ačkoliv jsou výrobky funkční, v případě dalšího rozsáhlejšího testování by bylo vhodné provést několik dalších úprav. V první řadě by bylo možné upravit geometrii komory v místě, kde se stýkají její dvě hlavní části, upevněné na ložiskové domky. Zde vznikla mezera 3x9 mm, která je zdrojem netěsnosti. Lepší těsnost by mohla následně vést na vyšší spolehlivost výsledků a menší kontaminaci laboratoře a jejího ovzduší.



Obr. 6-1 – netěsnost testovací komory

Další vhodnou úpravou by bylo upravit horní část komory tak, aby bylo umožněno posunout mikropipetu blíže ke kontaktu. Původní varianta adaptéru mikropipety byla navržena pro rozměry nástavce mikropipety s kapacitou 10 ml, zatímco pro testy TOR produktů byly použity kratší nástavce s kapacitou 0,2 ml. Aplikace z větší výšky vedla k občasným problémům, kdy nedošlo k aplikaci produktu do středu kontaktu a následný vznik nerovnoměrného třecího filmu.

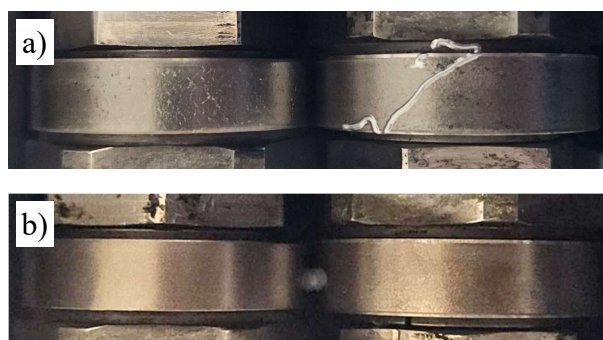
K takové zřejmě aplikaci došlo při druhém testu produktu OB2, viz Obr. 5-21. Na průběhu hodnoty součinitele adheze v rámci tohoto měření je vidět, že aplikace produktu zde vedla k menšímu propadu adheze a k menší redukci emise částic ve srovnání se zbývajícími dvěma testy. Špatnou aplikaci potvrzuje i kontrola kontaktu po provedení testu. Na Obr. 6-2 můžete vidět dva různé odstíny povrchu každého z disků. Při čištění se rovněž ukázalo, že po testu zbyla část produktu vytlačeného z kontaktu pouze na jedné straně, což indikuje, že na opačné straně povrchu nedošlo ke správné tvorbě mazacího filmu.



Obr. 6-2 – problém s mazáním

V rámci úvodních testů aplikace tekutých produktů byla nesprávná aplikace poměrně běžná. Na Obr. 6-3 (a) je ukázka špatné aplikace, kdy část produktu minula kontakt. Způsobeno to bylo pravděpodobně vlivem rychle proudícího vzduchu v komoře a velkou mezerou mezi koncovkou mikropipety a kontaktem, kdy mohlo dojít k odfouknutí části aplikovaného produktu mimo kontakt.

Proto byla pro finální testy TOR produktů použita upravená varianta unašeče mikropipety, kde byl tento jev minimalizován posunutím mikropipety blíže ke kontaktu a zvýšením tuhosti jejího uložení. Na Obr. 6-3 (b) je ukázka aplikace po zavedení této úpravy. Spolehlivost aplikace byla testována v rámci pěti pokusů, kdy došlo pokaždé ke správné aplikaci doprostřed kontaktu. I přes tuto snahu však zřejmě došlo při druhém měření produktu OB2 k chybě.



Obr. 6-3 – (a) špatná, (b) správná aplikace produktu

## Měřicí řetězec

Největším zdrojem nejistoty z hlediska provedených experimentů jsou použité čítače částic. Ve srovnání s ostatními vědeckými publikacemi, kde bylo zpravidla využito počítadel zkondenzovaných částic CPC, která jsou běžně schopná detekce částic větších než 10 nm používá tato práce optické čítače fungující na principu rozptylu světla, které rozlišují částice větší než 0,3  $\mu\text{m}$  a zároveň poskytují nižší přesnost. Rozhodnutí pokračovat s těmito snímači bylo dáno nižšími náklady na pořízení. Zároveň se v případě této práce jedná o pilotní studii, která si klade za cíl především identifikovat potenciálně rizikové situace z hlediska emise částic a možné přístupy pro její redukci. I přes tato omezení však bylo v rámci testování dosaženo poměrně dobré opakovatelnosti, a to zejména při použití zařízení *AirQuality*.

Rozhodnutí pokračovat s tímto snímačem pro finální část experimentů bylo kromě lepší spojitosti měřených dat a obecně vyšší přesností učiněno na základě jeho snazšího ovládní a možnosti úprav ovládacího programu. V konečném důsledku poskytovalo měření na zařízení *AirQuality* dobré výsledky, zařízení vykazovalo dobrou spolehlivost a umožnilo jednoduchou práci s měřenými daty.

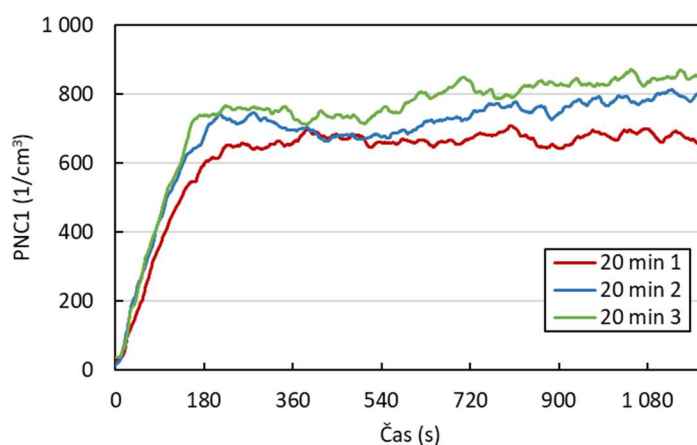
## Metodika

Jedním z hlavních cílů této práce bylo najít vhodný způsob pro testování emise částic z kontaktu kolo-kolejnice, a ověření potenciálních přístupů pro její redukci. Proto byl na základě provedených experimentů navržen postup pro srovnávání vlivu TOR produktů na emisi částic, protože právě tyto produkty mohou být jedním z hlavních řešení vysoké emise částic.

Navržený postup na Obr. 5-24 umožňuje přehledně srovnávat TOR produkty z hlediska jejich vlivu na emisi částic pomocí uceleného postupu přípravy a provedení experimentu a vyhodnocení naměřených dat. Navržené testy a jejich parametry z hlediska délky experimentu a zatížení jsou uzpůsobené chování dvoudiskového zařízení VUT. Použití tohoto postupu proto na jiných zařízeních bude pravděpodobně vykazovat odlišné výsledky.

Při testech bylo využito čítače částic s relativně malou rozlišovací schopností částic větších než 0,3  $\mu\text{m}$ . Dostupná literatura však udává, že největší množství částic uvolňovaných z kontaktu mezi kolem a kolejnici dosahuje menších rozměrů [19]. Proto použití jiného zařízení pravděpodobně povede na měření odlišných výsledků. Obecně by však i na základě měření částic třídy  $\text{PM}_1$  mělo být možné srovnat jednotlivé situace z hlediska emise částic.

