



Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování

Brno University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design

# **HODNOCENÍ VÝKONOSTI MAZIV APLIKOVANÝCH NA TEMENO KOLEJNICE**

**Ing. Martin Valena**

Pojednání ke státní doktorské zkoušce  
Discourse on the Dissertation Thesis

BRNO 2021





Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování

Brno University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design

# **HODNOCENÍ VÝKONOSTI MAZIV APLIKOVANÝCH NA TEMENO KOLEJNICE**

PERFORMANCE EVALUATION OF PRODUCTS FOR RAIL HEAD

**Ing. Martin Valena**

Autor práce  
Author

**prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.**

Vedoucí práce  
Supervisor

Pojednání ke státní doktorské zkoušce  
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2021



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>10</b>
3.1	Laboratorní testy	10
3.2	Terénní testy	20
<b>4</b>	<b>ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE</b>	<b>27</b>
4.1	Laboratorní testovací zařízení	27
4.2	Metodologie experimentu v laboratoři	29
4.3	Klíčové parametry ovlivňující výsledky experimentů	29
4.4	Terénní testy	30
4.5	Vyvození závěrů získaných na základě rešerše	31
<b>5</b>	<b>VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ</b>	<b>32</b>
5.1	Zaměření disertační práce	32
5.2	Cíle disertační práce	32
5.3	Způsob řešení a použité metody	34
5.3.1	Plán experimentů	34
5.3.2	Plán publikací	38
<b>6</b>	<b>SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>40</b>
6.1	Fáze 1 – vývoj metodiky testování TOR produktů	40
6.1.1	Experimenty za suchých podmínek	40
6.1.2	Postup při experimentech	41
6.1.3	Vliv skluzu	43
6.1.4	Vliv aplikace	44
6.2	Fáze 2 – Vývoj traťového tribometru	45
6.2.1	Konstrukce	46
6.2.2	Elektronika	47
6.2.3	Postup měření	48

6.2.4	Zpracování dat	49
6.2.5	Verifikační testy	50
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b>	<b>61</b>

# 1 ÚVOD

V poslední době začíná mít v kolejové dopravě své místo tzv. řízení tření, které zabezpečuje optimální součinitel adheze v kontaktu kola a kolejnice. Pokud je adheze příliš vysoká, dochází k nadměrnému opotřebení. V případě velmi nízké adheze je zase problém s trakcí, a také vzrůstá bezpečnostní riziko v podobě delší brzdné vzdálenosti. Švédská národní železniční správa odhadla náklady spojené s nízkou adhezí na 90 milionů euro v rámci Evropy [1]. Problémy s nedostatečnou adhezí se řeší pískováním, což ovšem způsobuje vyšší opotřebení a v kritickém případě ztrátu konduktivity – lokalizace vozidel. Aplikuje-li se do kontaktu látka, která ustálí součinitel adheze na optimální hladině, dojde ke snížení výskytu vlnkovitosti, snížení opotřebení a redukci hluku.

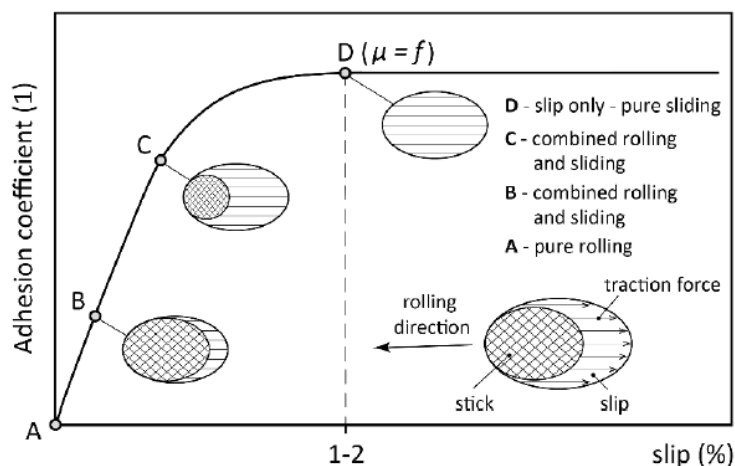
Tyto látky se obecně nazývají top-of-rail (TOR) produkty a mohou být na vodní nebo olejové bázi. Vzhledem k tomu, že se aplikují na temeno kolejnice, je zapotřebí znát jejich výkonnost – výsledný součinitel adheze, výdrž maziva v kontaktu, redistribuci a délku ošetření kolejnice. Součinitel adheze je ovlivněn nejenom TOR produktem, ale převážně aplikovaným množstvím. Nadměrné množství maziva způsobuje nízký součinitel adheze. Výdrž maziva v kontaktu lze chápat jako počet náprav, který musí projet přes místo aplikace, aby došlo k obnovení součinitele adheze nad požadovanou úroveň. Tento parametr lze v praxi využít jako interval mezi jednotlivými dávkami. Redistribuce a délka ošetření kolejnice jsou poměrně svázané parametry, neboť čím je lepší redistribuce dané látky, tím se dosáhne větší ošetřené délky. V současné době není přesně znám mechanismus redistribuce a literatura se také nemůže shodnout, jak daleko od místa aplikace se TOR produkty mohou dostat. Tyto parametry v praxi ovlivní vzdálenost mezi stacionárními mazacími jednotkami. Existuje mnoho zařízení, na kterých je možné měřit výše zmíněné parametry. Některé konfigurace jsou blíže reálnému kontaktu kola a kolejnice a některé jsou svojí konfigurací hodně vzdálené. Nejpřesnější výsledky dávají testy s železniční soupravou, ty jsou ovšem finančně nákladné. Nalezením metodiky testování TOR produktů v laboratorním prostředí bude možné komparačně určit výkonnější, a tedy i lepší mazivo. Stanovením výdrže maziva v kontaktu a délky ošetření kolejnice bude možné optimalizovat řízení tření z pohledu aplikačního intervalu a množství mazacích jednotek.

Předložené pojednání se zabývá vývojem metodiky na hodnocení výkonnosti TOR produktů v laboratorním prostředí. Jsou zde uvedeny i možnosti, jakým způsobem bude probíhat stanovení výdrže maziva v kontaktu a délky ošetření kolejnice.

## 2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Kontakt mezi kolem a kolejnicí je poměrně složitý a velmi důležitý prvek kolejové dopravy. Jeho důležitost spočívá v přenosu vertikálních, příčných, trakčních a brzdných sil. Jedná o otevřený tribologický systém, jehož složitosti nedosahuje skoro žádný kontakt strojních těles [1]. Pracovní podmínky kontaktu o typické velikosti 1 cm<sup>2</sup> se neustále mění. Jsou ovlivněny okolním počasím (teplotou a vlhkostí), kontaminanty (např. vodou, oxidy atd.) a v neposlední řadě taktéž polohou kontaktu.

Při přenosu trakčních nebo brzdných sil vzniká v kontaktu skluz. Jedná se o rozdílnou obvodovou a dopřednou rychlost. Kontaktní oblast se rozděluje na oblast lpění a skluzu. Pokud dochází k čistému valení, tak se v kontaktu nachází pouze lpění (Obr. 2-1, bod A). Při zvětšování skluzu, a tedy i přenášeného momentu, dochází ke vzniku oblasti skluzu a jejímu rozšiřování (body B, C). Po dosažení makroskopického skluzu 1-2 % je kontakt plně v režimu skluzu (bod D). V tomto bodě součinitel adheze dosahuje hodnoty součinitele tření. Tuto teorii poprvé matematicky popsal Carter [2] v roce 1926. K experimentálnímu potvrzení této teorie došlo až v 60. letech minulého století pomocí fotoelasticimetrie dvojicí Hainesem a Ollertonem [3].



Obr. 2-1 Teoretická adhezní křivka dle Cartera [4]

Součinitel adheze ovlivňuje i tzv. třecí vrstva, která se nachází mezi tělesy a může obsahovat např. listí, písek, oxidy, maziva atd. Přítomnost listí v kontaktu výrazně snižuje součinitel adheze. Tento problém nastává převážně v Nizozemí a Británii a věnují se mu následující publikace [5–8]. Pokud vozidlo nemá dostatečnou trakci, tak se do kontaktu aplikuje písek. Ten má za následek zvýšení součinitele adheze a částečně i odstranění vrstvy listí [9] a dalších kontaminantů. Pískování má i své nevýhody v podobě většího opotřebení kola a kolejnice a taktéž v detekci. Zmíněným problémům se věnuje [10, 11]. Některé třecí vrstvy vykazují negativní charakter adhezní křivky za bodem saturace, což

má za následek stick-slip oscilaci, která je odpovědná za generování kvílivého hluku a rozvoje vlnkovitosti [12]. Maziva aplikující se na koleje lze obecně rozdělit podle určení [13, 14]. První skupinou jsou lubrikanty, které se nanáší na okolek případně na pojižděnou hranu kolejnice. Jejich cíl spočívá ve snížení součinitele adheze pod hodnotu 0,1, čímž dochází k redukci opotřebení a také kvílivého hluku [15, 16]. Pokud se ovšem tyto látky dostanou na temeno kolejnice, tak se může objevit bezpečnostní riziko v podobě dlouhé brzdné vzdálenosti. Galas [17] na temeno aplikoval TOR produkt o větším množství a pro dvě ze tří testovaných množství se brzdná dráha výrazně prodloužila. Druhou skupinou jsou již zmíněné TOR maziva, které mají za úkol snížit součinitel adheze na střední úroveň 0,2 – 0,4 a zároveň zajistit pozitivní trakční křivku.

TOR produkty lze dále dělit podle jejich chování při schnutí [18]. První skupinou jsou látky na vodní bázi – MT (modifikátory tření). Voda funguje jako transportní médium a po jejím vyschnutí se na površích vytvoří umělá třecí vrstva, která částečně pohltí smykovou deformaci vzniklou v kontaktu. Matsumoto [19] udává, že tento mechanismus je odpovědný za optimalizaci adheze mezi kolem a kolejnicí. Druhou skupinou jsou TOR maziva založená na olejové bázi případně na kombinaci oleje a vody. Za redukci tření u těchto látek je odpovědné mezní nebo smířené mazání [18]. Jelikož TOR maziva obsahují tekutou fázi stále, tak již malá změna množství dokáže významně ovlivnit výsledný součinitel adheze. Pokud se nanese větší množství, než je kritické, tak dojde ke ztrátě trakce.

Benefity TOR maziv jsou již poměrně dobře zmapované. Kromě snížení součinitele adheze a opotřebení dochází zároveň k redukci kontaktní únavy [20], vlnkovitosti, hluku [21] a také příčných sil [22]. K výzkumu těchto produktů se používá velké množství zařízení, která mohou být typu full-scale (bez zmenšení) [23] nebo mohou využívat konfiguraci vzdálenou od reálného kontaktu např. typ pin-on-plate [24]. Nejrelevantnější výsledky dávají terénní testy, při kterých je přímo využita vlaková souprava. TOR produkty se aplikují na měřený úsek ručně nebo pomocí aplikačních jednotek a následně se provádí měření, které může být krátkodobé nebo dlouhodobé. Testery typu full-scale využívají reálná železniční kola nebo kolejnice. Oproti klasickým terénním testům se zde dosahuje nižších rychlostí a jsou zde další omezující parametry.

Z předchozích odstavců lze vyvodit závěr, že kontakt kola a kolejnice je poměrně komplexní systém, který se vědci a inženýři snaží pochopit a optimalizovat za účelem finanční úspory. Z toho důvodu se provádí velké množství experimentů na reálné trati i v laboratoři a používá se k tomu hodně zařízení. Z článků vyplývá, že každý autor provádí experimenty podle vlastní metodiky a výsledky se v některých případech velmi liší. Předběžným cílem disertační práce tedy je vyvinout metodiku pro hodnocení TOR produktů v laboratorním prostředí a zároveň popsat chování těchto látek na reálné kolejnici.

## 3 SHRNU TÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 3.1 Laboratorní testy

Tato kapitola bude obsahovat publikace, které poslouží při vývoji metodiky hodnocení TOR produktů a také při zkoumání třecí vrstvy v laboratorním prostředí. Zároveň dojde k identifikaci důležitých parametrů, které ovlivňují výsledky experimentu. Články budou rozebírány ze dvou hledisek – výsledků a použité metodiky. Rešerše je zaměřena zejména na publikace, ve kterých se používá zařízení s valivě-skluzovým kontaktem.

[25] LUNDMARK, J., E. KASSFELDT, J. HARDELL a B. PRAKASH. The influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions

[26] CHEN, Hua, Akira NAMURA, Makoto ISHIDA a Tsunamitsu NAKAHARA. Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness

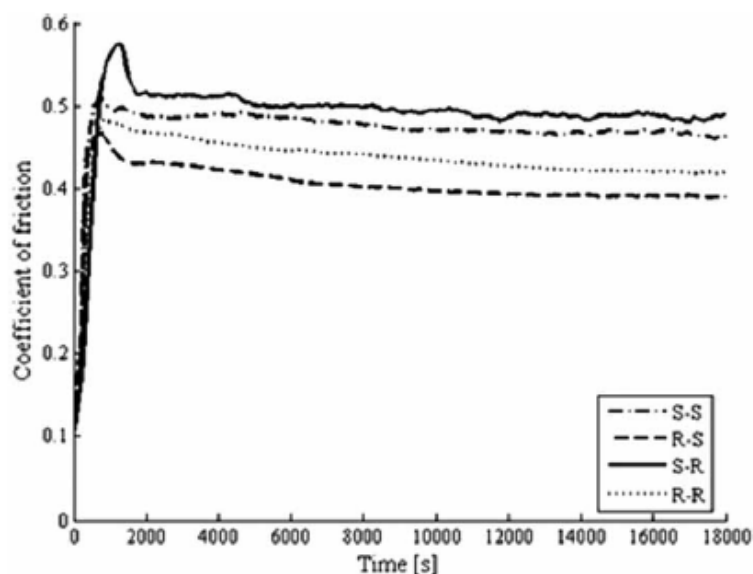
První publikace se snaží popsat vliv topografie kola a kolejnice na součinitel tření, opotřebení a výsledné poškození povrchu. Při jednotlivých experimentech se také sledovala počáteční záběhová fáze. Celkem se testovaly dva materiály pro kolo a dva pro kolejnici, přičemž každý vzorek byl opracován na dvě drsnosti – drsnou a hladkou (Tab. 3-1). Veškeré testy byly provedeny na dvoudiskovém zařízení. Druhá publikace [26] zkoumá vliv drsnosti kontaktních těles při dvou rychlostech a kontaktu kontaminovaném vodou. V průběhu experimentu se měnil i kontaktní tlak.

#### Výsledky

Nejvýznamnější vliv na opotřebení měl materiál kola a na tření drsnost kola. V případě testů na opotřebení se už ze čtyř kombinací vzorků provedlo opětovné měření z důvodu opakovatelnosti. Z výsledků vyplývá, že ocel UIC 1100 je citlivější na změny v provozních podmínkách. Všechny záznamy součinitele tření (vybraný graf viz. Obr. 3-1) kromě jedné kombinace materiálů vykazují peak v oblasti do 2 000 s – jedná se o záběhovou oblast. Peak je typický pro nemazané kovy s vyšší počáteční drsností, která se následně obrousí a dojde k poklesu tření. Hodnoty součinitele tření byly vyhodnocovány v ustáleném stavu, tedy po 3 000 s. Testy s drsným kolem a hladkou kolejnicí vykazovaly nižší součinitel tření u všech kombinací materiálů.

Tab. 3-1 Materiály a drsnosti použitých vzorků

stupeň drsnosti	materiál kola		materiál kolejnice	
	blue light steel	bainitic steel	UIC 1100 steel	boron rail steel
<b>drsňý</b>	Sa = 14 $\mu\text{m}$	Sa = 14 $\mu\text{m}$	Sa = 2.0 $\mu\text{m}$	Sa = 2.0 $\mu\text{m}$
<b>hladký</b>	Sa = 2 $\mu\text{m}$	Sa = 2 $\mu\text{m}$	Sa = 0.5 $\mu\text{m}$	Sa = 0.5 $\mu\text{m}$
<b>tvrdost HV<sub>30</sub></b>	380	325	324	525



Obr. 3-1 Záznam součinitele tření

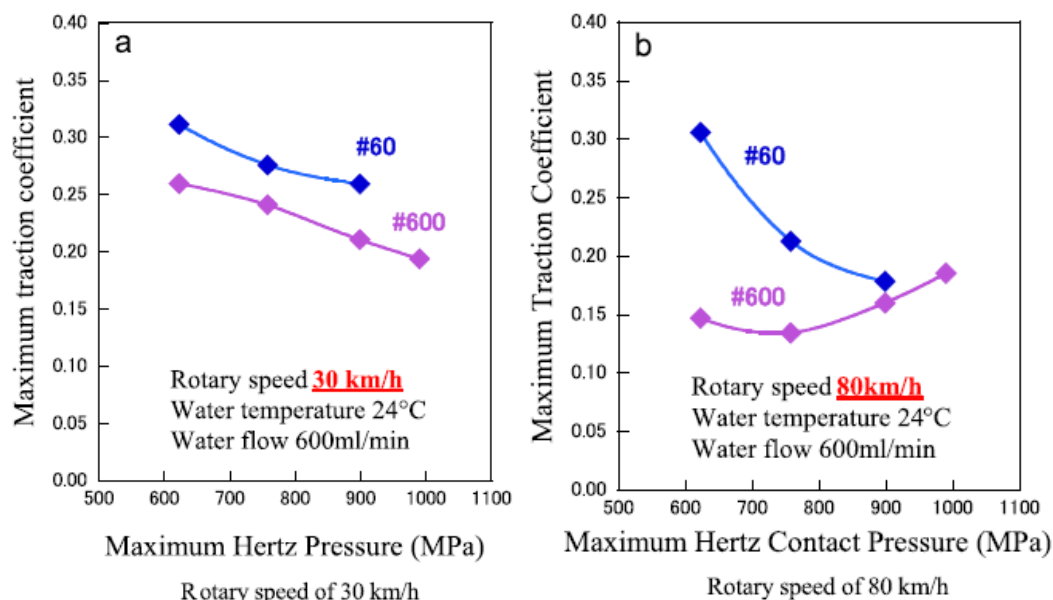
Testy byly prováděny na dvoudiskovém zařízení, které umožňuje oddělené řízení rychlostí obou disků. Ve článku nebyl přesně specifikován průměr použitých disků, uvádí se pouze maximální možný rozměr disku. Vzorek reprezentující kolejnici byl broušen v axiálním směru, jak je tomu v reálném provozu, a vzorek kola byl soustružen. Při testu se zvolila konfigurace hnacího disku reprezentující kolo a hnaného disku reprezentující kolej. Obě kontaktní tělesa byla před měřením čištěna v ultrazvukové čističce a vážena před i po testu. Aby se předešlo kontaminaci, umístil se nad kontakt vysavač. Provozní parametry jsou uvedeny v Tab. 3-2.

Tab. 3-2 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
<b>adheze, opotřebení</b>	dvoudiskové	810–880 MPa	200 r/min ( $\pm$ 450 mm/s)	1 %	5 h / 60 000 otáček	žádný

Experimenty v [26] byly provedeny při rychlosti 30 km/h a 80 km/h, přičemž testovací disky byly broušeny na drsnost přibližně 1,5  $\mu\text{m}$  a 0,4  $\mu\text{m}$ . Součinitel adheze získaný za nižší rychlosti vykazuje klesající charakter při zvětšování kontaktního tlaku pro obě

drsnosti (Obr. 3-2, a). Test za vyšší rychlosti vykazuje protichůdný trend součinitele adheze pro jednotlivé drsnosti (Obr. 3-2, b). Součinitel adheze v závislosti na kontaktním tlaku klesá, pokud je drsnost vyšší a roste, pokud je drsnost nižší. Z výsledků autor usuzuje, že existuje jistá prahová hodnota drsnosti povrchu měnící se s rychlostí, podle které se určí, zda součinitel adheze s rostoucím zatížením bude mít pozitivní nebo negativní charakter.



