



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# MODELOVÁNÍ ADHEZE PLASTICKÉHO MAZIVA V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

ADHESION MODELLING OF GREASE LUBRICANT IN WHEEL-RAIL CONTACT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kuchař

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Kvarda, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Tomáš Kuchař</b>
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Daniel Kvarda, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

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

## **Modelování adheze plastického maziva v kontaktu kola a kolejnice**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Mazání okolků a temene kolejnice je účinnou metodou snížení hluku, tření a opotřebení v kolejové dopravě. Pro optimální řízení aplikace maziv je potřeba stanovit, jak se vyvíjí tření po aplikaci v závislosti na provozních a povětrnostních podmínkách. Práce bude zahrnovat experimenty v laboratorním i reálném prostředí, které přinesou informace o jednotlivých faktorech ovlivňujících vývoj tření. Výsledky budou využity při vývoji modelu třecí vrstvy, který bude tvořit základ řídicího systému pro mazání okolků nebo temene kolejnice s reálným nasazením v železniční dopravě.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

### **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem diplomové práce je vytvořit regresní model, který popisuje vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu plastického maziva v kontaktu okolků a kolejnice. Práce bude zahrnovat laboratorní experimenty na komerčním zařízení, následné vypracování modelu a ověření modelu s pomocí traťového tribometru.

Dílní cíle diplomové práce:

- na základě rešerše identifikovat důležité vlivy a vyhodnocované parametry,
- navrhnout metodiku experimentů a metodiku zpracování dat,
- experimenty v laboratorním prostředí,
- analyzovat výsledky měření a vytvořit regresní model,
- ověření modelu na geometrii bližší reálnému kontaktu kola a kolejnice.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

**Seznam doporučené literatury:**

OLOFSSON, U. a R. LEWIS. Wheel-rail interface handbook. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

V současné době existují snahy o optimalizaci součinitele adheze v kontaktu kola a kolejnice pro snížení opotřebení, hluku a spotřebované energie. V rámci těchto snah vznikl projekt pro vytvoření digitálního dvojčete pro trať Brno–Adamov, který řeší firma ŠKODA TRANSPORTATION, a.s., Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity v Pardubicích a Ústav Konstruování VUT FSI v Brně. V této diplomové práci byla v rámci tohoto projektu řešena problematika retentivity plastického maziva, což je vzdálenost nebo čas, po který je mazivo schopné efektivně mazat kontakt a držet tak součinitel adheze na požadované úrovni. Hlavním cílem práce bylo vytvořit model, popisující vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu. Plastické mazivo bylo studováno na komerčním zařízení Mini-Traction Machine (MTM) v konfiguraci kulička – disk. Studovaným plastickým mazivem bylo BECHEM EcoRail 2009, které se skládá z bentonitového zpevňovačla a syntetického esteru jako základového oleje. Byly zjišťovány vlivy teploty, vzdušné vlhkosti, zatížení, skluzu, rychlosti a množství maziva na retentivitu. Bylo zjištěno, že zvýšení zatížení a skluzu způsobilo pokles retentivity a částečně bylo možné tyto vlivy popsat pomocí absorbované energie mazivem. Zvyšující rychlost způsobila pokles retentivity vyjádřenou v čase, avšak nárůst retentivity vyjádřenou ve skluzové vzdálenosti nebo počtu cyklů. Zvyšující množství maziva způsobilo lineární nárůst retentivity. Nárůst teploty způsobil lineární nárůst retentivity, avšak pouze pokud teplota byla v provozním rozsahu maziva. Vzdušná vlhkost měla vliv pouze, pokud docházelo ke kondenzaci, a to takový, že nastal nárůst retentivity. V modelu byly využity bezrozměrné parametry, díky kterým by mělo být možné model přenést i do reálného měřítka. Do modelu nebylo zahrnováno ulpívání maziva na kolejnici a redistribuce do dalších dvojkolí. Model byl následně ověřen pomocí traťového tribometru a bylo ukázáno, že predikce modelem odpovídá naměřeným výsledkům.