Posledním zdrojem nejistoty je u navržené metodiky délka experimentů. Přestože bylo obecně vzato měření poměrně spolehlivé a v rámci dílčích experimentů bylo dosaženo dobré opakovatelnosti, vznikaly občas situace s odlišnými hodnotami emise částic. V rámci řešení práce byla snaha nalézt takovou dobu, za kterou dojde ke stabilizaci emise částic z kontaktu, a vzniku konstantní hodnoty koncentrace částic v proudícím vzduchu. U většiny testů, jak můžete vidět i na Obr. 6-4, zdánlivě došlo ke stabilizaci v rámci přibližně tří minut, proto bylo rozhodnuto pro šestiminutové experimenty s analýzou průměrných hodnot během posledních sto sekund.

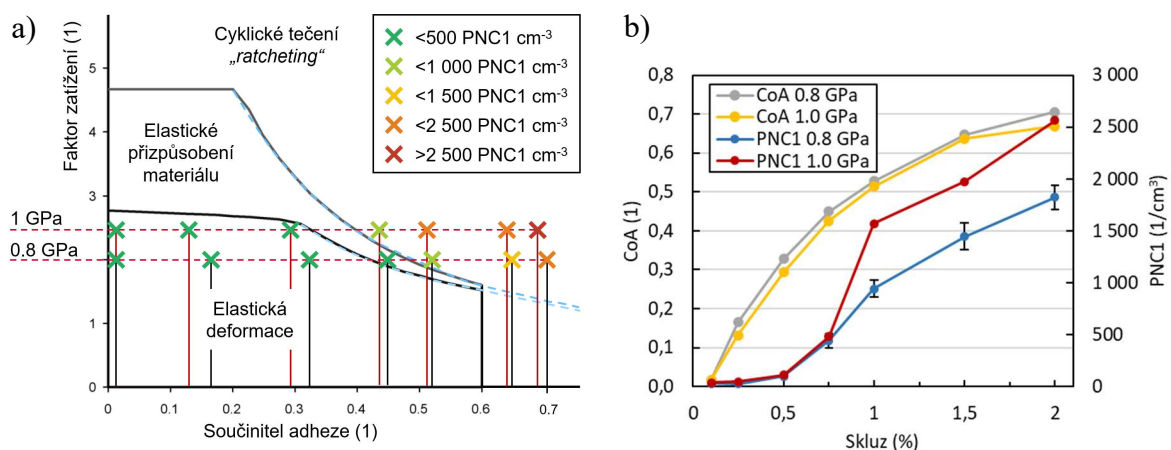


Obr. 6-4 – délka experimentů – 20minutové testy

## 6.2 Výzkumná část

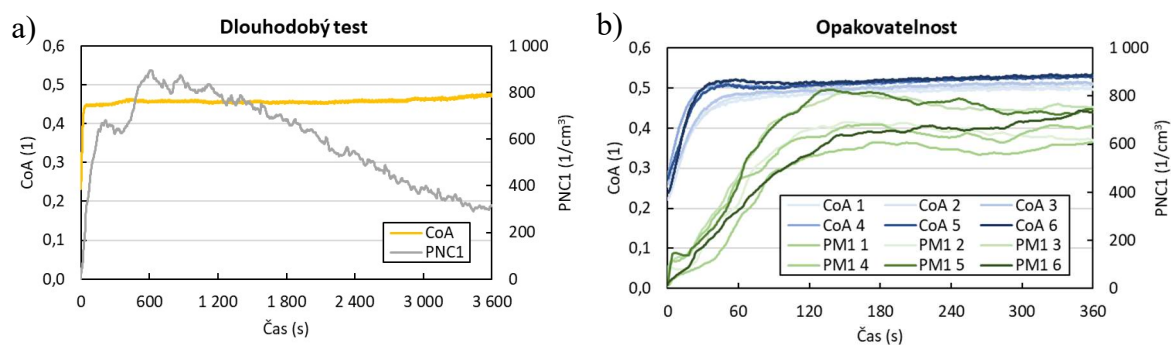
### Hypotéza H1

První hypotéza byla zaměřená na emisi částic ze suchého kontaktu mezi kolem a kolejnicí, a hovořila o souvislosti emise částic s oblastí opotřebení na *Shakedown mapě*. Na Obr. 6-5 je zobrazena Shakedown mapa [10], do které byly vyneseny body odpovídající testovanému zatížení a skluzu a barva značek vyjadřuje emisi z hlediska měřené koncentrace částic  $PM_{10}$ . Z tohoto grafu je zřejmé, že zatížení odpovídající oblasti elastické deformace vede k nízké emisi částic. Při vyšším zatížení normálovou silou a vyšších hodnotách součinitele adheze pak dochází ke vzniku vyšší koncentrace částic. Nejvyšší koncentrace částic byla naměřena při zatížení normálovou silou 3 100 N, kdy v kontaktu dle *Hertzovy teorie* vzniká maximální tlak o hodnotě 1,0 GPa a 2% skluzu. Z měřených zatížení odpovídá toto zatížení bodu nejvíce vzdálenému od hranice oblasti elastického přizpůsobení materiálu. V rámci dalších testů by bylo vhodné ověřit, zda tento trend platí i v případě podmínek vyššího kontaktního tlaku. Pro zvolený rozsah kontaktního tlaku a skluzu, který odpovídá běžným provozním parametrům kontaktu mezi kolem a kolejnicí pro lehkou kolejovou dopravu, však výsledky experimentů odpovídají předpokladu. Proto hypotézu H1 přijímám.



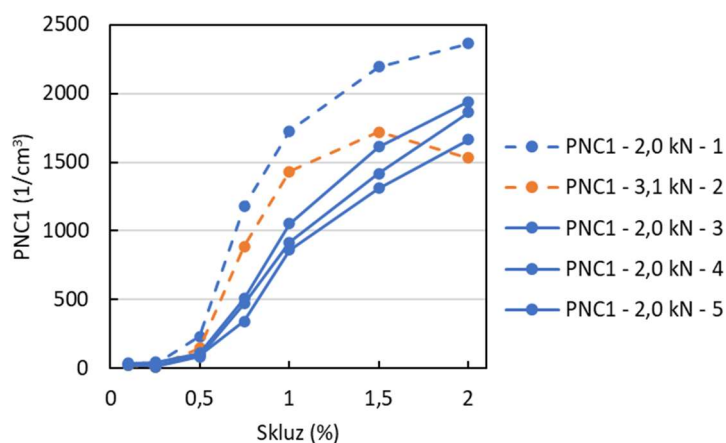
Obr. 6-5 – (a) Shakedown mapa s vynesnými body, (b) emise částic v závislosti na skluzu a zatížení

Jedním z hlavních cílů experimentů suchého kontaktu bylo také zjistit jestli, a případně za jak dlouhou dobu dojde při provozu kontaktu ke stabilizaci emise částic z hlediska měřené koncentrace. Chování kontaktu z hlediska emise však zřejmě není tak jednoduché. Ačkoliv emise zpravidla vykazuje poměrně dobrou opakovatelnost, kdy křivka následuje v rámci několika testů za stejných podmínek stejný průběh, při setrvání za těchto podmínek nedochází v rámci první hodiny zatížení ke stabilizaci její hodnoty. Pro srovnání jsou na Obr. 6-6 zobrazeny dva grafy – graf (a) s hodinovým testem, ve kterém emise částic po uplynutí 10 minut pozvolna klesala až do skončení experimentu. Tento graf reprezentuje nestabilitu emise částic v závislosti na délce experimentu. Na Obr. 6-6 (b) je zobrazeno šest 6minutových testů, kde však průběh emise částic následuje relativně stabilní trend.