Obr. 3-2 Závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku

## Závěr

Na základě výsledků uvedených v článku [25], lze konstatovat, že součinitel tření pro suché podmínky je závislý na drsnosti jednotlivých vzorků reprezentující kolo a kolejnici. Součinitel tření vykazuje nejvyšší hodnoty pro kombinaci hladké kolo a hrubá kolejnice. Nejnížší hodnoty jsou dosaženy v obrácené kombinaci – hrubé kolo a hladká kolejnice. Důležitý poznatek vyplývající ze studie je, že po určité době (ve studii 3000 s) dojde ke stabilizaci součinitele tření. Článek [26], který měřil kontakt za přítomnosti vody v kontaktu, ukazuje, že součinitel adheze v závislosti na zatížení má různý trend, který je ovlivněn rychlostí a drsností povrchů.

[27] ARIAS-CUEVAS, O, Z LI, R LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ  
Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts.

Publikace se zaměřuje na stanovení součinitele adheze pro dvojici modifikátorů tření a jejich porovnání. Současně je hodnocen i stav kontaktních těles – plastická oblast, tvrdost povrchu a opotřebení. Testy byly provedeny na dvoudiskovém zařízení za suchých a mokrých podmínek.

## Výsledky

Při aplikaci FMA za suchých podmínek došlo ke snížení adheze z 0,3–0,6 na 0,15–0,35. Tato hodnota vede k zmenšení opotřebení a kontaktní únavy při zachování odpovídajícího brzdného a trakčního výkonu. V porovnání se základním materiálem je také plasticky ovlivněná oblast menší včetně drsnosti povrchu disků po ukončení testů – celkem 12000 cyklů. Dále byla vyhodnocována tvrdost disků, která se zvýšila oproti stavu před testy, ovšem zvýšení bylo nejmenší v porovnání se základním materiálem a FMB. Naposledy byl stanoven hmotnostní úbytek, jež vyšel také nejlépe pro FMA. Po přidání vody, čímž se simuloval déšť, došlo k dalšímu poklesu součinitele adheze přibližně o 30 % až 60 % v závislosti na skluzu. Hlavním sledovaným parametrem za mokrých podmínek byl čas obnovy adheze na hodnotu před aplikací vody. FMA vykazuje nejrychlejší čas obnovy, a přitom nezáleží na skluzu. Tento jev může být připisován životnosti MT.

Použití FMB vede na hodnoty součinitele adheze v rozpětí 0,25 až 0,55. Jelikož se jedná o materiál obsahující poměrně velké částice písku, jsou povrchy kontaktních disků posety prasklinami a důlky, což má za následek větší drsnost a hmotnostní ubytok v porovnání s FMA, ale menší než vykazuje základní materiál. Po aplikaci vody dochází taktéž ke snížení součinitele adheze, ovšem stále je větší než u FMA. Za těchto podmínek dochází k velkému snížení životnosti, neboť rozdrčený písek odchází z kontaktní oblasti kvůli slabým vazbám s nosným gelem.

Tab. 3-3 Vlastnosti použitých disků

disk	ocel	tvrdost	drsnost
kolo	B5T	267 HV <sub>20kg</sub>	1 μm
kolejnice	R260Mn	281 HV <sub>20kg</sub>	1 μm

Testy byly prováděny na dvoudiskovém zařízení nazvaném SUROS s liniovým kontaktem. Zařízení využívá disky o šířce 10 mm, které jsou vyřezány z kola a kolejnice. Přesnější informace o discích jsou uvedeny v Tab. 3-3. Před každým experimentem jsou disky čištěny v ethanolu pomocí ultrazvukové čističky. Záběh trval 4 000 cyklů za suchých podmínek při skluzu 0,5 % a byl proveden pro každou novou dvojici disků. Po záběhu se na disk natřel MT v hmotnosti 0,4–0,5 g pro FMA a 0,7–0,8 pro FMB. Následoval samotný test – 2 000 cyklů pro suché podmínky 1 000 pro mokré. Mokré podmínky byly docíleny aplikací 0,04 g vody pomocí pipety v rámci jedné kapky na disk reprezentující kolejnici. Kontaminace vodou proběhla až po 20–50 cyklech, kde se ustálil skluz. Podmínky testů jsou uvedeny v Tab. 3-4.

## Závěr

Autor studii provedl na dvoudiskovém zařízení, přičemž před každým měřením disky očistil, následně proběhl záběh, a nakonec samotný test. Z výsledků je zřejmé, že MT

konkrétně FMA snižuje opotřebení a zároveň udržuje dostatečný součinitel adheze. Při kontaminaci vodou dochází k snížení součinitele adheze pod požadovanou úroveň. Nižšího opotřebení je dosaženo, pokud se použije FMA, které zároveň nezpůsobuje žádné vrypy do povrchu.

Tab. 3-4 Provozní parametry

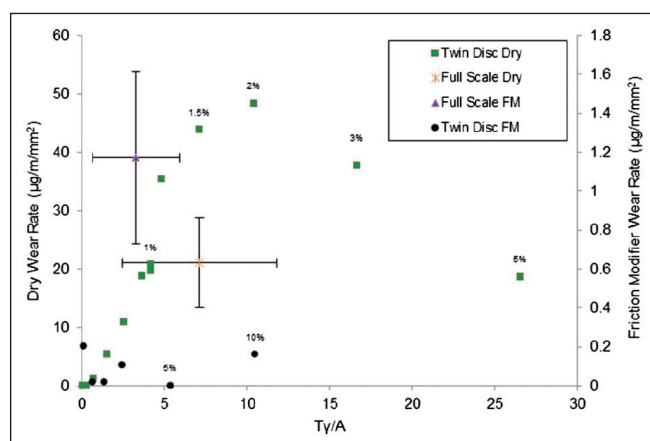
druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
adheze	dvoudiskové	1 200 MPa	1 m/s	0,5; 1; 2; 3 %	2000 a 1000	po záběhu, před pokusem

[28] BUCKLEY-JOHNSTONE, L, M HARMON, R LEWIS, C HARDWICK a R STOCK. A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales.

Studie se snaží popsat rozdíly ve výsledcích získaných na dvojici zařízení, přičemž jedno je typu full-scale a druhé dvoudiskové. První část práce porovnává data opotřebení a druhá se věnuje součiniteli adheze.

### Výsledky

Autor provedl dvojici testů na dvou různých zařízeních. V prvním případě testoval opotřebení, kde porovnal předchozí data pro suchý, mokrý a mazivem kontaminovaný kontakt s MT. Míra opotřebení byla nejmenší v případě MT. Z Obr. 3-3 je patrné, že test na zařízení typu full-scale s MT vykazuje větší opotřebení než na dvoudiskovém zařízení. Autor to vysvětluje tím, že v reálném kontaktu ne všechno mazivo se dostane do kontaktu, ale část je vytlačena mimo.



Obr. 3-3 Porovnání opotřebení full scale a tein disku

Dále se testovala výdrž MT. V případě dvoudiskového zařízení byl počáteční součinitel adheze 0,1 a po 17 500 cyklech se zvýšil na 0,3. Součinitel adheze odpovídající suchému

kontaktu byl dosažen po 23 000 cyklech. U zařízení typu full-scale došlo k překonání hodnoty 0,3 po přibližně 220 cyklech. Test neběžel dostatečně dlouho, aby součinitel adheze překonal hodnotu odpovídající suchému kontaktu.

Využité procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 3-5. MT se v první sérii testů aplikoval pomocí spreje, ve druhé pomocí štětce.

Tab. 3-5 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
opotřebení	full-scale	23 t	–	± 0,5 %	10 000	každých 250 cyklů
opotřebení	dvoudiskové	900 MPa	1 m/s	0–5 %	25 000	každých 250 cyklů
výdrž	full-scale	1 500 MPa	40 mm/s	2 %	800	–
výdrž	dvoudiskové	1 500 MPa	1 m/s	2 %	23 000	0,1 g

## Závěr

První část studie ukázala, že existuje dobrá korelace mezi dvojicí experimentů, i když učiněné předpoklady zavádí do výpočtu větší rozptyl. Výsledky vykazují lepší korelaci, při horších podmínkách v kontaktu. Druhá část poukazuje na rozdílný součinitel adheze pro suchý kontakt, a taky na delší obnovu součinitele adheze u zařízení typu full-scale.

[29] GALAS. R., D KVARDA, M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application.

Práce se zabývá vlivem jednotlivých složek vodních modifikátorů tření z pohledu tření a opotřebení. Autor detailně popisuje způsob přípravy vzorků před experimentem. Cílem je dosáhnout co nejpodobnějšího stavu povrchu, aby nedošlo k ovlivnění výsledků.

## Výsledky

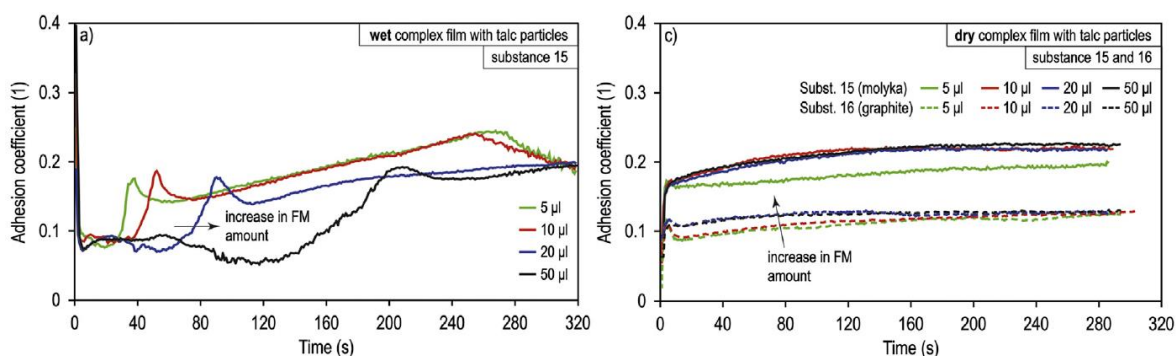
Článek popisuje vývoj součinitele adheze v čase pro různé látky s použitím zařízení typu ball-on-disk, konkrétně mini-traction-machine (MTM). Testy jsou prováděny s různými koncentracemi zkoumaných látek (zpravidla 5 až 15 hm%) a také se zkoumá vliv aplikovaného množství (5, 10, 20, 50 µl a 1 ml). Jeden mililitr simuluje předávkování kontaktu. Směs vody a bentonitu poskytuje střední hodnotu součinitele adheze, přičemž výdrž je ovlivněna aplikovaným množstvím. Přidáním dalších složek dochází k významnému ovlivnění součinitele adheze. V některých kombinacích dokonce pod hodnotu 0,1. Nejkomplexnější směs, jež obsahovala pevné mazivo, se testovala i po vyschnutí a vykazovala zcela odlišné trendy, viz. Obr. 3-4. Za mokrych podmínek byl součinitel adheze dlouho pod hodnotou 0,2. Oproti tomu za suchých podmínek došlo

k jejímu překročení relativně brzy, směs navíc vykazovala stabilní a vhodný součinitel adheze.

Tab. 3-6 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
<b>adheze</b>	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	240 s, 320 s	před testem
<b>opotřebení</b>	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	60 min	adheze > 0,4

Provozní parametry provedených testů jsou uvedeny v Tab. 3-6. Na adhezni testy se použila ložisková ocel AISI 52 100 a na testy opotřebení ocel C45, parametry těles jsou zobrazeny v Tab. 3-7. Před každým experimentem se tělesa očistila v ultrazvukové čističce s acetonem a následně proběhl záběh. K jeho ukončení došlo po ustálení součinitele adheze. Drsnost kuličky po záběhu byla 0,1  $\mu\text{m}$  a disku 0,25  $\mu\text{m}$ . Samotný test započal po dokončení záběhové fáze a nanesení MT. V případě suchých podmínek se čekalo přibližně 5 min na vyschnutí za blíže nespecifikovaných podmínek. V případě testů na opotřebení neprobíhala žádná záběhová fáze, neboť zde by došlo k značnému opotřebení v porovnání s opotřebením po aplikaci substancí.



Obr. 3-4 Adhezni křivka pro mokré (vlevo) a suché (vpravo) podmínky [29]

Tab. 3-7 Parametry kontaktních dvojic

druh testu	ocel disk	ocel kulička	tvrdost disk	tvrdost kulička	drsnost disk	drsnost kulička
<b>adheze</b>	AISI 52 100	AISI 52 100	720–780 HV	800–920 HV	Ra 0,02	Ra 0,01
<b>opotřebení</b>	C45	AISI 52 100	245 HB	800–920 HV	–	Ra 0,01

## Závěr

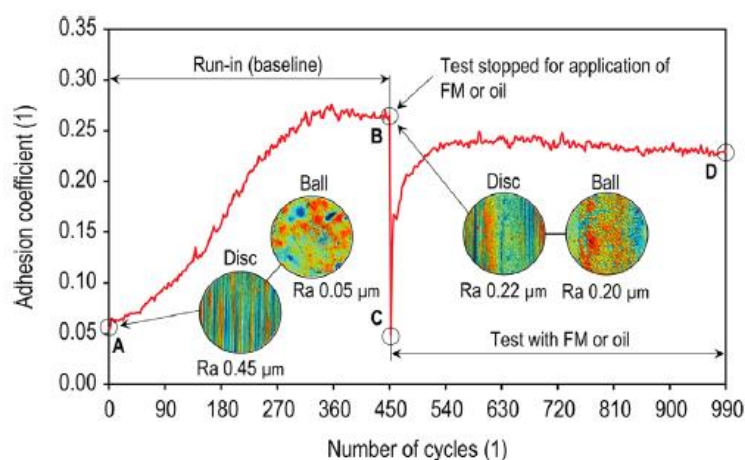
V článku je ukázáno, že existuje velký rozdíl v chování vodních MT za mokrých a za suchých podmínek. Také jsou dobře popsány podmínky experimentu včetně průběhu. Z výsledků vyplývá, že je zapotřebí dodržovat stejný postup při přípravě vzorků.

[30] GALAS. R., M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface.

Práce studuje schopnost olejových TOR maziv řídit součinitel adheze a snižovat opotřebení. Stejně, jako v předchozí publikaci, je zde detailně popsána příprava kontaktních dvojic před experimentem. Jako hlavní zkoumané parametry byly aplikované množství a velikost skluzu.

### Výsledky

Autor v článku porovnával dvě komerčně dostupná TOR maziva. První obsahuje větší počet kovových částic. Ukazuje se, že obsah těchto částic má velký vliv na součinitel adheze a následné opotřebení. Obě TOR maziva jsou schopné udržet součinitel adheze nad určitou minimální hodnotou, pouze při aplikaci dojde k poklesu součinitele adheze a doba obnovy je závislá na skluzu. Byly provedeny testy, kde se měnila rychlost v intervalu 1–2500 mm/s, za plně zaplavených podmínek. Vzniklé křivky mají tvar Stribeckovi křivky a již při velmi nízkých rychlostech dochází k elasto-hydrodynamickému (EHD) mazání. Dále byla hodnocena výdrž maziva – počet cyklů, než dojde k překročení součinitele adheze suchého kontaktu 0,4. Ukázalo se, že hlavní parametr je aplikované množství (1–4  $\mu\text{l}$ ), v některých případech ani po 540 cyklech nedošlo k překročení této hodnoty. Při vyšších množstvích byl detekován dlouhý časový úsek, kdy součinitel adheze byl pod kritickou hodnotou.



Obr. 3-5 Průběh pokusu [30]

Pokusy proběhly na zařízení typu ball-on-disk, konkrétně MTM, za pokojové teploty 23 °C a relativní vlhkosti 35–40 %. Materiál disku byl C45 o tvrdosti 245 HB a drsnosti povrchu Ra 0,45  $\mu\text{m}$ . Kulička byla vyrobena z oceli AISI 1010, dosahovala tvrdosti 650 HB a kvality povrchu 0,05  $\mu\text{m}$ . Po každém testu probíhalo čištění vzorků v ultrazvukové čističce. Pro odstranění vzniklých oxidů na povrchu byla před testy zařazena záběhová fáze, která byla ukončena po stabilizaci součinitele adheze na hodnotě odpovídající suchému tření. Podmínky záběhu byly voleny v závislosti na dalším testu. TOR maziva byla aplikována do dráhy kontaktu pomocí mikropipety a následně se provedlo několik

cyklů s čistým valením za účelem roznesení maziva. Obr. 3-5 ukazuje průběh testu a vývoj drsnosti. Fáze roznášení maziva zde není zahrnuta. Provozní parametry zobrazuje Tab. 3-8.

Tab. 3-8 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
<b>adheze</b>	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	1, 3, 5, 10 %	540	před testem, 1 $\mu$ l
<b>Stribeck</b>	ball-on-disk	750 MPa	1–2500 mm/s	10 %	–	před testem, zaplaveno
<b>výdrž</b>	ball-on-disk	750 MPa	0,3 m/s	10 %	540	před testem, 1–4 $\mu$ l

## Závěr

Ukázalo se, že v případě TOR maziv je hlavním parametrem pro výdrž maziva aplikované množství. Pokud se nanese větší množství, dochází k poklesu součinitele adheze pod kritickou úroveň. Velikost skluzu hraje také důležitou roli, neboť aplikované množství pro jednu hodnotu může být nedostatečné a pro druhou veliké.

[31] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves

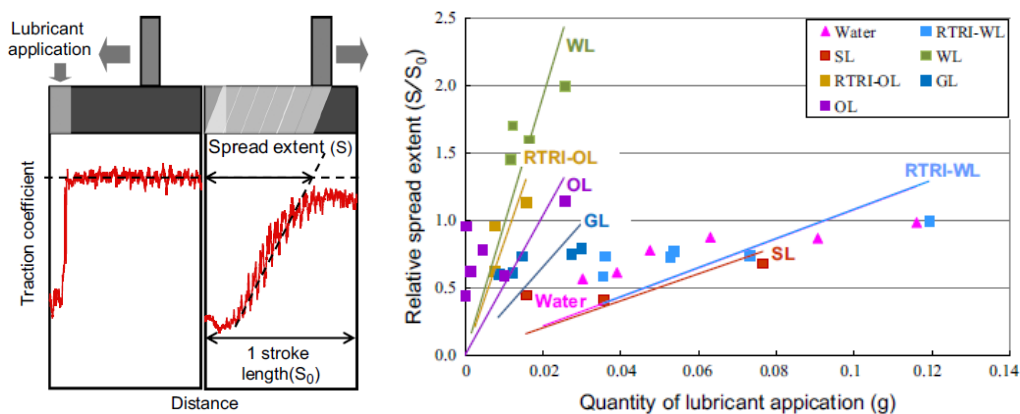
Jedná se o komplexní článek, kde v první části se autoři snaží stanovit součinitel adheze a délku roznesení maziva pro osm látek v laboratorním prostředí. Druhá část článku probíhá v reálném prostředí. Měří se zde skutečná délka roznesení maziva pro dvě aplikovaná množství a také brzdná vzdálenost, která je důležitá z pohledu bezpečnosti provozu.

## Výsledky

Testované látky jsou přijaté japonskými železnicemi a klasifikují se jako olejové (OL), plastické (GL), rozpustné ve vodě („water-soluble“) (WL) a pevné (SL). Výsledky z dvoudiskového zařízení sloužily k sestavení trakčních křivek pro jednotlivé materiály. Překvapivým zjištěním je, že voda dosahovala nejvyššího součinitele adheze 0,24 ze všech aplikovaných materiálů. Tuhá maziva měla rostoucí charakter, proto jsou vhodná na TOR aplikaci. Testy na roznesení látek po povrchu byly provedeny na zařízení typu disk–válec. Výsledky ukázaly, že se relativní roznesení zvyšuje s množstvím maziva (Obr. 3-6 vpravo). Nejlepších hodnot roznesení dosahovala maziva typu WL, potom OL, GL, SL.