## KLÍČOVÁ SLOVA

retentivita, plastické mazivo, kontakt kola a kolejnice, klimatické podmínky, provozní parametry, regresní modelování

## ABSTRACT

Currently, there are efforts to optimise the coefficient of adhesion in wheel-rail contact to reduce wear, noise and energy consumption. A project to create a digital twin for the Brno–Adamov line is being solved by ŠKODA TRANSPORTATION, a.s., the Jan Perner Transport Faculty of the University of Pardubice and the Institute of Machine and Industrial Design of the Brno University of Technology. In this thesis, within the previously mentioned project, the problem of grease retentivity was addressed, which is the distance or time for which the grease is able to efficiently lubricate the contact and thus maintain the adhesion coefficient at the desired level. The main objective of this work was to develop a model describing the effect of climatic conditions and operating parameters on retentivity of grease. The studied grease was BECHEM EcoRail 2009, which consists of bentonite thickener and a synthetic ester as a base oil. The grease was studied on a commercial Mini-Traction Machine (MTM) device in a ball on disc configuration. The effects of temperature, air humidity, load, slip, speed and lubricant quantity on retentivity were investigated. It was found that increasing load and slip caused a decrease in retentivity and could be described by using the energy absorbed by the lubricant. Increasing velocity caused a decrease in retentivity expressed in time but an increase in retentivity expressed in slip distance or number of cycles. Increasing the amount of lubricant caused a linear increase in retentivity. Increasing temperature caused an increase in retentivity, but only if the temperature was within the operating range of the grease. Air humidity only had an effect if condensation occurred, such that an increase in retentivity was observed. Dimensionless parameters were used in the model, which should make it possible to transfer the model to real scale. However, lubricant deposition to the rail and redistribution to other wheelsets was not included in the model. The model was then verified with a rail tribometer and it was shown that the model prediction was consistent with the measured results.

## KEYWORDS

retentivity, grease, wheel – rail contact, climatic conditions, operating parameters, regression modelling



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUCHAŘ, Tomáš. Modelování adheze plastického maziva v kontaktu kola a kolejnice. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154140>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Daniel Kvarda, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Danielovi Kvardovi, Ph.D. za veškeré cenné rady a čas, který věnoval vedení mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině a přítelkyni za podporu v průběhu studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Daniela Kvardy, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora





# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>18</b>
2.1	Rešeršní metody	18
2.2	Kritická rešerše	20
2.2.1	Kontakt kola a kolejnice	20
2.2.2	Plastická maziva	23
2.2.3	Vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na adhezi	25
2.2.4	Vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu	28
2.2.5	Vliv druhu plastického maziva na retentivitu	31
2.2.6	Vliv viskozity základového oleje na retentivitu	32
2.2.7	Fáze časového testu retentivity	33
2.2.8	Modelování v kolejové dopravě	33
2.2.9	Měření adheze v laboratorních podmínkách	36
2.2.10	Měření adheze na reálné trati	37
2.2.11	Metodika testování	39
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	39
2.4	Mezera v poznání	41
<b>3</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b>	<b>43</b>
3.1	Výzkumné otázky	43
3.2	Cíle výzkumu	43
3.3	Hypotézy	44
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>45</b>
4.1	Metodika	45
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	46
4.2.1	Mini-Traction Machine (MTM)	46
4.2.2	Traťový tribometr	47
4.2.3	Jednotka pro úpravu vlhkosti vzduchu	48
4.2.4	Další laboratorní zařízení	48
4.3	Materiál a testovací podmínky	49
4.4	Metody	49
4.4.1	Měření retentivity na MTM	50
4.4.2	Aplikace maziva na MTM	50