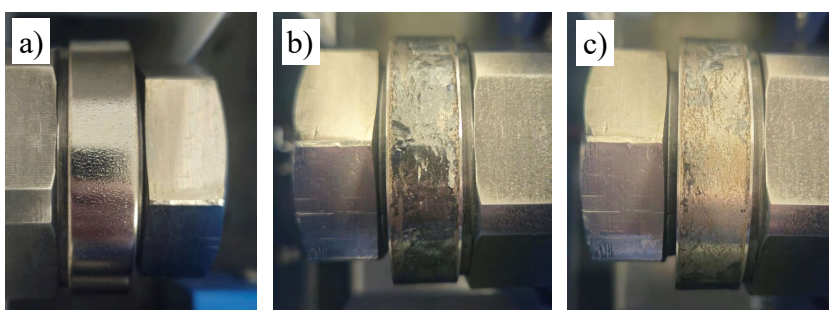
Obr. 6-6 – (a) dlouhodobý test, (b) opakovatelnost

Za nestabilitou dlouhého časového testu může stát několik faktorů. Prvním z nich je možný efekt deformačního zpevnění povrchů vlivem cyklického zatěžování. Tomu, že v kontaktu dochází k tomuto jevu, by odpovídala i data z měření suchého kontaktu při vyšším kontaktním tlaku. Data z prvních dvou testů na Obr. 6-7 vykazovala vyšší než běžné hodnoty emise částic. Po provedení testu s vyšším zatížením s kontaktním tlakem 1,0 GPa dle *Hertzovy teorie* však již další testy vykazovaly stabilnější hodnoty. Ověření, zda v kontaktu dochází k deformačnímu zpevnění, by mohlo být provedeno testem tvrdosti před a po provedení podobného experimentu.



Obr. 6-7 – snížení hodnot emise částic po provedení testu s vyšším kontaktním tlakem

Dalším možným důvodem pro klesající emisi částic v rámci dlouhodobého časového testu je zoxidovaná vrstva opotřebení na povrchu disku z materiálu kolejnice, zobrazená viz Obr. 6-8 (b). Ačkoliv tato vrstva nadržuje na disku pevně, a lze ji snadno odstranit papírovým ubrouskem nebo vysavačem, viz Obr. 6-8 (b), v rámci skluzně-valivého pohybu může kontaktu poskytovat ochranu. V tomto případě se může jednat o zkreslení vlivem odlišné charakteristiky kontaktů na dvoudiskovém zařízení a kontaktem reálným, kde ke vzniku této vrstvy nedochází. Do budoucna by bylo vhodné provést experiment, kdy v rámci testu bude docházet k opakovanému rozběhu a zastavení kontaktu, což by mělo vést na odstranění této vrstvy. Zároveň by tak bylo možné otestovat i reálné chování kontaktu, který během jízdy nepracuje za podmínek konstantního zatížení, skluzu ani rychlosti valení.



Obr. 6-8 – povrch po dlouhodobém testu (a) disk kola, (b) disk kolejnice, (c) po očištění vysavačem

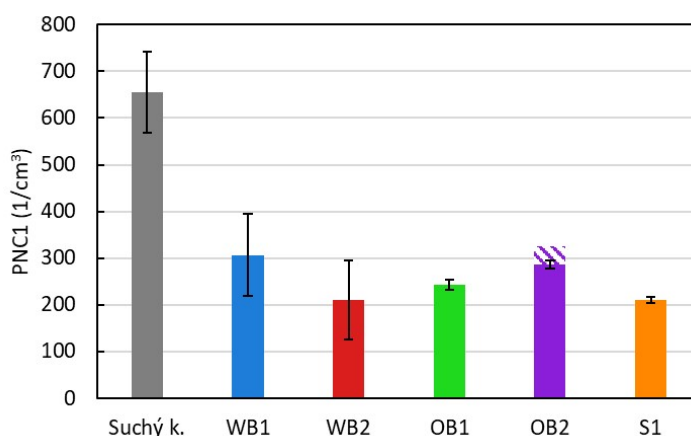
Alternativním vysvětlením postupného poklesu emise částic v rámci dlouhého časového testu může být postupné vyhlazení povrchu do stavu, kdy se na něm nachází jen malé množství nerovností, a díky čemuž dochází k lepšímu rozložení tlaku. Tomu by odpovídal i povrch disku kola na Obr. 6-8 (a), který po skončení testu dosáhl kovového lesku bez nutnosti čištění.

Posledním možným vysvětlením postupně klesající emise je zahřívání kontaktu, což může vést na rostoucí houževnatost materiálu. Hřídele, na kterých jsou disky uloženy, jsou však chlazeny vodou o teplotě 20 °C. Zároveň je ve spojitosti s délkou trvání tohoto jevu nepravděpodobné, že by bylo na povrchu disků dosaženo dostatečně vysoké teploty pro dosažení tohoto efektu. V rámci průvodních testů bylo zahřívání disků kontrolováno pomocí termočlánku typu K a v rámci devíti 12minutových testů nikdy nedošlo k ohřevu na teplotu vyšší než 30,2 °C, přičemž teplota v laboratoři byla 22,8 °C.

## Hypotéza H2

Druhá hypotéza predikovala redukcí emise částic po aplikaci TOR produktů vlivem redukce opotřebení kontaktních povrchů. Nejvýraznější redukce byla očekávána při aplikaci tekutých látek, které vedou na tvorbu kapalinového filmu se schopností zachytit částice opotřebení. Na základě provedených testů se dá jednoznačně potvrdit, že vhodnou aplikací TOR produktů je možné dosáhnout redukce emise částic.

Překvapivým výsledkem je, že na sdíleném prvním místě bylo nejlepších výsledků z hlediska redukce emise částic dosaženo aplikací produktů WB2 na bázi vody a tuhého produktu S. Při testování produktů bylo ve všech případech dosaženo redukce emise částic s redukcí koncentrace naměřených částic PM<sub>1</sub> v rozsahu 50,3-67,8 %. Nejmenší redukce zde bylo dosaženo aplikací produktu OB2. Výsledky však s vysokou pravděpodobností byly ovlivněny chybnou aplikací v rámci testu 2. Na Obr. 6-9 je zobrazeno srovnání produktů po vyřazení zmíněného testu z výsledků, dle kterých bylo dosaženo redukce emise částic o 56,2 %.



Obr. 6-9 – srovnání produktů s upravenou hodnotou OB2

V reakci na publikaci [27], kde po aplikaci produktů na bázi vody došlo k extrémnímu nárůstu emise ultra jemných částic však druhá část hypotézy H2 hovoří o riziku tohoto růstu. Ve zmíněné studii autor uvádí, že se pravděpodobně jedná o částice vodní páry, čemuž by odpovídala i jejich velikost 10 nm. Tuto část hypotézy bohužel s použitým čítačem částic, který neumožňuje takto malé částice rozlišit, není možné ověřit.