Disky pro dvoudiskové zařízení jsou zhotoveny z ocelí, které se běžně používají na výrobu železničních kol a kolejnic. Disk reprezentující kolo je hnaný a disk kolejnice je brzděný. Pro aplikaci maziv se použily dvě metody. V první se odpovídající množství látky rovnoměrně nanese rukou na vzorek kolejnice. Po dobu 60 s se s ním otáčelo rychlostí

5 m/h při zatížení 1 kN. Druhá metoda spočívá ve vstříknutí látky do kontaktu po dosažení požadované rychlosti. Parametry, při kterých se prováděly testy, jsou uvedeny v Tab. 3-9. Zařízení typu disk–válec slouží ke zkoumání roznesení maziva pomocí kol vozidla. Obr. 3-6 vlevo ukazuje metodu vyhodnocení. Jakmile se disk dostane do oblasti s mazivem, dojde k poklesu součinitele adheze. Při zpáteční cestě je mazivo roznášeno, čímž dochází ke zvyšování součinitele adheze. Délka roznesení je definována jako  $S$ , která začíná v místě nízkého součinitele adheze a končí v místě, kde dojde k obnově součinitele adheze na počáteční hodnotu, nebo jí blízkou. Hodnoty relativního roznesení byly normalizované za předpokladu, že jeden zdvih  $S_0$  je roven jedné. Objevuje se zde také předpoklad, že součinitel adheze roste lineárně v oblasti  $S$ .



Obr. 3-6 Vyhodnocovací metoda roznesení (vlevo). vliv množství na relativní roznesení

Testy v provozu byly provedeny na testovací trati Railway Technical Research Institute (RTRI), která se skládá z několika sekcí určených na měření délky roznesení, příčných sil a brzdné vzdálenosti. Výsledky z první sekce ukazují, že na vnitřní kolejnici látka dosahuje rozdílných vzdáleností roznesení, oproti tomu na vnější není pozorován žádný rozdíl. Byla aplikována dvě množství maziva (2 ml a 5 ml) na hlavu vnitřní kolejnice, aby se zjistil jejich vliv na délku roznesení, která nakonec zůstala nezměněna. Oproti tomu při aplikaci většího množství došlo ke snížení adheze skoro po celé délce. Dále byla provedena analýza zbylého množství maziva na kolejnici. Bylo potvrzeno, že mazivo se roznáší pomocí kola, ale množství ulpělé na kolejnici se zmenšuje se zvyšující se vzdáleností. Mazivo SL nebylo po 50 m skoro detekované. Brzdné testy byly provedeny za suchých a mokřích podmínek. Aplikací maziv došlo obecně ke snížení průměrného zpomalení, čímž se prodloužila i brzdná dráha. Procentuální hodnoty vůči nemazanému stavu jsou uvedeny v Tab. 3-10.

Tab. 3-9 Provozní parametry

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu	aplikace MT
adheze	twin disk	751 MPa	40 km/h	1–25 %	–	předem / po dosažení rychlosti
roznesení	disk-cylinder	650 MPa	60 mm/s	6 %	–	–

Při všech testech se vozidlo pohybovalo rychlostí 40 km/h. Měření redistribuce bylo provedeno vyhodnocováním součinitele adheze pomocí tribometru ve vzdálenostech 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 m od místa aplikace. Aplikovaly se 2 ml maziva na vzdálenosti 2,7 m, pro RTRI-WL to bylo 30 ml. Následně byl porovnáván poměr součinitele adheze před a po aplikaci. Zbylé množství bylo setřeno z pojížděné hrany, popř. temena. gázou a následně byla provedena analýza získaného oleje, popř. spektrální analýza. V případě brzdných testů byly použity pouze vzduchové brzdy a aplikace probíhala na temeno vnitřní kolejnice. Pro docílení mokřých podmínek byla nanášena voda na obě kolejnice s průtokem 4 l/min po celou dobu testu. Některá maziva se dávkovala z vozidla po celou dobu testu, jiné po dobu ujetí 3 metrů a další pomocí postranních jednotek.

Tab. 3-10 Změny brzdného výkonu při aplikaci maziv v %

nanesené mazivo	podmínky	SL	RTRI-SL	WL	RTRI-WL
<b>průměrné zpomalení</b>	suché	11,7	5,5	23,8	16,2
	mokré	18,9	17,3	21,1	6,1
<b>průměrná brzdná vzdálenost</b>	suché	4,7	2,1	16,8	9,0
	mokré	18,1	18,2	20,9	7,2

## Závěr

Článek podrobně popisuje postup při testování jednotlivých látek z pohledu součinitele adheze. Ze všech testovaných látek voda vykazuje nejvyšší součinitel adheze. Z experimentů zaměřených na délku roznesení maziva v laboratorním prostředí plyne, že se zvyšujícím se aplikovaným množstvím roste délka ošetření kolejnice a jednotlivé látky mají tuto schopnost rozdílnou. Délka ošetření kolejnice byla zkoumána i na testovací trati, kde ovšem nedošlo k potvrzení závěrů z laboratoře.

## 3.2 Terénní testy

Kapitola bude zaměřena na měření na reálných kolejnících ať již za přítomnosti různých kontaminantů (mazivo na okolky, voda, ...), TOR produktů nebo suchých podmínek, čímž se v práci myslí běžný, nijak neupravovaný stav kolejnice. Důraz bude kladen jak na výsledky, tak na měřicí zařízení. Získané poznatky budou použity při vývoji traťového tribometru a následném měření v terénu.

[32] HARRISON, H., T. MCCANNEY a J. COTTER. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface

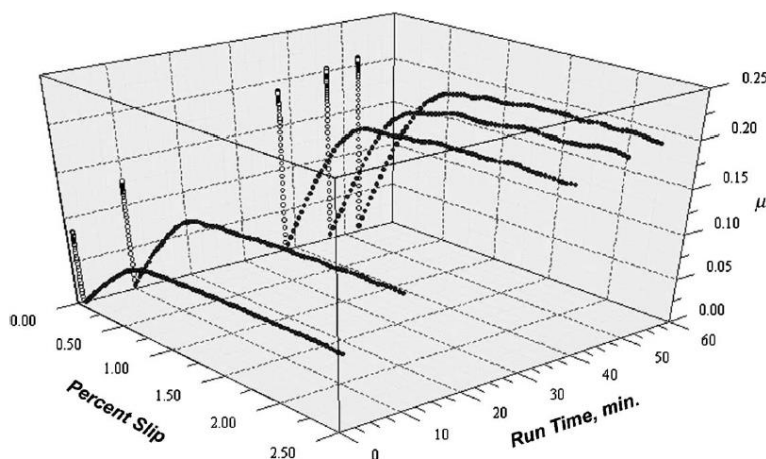
Jedná se o jeden z prvních článků, který popisuje měřicí zařízení na stanovení součinitele tření potažmo součinitele adheze, jak v laboratorním, tak reálném prostředí a snaží se

osvětlit rozdíly mezi nimi. Princip funkce jednotlivých zařízení je zde také popsán. Článek se snaží odpovědět na otázku, jaké parametry způsobují nesrovnalosti mezi laboratorními a terénními měřeními.

## Výsledky

První testy byly prováděny v laboratorním prostředí na reometru, který je navržen tak, aby měřil součinitel tření jako funkci posunutí ve třecí vrstvě. Využívá se zde konfigurace dvou pinů na disk, jež jsou zatěžovány zavěšeným závažím. Disk je spojen s otočným stolem skrze snímače zatížení, které měří celkovou střižnou sílu mezi piny a diskem při pomalém otáčení stolu. Druhým zařízením pro testování v laboratorním prostředí byl stroj Amsler. Zde jsou využita dvě válcová kola otáčející se vůči sobě se stejným převodovým poměrem. Při osazení odpovídajícími průměry kol dochází k fixnímu procentuálnímu skluzu, na základě čehož je možné sestavit závislost součinitele tření, popř. součinitele adheze na procentuálním skluzu. Nevýhodou tohoto testeru je, že normálová síla není přímo měřená. Dále, válcová kola jsou uložena letmo na hřídeli a jejich elastická deformace může způsobit změnu typu kontaktu, čímž se také změní kontaktní tlaky.

Pro měření ve venkovním prostředí byl použit ruční tribometr, který umožňoval zaznamenávat normálovou a třecí sílu, ale nikoli skluz. Pracoval na principu zvyšování brzdného momentu měřicího kola, dokud nedošlo k prokluzu. Součinitel adheze se následně vypočetl z maximálního momentu. Druhé zařízení TriboRailer využívá k pohonu doprovodné vozidlo a dokáže pracovat až při rychlosti 100 km/h. Na rozdíl od ručního tribometru se zde vyhodnocuje příčný skluz s maximem 2,5 %. Obsahuje speciálně vyvinutou snímací jednotku s vysokou přesností.



Obr. 3-7 Vliv doby od aplikace na trakční křivku [32]

Při porovnání výsledku z ručního tribometru a TriboRaileru lze dojít k závěru, že tribometr mírně nadhodnocuje součinitel adheze, což pramení ze zaznamenání hodnoty při vyšším skluzu, než je bod saturace. Zařízení taktéž neumožňuje měřit aktuální skluz. Dále byla pozorována nepřímá závislost mezi hodnotou součinitele adheze a kontaktním tlakem, tedy se zvyšujícím se tlakem klesá součinitel adheze. Také zde byla provedena měření, kde se

sledoval vliv doby od aplikace na součiniteli adheze. Z Obr. 3-7 lze vyčíst rostoucí závislost součinitele adheze na čase od aplikace látky na úpravu součinitele tření. Výsledky z reometeru slouží jako rychlé zhodnocení základních vlastností TOR produktů. Jednou z nevýhod je, že závislost součinitele tření na posunutí nelze dobře překlomit na závislost součinitele tření a skluzu, což znesnadňuje jejich porovnání. Nicméně laboratorní a venkovní testy ukazují podobné výsledky, ovšem v jiné výkonostní části.

## **Závěr**

Článek představil čtyři metody pro hodnocení součinitele adheze – dvě laboratorní a dvě terénní. Dále ukázal ovlivňující parametry, konkrétně: „stáří“ – čas od aplikace, oblast trakční křivky a Hertzovo kontaktní napětí. Obecně lze říct, že hodnota součinitele adheze bez těchto parametrů není moc vypovídající.

---

[33] AREIZA, Y. A., S. I. GARCÉS, J. F. SANTA, G. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer.

Článek se zabývá měřením součinitele adheze na reálné trati za přítomnosti různých kontaminantů (dvojice TOR produktů, maziva na okolek a vody) pomocí ručního tribometru. Pro získání referenční hodnoty součinitele adheze bylo provedeno měření za suchých podmínek. Součástí práce jsou trakční (adhezní) křivky pro jednotlivé podmínky.

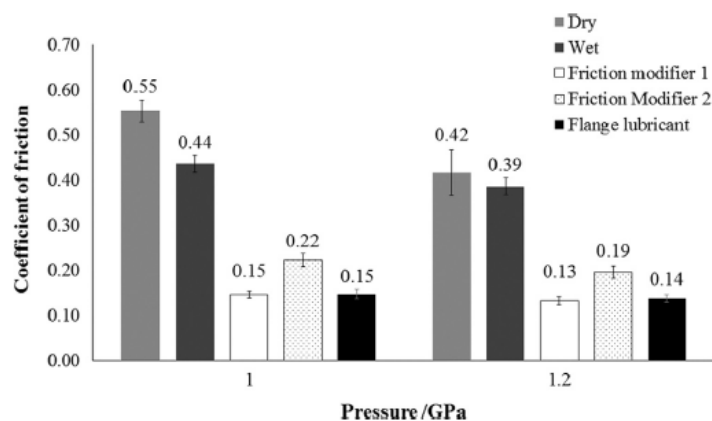
## **Výsledky**

K měření byl využit ručně tlačný tribometr, který umožňoval stanovit kompletní adhezní křivku. Součinitel adheze a další data byla ukládána do notebooku. Měřicí kolo je přitlačováno ke kolejnici pomocí pružiny a proto v průběhu měření kontaktní síla zůstává konstantní. Experimenty probíhaly za kontaktního tlaku 1,0 a 1,2 GPa. K vyvození skluzu je využita elektromagnetická brzda, která postupně zvětšuje brzdny moment, čímž roste i skluz. Měřicí karta připojená k notebooku zaznamenává rychlost měřicího kola a normálovou sílu a řídí brzdny moment. Měření začalo po dosažení konstantní rotační rychlosti.

Každý test (celkem 5) se skládal z šesti nezávislých měření provedených na úseku kolejnice o délce 30 m. Měřicí kolo tribometru bylo čištěno po každém měření pomocí metanolu a acetonu. Kolejnice byla taktéž očištěna, ovšem pouze před a po každé sérii testů. Prostředky na čištění byly stejné. Čištěním došlo k odstranění kontaminantů jako je listí nebo prach, nikoli však silně přichycených oxidických vrstev. Voda byla aplikována pomocí láhve a množství nebylo kontrolováno. Zbylé látky se aplikovaly pomocí štětce a množství bylo předem odměřeno pomocí stříkačky. Dávka se pohybovala v rozmezí 1 až 3 ml/m kolejnice, podle doporučení výrobce.

Z Obr. 3-8 je zřejmé, že po aplikaci látek ovlivňující součinitel adheze dochází k jeho snížení oproti suchým podmínkám, které dosahují hodnoty 0,55 pro kontaktní tlak 1 GPa.

Pro mokrou kolejnici (podmínky simulující déšť) se součinitel tření pohybuje v rozmezí 0,39 až 0,44. Aplikací komerčního modifikátoru tření (FM1) se hodnoty sníží na úroveň maziva na okolky, přibližně 0,15. Tento propad může být způsoben nevhodným množstvím maziva naneseným na kolejnici. Vyrobený modifikátor tření vykazuje součinitel tření v rozsahu 0,19 – 0,22. Při zvýšení kontaktního tlaku dochází k poklesu měřených hodnot součinitel adheze. Nejvýraznější rozdíl je pro suché podmínky, což autorka vysvětluje lokálním deformačním zpevněním měkkého materiálu. Aplikací TOR produktů se tento vliv sníží. Článek porovnává naměřené hodnoty s literaturou a konstatuje, že jsou v dobré shodě.



Obr. 3-8 Průměrný součinitel tření

## Závěr

Publikace popisuje funkci traťového tribometru a způsob měření na reálné kolejnici. Stanovoval se součinitel adheze pro pětici podmínek, přičemž nejvyšších hodnot bylo dosaženo za suchých podmínek a nejnižších při aplikaci komerčního modifikátoru tření a maziva na okolek. Změřené hodnoty součinitele tření jsou porovnány s literaturou. Komentován je i vliv kontaktního tlaku v průběhu měření, a také jak se změní hodnoty.

[34] HARRISON, H. The development of a low creep regime, hand-operated tribometer.

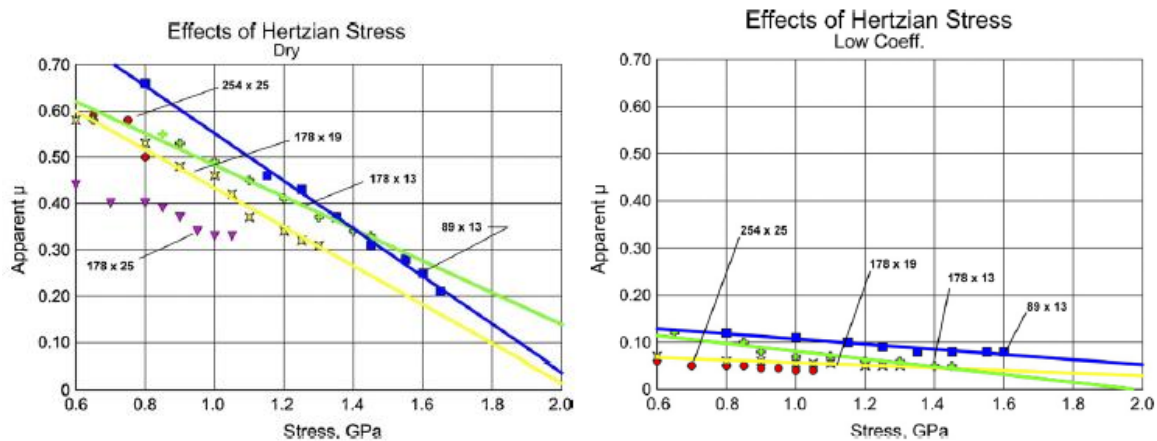
[35] HARRISON, H. Producing and measuring the 3rd body layer.

Jedná se o dvojici publikací, které se věnují rozdílům v jednotlivých měřeních součinitele adheze. [34] se zabývá parametry zařízení, mezi které patří kontaktní tlak, rychlost, geometrie měřicího kola a tepelné zpracování. Harrison [35] si položil otázku, jaká je „správná“ hodnota součinitele adheze a stanovil dopad mnohonásobných průjezdů a čištění kola a kolejnice.

## Výsledky

Všechny experimenty v [34] byly provedeny v laboratoři na testovací soupravě, jež obsahovala měřicí kolo a jednotku z ručně tlačného tribometru. Skluz byl vytvářen pomocí natáčení měřicího kola kolem svislé osy. Tento princip je vhodný pro vytváření maximálního skluzu 2-3 %. Měřicí jednotka dokáže zaznamenávat sílu ve třech směrech, na základě čehož se stanovuje součinitel adheze. Druhá publikace [35] využívá zařízení, které se pevně připevňuje ke kolejnici. Způsob vyvození skluzu je totožný jako v předchozí publikaci.

Měřicí kola měla tři průměry 254, 178 a 89 mm a každé mělo jiný rádius v příčném směru. Všechna kola byla broušena na drsnost 0,2  $\mu\text{m}$ . Největší a nejmenší kolo bylo vyrobeno z nerezové oceli 416 a zakaleno na 40–45 Rc. Prostřední kolo bylo z běžné oceli válcované za tepla a nijak tepelně zpracované. V průběhu experimentu se postupně zvětšovala zátěžná síla, v jejímž důsledku se měnil i kontaktní tlak. Pokud se vykreslí změřený součinitel adheze na kontaktním tlaku, vznikne lineární závislost, přičemž každé kolo má jinou směrnici (Obr. 3-9). Tato směrnice se liší i v závislosti na podmínkách měření (střední a nízký součinitel adheze). Za suchých podmínek je sklon přímky největší a za nízkého součinitele adheze nejmenší. Dále se zde zkoumal vliv rychlosti. Zařízení v původní konfiguraci natáčelo měřicí kolo ve frekvenci 1 Hz. Pro tento stav byla stanovena minimální rychlost na 0,3–0,6 m/s. Nad touto hodnotou jsou malé rozdíly v měřené hodnotě. Po zmenšení frekvence natáčení kola se rychlostní limit posunul na 0,02 m/s.



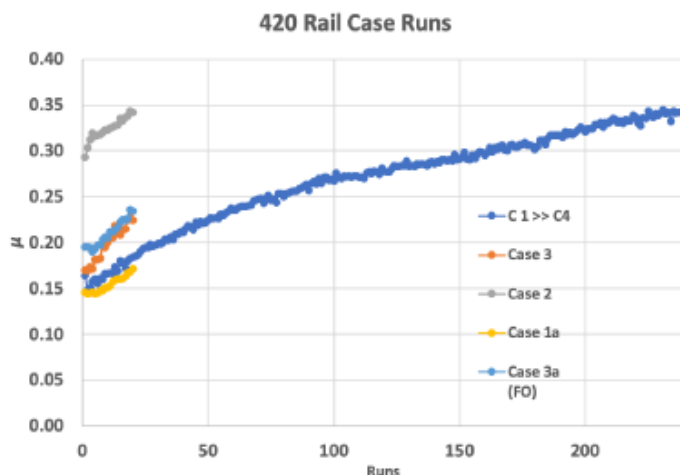
Obr. 3-9 součinitel adheze v závislosti na kontaktním tlaku a konfiguraci kol, a) suché podmínky b) nízká adheze

Publikace také poukazuje na jev, že pokud se vezme nové kolo a nechá se zaběhnout na stabilní hodnotu adheze a následně se provede měřicí cyklus (postupné zvyšování zatížení) získají se poměrně nízké hodnoty součinitele adheze. Pokud se bude dále v záběhu a měření pokračovat, tak každé další měření bude vykazovat vyšší hodnoty součinitele adheze. Při extrapolaci křivek (součinitel adheze – kontaktní tlak) z jednotlivých měření dojde k jejich protnutí v jednom bodě. Autor usuzuje, že dojde k elastické a plastické deformaci výstupků a nastane tak společný stav povrchu.