4.4.3	OFAT testování na MTM	52
4.4.4	Vyhodnocování dat na MTM	53
4.4.5	Regresní model	54
4.4.6	Měření retentivity na traťovém tribometru	57
4.4.7	Vyhodnocování dat na traťovém tribometru	58
4.4.8	Porovnání predikce modelu a měření na traťovém tribometru	59
4.5	Testované predikce	60
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>62</b>
5.1	Fáze časového testu retentivity	62
5.2	Vliv klimatických podmínek na retentivitu	63
5.2.1	Vliv teploty na retentivitu	63
5.2.2	Vliv vlhkosti na retentivitu	64
5.3	Vliv provozních parametrů	66
5.3.1	Vliv zatížení na retentivitu	66
5.3.2	Vliv skluzu na retentivitu	67
5.3.3	Vliv rychlosti na retentivitu	69
5.3.4	Vliv množství maziva na retentivitu	70
5.3.5	Ekvivalence zatížení a skluzu	72
5.3.6	Množství absorbované energie mazivem	73
5.4	Regresní model	74
5.5	Ověření regresního modelu s pomocí traťového tribometru	78
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>80</b>
6.1	Interpretace výsledků	80
6.1.1	Fáze testu retentivity	80
6.1.2	Vliv klimatických podmínek na retentivitu	81
6.1.3	Vliv provozních parametrů	82
6.1.4	Regresní model	85
6.1.5	Ověření modelu s pomocí traťového tribometru	85
6.1.6	Limitace práce a naznačení dalšího výzkumu	86
6.2	Verifikace hypotéz	88
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>94</b>

<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>100</b>
10.1	Seznam zkratek	100
10.2	Seznam veličin	100
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>103</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>106</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>107</b>
	<b>PŘÍLOHA Č.1 – GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ MODEL PRO PŘEKROČENÍ SOUČinitele adheze <math>\mu = 0,15</math></b>	<b>108</b>

# 1 ÚVOD

V současné době se v oblasti kolejové dopravy často řeší problematika optimalizace procesu mazání v kontaktu kola a kolejnice. Optimalizace mazání spočívá v tom, že je součinitel adheze udržován na požadovaných hodnotách, a nedochází tak k nadměrnému mazání, které by způsobilo plýtvání mazivem a nevzniká nebezpečí přemazání kontaktu. Optimalizace mazání se dá dosáhnout pomocí mazacího algoritmu nebo digitálního dvojčete. Digitální dvojče na základě informací ze senzorů umístěných na vlaku určuje, kdy bude nutná další aplikace maziva do kontaktu kola a kolejnice. Takové digitální dvojče se v současné době snaží vyvinout firma ŠKODA TRANSPORTATION a.s. ve spolupráci s dopravní fakultou Jana Pernera univerzity Pardubice a Ústavem Konstruování na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Digitální dvojče je vyvíjeno pro trať Brno–Adamov, na které je velké množství traťových oblouků a dochází zde k velmi rychlému opotřebení kol a kolejnicí. Digitální dvojče na této trati umožní optimalizovat mazací procesy, což povede k úsporám ve spotřebované elektrické energii, úsporám v množství spotřebovaného maziva, umožní cílené mazání v problematických místech, sníží se opotřebení kol i kolejnicí a dojde k snížení hluku při průjezdu vlaku. Vývoj digitálního dvojčete je také motivován rozšiřujícím se autonomním řízením a častou digitalizací v rámci průmyslu 4.0, díky čemuž by mohly být informace o stavu vlaku sledovány v reálném čase.

Pro svoji správnou funkci digitální dvojče potřebuje mít údaje o vývoji součinitele adheze v čase. Pokud dojde k překročení určité hodnoty součinitele adheze vlivem úbytku maziva, dojde k nové aplikaci maziva. Doba, po kterou je udržován součinitel adheze pod určitou úroveň se nazývá retentivita maziva. V reálném kontaktu hraje také významnou roli to, že mazivo ulpívá na kolejnici a tím se odstraňuje z kontaktu. Mazivo ulpěné na kolejnici pak ulpívá na dalším kole a tím dochází k redistribuci maziva. V této práci je řešena pouze retentivita maziva (vývoj součinitele adheze v čase), redistribuce zde řešena není.