Každopádně i v rámci této práce bylo při aplikaci velké řady TOR produktů pozorováno chování, kdy emise částic nejprve krátce po aplikaci produktu výrazně klesne, avšak při odbourávání produktu z kontaktu pozvolna roste s maximálními hodnotami koncentrace částic v momentě vyhladování kontaktu, kdy se hodnota součinitele adheze vrací na původní hodnotu odpovídající suchému kontaktu, viz Obr. 5-21. Maximální hodnoty koncentrace částic zde často přesahují koncentraci částic odpovídající suchému kontaktu.

U produktu WB1 by se dokonce dalo argumentovat, že vlivem jeho aplikace došlo k nárůstu emise částic. Využití tohoto produktu by zřejmě vedlo na redukci emise částic pouze v případě, že by se jednalo o chytrou aplikaci, která by udržovala tření v kontaktu na střední hodnotě, a nedocházelo by ke hladování mazacího filmu v kontaktu. Z naměřených dat vychází, že aby bylo dosaženo redukce emise částic by bylo nutné opakovat aplikaci nejpozději po 132 s. V tento moment v průměru poskytoval kontakt s aplikovaným WB1 součinitele adheze o hodnotě 0,37.

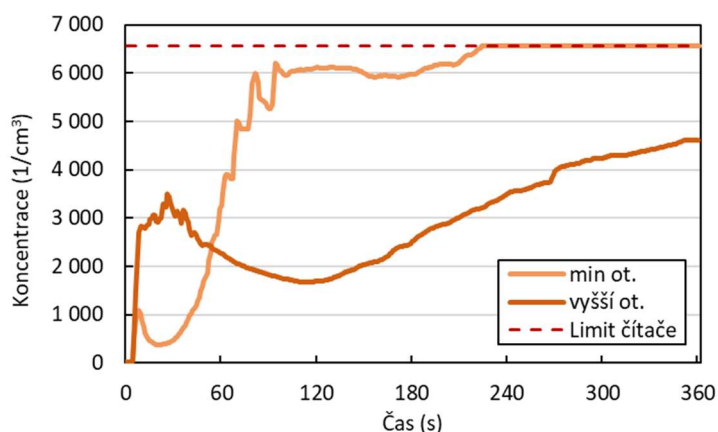
Při testování aplikace produktu WB1 docházelo ke vzniku velkého množství částic opotřebení, které se usazovaly v testovací komoře. Je možné, že tento produkt obsahuje vysoké množství tvrdých částic pro modifikaci tření, čemuž by odpovídala i poměrně rychlá obnova hodnoty součinitele adheze. Tyto částice mohou potenciálně vést na opotřebení kontaktu a vznik nerovností na kontaktních površích. V rámci následujících cyklů zatížení po odbourání mazacího filmu dochází vlivem těchto nerovností ke zvýšené koncentraci napětí vlivem jejich vzájemných kontaktů. Tato skutečnost pak může vést na zvýšené opotřebení a s ním spojenou vyšší emisi částic. Po určitém množství cyklů zatížení dochází k opětovnému zarovnání povrchů a emise částic se zpravidla vrací na typické hodnoty odpovídající suchému kontaktu.

Vhodnou aplikací TOR produktů je možné dosáhnout redukce emise částic. K největší redukci emise částic dochází krátce po aplikaci tekutých produktů, kdy se vlivem vzniklého mazacího filmu do ovzduší prakticky žádné částice z kontaktu neuvolňují. Uvolňování ultrajemných částic po aplikaci produktů na bázi vody nebylo s dostupným měřicím řetězcem možné ověřit. Získaná data tedy hypotézu H2 podporují s jistými výhradami, na základě získaných informací se však nedá jednoznačně potvrdit ani vyvrátit.

### **Hypotéza H3**

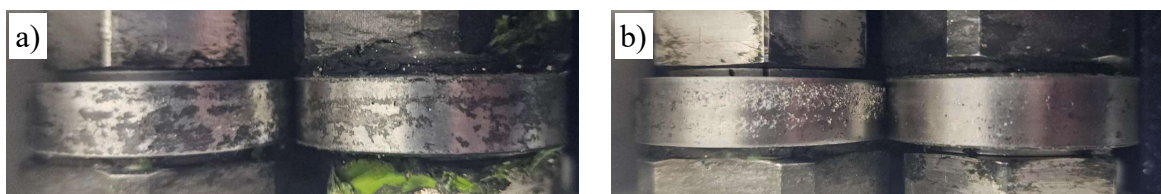
Poslední hypotéza byla zaměřena na aplikaci produktů pro obnovu nízké hodnoty součinitele adheze. Předpokladem bylo, že aplikací písku či jiné látky pro tento účel dojde k výraznému nárůstu emise částic. Z naměřených výsledků je patrné, že aplikace těchto látek jednoznačně vede k okamžitému vzrůstu emise částic. Ve velkém množství provedených testů v momentě aplikace písku docházelo k přetečení maximální hodnoty koncentrace částic měřené použitým čítačem.

Proto není z naměřených dat s jistotou možné říct, jak velkého nárůstu je reálně dosaženo. V rámci jednoho testu s nižší dávkou písku však nedošlo k přetečení limitu. Při tomto testu dosáhla koncentrace částic v krátkém čase po aplikaci písku 22násobku koncentrace částic ze suchého kontaktu před aplikací. V případě dalšího výzkumu více zaměřeného na pískování by bylo možné redukovat jev přetečení limitu čítače testováním při vyšších otáčkách ventilátoru. Tento postup byl ověřen při testování vysokých hodnot skluzu za podmínek suchého kontaktu, při nichž také docházelo k přetečení limitu. Jak lze vidět na Obr. 6-10, zvýšením otáček ventilátoru z minimální hodnoty odpovídající poloze P1 na potenciometru do polohy P3 zde došlo k potlačení nominálních měřených hodnot.



Obr. 6-10 – potlačení měřených hodnot koncentrace částic zvýšením otáček ventilátoru

Při testech na discích z kola a kolejnice docházelo ke zvýšení emise částic i několik minut po aplikaci. Po aplikaci písku jednoznačně docházelo k narušení povrchů. Podobně jako bylo vysvětleno výše v souvislosti s nárůstem emise po aplikaci produktu WB1, zde pravděpodobně docházelo ke koncentraci napětí na nerovném povrchu poškozených disků, která vede k vyšší míře opotřebení a kvůli tomu i vyšší emisi částic. Emise se po odbourání největších nerovností zpravidla ustálila zpátky na hodnotách odpovídajících suchému kontaktu.