Tab. 3-11 Čtyři základní stavy kola a kolejnice

<b>STAV 1</b> Čisté kolo Čistá kolejnice	<b>STAV 2</b> Čisté kolo Neočištěná kolejnice
<b>STAV 3</b> Neočištěné kolo Očištěná kolejnice	<b>STAV 4</b> Neočištěné kolo Neočištěná kolejnice

Stejný jev je diskutován ve druhé publikaci [35]. Jsou zde zavedeny čtyři stavy kontaktních dvojic (viz. Tab. 3-11). První část popisuje rozdíl mezi nimi teoreticky i pomocí experimentů. V případě čistého kola a kolejnice součinitel adheze dosahuje hodnoty 0,15 a po 240 průjezdech se zvýší na 0,35 (viz. Obr. 3-10). Kontakt tedy přejde ze stavu jedna do stavu čtyři. Po očištění kola a měření na stejné dráze, jako v předchozím případě, součinitel adheze začíná na hodnotě 0,3 a vykazuje rychlejší růst. V případě čisté kolejnice a neočištěného kola součinitel adheze začíná na trochu vyšší hodnotě (0,17). Další část publikace se zabývá vlivem tvrdosti kola a kolejnice. Z několika provedených měření vyplývá, že tvrdší kolejnice, zejména dlouhodobě ježděné, vykazují vyšší hodnoty součinitele adheze. V případě měkkého kola (ocel válcovaná za tepla) měřené hodnoty vykazují stejný trend jako standardní kolo, ovšem po určitém počtu měření dochází k redukci součinitele adheze. Autor to vysvětluje tím, že částice opotřebení z kola významně ovlivňují třecí vrstvu a vykazují nižší smykovou pevnost.



Obr. 3-10 Laboratorní testy na nové tvrdé kolejnici

## Závěr

Obě publikace jsou zaměřeny na parametry ovlivňující měřený součinitel adheze. Z první vyplývá, že se zvyšujícím se kontaktním tlakem klesá součinitel adheze a přímka má pro každou geometrickou konfiguraci, dokonce i pro jiné podmínky v kontaktu, jinou směrnici. Druhá pojednává zejména o rozdílných hodnotách součinitele adheze v závislosti na počtu průjezdů přes jeden úsek. Dochází totiž k ovlivnění třecí vrstvy a jejímu přenosu na očištěné měřicí kolo.

- [36] LUNDBERG, J., M. RANTATALO, Ch. WANHAINEN a J. CASSELGREN.  
Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions

Publikace porovnává výsledky při aplikaci MT na reálnou trať získané pomocí ručně tlačeného tribometru a IORE lokomotivy. Měření byla provedena jak za suchých podmínek, tak po aplikaci MT. Jedná se o jeden z mála full-scale terénních testů, které jsou publikované. Tento typ měření je extrémně finančně náročný.

### **Výsledky**

Pro účely tohoto testu byl využit plně naložený vlak ocelkové hmotnosti 8520 t a komerčně dostupný tribometr. První změřený součinitel adheze za suchých podmínek pomocí tribometru má hodnotu 0,35, která následně roste a ustálí se v rozmezí 0,6–0,7. Je-li stejný úsek měřen průjezdem vlaku, získají se přibližně poloviční hodnoty. Výrobce vodního MT udává nejmenší koeficient adheze 0,3, ale z měření tribometrem vychází hodnota 0,18. V případě lokomotivy dochází k prokluzu všech kol, což vede k výraznému zpomalení až zastavení a následnému ukončení pokusu. Průměrný zaznamenaný součinitel adheze je v rozsahu 0,1–0,15. Ke zvýšení na 0,23 (poměrně stabilní) dojde, pokud se kolo obalené MT z předchozího měření odvaluje po neošetřené kolejnici (lokomotiva couvala). Při druhém najetí do oblasti s MT součinitel adheze znovu padá. Tyto rozdíly mohou být vysvětleny skrze vliv aplikovaného množství.

Teplota v době testů byla  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Měřený úsek měl 330 m s mírným stoupáním a nespecifikovanou drsností. Využila se lokomotiva, která měřila skluzovou rychlost a třecí sílu svých čtyř podvozků. Průměrná skluzová rychlost dosahovala 0,15–0,3 m/s. Za suchých podmínek vlak dokázal na zmíněném úseku zrychlit z 13 km/h na 20 km/h. MT se na kolejnici aplikoval ručně pomocí malířského válečku ve vrstvě o tloušťce 0,2–0,5 mm. První průjezd nebyl dokončen z důvodu nedostatečného součinitele adheze. Další měření proběhlo při návratu vlaku do počáteční pozice – 100 m před začátkem nanášení MT. Druhý průjezd byl zároveň posledním měřením. Ruční tribometr využívá ocelové kolo o průměru 89 mm a šířce 9,2 mm zatěžované pomocí pružiny. Kolo je připojeno skrze elektromagnetickou spojku k rámu. Skluz se ovládá pomocí ručně řízeného odporu. Získaný součinitel adheze odpovídá bodu, kdy došlo k proklouznutí kola. V průběhu experimentu šel operátor rychlostí 5 km/h. Měření ručním tribometrem bylo zařazeno před průjezd vlaku, aby nedošlo k ovlivnění výsledků, jelikož by se neměřily stejné třecí vrstvy.

### **Závěr**

Článek ukazuje rozdíl mezi skutečným součinitelem adheze měřeným pomocí lokomotivy a pomocí tribometru. V případě suchých podmínek tribometr nadhodnocuje součinitel adheze na dvojnásobek v porovnání s lokomotivou. Po aplikaci MT součinitel adheze klesl na příliš nízkou úroveň, což vedlo na nepříjemně dlouhou brzdovou dráhu.

---

## 4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Rešerše je analyzována z několika pohledů. Nejprve jsou detailně rozebrány laboratorní testovací zařízení včetně podmínek, za kterých měření probíhala. Další část se věnuje použité metodologii při provádění experimentu – záběh, aplikace TOR produktů atd. Nakonec jsou analyzovány publikace týkající se terénních testů a převážně traťových tribometrů.

### 4.1 Laboratorní testovací zařízení

Při hodnocení výkonnosti maziv se používá několik typů zařízení. První z nich je zařízení typu full-scale, které využívá ve většině případů reálné kolo a kolejnici. Buckley-Johnstone [28] na tomto zařízení provedl testy na opotřebením a výdrž maziva v kontaktu. Z Tab. 4-1 si lze všimnout, že při testu byla využita rychlost pouze 40 mm/s, což je obecně problém testovacích zařízení a nejenom typu full-scale.

Tab. 4-1 Provozní parametry full-scale zařízení

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
opotřebením	full-scale	23 t	–	÷ 0,5 %	10 000	každých 250 cyklů
výdrž	full-scale	1 500 MPa	40 mm/s	2 %	800	–

Dalším využívaným zařízením je dvoudiskové zařízení. To bylo využito v řadě studií, jelikož provoz není tak finančně náročný a poměrně dobře reprezentuje kontakt kola s kolejnicí. Velikost disků se liší v závislosti na konkrétním zařízení, např. SUROS [27] využívá průměr 47 mm a dvoudiskové zařízení využitá Chenem [31] průměr 300 mm. Také se zde objevuje jasný trend v použitých materiálech. Většinou se jedná o oceli používající se na výrobu kol a kolejnic, v některých případech se dokonce vyřezávají z těchto dílů [27, 28]. Pokud to není možné, snaží se vybrat ocel o podobných parametrech. Kontaktní oblast má tvar buď obdélníka (v nezatiženém stavu liniový kontakt) [25, 27, 28] nebo elipsy, které se docílí vytvořením rádiusu na jednom z disků [31]. Tab. 4-2 ukazuje provozní parametry použité při experimentech. Lze si všimnout, že kontaktní tlak se pohybuje kolem hodnoty 1 000 MPa, což odpovídá lehkým soupravám, např. metro, tramvaje. Co se týče rychlosti, tak nejčastější hodnota odpovídá 1 m/s, což je pravděpodobně způsobeno limity stroje a použitím malých průměrů disků. Chen [31] se

dostal dokonce až na hodnotu 40 km/h, která se blíží reálným podmínkám. Skluz se většinou pohybuje v rozmezí 0–10 %, neboť v této oblasti se nachází bod saturace. Délka samotného testu závisí na pozorovaných parametrech a cíli experimentu. Dvoudiskové zařízení je vhodné pro zkoumání opotřebení a součinitele adheze při různých skluzech.

Tab. 4-2 Prvozní parametry používané na dvoudiskových zařízeních

autor	druh testu	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
<b>Arias-Cuevas</b>	adheze	1 200 MPa	1 m/s	0,5; 1; 2; 3 %	2000 a 1000	po záběhu, před pokusem
<b>Buckley-Johnstone</b>	opotřebení	900 MPa	1 m/s 400 (r/min)	0–5 %	25 000	každých 250 cyklů
<b>Buckley-Johnstone</b>	výdrž	1 500 MPa	1 m/s 400 (r/min)	2 %	23 000	0,1 g
<b>Lundmark</b>	adheze, opotřebení	810–880 MPa	200 r/min (=450 mm/s)	1 %	5 h / 60 000 otáček	žádný
<b>Chen</b>	adheze	751 MPa	40 km/h	1–25 %	–	předem / po dosažení rychlosti

Galas ve svých pracích [29, 30] využil komerční zařízení typu ball-on-disk – MTM. Materiál kontaktních těles je ložisková ocel AISI 52 100 a pro testy opotřebení byla využita ocel C45 mající podobné vlastnosti jako ocel na železnice. V obou případech jsou tělesa leštěna alespoň na Ra 0,25 μm pro disk a Ra 0,1 μm pro kuličku. Parametry testů jsou uvedeny v Tab. 4-3. Lze si všimnout, že kontaktní tlak a rychlost jsou nižší než u dvoudiskových zařízení. Rychlost je limitována konstrukcí samotného stroje a velikostí testovacích vzorků. Skluz zde byl zvolen do hodnoty 10 %. Zařízení je vhodné na získávání trakční křivky případně na testy opotřebení.

Tab. 4-3 Provozní parametry zařízení typu ball-on-disk

druh testu	medium	kontaktní tlak	rychlost	skluz	počet cyklů	aplikace MT
<b>adheze</b>	TOR mazivo	750 MPa	0,3 m/s	1, 3, 5, 10 %	540	před testem, 1 μl
<b>stribekova křivka</b>	TOR mazivo	750 MPa	1–2500 mm/s	10 %	–	před testem, zaplaveno
<b>výdrž</b>	TOR mazivo	750 MPa	0,3 m/s	10 %	540	před testem, 1–4 μl
<b>adheze</b>	MT	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	240s, 320s	před testem
<b>opotřebení</b>	MT	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	60 min	adheze > 0,4

## 4.2 Metodologie experimentu v laboratoři

V některých člancích se autoři zmiňují o takzvané fázi záběhu. Jedná se o proceduru, která má ustálit drsnosti na kontaktních plochách a nastolit stejné počáteční podmínky, které vedou k větší opakovatelnosti měření. Arias-Cuevas [27] před každým experimentem provedl záběh čítající 4 000 cyklů při skluzu 0,5 %. Galas také vykonával záběh, ovšem konečné kritérium nebyl počet cyklů, ale ustálení součinitele adheze na hodnotě odpovídající suchému tření. Ve své práci [29] neuvádí, za jakých podmínek byl záběh proveden, pouze konstatuje, že jej vynechal při testech opotřebení. Oproti tomu v práci [30] probíhá záběh za stejných podmínek jako následující experiment. Všechny práce řešící součinitel adheze využívají pro testy nové dvojice kontaktních těles, což není zcela vhodné, neboť se v průběhu testů mění topografie a konformita vzorků, což může ovlivňovat měřený součinitel adheze.

Nejvíce zmiňovaný způsob nanášení maziva je pomocí štětce na vzorek kolejniče [27, 28]. Galas v případě vodních MT [29] provedl aplikaci podél kontaktní oblasti a následně čekal přibližně pět minut na vyschnutí a následně započal experiment. TOR maziva Galas [30] dával pomocí mikropipety do kontaktní dráhy. Následně provedl několik cyklů při čistém valení, aby získal tenký jednotný film maziva. Chen [31] pro aplikaci MT použil dvě metody. V první ručně nanasl MT na vzorek kolejniče a následně spustil otáčky. Roznášení trvalo 60 s při rychlosti 5 km/h a zatížení 1 kN. V druhém případě počkal na dosažení požadovaných otáček a MT vstříknul do kontaktní oblasti.

Nejčastější způsob čištění vzorků je pomocí ultrazvukové čističky. Lundmark [25] a Galas [30] v člancích blíže nespecifikovali, jaké rozpouštědlo či čistič použili. Arias-Cuevas své vzorky čistil v etanolu [27] a Galas ve druhé analyzované práci uvádí, že použil aceton [29]. Zařazení záběhové fáze může posloužit také jako mechanická forma čištění, zejména před vzniklými oxidy [30].

## 4.3 Klíčové parametry ovlivňující výsledky experimentů

Objevuje se několik článků, které popisují rozdíly ve změřených hodnotách a jejich důvody. Jedním z důvodů je velikost kontaktního tlaku. Tomu je věnováno hned několik publikací [26, 32, 33]. Z výsledků Chena [26] lze vypozařovat vliv rychlosti a drsnosti, i když to nebylo primární zaměření článku. Lu [37] popsal dopad skluzové rychlosti na adhezi. Lundmark [25] ukázal, že počáteční drsnost kontaktních těles ovlivňuje adhezi v ustáleném stavu po záběhu. Dopad rozdílné teploty a vlhkosti zkoumal Lewis [38].

## 4.4 Terénní testy

Jeden z prvních ručních tribometrů [32, 36] dokázal měřit pouze normálovou a tečnou sílu a byl ručně tlačěn. Brzdný moment se postupně zvětšoval a při prokluzu došlo k zaznamenání hodnoty součinitele adheze, který se spočetl z poměru tečné a normálové síly. Tribometr dával z dnešního pohledu pouze orientační hodnoty, neboť nešlo stanovit, při jakém skluzu došlo k zápisu dat. Vylepšený ručně tlačенý tribometr [33] dokázal zaznamenávat i hodnotu skluzu společně se součinitelem adheze. O řízení brzdného momentu se starala měřící karta připojená k počítači. Na základě uložených dat z měřeného úseku (přibližně 30 m) bylo možné vykreslit adhezní křivku. Nejnovější ruční tribometr [35] se pevně připevňuje ke kolejnici a měří se pouze krátký úsek. Skluz je vyvozován natáčením měřicího kola kolem svislé osy, čímž je možné dosáhnout hodnoty až 15 %. Výhoda mechanismu spočívá v přesnějším vytváření malých skluzů. Dalším zařízením na měření součinitele adheze na reálné kolejnici je TriboRailer [32], který přesně zaznamenává data do skluzu 3 %, jež se vytváří taktéž natáčením měřicího kola. Nevýhoda ovšem spočívá ve váze a nutnosti doprovodného vozidla.

Všechny publikace v kap. 3.2 uvádí fakt, že s rostoucím kontaktním tlakem klesá měřený součinitel adheze. Harrison v [32] pouze prezentuje, že pokud dojde ke zvýšení normálové síly u TriboRaileru, tak se sníží součinitel adheze. Areiza [33] provedla měření TOR produktů a maziva na okolek při dvojici tlaků. Z výsledků je zřejmé, že k největšímu poklesu součinitele adheze vlivem kontaktního tlaku došlo za suchých podmínek. V ostatních měřeních není pokles tak výrazný. Tomuto problému se podrobně věnuje [34]. Autor zjistil, že součinitel adheze lineárně klesá se zvyšujícím se kontaktním tlakem a směrnice je pro každou geometrii kola jiná. Pokud se měří nízká adheze, tak přímka vykazuje plytší charakter. Poprvé se zde objevuje jev, kdy s každým dalším měřením na nové kolejnici roste zaznamenaný součinitel adheze. Tento jev je podrobně analyzován v [35]. Na povrchu kola a kolejnice se postupně vytváří třecí vrstva, která dosahuje vyšší smykové pevnosti. Pokud se jedná o stav, kdy je kolo očištěno a kolejnice nikoli, měřený součinitel adheze dosahuje podobných hodnot, jako by se jednalo o stav neočištěného kola a kolejnice.

Součinitel adheze pro suché podmínky změřený ručním tribometrem na reálné trati [36] dosahuje hodnoty 0,6–0,7, což je vyšší hodnota než změřila Areiza [33]. Hodnoty získané po aplikaci TOR produktů jsou v dobré shodě a pro [36] dosahuje 0,18. Pokud se ovšem stejný úsek změří i pomocí lokomotivy, dojde se k závěru, že reálný součinitel adheze je ještě nižší, přibližně 0,1–0,15. V obou případech jsou hodnoty nedostatečné pro dosažení požadované trakce nebo brzdění.

## 4.5 Vyvození závěrů získaných na základě rešerše

Na základě publikací zmíněných v tomto pojednání lze vyvodit následující závěry:

- Existuje několik typů zařízení (full-scale [28], pin-on-plate [24, 38], twin-disk [27, 31] a ball-on-disk [29, 30]), které je možné při vývoji metodiky na stanovení výkonnosti TOR produktů použít. Mezi nejvhodnější patří dvoudiskové zařízení a zařízení typu ball-on-disk.
- Doposud neexistuje žádný široce používaný postup, jak provádět testy s TOR produkty.
- V prvních minutách experimentu dochází k výrazné změně tvaru kontaktní drážky, proto je zapotřebí zařadit fázi záběhu [27, 29, 30], při které se bude čekat na ustálení součinitele adheze a drsnosti, jež významně ovlivňuje test [25, 26]. Před samotným měřením bude zapotřebí znát hodnotu drsnosti.
- Nejčastěji používané materiály kontaktních dvojic jsou reálné materiály [27, 28] (vzorky se realizují vyřezáváním z kola nebo kolejnice) nebo ložisková ocel [29, 30].
- Skluz se pohybuje v intervalu 0–10 %. Nejčastěji používaná rychlost je 1 m/s, kontaktní tlak 750–1500 MPa (viz Tab. 4-2 a Tab. 4-3)
- Z laboratorních výsledků vyplývá, že rozdílné látky dosahují různé délky ošetření kolejnice a také že tuto vzdálenost ovlivňuje aplikované množství. Měření na reálné trati toto zjištění nepotvrdilo [31].
- Kontaktní tlak významně ovlivňuje měřený součinitel adheze pomocí ručních tribometrů [32–34]. Hodnota také záleží na konkrétní geometrii měřicího kola [34].
- Opakované měření jednoho úseku kolejnice je doprovázeno postupným zvyšováním součinitele adheze. Pokud je měřicí kolo z měkkého materiálu, tak se hodnota zastaví na nižším čísle, neboť tření vrstva je ovlivněna částicemi opotřebení z kola [35].
- Ideální stav pro měření ručním tribometrem je, aby kolo bylo pokryto stejnou třecí vrstvou jako kolejnice. Jedná se o nejrealističtější stav. Pokud je měřicí kolo čisté, součinitel adheze dosahuje nižších hodnot, ovšem tento vliv není markantní [35].