Kontakt kola a kolejnice je otevřená tribologická soustava, na kterou působí vnější vlivy (teplota, vzdušná vlhkost, kontaminace – voda, listí) a provozní parametry (rychlost, skluz, množství aplikovaného maziva a jeho typ). Všechny tyto parametry ovlivňují součinitel adheze a jeho vývoj v čase. Kontakt kola a kolejnice lze rozdělit na dvě hlavní kontaktní oblasti – kontakt na běhounu kola a kontakt v okolku. Kontakt na běhounu je důležitý zejména z důvodu přenosu trakčních sil. Z tohoto důvodu je zde snaha o udržení součinitele adheze na střední hodnotě – příliš malá hodnota součinitele adheze by způsobovala nedostatečné trakční síly a příliš vysoká hodnota by způsobovala vyšší energetické ztráty třením a hluk. Kontakt v okolku je typický tím, že zde dochází k velkým kontaktním tlakům (až 3 GPa). Ke kontaktu v tomto místě dochází především v traťových obloucích. Vzhledem k tomu, že zde nedochází k přenosu trakčních sil, je zde snaha o udržení součinitele adheze na co nejnižší hodnotě. K tomu se používají zejména plastická maziva, která jsou v literatuře občas označována také jako LCF (Low Coefficient of Friction) maziva.



Cílem této práce je popsat vývoj součinitele adheze v čase při aplikaci plastického maziva za různých klimatických podmínek a provozních parametrů. Při testech je zanedbán mechanismus úbytku maziva vlivem ulpívání maziva na kolejnici. Testy jsou prováděny v laboratorních podmínkách. Z těchto testů je následně vytvořen regresní model, který popisuje retentivitu v závislosti na provozních a klimatických podmínkách. V práci jsou také provedeny testy na vzorku reálné kolejnice s využitím traťového tribometru a model je s těmito výsledky porovnán za účelem ověření modelu v jiném měřítku.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V rámci rešerše byly hledány odpovědi na otázky týkající se kontaktu kola a kolejnice v reálných podmínkách. Podle toho, jak se na základě rešerše podařilo na tyto otázky odpovědět, bylo definováno bílé místo výzkumu a výzkumné otázky. Otázky pro rešerši byly následující:

1. Jaký je vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na součinitel adheze v kontaktu kola a kolejnice při aplikaci plastického maziva?
2. Jaký je vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu plastického maziva v kontaktu kola a kolejnice?
3. Jaké jsou možnosti modelování adheze v kontaktu kola a kolejnice?

Bylo však potřeba definovat, jaké klimatické podmínky a provozní parametry budou studovány. Ty byly dle předběžného průzkumu zvoleny:

- a) teplota,
- b) vlhkost,
- c) zatížení,
- d) skluz,
- e) rychlost,
- f) množství aplikovaného maziva.

Důležité je zmínit, že z důvodu nedostatku literatury, ve které je využito plastické mazivo byla rešerše v případě potřeby rozšířena i na modifikátory tření na olejové bázi, olej a případně i na modifikátory tření na vodní bázi. V rešerši jsou také popsány vlastnosti plastického maziva (kap. 2.2.2), přičemž zde byly informace čerpány z literatury zabývající se valivými ložisky, kde je aplikace plastického maziva velice častá. Na základě nalezených článků jsou také představeny metody zjišťování součinitele adheze v laboratorních podmínkách (kap. 2.2.9) i na reálné trati (kap. 2.2.10). Poslední kapitola se pak zabývá doporučeními pro metodiku zpracování kvalitní vědecké práce (kap. 2.2.11).

### 2.1 Rešeršní metody

Využitím rešeršních metod bylo zaručeno, že bude nalezena veškerá relevantní literatura zabývající se daným tématem. Cílem bylo systematicky pokrýt téma kontaktu kola a kolejnice za přítomnosti maziv a možnosti modelování v těchto kontaktech.

## 2.1.1 Vyhledávání zdrojů

K vyhledávání zdrojů byly použity databáze Scopus, Web of Science a Google Scholar. Scopus nabízel nejvíce relevantních výsledků, proto byl použit jako hlavní zdroj literatury. Některá literatura nebyla vyhledána s pomocí klíčových slov, ale byla přidána manuálně. Jedná se o literaturu poskytnutou vedoucím práce a literaturu ze zdrojů v pracích vyhledaných s pomocí databáze. K této literatuře byly navíc přidány publikace, které se zabývají tématem mimo rešeršní dotazy, ale pro úplnost rešerše musely být také zahrnuty.