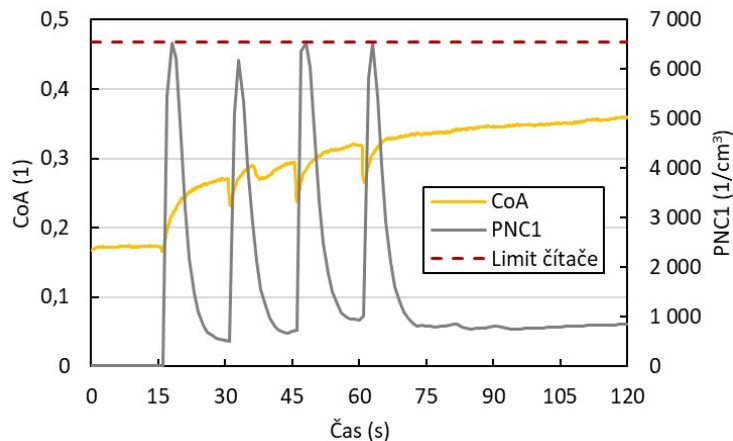


Obr. 6-11 – (a) stav disků po pískování, (b) po očištění povrchů

V souladu s tímto předpokladem je rovněž závislost naměřená v Obr. 5-15, kdy v rámci na sebe navazujících testů postupně docházelo k rychlejší obnově součinitele adheze, ale také k vyšší emisi částic. Způsobeno by to mohlo být akumulací poškození povrchu, do nějž mohou díky nerovnostem snáze penetrovat částice rozdrčeného písku a může docházet k větší míře jejich usazování. Větší množství částic rozdrčeného písku vstupujících do kontaktu by přirozeně vedlo na rychlejší obnovu součinitele adheze, ale také na vyšší opotřebení, a s ním spojenou vyšší emisi částic.

Nejistotu při těchto experimentech může vzbuzovat i poměrně nízká dávka aplikovaného písku. Proti navýšení této dávky však existují dva argumenty. Při aplikaci většího množství písku přirozeně dochází k větší emisi částic vlivem uvolňování rozdrčených částic písku. Za stávajících testovacích podmínek i s dávkou 0,4 g ve většině testů došlo k přetečení maximální hodnoty koncentrace částic měřené čítačem částic. Proto by použití větší dávky písku vedlo na vyšší koncentraci, kterou by však nebylo možné pomocí dostupných čítačů měřit.

Druhým argumentem proti zvýšení je experiment, při němž byl ověřován přístup postupného dávkování písku. Do kontaktu kontaminovaného listím bylo aplikováno 0,4 g písku S4 v rámci čtyř dávek oddělených 15 sekundami. Jak můžete vidět na Obr. 6-12, tak kromě první aplikace nevedla další aplikace k patrnému nárůstu adheze. Naopak při každé další aplikaci krátkodobě docházelo k mírným propadům její hodnoty. Proto je otázkou, zda by vůbec vyšší dávka písku vedla k lepší obnově nízké hodnoty součinitele adheze.

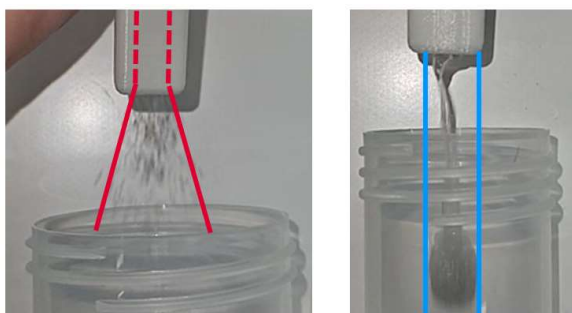


Obr. 6-12 – test pískování v rámci čtyř dávek

Poslední testy zaměřené na produkty pro obnovení nízké hodnoty součinitele adheze zkoumaly potenciální alternativy této metody a emise částic při jejich použití. Vůči standardnímu pískování byly srovnávány konkrétně aplikace písku s vodou a použití spékané aluminy. Při těchto testech byl naměřen podezřele nízký účinek při aplikaci suchého písku S4. Podle zvýšené emise na Obr. 5-18 je patrné, že po aplikaci část písku do kontaktu vstoupila a byla rozdracena. Ve srovnání s předešlými testy, viz Obr. 5-15 však nebyl efekt obnovy adheze zdaleka tak výrazný. Za tím teoreticky mohou stát zvýšené otáčky ventilátoru, kdy vlivem rychleji proudícího vzduchu mohla být větší část písku odvedena mimo kontakt.

Tomu by odpovídal i průběh adheze při aplikaci písku s vodou, kdy zjevně do kontaktu vstoupilo větší množství písku, a po vytlačení vody z kontaktu došlo k rychlejší obnově adheze s průběhem blíže odpovídajícím přechozím testům na Obr. 5-15. Při aplikaci SA nemusel být vliv odnášení částic mimo kontakt tak výrazný, díky jejich větší velikosti a vyšší hustotě.

Na Obr. 6-13 je snímek ze zpomaleného videa, který ukazuje kužel rozptylu sypaného písku, který obzvláště v podmínkách rychle proudícího vzduchu může vést na výrazné ztráty z hlediska minutí kontaktu. Naopak při aplikaci směsi vody a písku dochází ke vzniku velké kapky, která mohla písek do kontaktu lépe nasměrovat.



Obr. 6-13 – srovnání aplikace písku a písku s vodou ze zpomaleného videa

Z hlediska experimentu písku s vodou je však nejzajímavější skutečnost, že ve srovnání s ostatními metodami obnovy nízké adheze zde nedošlo ke vzniku vysoké hodnoty emise částic. Z tohoto důvodu by mohlo být pískování s vodou potenciálním způsobem redukce emise částic při procesech obnovy adheze. Zároveň by tímto způsobem mohla být ovlivněna schopnost pískovacího zařízení trefit kontakt a dosáhnout větší efektivity z hlediska spotřebovaného materiálu. Velkým omezením při tomto konkrétním aplikačním poměru písku a vody je však náhlý propad adheze přímo v momentě aplikace, který z hlediska účelu pískování není přijatelný. Správný poměr písku a vody by nemusel vést na propad adheze a zároveň by zachoval schopnost této směsi redukovat emisi částic při pískování.

Přesto odpovídají experimentální výsledky z testování vlivu aplikace látek pro obnovu nízké hodnoty součinitele adheze předpokladům stanoveným na základě rešerše. Hypotézu H3 přijímám.

## 7 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na emisi pevných částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí, identifikaci kritických situací, které vedou na zvýšenou emisi a možné přístupy k její redukci. Moderním přístupem k redukci opotřebení kontaktu, které s emisí částic úzce souvisí, je aplikace TOR produktů. Proto byl otestován vliv produktů na bázi vody, oleje a tuhý TOR produkt z hlediska jejich vlivu na emisi částic. S ohledem na situace s vysokou emisí částic byly otestovány stavy s vysokým mechanickým zatížením a proces pískování kontaktu. Při řešení práce bylo nutné realizovat úpravy zařízení a měřicího řetězce a bylo nutné najít vhodné podmínky pro experiment zaměřený na emisi částic.

Hlavním přínosem této práce je navržený postup pro hodnocení TOR produktů na základě jejich vlivu na emisi částic. Tato vlastnost nabývá na významu se zpřísňujícími se emisními normami a prokazatelnou škodlivostí těchto částic vůči zdraví.

Ačkoliv bylo otestováno široké spektrum produktů pro řízení tření, většina z přístupů byla otestována pouze v omezeném rozsahu provozních podmínek. V budoucnosti by bylo vhodné otestovat konkrétní produkty za různých podmínek z hlediska mechanického zatížení kontaktu a různých aplikačních dávek.