# 5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

## 5.1 Zaměření disertační práce

Disertační práce se zaměřuje na hodnocení výkonnosti TOR produktů. Pod pojmem výkonnost se v této práci myslí více vlastností TOR produktů – součinitel adheze, výdrž maziva v kontaktu, redistribuce maziva a délka ošetření kolejnice. V současné době neexistuje žádný předpis, který by obsahoval pokyny na testování maziv. Každá práce je provedena za mírně odlišných podmínek, což znamená, že jednotlivá data nelze jednoduše porovnat mezi sebou, natož stanovit, jak se budou chovat v reálném provozu. Odborná literatura se také nemůže shodnout na tom, v jaké vzdálenosti od místa aplikace ještě TOR produkty plní svoji roli, tedy udržení součinitele adheze na středních hodnotách. Rozdíl pramení z nejednotnosti použitých metod.

Disertační práce se skládá z experimentálního vývoje zařízení 25 %, konkrétně se jedná o vývoj traťového tribometru. Další částí (25 %) je specifický aplikovaný výzkum v podobě vývoje metodiky na hodnocení TOR produktů v laboratorním prostředí. Poslední část práce (50 %) spadá do orientovaného základního výzkumu, kde bude snaha popsat chování třecích vrstev a jejich ovlivňujících parametrů jak v laboratorním, tak reálném prostředí.

## 5.2 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je hodnocení výkonnosti TOR produktů, což zahrnuje vývoj metodiky pro testování TOR maziv v laboratorním prostředí a zároveň měření těchto látek na kolejnici v reálném a laboratorním prostředí. Za účelem měření na kolejnici je potřeba vyvinout nový traťový tribometr. Metodika umožní komparačně určit, který z produktů dosahuje lepších výsledků. Měření na kolejnici pomůže pochopit mechanismus roznášení maziva a zároveň porovná laboratorní a reálná data.

Dílčí cíle vedoucí k dosažení hlavního cíle:

- identifikace faktorů ovlivňující opakovatelnost experimentu za suchých podmínek na MTM,
- provedení série experimentů na MTM s TOR mazivem za účelem stanovení metodiky,
- vývoj traťového tribometru,
- verifikační testy traťového tribometru,

- stanovení postupu na přípravu třecí vrstvy v laboratorním prostředí na redistribučním zařízení,
- stanovení délky ošetřené kolejnice TOR mazivem, výdrže TOR maziva v kontaktu a rozdělení mazacího filmu mezi tělesa v laboratorním prostředí,
- experimentální výzkum a ověření poznatků v reálných podmínkách s využitím traťového tribometru,
- sjednocení získaných poznatků a jejich publikace.

#### **Požadavky kladené na navrhovanou metodiku:**

- objasnit roli dlouhodobého a krátkodobého záběhu těles,
- pravidelná kontrola topografie a drsnosti těles,
- výběr vhodného způsobu aplikace maziv (způsob a množství),
- definice adhezních pásem (nízké, střední, vysoké),
- možnost provádět více experimentů na jedné kontaktní dvojici,
- zajištění dobré opakovatelnosti tvaru adhezních křivek.

#### **Požadavky kladené na traťový tribometr:**

- zvýšení tuhosti uchycení ke kolejnici,
- vyšší tuhost spojení měřicího modulu a vozíku lineárního vedení,
- změna způsobu vyvození kontaktního tlaku,
- zjednodušení elektroniky a umožnění provozu tribometru bez notebooku,
- více měřících módů,
- vytvoření postupu na zpracování dat,
- stanovení odhadu nejistot při měření.

#### **Vědecká otázka 1**

*„Jakým způsobem se ovlivní výkonost TOR maziva při změně aplikovaného množství a způsobu nanesení na kolejnici?“*

#### **Pracovní hypotéza 1**

Se zvětšujícím se aplikovaným množstvím [31] a počtem míst aplikace selepší výkonnost TOR maziva z pohledu ošetřené vzdálenosti a součinitele adheze, neboť nedojde k vytlačení velkého množství maziva mimo kontakt, čímž by se snížila jeho schopnost znovu se dostat do kontaktu.

## Vědecká otázka 2

*„Jaký součinitel adheze dosahuje třecí vrstva s TOR mazivem na reálné kolejnici a jak se mění v závislosti na vzdálenosti od místa mazací jednotky?“*

### Pracovní hypotéza 2

Součinitel adheze za „suchých“ podmínek na reálné kolejnici poměrně kolísá v závislosti na složení třecí vrstvy. TOR mazivo jej dále snižuje a v některých případech i pod kritickou úroveň [36]. Bezprostředně za aplikační jednotkou součinitel adheze dosahuje nejnižších hodnot a se vzrůstající vzdáleností roste, neboť množství přítomného maziva klesá a zároveň je spotřebováváno jednotlivými průjezdy [30].

## 5.3 Způsob řešení a použité metody

Aby bylo možné odpovědět na výše uvedené vědecké otázky, je nutné provést několik měření v laboratorním prostředí a vyvinout traťový tribometr. Vývoj metodiky bude probíhat v laboratorním prostředí za využití MTM – komerční tribometr typu ball-on-disk. Pro hodnocení topografie povrchu a jeho drsnosti se využije 3D optický profilometr Bruker Contour GT-X. Vývoj traťového tribometru se bude skládat z konstrukce měřicího modulu a způsobu vyvozování kontaktního tlaku. Součástí bude i realizace měřicí elektroniky včetně navržení měřících režimů, ve kterých bude zařízení pracovat. Závěrečná fáze vývoje se bude týkat vyhodnocení získaných dat. Po ukončení vývoji traťového tribometru a jeho verifikaci se začne zkoumat problematika redistribuce na redistribučním zařízení. V poslední fázi disertační práce se poznatky o redistribuci získané v laboratorním prostředí porovnají s měřeními na reálné trati. Postup řešení disertační práce je graficky znázorněn na Obr. 5-1.

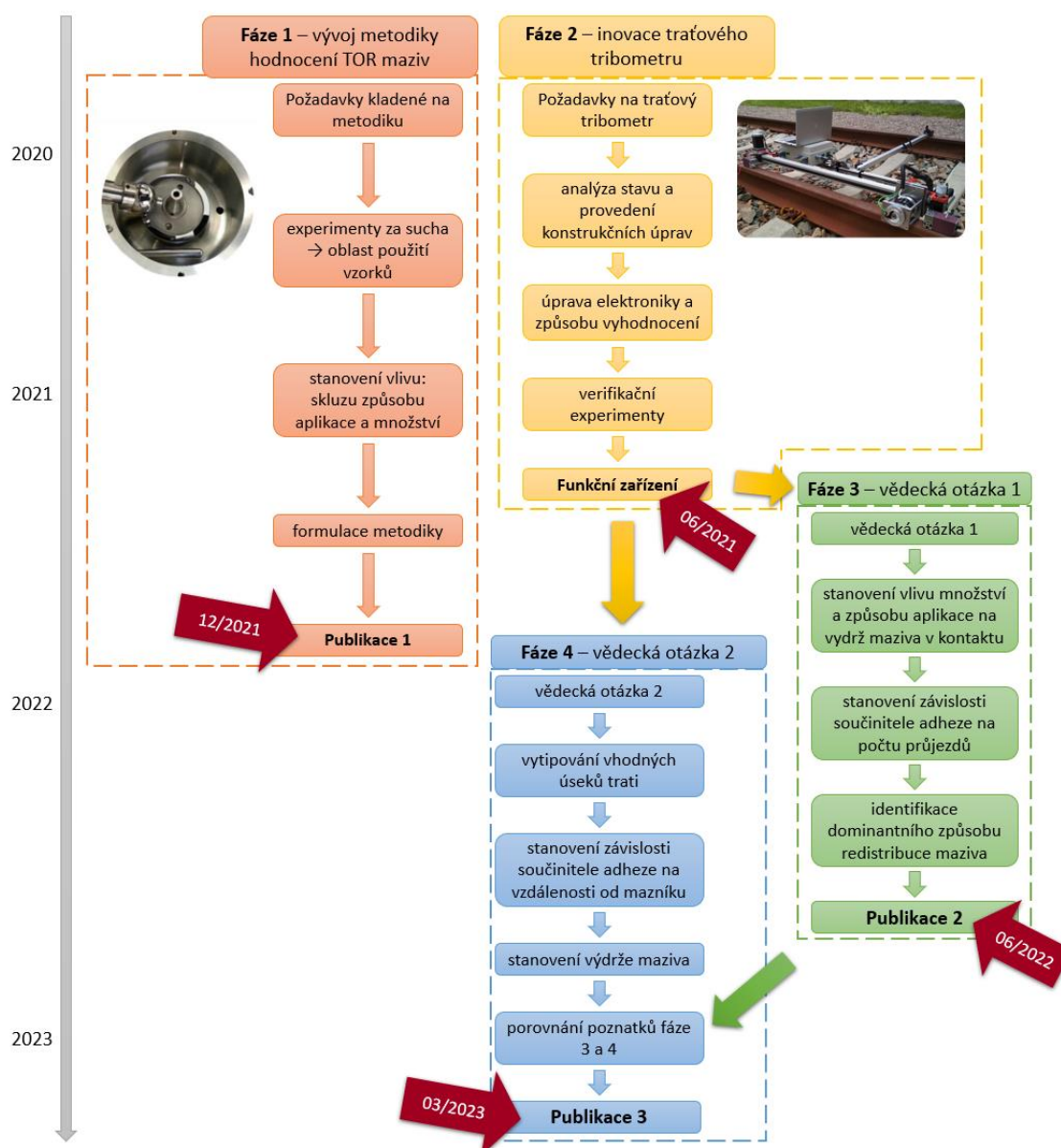
### 5.3.1 Plán experimentů

Plán experimentů je možné rozdělit do čtyř fází, přičemž první a druhá fáze proběhne souběžně. Po dokončení fáze dvě je možné začít řešit fázi tři a čtyři. Tyto fáze je taktéž možné řešit částečně souběžně. První fáze obsahuje vývoj metodiky, druhá vývoj traťového tribometru, třetí studium třecích vrstev na redistribučním zařízení a čtvrtá je zaměřená na venkovní testy.

#### Fáze 1 – vývoj metodiky

V první fázi disertační práce se bude vyvíjet metodika na testování výkonnosti TOR maziv. Nejprve na základě rešerše dojde ke stanovení, které parametry mají nižší dopad na součinitel adheze (zatížení, mazivo, ...) a ty se zafixují po celou dobu vývoje metodiky.

Experimenty se budou provádět na MTM, které dokáže vyvinout kontaktní tlak až 1,7 GPa. Pro všechna měření byly stanoveny parametry uvedené v Tab. 5-1.



Obr. 5-1 Postup řešení disertační práce

Prvotní experimenty na MTM se provedou za suchých podmínek a budou mířit na stanovení zóny použitelnosti vzorků. Jedná se o oblast, kde bude minimální změna drsnosti a geometrie kontaktních těles, což ovlivňuje výsledný součinitel adheze. Využitím suchých podmínek dochází ke zjednodušení experimentu a odstranění potenciálních ovlivňujících parametrů. Testy budou probíhat tak, že se zaznamená vývoj součinitele tření a po předem stanovené době dojde k zastavení testu a změření geometrie a drsnosti kontaktních těles. Po stanovení těchto parametrů se bude pokračovat v experimentu se stejnými kontaktními tělesy. Experiment se ukončí po překročení šířky drážky 1 mm. Získaná data týkající se geometrie drážky v tělesech se vykreslí v závislosti na celkové době běhu experimentu. Získaná závislost poslouží ke stanovení délky počátečního záběhu s cílem stabilizace

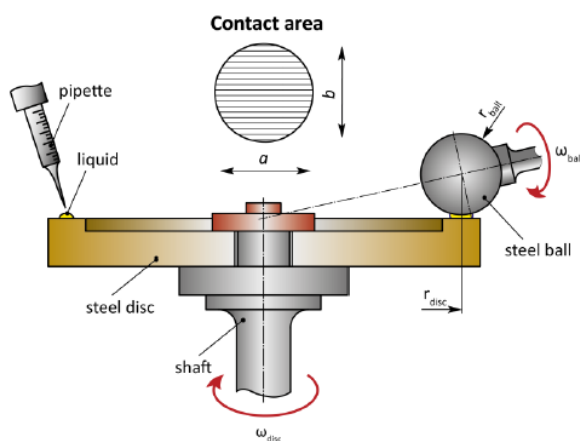
kontaktní oblasti. Průběhy součinitele adheze získané v každém měření se vykreslí do jednoho grafu, čímž bude možné určit dobu potřebnou ke stabilizaci součinitele adheze po opětovném spuštění měření.

Tab. 5-1 Provozní parametry

kontaktní tlak (GPa)	skluz (%)	Rychlost (m/s)
0,8	2; 3; 5	1

Dále budou následovat testy s TOR mazivem, jejichž účelem bude stanovit vliv skluzu, aplikace, množství. Testy budou mířeny na sestavení metodiky testování. Na základě předchozích experimentů bude stanovena délka počátečního záběhu a záběhu před aplikací maziva. První záběh se provede pouze u nových těles, přičemž druhý uvedený se provede před každou aplikací. Mezi jednotlivými experimenty bude prováděno měření topografie a drsnosti kontaktní oblasti na obou tělesech a její fotografování. Po stanovení vlivu jednotlivých parametrů bude formulována metodika měření TOR produktů na MTM.

Zařízení MTM je typu ball-on-disk. Kulička má průměr 19,05 mm a disk 46 mm. Je zde možnost použití několika typů materiálů na vytvoření kontaktní dvojice. V případě této práce budou vzorky z oceli C45, AISI 52 100 nebo oceli určené na výrobu kol a železnic. Disk i kulička jsou nezávisle řízeny dvojicí motorů, díky čemuž je možné plynule nastavovat skluz. MTM je vybaveno dvojicí snímačů zatížení – jeden snímá normálovou a druhý třecí sílu. Snímače pracují na frekvenci 1 Hz. Kontaktní oblast má tvar kruhu. Obr. 5-2 ukazuje schématické znázornění MTM.



Obr. 5-2 Schéma ball-on-disk tribometru – MTM [4]

## Fáze 2 – vývoj traťového tribometru

V další fázi bude zapotřebí vyvinout traťový tribometr, jehož hlavními součástmi jsou rám s lineárním vedením a měřicí modul. Původní varianta, ze které nový traťový tribometr vychází, vyvozovala kontaktní tlak vahou modulu uloženého na pantu. Řešení není vhodné, neboť spojení vykazovalo nízkou tuhost a také vůli v pantu, což umožňovalo natáčení modulu a vzniku laterálního skluzu, který snižoval přesnost měření. Zařízení

pracovalo pouze v jednom měřicím režimu – konstantní brzdňý moment po celé měřené dráze. Adhezní křivka se získávala postupnými průjezdy, přičemž každý průjezd znamenal jeden bod křivky, neboť skluz i součinitel adheze se průměrovaly po délce celého průjezdu.

Nový traťový tribometr (Obr. 6-7) tyto nedostatky odstraňuje. Kontaktní tlak se vyvozuje váhou měřicího modulu a dosahuje hodnot 0,8 nebo 0,9 GPa v závislosti na počtu závaží. Traťový tribometr obsahuje i klínový mechanismus, který umožňuje pohyb v laterálním směru za účelem změny měřené dráhy. Zařízení může pracovat celkem ve třech měřicích režimech (konstantní, rampa a pulzní.), které se od sebe liší aplikovaným brzdňým momentem. Vyvinutý traťový tribometr umí stanovit průběh adheze a skluzu v závislosti na poloze měřicího modulu. Vykreslením součinitele adheze v závislosti na skluzu vzniká adhezní křivka nebo její část.

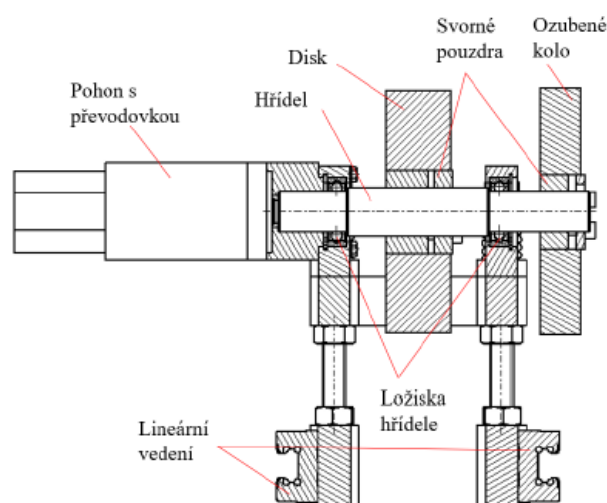
### Fáze 3 – vědecká otázka 1

Po úpravě traťového tribometru bude možné zkoumat třecí vrstvu vytvořenou na kontaktním simulátoru z pohledu vizuálního a součinitele adheze. Experimenty budou zaměřeny na stanovení ošetřené délky kolejnice a výdrže maziva v kontaktu. Před začátkem měření bude kolejnice důkladně očištěna a následně bude aplikováno mazivo pomocí pipety. Mazivo se pomocí kola roznese po kolejnici. Počet průjezdů roznášejícího kola bude záležet na vzhledu vrstvy a aktuální hodnotě součinitele adheze. Podle toho, který fenomén se bude zkoumat (délka ošetření kolejnice, výdrž maziva v kontaktu), se bude čistit kontaktní povrch tělesa – kolejnice pro stanovení ošetřené délky a kolo pro zjištění výdrže maziva v kontaktu. V rámci těchto experimentů se bude měnit aplikované množství a několik typů maziva. Z výsledků se stanoví závislost ošetřené vzdálenosti a výdrže v kontaktu na typu maziva a aplikovaném množství.

Na kontaktním simulátoru bude také zkoumáno rozdělení mazacího filmu mezi tělesy. Při experimentech se využije několik druhů TOR maziva a bude se aplikovat rozdílné množství. Známé množství maziva se nanese na kolo. Provede se jedna otáčka kola tak, aby mazivo sebrané kolem nedošlo znovu do kontaktu. Následně se setře mazivo z kola a kolejnice a provede se jeho zvažení. Experiment se provede několikrát, aby bylo možné statistické vyhodnocení průměrného poměru rozdělení maziva mezi kolem a kolejnicí. Pokud na kolejnici zůstane dostatečné množství maziva, očistí se kolo a znovu se provede průjezd kolem a vyhodnocení se bude opakovat. Cílem těchto experimentů je odpovědět na otázku, který způsob redistribuce je dominantní, jestli kolem nebo kolejnici. Současně se stanoví, jak se mění poměr maziva na kole a kolejnici v závislosti na počtu průjezdů a aplikovaném množství.

V této fázi bude využit traťový tribometr a kontaktní simulátor (Obr. 5-3). Simulátor se skládá z rámu, na kterém jsou připevněna lineární vedení, trojice kolejnic o délce jeden metr a vozíku. Vozík dále obsahuje ozubené kolo, jež realizuje dopředný pohyb a je poháněno krokovým motorem, roznášecí disk a dvojicí pružin vyvíjející kontaktní tlak.

Zařízení pracuje s konstantním skluzem 1,6 % daným geometrií a kontaktním tlakem až 0,8 GPa. Dopředná rychlost dosahuje hodnoty 0,1 až 0,5 m/s.



Obr. 5-3 Kontaktní simulátor

#### Fáze 4 – vědecká otázka 2

Po ukončení vývoje traťového tribometru se experimenty rozšíří i do reálného prostředí. V první řadě dojde k vytipování míst na tramvajové trati Dopravního podniku města Brna (DPMB), kde se následně bude zkoumat třecí vrstva. Hodnocení se provede na základě vzhladu a měření adheze pomocí traťového tribometru.