Klíčová slova byla volena tak, aby co nejlépe vystihovala problematiku mazání plastickým mazivem v oblasti kolejové dopravy. K těmto slovům byla následně přidána synonyma a pojmy uváděné v abstraktech již nalezených prací. Klíčová slova a jejich synonyma byla následně pospojována pomocí Booleovských operátorů a tím byly vytvořeny vyhledávací dotazy. Na základě počtu nalezených publikací pak byla využita metoda rostoucí perly (přidávání synonym pro zvětšení počtu nalezených publikací), anebo metoda ořezávání (přidávání klíčových slov pro zmenšení počtu nalezených prací).

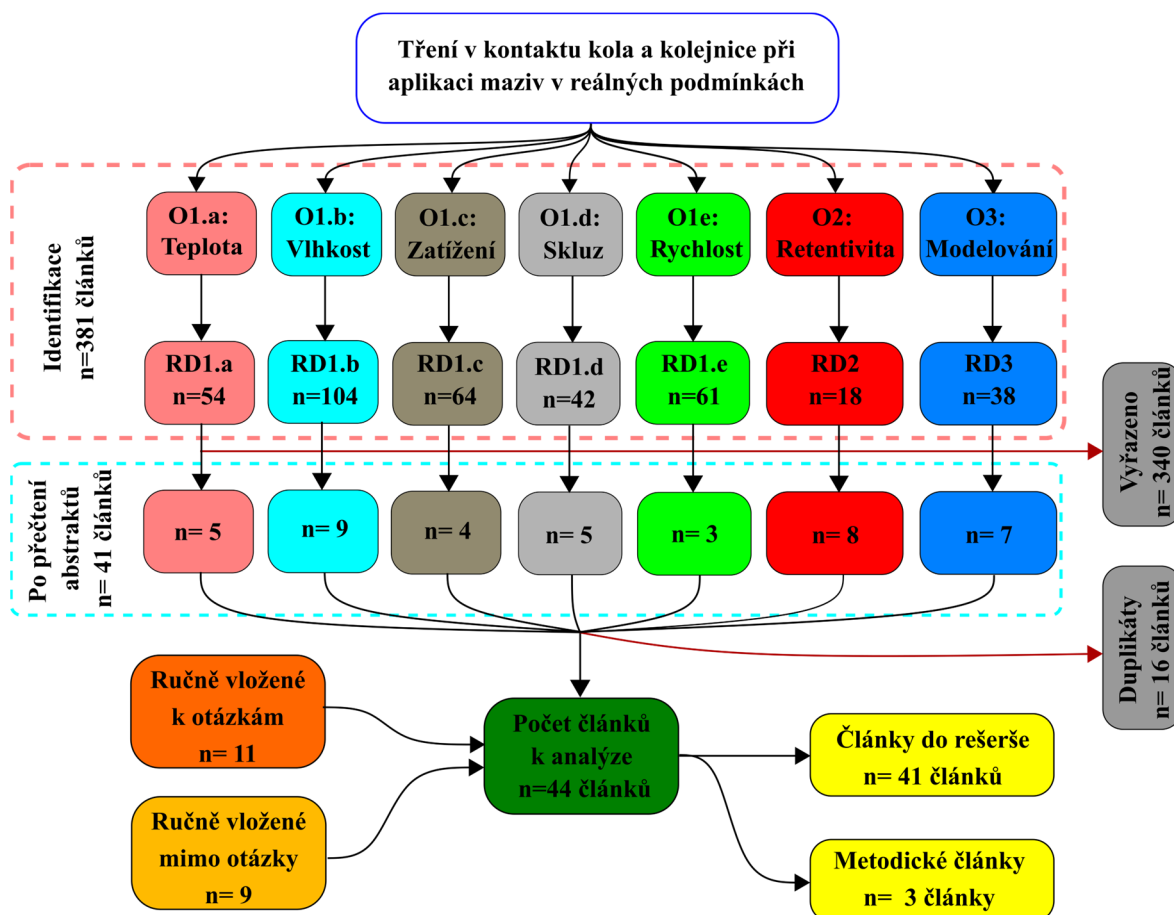
Finální počet publikací po vyfiltrování byl 44, z čehož jsou 3 metodické články. Finální vyhledávací dotazy a výsledky jsou uvedeny v Tab. 2-1.