Jako kritická situace z hlediska emise částic se ukázalo být pískování. Proto by bylo vhodné se v dalším výzkumu také zaměřit na možné alternativní přístupy obnovy nízké adheze s menším dopadem na emisi částic, případně nalezení vhodného dávkování písku.

### **Hlavní výzkumná zjištění:**

- V rozmezí 0-2 % skluzu platí, že s rostoucím skluzem roste i emise pevných částic z kontaktu.
- Zejména při skluzu vyšším než 1 % vede vyšší kontaktní tlak k vyšší emisí částic.
- Použití všech testovaných TOR produktů vedlo na redukci emise částic. Aplikací produktů WB2 a S1 došlo v rámci provozní oblasti k redukci emise částic o 67,4 % ve srovnání se suchým kontaktem.
- Krátce po aplikaci písku vznikají extrémně vysoké hodnoty koncentrace částic. Výjimkou byla aplikace písku s vodou, kde bylo šíření částic omezeno vznikem vodního filmu, který dokázal zachytit částice rozdrčeného písku.

## 8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Výsledky této práce rozšiřují současný stav poznání v oblasti emise částic z kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Za účelem publikace byl připraven manuskript odborného článku, který je zaměřený na vliv TOR produktů na emisi částic z kontaktu kolo-kolejnice, simulovaného na dvoudiskovém zařízení.

**Název:** The Effect of Top-of-Rail Products on Airborne Particle Emissions from a Wheel–Rail Contact Simulated Using a Twin-Disc Testing Rig

**Autoři:** Šperlich V., Galas R.

**Abstrakt:**

Exposure to elevated concentrations of airborne particles generated at the wheel–rail contact poses a significant risk for the development of respiratory and cardiovascular diseases. This paper presents an experimental investigation of particle emissions associated with the use of solid, water-based and oil-based Top-of-Rail (TOR) products. A twin-disc testing rig was used to simulate the rolling–sliding contact under controlled conditions. The application of TOR products resulted in a reduction in particle emissions of up to 67.8%, confirming their potential to reduce the environmental and health impacts of railway transportation. A novel methodology for comparing TOR products in terms of their emission-reduction performance is proposed.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DOPRAVNÍ PODNIK HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY, A. S. *Výroční zpráva DPP 2023*.
- [2] DOPRAVNÍ PODNIK MĚSTA BRNA, A.S. *Výroční zpráva DPMB 2023*.
- [3] KARLSSON, Hanna L.; NILSSON, Lennart a MÖLLER, Lennart. Subway Particles Are More Genotoxic than Street Particles and Induce Oxidative Stress in Cultured Human Lung Cells. *Chemical Research in Toxicology*. 2005, roč. 18, č. 1, s. 19-23. ISSN 0893-228X.
- [4] LEWIS, R. a OLOFSSON, U. *Wheel–Rail Interface Handbook*. Xxii. Cambridge: Woodhead: Woodhead publishing in mechanical engineering, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [5] OLOFSSON, Ulf; ZHU, Yi; ABBASI, Saeed; LEWIS, Roger a LEWIS, Stephen. Tribology of the wheel–rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion. *Vehicle System Dynamics*. 2013, roč. 51, č. 7, s. 1091-1120. ISSN 0042-3114.
- [6] GALAS, Radovan. *Friction Modification within Wheel-Rail Contact*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2018.
- [7] LEWISA, R a DWYER-JOYCE, R S. Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2004, roč. 218, č. 6, s. 467-478. ISSN 1350-6501.
- [8] ZANI, Nicola; MAZZÙ, Angelo; SOLAZZI, Luigi a PETROGALLI, Candida. Examining Wear Mechanisms in Railway Wheel Steels: Experimental Insights and Predictive Mapping. *Lubricants*. 2024, roč. 12, č. 3. ISSN 2075-4442.
- [9] SEO, Jung-Won; JUN, Hyun-Kyu; KWON, Seok-Jin a LEE, Dong-Hyeong. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling–sliding contact. *International Journal of Fatigue*. 2016, roč. 83, s. 184-194. ISSN 01421123.
- [10] EADIE, Donald T.; ELVIDGE, Dave; OLDKNOW, Kevin; STOCK, Richard; POINTNER, Peter et al. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail–wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear*. 2008, roč. 265, č. 9-10, s. 1222-1230. ISSN 00431648.

- [11] XIE, Yulong; WANG, Wenjian; GUO, Jun; AN, Boyang; CHEN, Rong et al. Rail rolling contact fatigue response diagram construction and shakedown map optimization. *Wear*. 2023, roč. 528-529. ISSN 00431648.
- [12] *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2023*. Online. Praha: ČHMÚ 2024, 2024. ISBN ISBN 978-80-7653-071-3.
- [13] LEE, HyunWook. The effect of water lubricant on reducing the generation of airborne wear particles from wheel–rail contacts under various train velocities. *Tribology International*. 2020, roč. 150. ISSN 0301679X.
- [14] Effect of particulate matter (pm) on plants, climate, ecosystem and human health. *IJATES*. 2014, roč. 2014, č. 4, s. 118-129. ISSN 2348-7550.
- [15] *PM1 Air filter*. Online. AFPRO filters. Dostupné z: <https://www.afprofilters.com/expertises/pm1-airfilter/>. [cit. 2025-03-24].
- [16] *Asbestos*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [cit. 2025-03-24].
- [17] SUNDH, Jon a OLOFSSON, Ulf. Relating contact temperature and wear transitions in a wheel–rail contact. *Wear*. 2011, roč. 271, č. 1-2, s. 78-85. ISSN 00431648.
- [18] SUNDH, Jon; OLOFSSON, Ulf; OLANDER, Lars a JANSSON, Anders. Wear rate testing in relation to airborne particles generated in a wheel–rail contact. *Lubrication Science*. 2009, roč. 21, č. 4, s. 135-150. ISSN 0954-0075.
- [19] LEE, HyunWook. Generation of airborne wear particles from wheel–rail contact during rolling/sliding and pure sliding contact. *Wear*. 2019, roč. 426-427, s. 1797-1806. ISSN 00431648.
- [20] FRUHWIRT, Daniel; STURM, Peter; NÖST, Thomas; LEONHARDT, Philip; BODE, Gina et al. PM emissions from railways – Results of tests on a wheel-rail test bench. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2023, roč. 122. ISSN 13619209.
- [21] ABBASI, S; OLANDER, L; LARSSON, C; OLOFSSON, U; JANSSON, A et al. A field test study of airborne wear particles from a running regional train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012, roč. 226, č. 1, s. 95-109. ISSN 0954-4097.
- [22] GALAS, R.; OMASTA, M.; KRUPKA, I. a HARTL, M. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, č. 368-369, s. 230-238. ISSN 0043-1648.