V rámci reálného prostředí se bude hodnotit i vzdálenost ošetření kolejnice, které se provede na základě změřené adheze. Měřit se bude v pravidelných vzdálenostech od místa aplikace TOR produktu. Sběr dat na daném úseku se provede několikrát v různé dny. Ze získaných hodnot adheze se stanoví její vývoj v závislosti na vzdálenosti od místa aplikace. Data poslouží hlubšímu porozumění problematice redistribuce maziva.

Dalším testem na reálné trati bude stanovení výdrže maziva. Jedná se o experiment, kde se bude měřit součinitel adheze ve stejném místě za mazací jednotkou po každém průjezdu soupravy. V rámci měření bude zachován interval mezi aplikací maziva. Z měření se bude dát stanovit vývoj součinitele adheze v závislosti na počtu průjezdů po aplikaci a taktéž „spotřeba“ maziva na jeden průjezd. U všech měření v reálném prostředí se bude zaznamenávat drsnost kolejnice. Získaná data se porovnají se závěry

#### 5.3.2 Plán publikací

Publikace budou rozděleny do tří hlavních oblastí, kterými se disertační práce zabývá. První publikace bude popisovat metodiku testování výkonosti TOR produktů. Druhá bude pojednávat o vlastnostech třecí vrstvy vyrobené v laboratorním prostředí. Třetí publikace se bude zabývat terénním měřením.

## Publikace 1

Cílem je popsat metodiku hodnocení TOR produktů. Publikace odpovídá první fázi plánu experimentů (kap. 0). Všechny experimenty budou provedeny na zařízení MTM za podmínek uvedených v Tab. 5-2. Bude zde popsán postup přípravy kontaktních těles z AISI 52 100 před započítáním samotného experimentu následovaný volbou způsobu aplikace. Publikace bude uvádět hlavní kritéria, podle kterých půjde rozhodnout, jaké mazivo dosahuje lepší výkonnosti. Cílovým časopisem je Tribology International (IF = 2.971). Předpokládaný termín odeslání je poslední čtvrtletí 2021.

Tab. 5-2 Parametry použité při testech

<b>kontaktní tlak (GPa)</b>	<b>skluz (%)</b>	<b>Rychlost (m/s)</b>	<b>způsob aplikace</b>	<b>množství</b>
0,8	2; 3; 5	1	dynamická / statická	1; 2; 4; 8

## Publikace 2

Jejím cílem je popsat třecí vrstvu vytvořenou v laboratorním prostředí z pohledu délky ošetřené kolejnice a výdrže maziva v kontaktu. Publikace bude také prezentovat, jakým způsobem dochází k roznášení TOR maziva po kolejnici. Tento závěr bude formulován na základě výsledků z rozdělení mazacího filmu mezi tělesa. Experimenty pro dosažení cíle publikace se budou provádět na redistribučním zařízení a podrobněji jsou popsány ve třetí fázi kap. 0. Hlavní aplikované množství se odvíjí od reálně používaného – 6 x 0,09 g na jednu kolejnici, tedy 0,54 g. Cílovým časopisem je Tribology International (IF = 2.971). Předpokládaný termín odeslání je polovina roku 2022.

## Publikace 3

Jedná se případovou studii na trati DPMB, jejíž cílem je popsat třecí vrstvy přítomné na kolejnici z pohledu vizuálního a součinitele adheze. Nejprve se identifikují místa, kde se bude provádět výzkum. Preferovaná budou místa s mazací jednotkou, ale zajímavé výsledky by mohly dát lokality, kde se nikdy kolejnice nemazala a po svolení DPMB by se provádělo ruční mazání v průběhu měření. Součástí publikace budou i data součinitele adheze získaná za „suchých“ podmínek. V tomto případě myšleno, za podmínek, které se na kolejnici vytvořili samovolně. Publikace v závěru porovná získané poznatky z reálné tratě (fáze 4) a z laboratorního prostředí (fáze 3). K dosažení cílů se bude využívat vyvinutý traťový tribometr. Publikace odpovídá experimentům uvedených ve fázi čtyři kap. 0. Cílovým časopisem je Tribology Letters (IF = 1.891). Předpokládaný termín odeslání je první kvartál roku 2023.

## 6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

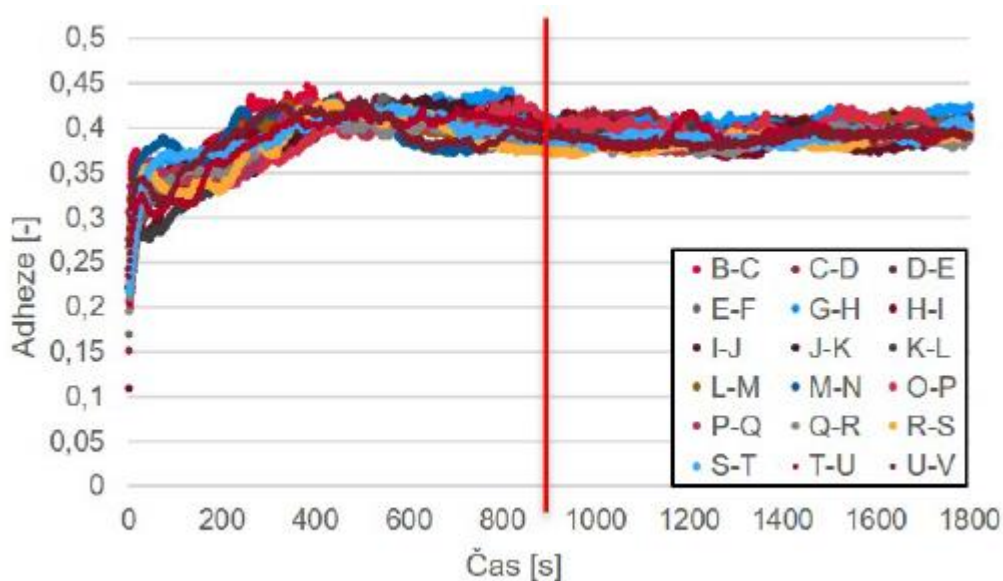
Disertační práce je ve stavu téměř dokončené první fáze (vývoj metodiky testování TOR produktů) a druhé fáze (vývoj traťového tribometru). Následující kapitola bude obsahovat dosažené výsledky z prvních dvou fází.

### 6.1 Fáze 1 – vývoj metodiky testování TOR produktů

Na základě literatury se stanovily podmínky (Tab. 5-2), při kterých budou probíhat experimenty. Kontaktní tlak je 0,8 GPa, což odpovídá lehkým vozům – tramvajím. Rychlost 1 m/s je nejrozšířenější používaná hodnota. Uvedené skluzu byly zvoleny na základě toho, že v této oblasti se nachází bod saturace adhezní křivky, a také že se vyskytuje v reálném provozu. Nižší hodnotu než 1  $\mu\text{l}$  není možné aplikovat z důvodu technického omezení. Už při nanesení 8  $\mu\text{l}$  došlo k přemazání, proto nemá smysl uvažovat nad ještě větším množstvím.

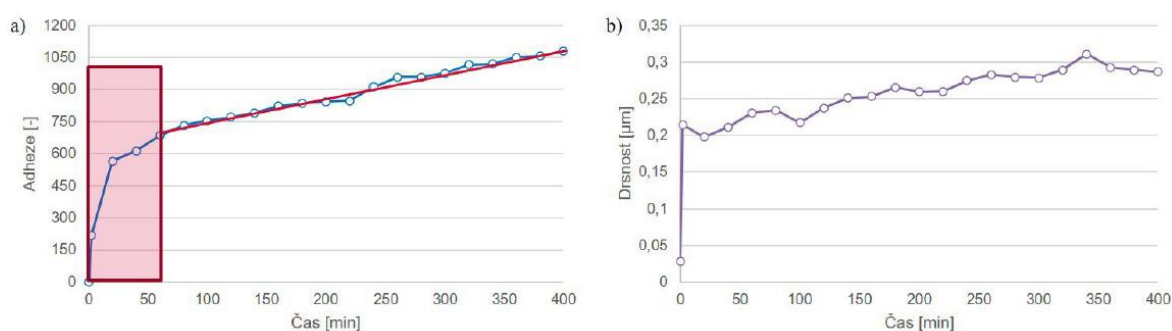
#### 6.1.1 Experimenty za suchých podmínek

Byly provedeny dvě série testů za suchých podmínek, aby bylo možné stanovit potřebnou dobu dlouhého a krátkého záběhu. Dlouhý záběh se bude využívat pouze pokud budou nová tělesa. Důvodem je, aby v průběhu měření nedocházelo k velkým změnám geometrie. Krátký záběh se bude využívat před každým měřením za účelem stabilizace součinitele adheze.



Obr. 6-1 Průběh adheze pro suchý kontakt za skluzu 2 %

První série využívala 2% skluz a jeden test trval 30 min. Druhá série běžela 20 min za 3% skluzu. V každém testu se zaznamenával součinitel adheze a následně rozměry a drsnost drážky jak na disku, tak na kuličce. Z časového záznamu součinitele adheze všech měření při skluzu 2 % (Obr. 6-1) lze stanovit, že v prvních 400 sekundách dochází k nárůstu součinitele adheze a variace je poměrně zdatelná. Po 900 sekundách se vývoj součinitele adheze ustálil pro všechna měření na stejné hodnotě. Ze statistického zpracování vyplývá střední hodnota 0,39 a směrodatná odchylka 0,027. Stejný trendy byly nalezeny i u skluzu 3 %. Po 800 s dojde k ustálení součinitele adheze na 0,474 se směrodatnou odchylkou 0,041. Uvedené časy slouží jako minimální délky krátkého záběhu, přičemž je důležité řídit se i tvarem aktuální adhezní křivky. V některých případech má křivka tendenci růst i po této době, proto je potřeba vyčkat na ustálení součinitele adheze.



Obr. 6-2 Vývoj kontaktních těles; a) šířka, b) drsnost

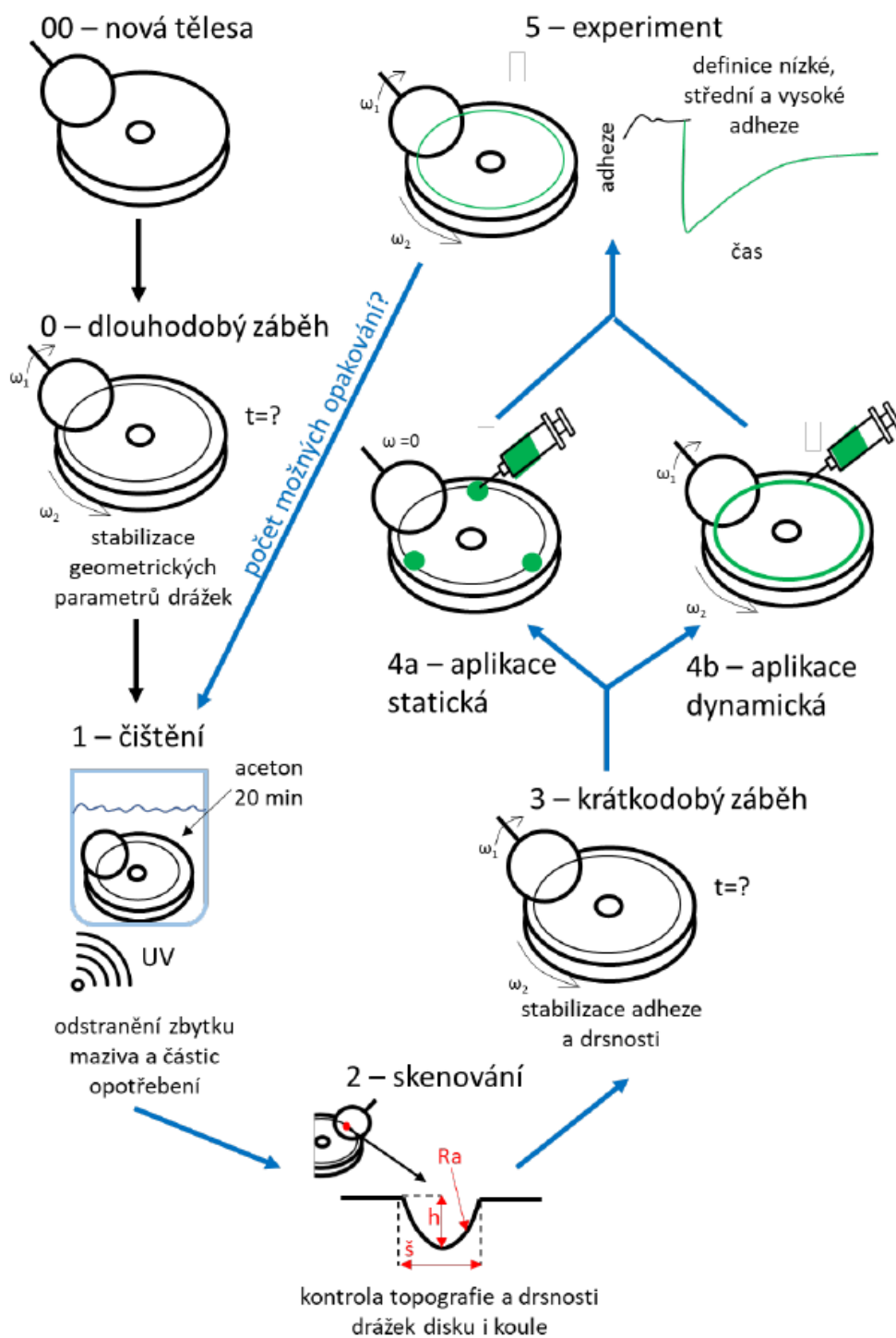
Změřené parametry drážky (šířka, hloubka a drsnost) po jednotlivých testech byly vykresleny na časovou osu. Jedná se o kombinované hodnoty, což znamená průměr pro kuličku a disk měřeno na několika místech. Hloubka drážky dosahuje max 10 µm a postupně roste, proto nebyl tento parametr brán jako kritérium. Šířka drážky na začátku série měření roste nerovnoměrně (Obr. 6-2, a (červená oblast)). Jedná se o nevhodnou oblast pro testování, neboť výsledky budou značně ovlivněny změnou šířky drážky. Po 60 min dojde k ustálení růstu šířky drážky a data vykazují lineární charakter. Výsledky získané v této oblasti budou zatíženy stejnou změnou šířky, a tedy je bude možné porovnávat. Kombinovaná drsnost drážky vykazuje téměř od začátku lineární růst, což je způsobeno suchými podmínkami – bez přítomnosti maziva. Vzhledem k tomu, že kulička je tvrdší než disk, docházelo u disku k výrazně vyššímu nárůstu drsnosti než na kuličce.

### 6.1.2 Postup při experimentech

Na základě poznatků za suchých podmínek byl stanoven postup při měřeních s TOR mazivy (Obr. 6-3). Postup se skládá z kroků uvedených níže. Po dokončení hlavního měření (krok 5) následuje znovu čištění (krok 1) a tento cyklus je možné několikrát opakovat.

- 00 – zcela nová kontaktní tělesa,

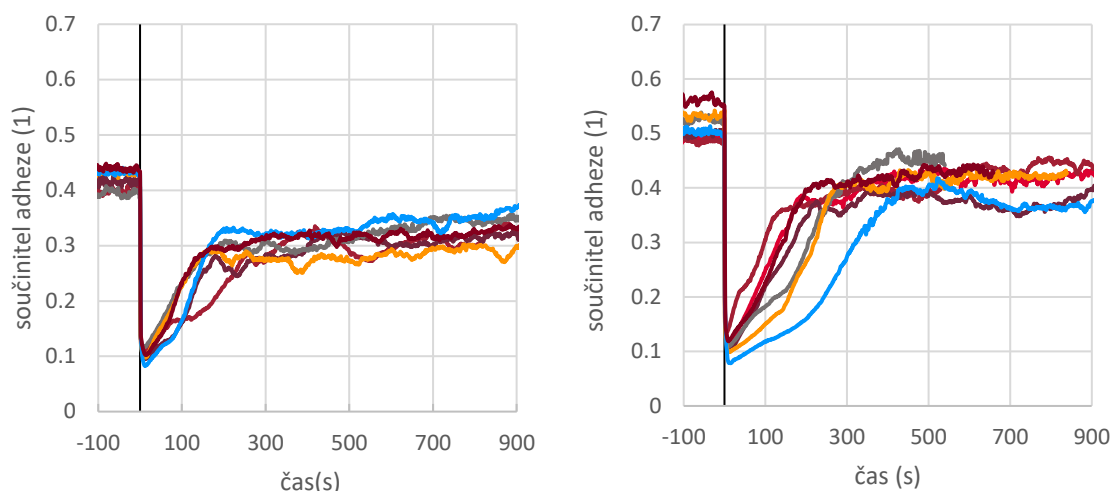
- 0 – stav po dlouhodobém záběhu, kde došlo ke stabilizaci geometrie drážky,
- 1 – čištění v acetonu po dobu 20 min,
- 2 – skenování geometrie a drsnosti drážky na obou kontaktních tělesech,
- 3 – krátkodobý záběh za účelem stabilizace adheze,
- 4 – aplikace maziva pomocí mikropipety,
  - 4a – statická aplikace – disk ani kulička se netočí
  - 4b – dynamická aplikace – obě tělesa jsou v kontaktu a pohybu
- 5 – hlavní měření – sledování součinitele adheze v čase.



Obr. 6-3 Schéma popisující vývoj metodiky

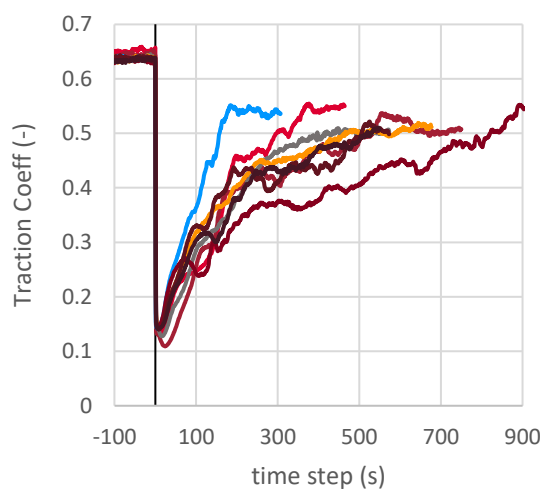
### 6.1.3 Vliv skluzu

Pro stanovení vlivu skluzu byly provedeny tři série testů, kde se měnil nastavený skluz. Aplikoval se dynamicky 1  $\mu\text{l}$  TOR maziva. Hlavním cílem experimentu bylo porovnat opakovatelnost jednotlivých experimentů.



Obr. 6-4 Adhezní křivky pro skluz 2 % (vlevo) a 3 % (vpravo)

Jak lze na základě grafů pro jednotlivé skluzy (Obr. 6-4 a Obr. 6-5) stanovit, tak dobré opakovatelnosti v rostoucí části křivky bylo dosaženo pro skluz 2 a 5 %. O trochu horší výsledky vykazuje sada měření při 3 % a kdyby se nezapočítalo modré měření, tak opakovatelnost je podobná jako ve zbylých dvou případech. S rostoucím skluzem taktěž roste počáteční součinitel adheze, který díky krátkému záběhu dosahuje dobré opakovatelnosti. Lze si taktěž povšimnout, že součinitel adheze po 900 s od aplikace nedosahuje původní hodnoty za suchých podmínek a vykazuje malou tendenci růstu.