- [23] ZHU, Yi; OLOFSSON, Ulf a SÖDERBERG, Anders. Adhesion modeling in the wheel–rail contact under dry and lubricated conditions using measured 3D surfaces. *Tribology International*. 2013, roč. 61, s. 1-10. ISSN 0301679X.
- [24] *SLIP PREVENTION PARTICLE INJECTION DEVICE* (EU). OHNO, Kaoru, Railway Technical Research Institute Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540 (JP). Přihl.: 2001-03-14. Uděl.: 2006-12-06. EP1182109B1.
- [25] WANG, W.J.; LIU, T.F.; WANG, H.Y.; LIU, Q.Y.; ZHU, M.H. et al. Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions. *Tribology International*. 2014, roč. 75, s. 16-23. ISSN 0301679X.
- [26] WANG, W.J.; LEWIS, R.; YANG, B.; GUO, L.C.; LIU, Q.Y. et al. Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions. *Wear*. 2016, roč. 362-363, s. 146-152. ISSN 00431648.
- [27] ABBASI, Saeed; OLOFSSON, Ulf; ZHU, Yi a SELLGREN, Ulf. Pin-on-disc study of the effects of railway friction modifiers on airborne wear particles from wheel–rail contacts. *Tribology International*. 2013, roč. 60, s. 136-139. ISSN 0301679X.
- [28] BOUKHRIS, Rahma; BERGSETH, Ellen; OLOFSSON, Ulf; LECKNER, Johan a ARDAI, Roland. The Effect of Top-of-Rail Products Incorporating Environmentally Acceptable Solid Particles on Friction, Retentivity, Wear and Airborne Particle Emissions of Wheel–Rail Contact. *Machines*. 2025, roč. 13, č. 3. ISSN 2075-1702.
- [29] LEWIS, R a DWYER-JOYCE, R S. Wear at the wheel/rail interface when sanding is used to increase adhesion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2006, roč. 220, č. 1, s. 29-41. ISSN 0954-4097.
- [30] PARK, Jongsung; JOO, Byungsoo; SEO, Hyungjo; SONG, Wansu; LEE, Jung Ju et al. Analysis of wear induced particle emissions from brake pads during the worldwide harmonized light vehicles test procedure (WLTP). *Wear*. 2021, roč. 466-467. ISSN 00431648.
- [31] WAHLSTRÖM, Jens; SÖDERBERG, Anders; OLANDER, Lars; JANSSON, Anders a OLOFSSON, Ulf. A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. *Wear*. 2010, roč. 268, č. 5-6, s. 763-769. ISSN 00431648.
- [32] LEWIS, R. a OLOFSSON, U. Mapping rail wear regimes and transitions: *Wear*. 2004, roč. 257, č. 7–8, s. 721-729. ISSN 0043-1648.

- [33] ROCHA, R. C.; EWALD, H.; REZENDE, A. B.; FONESCA, S. T. a MEI, P. R. Using twin disc for applications in the railway: a systematic review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023, roč. 45, č. 191.
- [34] OLOFSSON, Ulf; OLANDER, Lars a JANSSON, Anders. A Study of Airborne Wear Particles Generated From a Sliding Contact. *Journal of Tribology*. 2009, roč. 131, č. 4. ISSN 0742-4787.
- [35] LEE, HyunWook. Generation of airborne wear particles from the wheel–rail contact under wet conditions using a twin-disk rig. *Wear*. 2020, roč. 448-449. ISSN 00431648.
- [36] LEE, HyunWook; NAMGUNG, Hyeong-Gyu a KWON, Soon-Bark. Effect of train velocity on the amount of airborne wear particles generated from wheel–rail contacts. *Wear*. 2018, roč. 414-415, s. 296-302. ISSN 00431648.
- [37] *PC220 Particle Counter - TROTEC*. Online. TROTEC. Dostupné z: <https://en.trotec.com/shop/pc220-particle-counter.html>. [cit. 2025-05-11].
- [38] *M5STACK*. Online. Air Quality kit. Dostupné z: <https://docs.m5stack.com/en/core/AirQ>. [cit. 2025-05-11].
- [39] *Multipette® E3x*. Online. Eppendorf. Dostupné z: <https://www.eppendorf.com/hu-en/Products/Liquid-Handling/All-Pipettes-Dispensers-Automated-Liquid-Handlers/MultipetteE3-MultipetteE3x-p-PF-135444>. [cit. 2025-05-11].
- [40] EPPENDORF SE. *Multipette® E3 / E3x & Combitips® advanced: Technical data*. 2022.
- [41] *SANDING SYSTEM PZKV-01, KOVA-03D*. Online. Tribotec. 2023. Dostupné z: [https://kolejovatechnika.tribotec.cz/wp-content/uploads/2023/05/tribotec-sanding-systems-2023\\_05.pdf](https://kolejovatechnika.tribotec.cz/wp-content/uploads/2023/05/tribotec-sanding-systems-2023_05.pdf). [cit. 2025-05-13].
- [42] MADEJSKI, J. a GOLA, A. Tram wheel geometry monitoring system. *Urban Transport XII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. 2006, s. 399-408. ISBN 1845641795. ISSN 1743-3509.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

---

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
<i>TOR</i>	<i>Top-of-Rail, mazivo temene kolejnice</i>
<i>CoA</i>	<i>Coefficient of Adhesion, součinitel adheze</i>
<i>CPC</i>	<i>Condensation Particle Counter, počítadlo zkondenzovaných částic</i>
<i>FMPS</i>	<i>Fast mobility Particle Sizer</i>
<i>PM</i>	<i>Particulate Matter, pevné částice</i>
<i>SEM</i>	<i>Scanning Electron Microscope, rastrovací elektronový mikroskop</i>
<i>HB</i>	<i>tvrdost dle Brinella</i>
<i>HRC</i>	<i>tvrdost dle Rockwella</i>
<i>S4</i>	<i>písek S4</i>
<i>SA</i>	<i>spékaná alumina</i>
<i>WB</i>	<i>Water-based, TOR produkt na vodní bázi</i>
<i>OB</i>	<i>Oil-based, TOR produkt na olejové bázi</i>
<i>S</i>	<i>Solid, tuhý TOR produkt</i>
<i>P</i>	<i>Poloha nastavení potenciometru</i>

---

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Veličina</i>
$D_k$	$m$	<i>průměr kola</i>
$D_d$	$m$	<i>průměr disku</i>
$O_k$	$m$	<i>obvod kola</i>
$v$	$m \cdot s^{-1}$	<i>rychlost tramvaje</i>
$v_o$	$m \cdot s^{-1}$	<i>obvodová rychlost</i>
$t_o$	$s$	<i>čas jedné otáčky kola</i>
$m_{30s}$	$g$	<i>množství písku za 30 s</i>
$M_{1ok}$	$g$	<i>množství písku na jednu otáčku kola</i>
$M_{1od}$	$g$	<i>množství písku na jednu otáčku disku</i>
$V$	$\mu l$	<i>objem aplikovaného produktu</i>
$F_N$	$N$	<i>normálová síla</i>
$F_t$	$N$	<i>tečná síla</i>
$CoA$	$1$	<i>součinitel adheze</i>
$p$	$GPa$	<i>kontaktní tlak</i>
$t$	$s$	<i>čas</i>
$n$	$s^{-1}$	<i>otáčky za sekundu</i>
$\xi$	$\%$	<i>skluz</i>
$\omega$	$rad \cdot s^{-1}$	<i>úhlová rychlost</i>