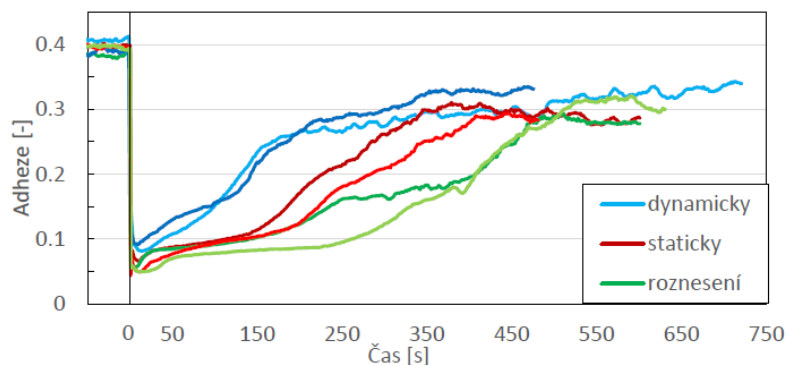


Obr. 6-5 Adhezní křivky pro skluz 5 %

#### 6.1.4 Vliv aplikace

Vliv aplikace se posuzoval z pohledu rozdílných podmínek při aplikaci (Obr. 6-3 – 4a, 4b) a samotného postupu. Zkoumala se dynamická aplikace, kde se po dosažení stabilního součinitele adheze nanese 1  $\mu\text{l}$  TOR maziva do kontaktu bez zastavení a znovu spuštění měření. Statická aplikace probíhala bez roznesení, kde po dosažení stabilního součinitele

adheze došlo k zastavení měření, nanesení maziva a znovu spouštění měření, dále pak s roznesením, kde se po aplikaci zařadil krátký cyklus bez skluzu a pak až se provedlo měření. Z průběhu součinitele adheze pro jednotlivé typy aplikace (Obr. 6-6) je možné stanovit, že při dynamické aplikaci součinitel adheze roste nejrychleji. Oproti tomu statická aplikace s roznesením roste nejpomaleji. Jako nejvhodnější způsob nanášení TOR maziva byl zvolen dynamický, neboť při kratším testu dochází k menší změně geometrie drážky a produkci částic opotřebení.



Obr. 6-6 Srovnání průběhů experimentů pro různé způsoby aplikace

Dále se zkoumal způsob aplikace, tedy rozdělení celkového aplikovaného množství do několika dávek. Test probíhal při skluzu 2 % a množství 2, 4 a 8  $\mu\text{l}$ . Na základě dat pro 2  $\mu\text{l}$  nelze určit, jestli je lepší aplikovat 1x2  $\mu\text{l}$  nebo 2x1  $\mu\text{l}$ . V obou případech byly výsledky stejné a nešlo určit rozdíl. Aplikace 4  $\mu\text{l}$  vykazuje nejlepší výsledky při nanášení 2x2  $\mu\text{l}$ , což vede na nejkratší průběh. Pro 8  $\mu\text{l}$  došlo ve všech případech k přemazání, a tedy nebylo možné stanovit lepší variantu.

## 6.2 Fáze 2 – Vývoj traťového tribometru

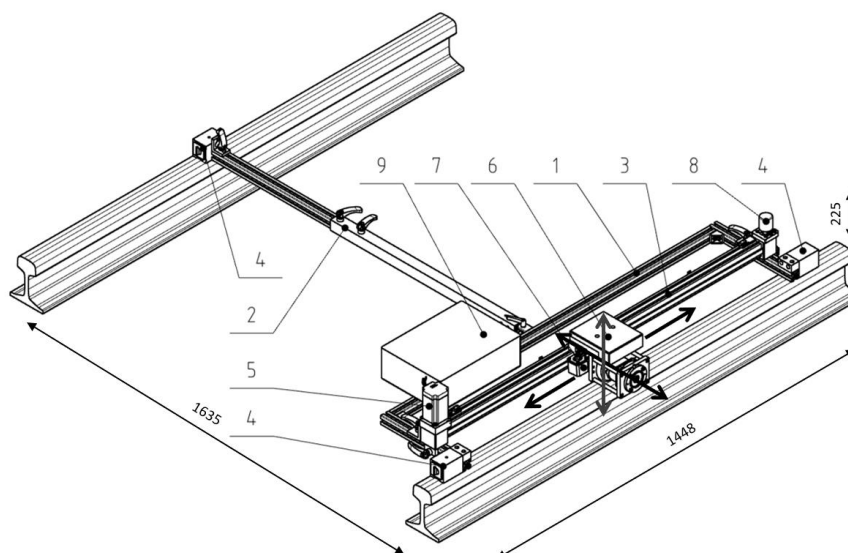
Jak již bylo uvedeno dříve, traťový tribometr pracuje na principu řízení změny brzděné síly, čímž dochází ke vzniku skluzu. Jedná se o zařízení, které se pevně instaluje na kolejnici a měří součinitel adheze na 800mm úseku. Původní varianta vykazovala tyto nedostatky, které byly v průběhu vývoje odstraněny:

- nízká tuhost uchycení měřicího modulu,
- nevhodný způsob zatěžování kontaktu,
- pouze jeden měřicí režim,
- komplikovaná elektronika,
- řízení pomocí počítače,
- základní vyhodnocení dat – průměrování celého průjezdu.
- velký počet průjezdů pro stanovení adhezní křivky.

## 6.2.1 Konstrukce

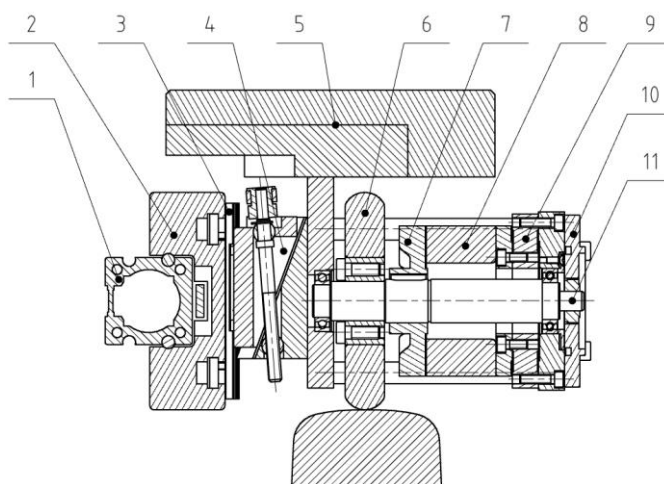
Traťový tribometr na Obr. 6-7 se skládá z rámu (1), teleskopického ramena (2), horizontálního lineárního vedení (3), magnetických základen (4), krokového motoru (5), měřicího modulu (6), klínového mechanismu (7), rotačního enkodéru (8) a krabice s elektronikou (9).

Rám traťového tribometru z hliníkových konstrukčních profilů se ke kolejnici připevňuje pomocí trojice magnetických základen, přičemž jedna je umístěna na teleskopickém rameni. Rameno působí jako opora a zajišťuje stabilitu celého zařízení. Kloub spojující rám a teleskopické rameno umožňuje jeho sklopení a tím i lepší manipulaci. K rámu je přišroubováno horizontální lineární vedení s vozíkem, jehož pohyb obstarává krokový motor s nominálním kroutícím momentem 4,1 Nm. Na pravé straně lineárního vedení je umístěn rotační enkodér zaznamenávající polohu vozíku. K vozíku je připevněn klínový mechanismus spolu s měřicím modulem.



Obr. 6-7 Traťový tribometr

Měřicí modul (Obr. 6-8) byl konstrukčně upraven, přičemž hlavní komponenty zůstaly zachovány. Skládá se z měřicího kola (6), elektromagnetické třecí brzdy (7, 8), momentového snímače (9) a enkodéru (10). Měřicí kolo spolu s brzdovým diskem (7) jsou upevněny na hřídeli (11), která se otáčí ve dvojici ložisek. Pravé ložisko je uloženo suvně, aby víčkem bylo možné vymezit vůli. Přivedením elektrického napětí na brzdu dojde k vytvoření magnetického pole, které přitáhne brzdový disk k tělu brzdy a pomocí tření dochází k brždění. Tyto reakce jsou přenášeny na momentový snímač a následně měřeny. Celý modul uzavírá dvojice přírub, velká a malá. Na horní straně velké příruby se nachází dvě závaží (9). Menší závaží dovažuje modul na váhu 7,6 kg a zároveň koriguje polohu těžiště tak, aby bylo přímo nad kontaktem. Druhé (přídavné) závaží zvyšuje hmotnost na 11,2 kg při zachování polohy těžiště. Poslední součástí modulu je magnetický rotační enkodér (10) zaznamenávající rotační polohu měřicího kola.



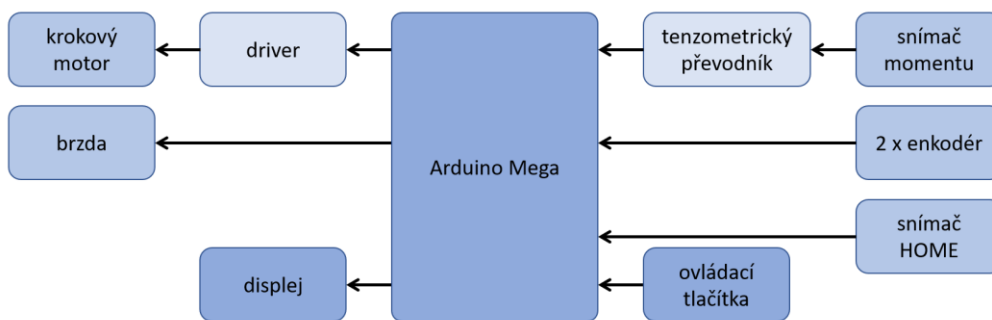
Obr. 6-8 Klínový mechanismus a měřicí modul

Průměr měřicího kola byl zachován a vychází z teoretického Hertzova tlaku pro eliptický kontakt a modelového zmenšení kontaktní oblasti v poměru 1:10 ve srovnání s reálným kontaktem kolejového vozidla a kolejnice. Měřicí kolo má tedy průměr 100 mm a rádius 10 mm. Je vyrobené z ložiskové oceli ČSN 14 209. Použitím pouze malého závaží vzniká v kontaktu tlak 0,8 GPa. Přidáním přidavného závaží lze docílit tlaku 0,9 GPa.

Klínový mechanismus (Obr. 2, pozice 4), který je jednou z hlavních konstrukčních úprav, zajišťuje posun měřicího modulu od lineárního vedení (1) s vozíkem (2) v laterálním směru za účelem automatické změny polohy měřené dráhy. Zároveň zvyšuje tuhost spojení měřicího modulu s vozíkem horizontálního lineárního vedení. Samotný klínový mechanismus se skládá ze dvou klínů spojených přesným válečkovým vedením. Pro udržení klínů v požadované poloze a její změně slouží šroub ovládaný krokovým motorem skrze ozubený řemen. Mechanismus umožňuje změnu hlavního rozměru o 8 mm při poměrně malé zástavbě 38 mm. Pokud by tento rozměr byl větší, docházelo by k nadměrnému zatěžování lineárního posuvu.

## 6.2.2 Elektronika

Původní elektronika využívala několik platforem pro funkci zařízení, což není zcela žádoucí. NI karta byla hlavní jednotkou. Posílala instrukce driveru krokového motoru a PWM regulátoru brzdy. Četla elektrické napětí z momentového snímače a také z Arduina mini, které vyhodnocovalo skluz na základě enkodérů a výsledek posílalo analogové lince.

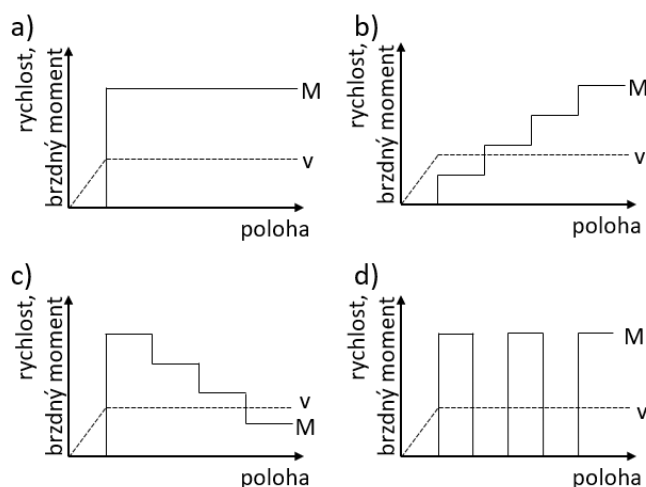


Obr. 6-9 Schéma nové elektroniky

Nová elektronika pracuje na platformě Arduino Mega, která obstarává řízení celého zařízení a zaznamenávání měřeného brzdného momentu spolu s pozicemi enkodérů. Driver krokového motoru zůstal, což usnadňuje celkové řízení a vytíženost čipu, neboť není nutné generovat jednotlivé pulzy. PWM modul byl nahrazen MOSFETem, jež řídí třetí elektromagnetickou brzdu. Výhoda řešení spočívá v lineární závislosti nastaveného vstupního napětí a výstupním napětím. Umožňuje tedy přesnější regulaci brzdného momentu. Veškeré ovládání zařízení je realizováno pomocí pětice tlačítek. Nastavené parametry průjezdu (měřicí režim, elektrické napětí na začátku průjezdu, elektrické napětí na konci průjezdu a počet kroků) jsou zobrazeny na čtyřřádkovém displeji.

### 6.2.3 Postup měření

Po nastavení parametrů a měřicího režimu lze přistoupit k samotnému měření. V průběhu experimentu je měřicí modul tažen konstantní rychlostí 265 mm/s. Po dosažení konstantní rychlosti začne brzda aplikovat počáteční brzdný moment, jež vyvolá momentovou reakci na snímači a zároveň vznik skluzu. Podle nastaveného měřicího režimu se automaticky provádí další změny brzdného momentu. Elektronika zaznamenává čas, lineární polohu, rotační polohu a moment ve vzorkovací frekvenci 96 Hz. Smyčka měřicí moment běží na vyšší frekvenci, ale ukládá se pouze průměrná hodnota spolu s ostatními.

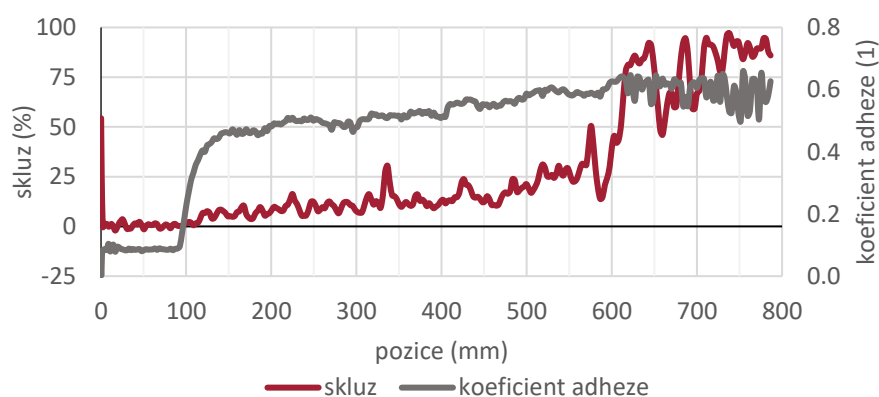


Obr. 6-10 Měřicí režimy ((a) konstantní, (b), (c) rampa, (d) pulzní)

Jednotlivé režimy se odvíjí od nastavených parametrů – mód, elektrické napětí na začátku průjezdu, elektrické napětí na konci průjezdu a počet kroků. První režim (Obr. 6-10, a) přejede měřený úsek s konstantním napětím na brzdě, a tedy i konstantním brzdícím momentem. Pro jeho aktivaci musí být nastaven počet kroků 1 a mód „klasický“. Lze použít v případě stanovování lokálních změn skluzu při stejném koeficientu adheze. Pro sestavení adhezní křivky je nutný větší počet průjezdů. Druhý režim (Obr. 6-10, b, c) je „rampa“, který umožňuje postupné zvyšování nebo snižování elektrického napětí na brzdě v závislosti na zadaných hodnotách. Změna se provádí dle počtu kroků. K aktivaci režimu dojde, pokud je počet kroků větší než jedna a mód nastaven na „klasický“. Tento režim snižuje počet potřebných průjezdů pro stanovení adhezní křivky, ovšem nevýhoda spočívá v tom, že i když dojde k prokluzu, tak brzdící moment se bude dále zvětšovat a že v každé části měřeného úseku je jiný brzdící moment. Poslední režim (Obr. 6-10, d) se nazývá „pulzní“ a jak lze odvodit z názvu, jedná se o střídání dvou hodnot napětí. Počet kroků udává, kolikrát dojde ke změně elektrického napětí na brzdě. Pro aktivaci režimu je nutné zvolit „pulzní“ mód. Pomocí tohoto režimu jde teoreticky sestavit adhezní křivka jedním průjezdem.

#### 6.2.4 Zpracování dat

Na záznam polohy měřicího modulu a rotační polohy se aplikuje Gaussův filtr. Numerickou derivací poloh podle času a následným přepočtem se stanoví rychlosti v mm/s. Skluz je dán poměrem rozdílu dopředné a rotační rychlosti ku dopředné rychlosti. Čistý prokluz zde odpovídá 100 %. Poměr tečné a normálové síly definuje součinitel adheze. Normálová síla se neměří, a je tedy brána jako konstanta, která byla stanovena ze skutečné hmotnosti měřicího modulu. Tečná síla se počítá z brzdícího momentu podělením poloměrem měřicího kola.



Obr. 6-11 Záznam skluzu a adheze pro suchý kontakt

Ze získaných dat lze vykreslit průběh součinitele adheze a skluzu v závislosti na poloze měřicího modulu (Obr. 6-11), respektive vozíku. Na základě těchto grafů je možné stanovit, ve kterých místech došlo k prokluzu a jaký zde byl součinitel adheze. Toto

vyhodnocení se provádí pro každý měřicí průjezd. Dále je možné sestavit adhezní křivku. Do adhezní křivky se zahrnují pouze data získaná za konstantní rychlosti. Z adhezní křivky se stanovuje nejvyšší součinitel adheze a bod saturace. Do adhezní křivky se dají zahrnout i data z více měřících průjezdů na stejném úseku.

### 6.2.5 Verifikační testy

Verifikační testy byly provedeny v laboratorním prostředí na zcela nové kolejnici za trojice různých podmínek – suchý kontakt, ricinový olej a TOR mazivo. Před měřením byly kolejnice a kolo očištěny pomocí brusné houby a následně otřeny ubrouskem s acetonem. Všechna data byla získána za kontaktního tlaku 0,9 GPa. Délka měřeného úseku činila 800 mm, přičemž brzda začala zabírat po ujetí 90 mm, kde došlo k ustálení rychlosti.

#### Metodika

„Suché“ podmínky se dosáhly očištěním kontaktních dvojic a několikanásobným přejezdem přes měřenou dráhu s plným skluzem. Tímto postupem se odstranily oxidy a částice, které na kolejnici zůstaly po čištění acetonem. Následovalo samotné měření, kde se využil měřicí režim „rampa“ (rostoucí i klesající) o sedmi krocích.

Další série měření proběhla s ricinovým olejem naneseným pomocí ubrousku na hlavu kolejnice tak, aby byl rozetřený po celé měřicí dráze. V tomto případě se použil první měřicí režim – „konstantní“. První měřicí průjezd byl bez elektrického napětí na brzdě (brzděného momentu) a v každém dalším se hodnota zvýšila.

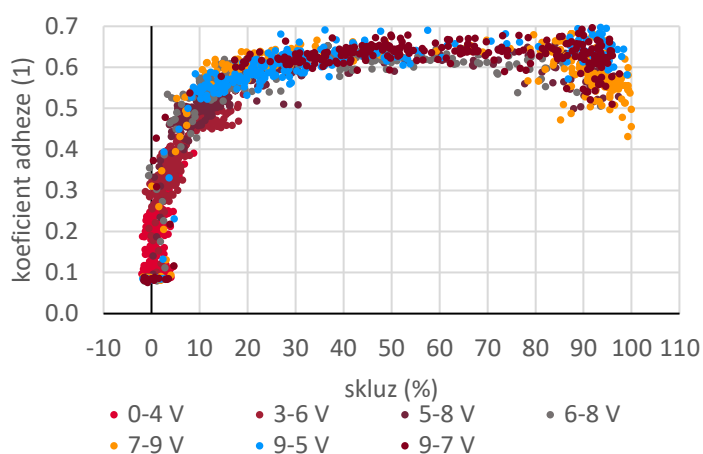
Poslední série měření probíhala s TOR mazivem. Mazivo bylo rovnoměrně nanášeno na temeno hlavy. Z důvodu velkého množství se přistoupilo k setření maximálního možného množství pomocí suchého ubrousku. Zbytek maziva, který se nepovedl setřít, se následně měřil. I v této sérii měření se využíval „konstantní“ režim a elektrické napětí na brzdě se v jednotlivých průjezdech zvětšovalo.