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 – kinematika kontaktu kolo-kolejnice .....	14
Obr. 2-2 – trakční křivka.....	15
Obr. 2-3 – kontaktní oblasti rozhraní kolo-kolejnice .....	16
Obr. 2-4 – míra opotřebení v závislosti na skluzu, na $T\gamma$ .....	17
Obr. 2-5 – míra opotřebení rostoucí s rostoucím kontaktním tlakem a skluzem .....	17
Obr. 2-6 – princip adhezivního opotřebení .....	18
Obr. 2-7 – shakedown mapa .....	18
Obr. 2-8 – typy deformace vlivem kontaktní únavy .....	19
Obr. 2-9 – dělení produktů pro řízení tření .....	20
Obr. 2-10 – zdroje pevných částic v ovzduší v ČR za rok 2023 .....	21
Obr. 2-11 – pronikavost částic v závislosti na velikosti .....	21
Obr. 2-12 – vlákna azbestu zobrazená pomocí SEM.....	22
Obr. 2-13 – škodlivost pouličních částic a částic z metra vůči DNA .....	22
Obr. 2-14 – SEM snímky částic z frakce $PM_{10}$ a částice z frakce $PM_{0.1}$ .....	23
Obr. 2-15 – závislost emise částic na normálovém zatížení a skluzu .....	24
Obr. 2-16 – množství uvolněných částic při aplikaci TOR produktů .....	24
Obr. 2-17 – nárůst emise částic o velikosti 10 nm při aplikaci schnoucího produktu .....	25
Obr. 2-18 – srovnání TOR produktů podle vlivu na emisi částic.....	25
Obr. 2-19 – průběh součinitele tření, průběh emise částic při aplikaci TOR produktů ....	26
Obr. 2-20 – zvýšená míra opotřebení při aplikaci písku .....	26
Obr. 2-21 – pin-on-disc simulátor v testovací komoře .....	27
Obr. 3-1 – shakedown mapa a předpokládané charakteristiky emise částic .....	32
Obr. 4-1 – schéma postupu řešení práce.....	33
Obr. 4-2 – dvoudiskové zařízení .....	34
Obr. 4-3 – čítače částice <i>Trotec PC220, AirQuality kit</i> .....	34
Obr. 4-4 – testovací komora .....	35
Obr. 4-5 – aplikátory látek .....	36
Obr. 4-6 – nastavení potenciometru.....	37

Obr. 4-7 – metodika experimentu.....	37
Obr. 4-8 – povrch nových disků, povrch zaběhnutých disků.....	38
Obr. 4-9 – spékaná alumina, písek S4, použité listí .....	40
Obr. 4-10 – <b>P1</b> : emise částic bude odpovídat oblasti zatížení na shakedown mapě.....	41
Obr. 4-11 – <b>P2</b> : vliv aplikace produktů pro řízení tření na emisi částic .....	42
Obr. 5-1 – upravená testovací komora, foto komory v provozu.....	43
Obr. 5-2 – ovládací prostředí <i>AirQuality Logger</i> .....	44
Obr. 5-3 – vliv otáček ventilátoru na stabilitu dat měřených čítačem <i>Trotec PC220</i> .....	45
Obr. 5-4 – testované polohy čítače částic .....	46
Obr. 5-5 – vliv polohy čítače částic na stabilitu měřených dat .....	46
Obr. 5-6 – poloha snímačů pro vzájemné srovnání.....	47
Obr. 5-7 – srovnání čítačů částic .....	47
Obr. 5-8 – vliv otáček ventilátoru na stabilitu dat, používaná nastavení potenciometru ..	48
Obr. 5-9 – emise částic pro skluz 0-2 %.....	49
Obr. 5-10 – trakční křivka a závislost emise na skluzu pro 0-2 % .....	50
Obr. 5-11 – trakční křivka a závislost emise na skluzu pro 0-2 % v rámci osmi bodů.....	50
Obr. 5-12 – trakční křivka a závislost emise na skluzu 0-9 % .....	51
Obr. 5-13 – závislost emise na skluzu pro dvě hodnoty kontaktního tlaku.....	52
Obr. 5-14 – úvodní testy pískování.....	53
Obr. 5-15 –emise částic a součinitel adheze při pískování, vyhodnocené průměry .....	54
Obr. 5-16 – povrch disků při testu pískování .....	55
Obr. 5-17 – průběhy adheze a emise při testování alternativ pískování .....	56
Obr. 5-18 – průběh emise a adheze při aplikaci tuhého TOR produktu .....	57
Obr. 5-19 – retentivita produktů na bázi vody a oleje .....	58
Obr. 5-20 – srovnání emise části suchého a mokrého filmu produktu WB1.....	59
Obr. 5-21 – průběhy emise a součinitele adheze testovaných TOR produktů.....	60
Obr. 5-22 – oblast pro vyhodnocení průměrné hodnoty emise TOR produktů .....	60
Obr. 5-23 – srovnání vlivu TOR produktů na emisi částic .....	61
Obr. 5-24 – metodika pro srovnávání TOR produktů z hlediska vlivu na emisi částic ....	63
Obr. 6-1 – netěsnost testovací komory .....	64

Obr. 6-2 – problém s mazáním .....	65
Obr. 6-3 – špatná aplikace produktu .....	65
Obr. 6-4 – délka experimentů – 20minutové testy .....	67
Obr. 6-5 – Shakedown mapa s vynesnými body, emise v závislosti na zatížení .....	68
Obr. 6-6 – dlouhodobý test, opakovatelnost .....	68
Obr. 6-7 – snížení hodnot emise částic po provedení testu s vyšším tlakem .....	69
Obr. 6-8 – povrch po dlouhodobém testu .....	69
Obr. 6-9 – srovnání produktů s upravenou hodnotou OB2 .....	70
Obr. 6-10 – potlačení hodnot koncentrace částic zvýšením otáček ventilátoru.....	72
Obr. 6-11 – stav disků po pískování, po očištění povrchů .....	72
Obr. 6-12 – test pískování v rámci čtyř dávek.....	73
Obr. 6-13 – srovnání aplikace písku a písku s vodou ze zpomaleného videa .....	74

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – souhrnná tabulka článků .....	29
Tab. 2 – použité vedlejší měřicí přístroje .....	35
Tab. 3 – nastavení potenciometru .....	37
Tab. 4 – testované TOR produkty .....	39
Tab. 5 – použité parametry experimentů .....	40
Tab. 6 – kontrolované, závislé a nezávislé proměnné .....	42
Tab. 7 – aplikační dávky látek pro obnovu adheze .....	55
Tab. 8 – aplikační dávky TOR produktů .....	58

## 13 SEZNAM PŘÍLOH

### Příloha A – Výsledné hodnoty vlivu TOR produktů na emisi částic

	Suchý k. PNC1 (cm <sup>-3</sup> )	WB1 PNC1 (cm <sup>-3</sup> )	WB2 PNC1 (cm <sup>-3</sup> )	OB1 PNC1 (cm <sup>-3</sup> )	OB2 PNC1 (cm <sup>-3</sup> )	S1 PNC1 (cm <sup>-3</sup> )
Průměr	655,48	306,11	210,53	243,55	325,66	210,88
měření č.1		424,99	307,43	251,13	277,92	204,88
měření č.2		277,49	101,80	251,56	403,27	208,28
měření č.3		215,83	222,36	227,96	295,78	219,49
směrodatná odchylka	86,43	87,75	84,36	11,03	55,36	6,24
redukce vůči such. k. (%)		53,30	67,88	62,84	50,32	67,83

### Příloha B – Návod na obsluhu – měření emise částic