#### Výsledky a jejich zhodnocení

Pro sestavení adhezní křivky pro „suchý“ kontakt (Obr. 6-12) bylo zapotřebí provést sedm průjezdů. Označení v legendě odpovídá nastavenému elektrickému napětí na začátku a na konci průjezdu. Stanovený koeficient adheze má hodnotu 0,63. K největšímu nárůstu koeficientu adheze dochází v počáteční fázi. V oblasti nad 80% skluzem má součinitel adheze větší rozptyl, což může být způsobeno dynamikou měřicího systému. Při porovnání dat s [33] lze konstatovat, že změřený koeficient adheze dosahuje poměrně vysokých hodnot a zároveň počáteční nárůst není tak strmý. Vysoké hodnoty blízké součiniteli tření pro „čisté“ ocelové povrchy jsou dány tím, že před měřením proběhlo cca 50 průjezdů za vysokého skluzu, čímž se očistily kontaktní povrchy. Rozdíl může být dán i laboratorním prostředím, neboť data v [33] jsou z reálné kolejnice. Další odlišnost je

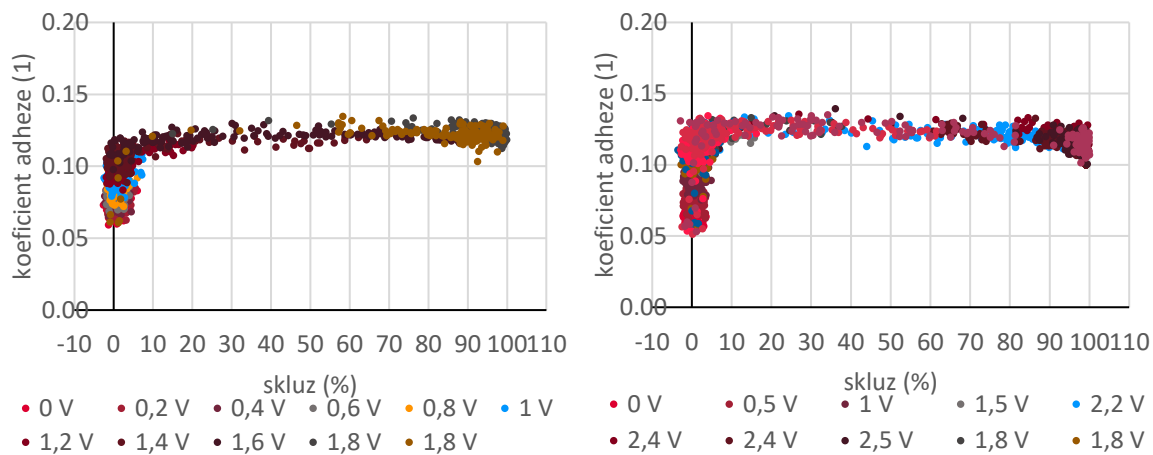
v metodice, kde autorka očistila měřicí kolo acetonem a metanolem, ale neprovedla úvodní průjezdy.

Adhezní křivka pro ricinový olej (Obr. 6-13 vlevo) se skládá z 11 průjezdů. Dosahuje se zde nízké adheze, přibližně 0,12. Adheze pro TOR mazivo má hodnotu 0,13 v oblasti bodu saturace (Obr. 6-13 vpravo). Pro oba kontaminanty dochází k největšímu nárůstu adheze v oblasti do 5 % skluzu. Tento poznatek přibližně koresponduje s daty uvedenými v [33, 35]. První uvedená křivka neustále roste a druhá po bodu saturace klesá. TOR maziva by měla mít neutrální nebo rostoucí charakter a měla by vykazovat vyšší koeficient adheze [39]. Nízký změřený součinitel adheze ukazuje, že pravděpodobně došlo k přemazání, i když se ubrouskem setřelo vše, co šlo. Areiza [33] testovala dvojici modifikátorů tření a jeden z nich vykazuje nižší hodnoty adheze, než jsou zde prezentovány. Jeví se, že výsledná adheze závisí na konkrétním produktu.



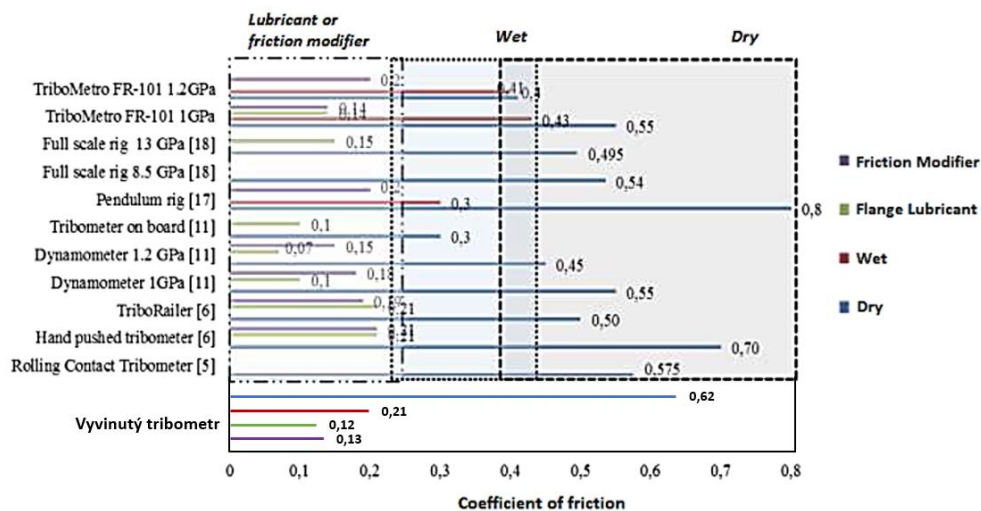
Obr. 6-12 Adhezní křivka pro suchý kontakt

Obr. 6-14 porovnává provedená měření s měřeními na jiných zařízeních. Lze si povšimnout, že hodnota pro „suchý“ kontakt je vyšší, což vychází z počtu průjezdů před samotným testem a laboratorního prostředí. Pokud by se měřilo na reálné trati, je možné očekávat nižší hodnotu. Voda vykazuje mírně nižší hodnoty oproti ostatním zařízením. Olej a TOR mazivo jsou v dobré shodě.



Obr. 6-13 Adhezní křivka pro ricinový olej (vlevo) a TOR mazivo (vpravo)

Při měření měl koeficient adheze mírnou tendenci růst s každým dalším průjezdem. Stejný trend zaznamenal Harrison [5], který i poukázal, že je potřeba řešit i otázku, v jakém stavu je třecí vrstva na kole, neboť čištění před měřením dává odlišné výsledky od reality. Skutečné železniční kolo také pokrývá nějaká třecí vrstva.



Obr. 6-14 Porovnání změřeného koeficientu adheze s literaturou (upraveno) [40]

## 7 ZÁVĚR

V tomto pojednání ke státní doktorské zkoušce jsou analyzovány hlavní publikace týkající se problematiky hodnocení výkonnosti TOR maziv v laboratorním a reálném prostředí. Na základě získaných poznatků došlo ke stanovení cíle disertační práce včetně požadavků na metodiku a vědeckých otázek. Postup řešení je rozdělen do čtyř fází, přičemž první dvě mohou běžet zároveň. Byl představen i plán publikací. Každá publikace odpovídá jedné fázi řešení, kromě druhé, kde probíhá vývoj traťového tribometru. Poslední část práce představuje současný stav řešení – fáze 1 a 2. U metodiky testování TOR maziv byl navržen postup, stanovena doba záběhů (prvotní i mezi experimenty) a stanoven vliv skluzu a způsobu aplikace. Ve fázi 2 proběhla konstrukční úprava traťového tribometru, návrh elektroniky, stanovení postupu měření, a nakonec verifikační testy.

## 8 BIBLIOGRAFIE

- [1] LEWIS, Roger a Ulf OLOFSSON. *Wheel-rail interface handbook*. 1st pub. Cambridge: Boca Raton: Woodhead ; CRC Press, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [2] CARTER, Frederick William. On the action of a locomotive driving wheel. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1926, roč. 112, č. 760, s. 151–157. ISSN 0950-1207.
- [3] HAINES, D. J. a E. OLLERTON. Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces Subjected to Radial and Tangential Forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1963, roč. 177, č. 1, s. 95–114. ISSN 0020-3483.
- [4] GALAS, R. *Friction Modification within Wheel-Rail Contact*. B.m., 2017. Brno University of Technology.
- [5] CANN, P. M. The „leaves on the line“ problem - A study of leaf residue film formation and lubricity under laboratory test conditions. *Tribology Letters*. 2006, roč. 24, č. 2, s. 151–158. ISSN 10238883.
- [6] ISHIZAKA, K, S R LEWIS a R LEWIS. The low adhesion problem due to leaf contamination in the wheel/rail contact: Bonding and low adhesion mechanisms. *Wear*. 2017, roč. 378–379, s. 183–197. ISSN 0043-1648.
- [7] MEIERHOFER, Alexander, Gerald TRUMMER, Christof BERNSTEINER a Klaus SIX. Vehicle tests showing how the weather in autumn influences the wheel–rail traction characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020, roč. 234, č. 4, s. 426–435. ISSN 20413017.
- [8] ZHU, Yi, Ulf OLOFSSON a Rickard NILSSON. A field test study of leaf contamination on railhead surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014, roč. 228, č. 1, s. 71–84. ISSN 09544097.
- [9] ARIAS-CUEVAS, O a Z LI. Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel–rail contacts with locomotive sanders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2011, roč. 225, č. 5, s. 443–456. ISSN 0954-4097.
- [10] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear*. 2010. ISSN 00431648.
- [11] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI a R. LEWIS. Investigating the Lubricity and Electrical Insulation Caused by Sanding in Dry Wheel–Rail Contacts. *Tribology Letters*. 2010, roč. 37, č. 3, s. 623–635. ISSN 1023-8883.
- [12] EADIE, Donald T., Joe KALOUSEK a Kelvin C. CHIDDICK. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 185–192 [vid. 13. únor 2020]. ISSN 00431648.
- [13] OLOFSSON, Ulf a Yezhe LYU. Open System Tribology in the Wheel-Rail Contact-A Literature Review. *Applied Mechanics Reviews*. 2017, roč. 69, č. 6, s. 1–

10. ISSN 00036900.

- [14] KALOUSEK, Joe a Eric MAGEL. Modifying and managing friction. *Railway Track and Structures*. 1997, roč. 93, č. 5, s. 31-X4. ISSN 00339016.
- [15] CURLEY, D, D C ANDERSON, J JIANG a D HANSON. Field Trials of Gauge Face Lubrication and Top-of-Rail Friction Modification for Curve Noise Mitigation. In: J C O NIELSEN, D ANDERSON, P E GAUTIER, M IIDA, J T NELSON, D THOMPSON, T TIELKES, D A TOWERS a P DEVOS, ed. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. 2015, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, s. 449–456. ISBN 978-3-662-44832-8; 978-3-662-44831-1. Dostupné z: doi:
- [16] TEMPLE, P. D., M. HARMON, R. LEWIS, M. C. BURSTOW, B. TEMPLE a D. JONES. Optimisation of grease application to railway tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018, roč. 232, č. 5, s. 1514–1527. ISSN 20413017.
- [17] GALAS, Radovan, M. OMASTA, M. KLAPKA, S. KAEWUNRUEN, I. KRUPKA a M. HARTL. Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise. *Tribology in Industry*. 2017, roč. 39, č. 2, s. 198–206. ISSN 03548996.
- [18] STOCK, R, L STANLAKE, C HARDWICK, M YU, D EADIE a R LEWIS. Material concepts for top of rail friction management - Classification, characterisation and application. *Wear*. 2016, roč. 366, s. 225–232. ISSN 0043-1648.
- [19] MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki ONO, Yonjin WANG, Masayuki YAMAMOTO, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 199–203. ISSN 00431648.
- [20] SEO, Jung Won, Hyun Kyu JUN, Seok Jin KWON a Dong Hyeong LEE. Effect of Friction Modifier on Rolling Contact Fatigue and Wear of Wheel and Rail Materials. *Tribology Transactions*. 2018, roč. 61, č. 1, s. 19–30. ISSN 1547397X.
- [21] LIU, Xiaogang a Paul A. MEEHAN. Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers. *Journal of Sound and Vibration*. 2016, roč. 371, s. 393–405. ISSN 10958568.
- [22] EADIE, D. T. a M. SANTORO. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293, č. 3–5, s. 747–757. ISSN 10958568.
- [23] ZHANG, Weihua, Jianzheng CHEN, Xuejie WU a Xuesong JIN. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 82–88. ISSN 00431648.
- [24] ISHIZAKA, Kei, Stephen R. LEWIS, Deborah HAMMOND a Roger LEWIS. Chemistry of black leaf films synthesised using rail steels and their influence on the low friction mechanism. *RSC Advances*. 2018, roč. 8, č. 57, s. 32506–32521. ISSN 20462069.
- [25] LUNDMARK, J., E. KASSFELDT, J. HARDELL a B. PRAKASH. The influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2009, roč. 223, č. 2, s. 181–187. ISSN 09544097.
- [26] CHEN, Hua, Akira NAMURA, Makoto ISHIDA a Tsunamitsu NAKAHARA. Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness. *Wear*. 2016, roč. 366–367, s. 303–309. ISSN 00431648.
- [27] ARIAS-CUEVAS, O, Z LI, R LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts. *Wear*. 2010, roč. 268, č. 3–4, s. 543–551. ISSN 00431648.
- [28] BUCKLEY-JOHNSTONE, L, M HARMON, R LEWIS, C HARDWICK a R STOCK. A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, roč. 233, č. 2, s. 201–210. ISSN 0954-4097.
- [29] GALAS, R, D KVARDA, M OMASTA, I KRUPKA a M HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application. *Tribology International*. 2018, roč. 117, s. 87–97. ISSN 0301-679X.
- [30] GALAS, R, M OMASTA, I KRUPKA a M HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, roč. 368, s. 230–238. ISSN 0043-1648.
- [31] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear*. 2014, roč. 314, č. 1–2, s. 228–235. ISSN 00431648.
- [32] HARRISON, H., T. MCCANNEY a J. COTTER. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 114–123. ISSN 00431648.
- [33] AREIZA, Y. A., S. I. GARCÉS, J. F. SANTA, G. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*. 2015, roč. 82, č. PB, s. 274–279. ISSN 0301679X.
- [34] HARRISON, Harold. The development of a low creep regime, hand-operated tribometer. *Wear*. 2008, roč. 265, č. 9–10, s. 1526–1531. ISSN 00431648.
- [35] HARRISON, Harold. Producing and measuring the 3rd body layer. *2020 Joint Rail Conference, JRC 2020*. 2020, s. 1–7.
- [36] LUNDBERG, J., M. RANTATALO, Ch. WANHAINEN a J. CASSELGREN. Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions. *Wear*. 2015, roč. 324–325, s. 109–117. ISSN 00431648.
- [37] LU, X., J. COTTER a D. T. EADIE. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. *Wear*. 2005, roč. 259, č. 7–12, s. 1262–1269. ISSN 00431648.
- [38] LEWIS, Stephen R, Roger LEWIS, Ulf OLOFSSON, Don T. EADIE, John COTTER a Xin LU. Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012, roč. 227, č. 2, s. 115–127. ISSN 0954-4097.

- [39] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*. 2016, roč. 10, č. 3, s. 150–162. ISSN 1751584X.
- [40] VAN STEENIS, Niels. *Monitoring train performance in case of low adhesion : acquiring knowledge for the development of low adhesion measures.*, 2010. Ph.D. Thesis, University of Twente.

# SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Teoretická adhezní křivka dle Cartera [4] .....	8
Obr. 3-1 Záznam součinitele tření .....	11
Obr. 3-2 Závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku.....	12
Obr. 3-3 Porovnání opotřebení full scale a tein disku .....	14
Obr. 3-4 Adhezní křivka pro mokré (vlevo) a suché (vpravo) podmínky [29].....	16
Obr. 3-5 Průběh pokusu [30] .....	17
Obr. 3-6 Vyhodnocovací metoda roznesení (vlevo). vliv množství na relativní reznesení	19
Obr. 3-7 Vliv doby od aplikace na trakční křivku [32].....	21
Obr. 3-8 Průměrný součinitel tření .....	23
Obr. 3-9 součinitel adheze v závislosti na kontaktním tlaku a konfiguraci kol, a) suché podmínky b) nízká adheze.....	24
Obr. 3-10 Laboratorní testy na nové tvrdé kolejnici .....	25
Obr. 5-1 Postup řešení disertační práce .....	35
Obr. 5-2 Schéma ball-on-disk tribometru – MTM [4] .....	36
Obr. 5-3 Kontaktní simulátor.....	38
Obr. 6-1 Průběh adheze pro suchý kontakt za skluzu 2 % .....	40
Obr. 6-2 Vývoj kontaktních těles; a) šířka, b) drsnost.....	41
Obr. 6-3 Schéma popisující vývoj metodiky.....	43
Obr. 6-4 Adhezní křivky pro skluz 2 % (vlevo) a 3 % (vpravo) .....	44
Obr. 6-5 Adhezní křivky pro skluz 5 % .....	44
Obr. 6-6 Srovnání průběhů experimentů pro různé způsoby aplikace .....	45
Obr. 6-7 Traťový tribometr .....	46
Obr. 6-8 Klínový mechanismus a měřící modul.....	47
Obr. 6-9 Schéma nové elektroniky .....	48
Obr. 6-10 Měřící režimy ((a) konstantní, (b),(c) rampa, (d) pulzní) .....	48
Obr. 6-11 Záznam skluzu a adheze pro suchý kontakt .....	49
Obr. 6-12 Adhezní křivka pro suchý kontakt .....	51
Obr. 6-13 Adhezní křivka pro ricinový olej (vlevo) a TOR mazivo (vpravo).....	52

Obr. 6-14 Porovnání změřeného koeficientu adheze s literaturou (upraveno) [40] ..... 52

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Materiály a drsnosti použitých vzorků .....	11
Tab. 3-2 Provozní parametry .....	11
Tab. 3-3 Vlastnosti použitých disků .....	13
Tab. 3-4 Provozní parametry .....	14
Tab. 3-5 Provozní parametry .....	15
Tab. 3-6 Provozní parametry .....	16
Tab. 3-7 Parametry kontaktních dvojic .....	16
Tab. 3-8 Provozní parametry .....	18
Tab. 3-9 Provozní parametry .....	19
Tab. 3-10 Změny brzdného výkonu při aplikaci maziv v %.....	20
Tab. 3-11 Čtyři základní stavy kola a kolejnice .....	25
Tab. 4-1 Provozní parametry full-scale zařízení.....	27
Tab. 4-2 Provozní parametry používané na dvoudiskových zařízeních.....	28
Tab. 4-3 Provozní parametry zařízení typu ball-on-disk .....	28
Tab. 5-1 Provozní parametry .....	36
Tab. 5-2 Parametry použité při testech.....	39

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

TOR	top-of-rail
MT	modifikátory tření
FMA	modifikátor tření A („friction modifier“)
FMB	modifikátor tření B
MTM	mini-traction-machine
EHD	elastohydrodynamické
OL	olejové (látky)
GL	plastické (látky)
WL	rozpuštné ve vodě („water-soluble“) (látky)
SL	pevné (látky)
RTRI	Railway Technical Research Institute
IF	impact factor