Tab. 2-1: Výsledky vyhledávání pro jednotlivé rešeršní dotazy

Otázka	Rešeršní dotaz	Scopus	Web of Science	Google Scholar
1. a	(grease OR oil OR fm OR "friction modifier" OR gauge OR flange) AND (temperature) AND (wheel-rail)	54	37	6 270
1. b	(grease OR oil OR fm OR "friction modifier" OR gauge OR flange) AND (humidity OR water) AND (wheel-rail OR railhead)	104	76	16 100
1. c	(grease OR oil) AND (pressure OR load) AND (wheel-rail)	64	51	4 200
1. d	(grease OR oil) AND (slip OR creepage OR creep) AND (wheel-rail)	42	36	2 600
1. e	(grease OR oil) AND (speed OR velocity) AND (wheel-rail)	61	44	4 260
2. a-f	(grease OR oil OR fm OR gauge OR "friction modif" OR "top-of-rail product") AND (retentivity OR "Carry down" OR "spread extent" OR "Carry-on") AND (wheel-rail OR rail OR wheel)	18	11	16 500
3.	(grease OR oil) AND (adhesion OR friction) AND model AND wheel-rail	38	36	3 210

## 2.1.2 Filtrování zdrojů

Zdroje byly následně filtrovány na základě přečtení názvu, abstraktu a případně nalezených duplikátů (Obr. 2-1). U článků byly také hodnoceny scientometrické údaje, jako je počet citací, h-index autorů a impakt faktor časopisu, žádné články však nebyly vyřazeny jenom proto, že by měly nízké scientometrické údaje.



Obr. 2-1: PRISMA diagram

## 2.2 Kritická rešerše

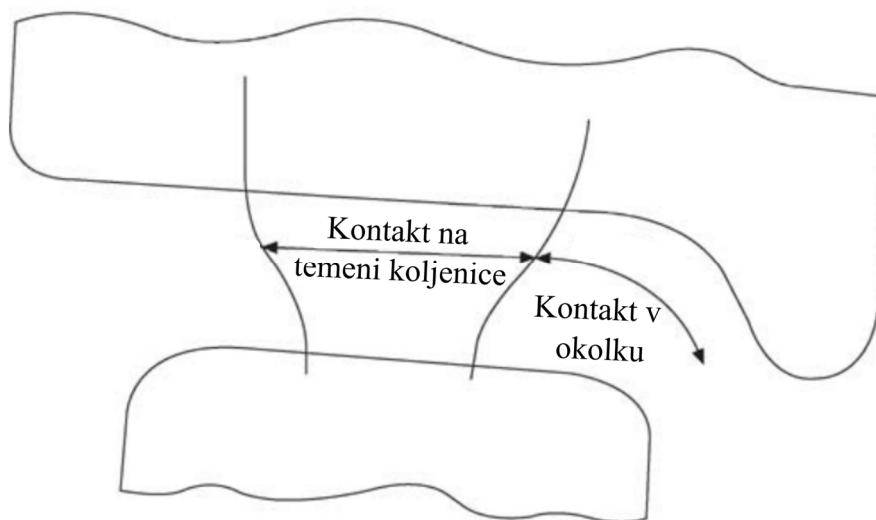
### 2.2.1 Kontakt kola a kolejnice

#### Rozdělení kontaktu

Při kontaktu kola a kolejnice (Obr. 2-2) dochází ke třem hlavním způsobům kontaktu [1]:

- Prvním je kontakt na běhounu kola a temeni kolejnice. Tento kontakt je typický větší kontaktní plochou, nižšími kontaktními tlaky (800–1200 MPa), nižším opotřebením a nižším skluzem (0–5 %). Dochází k němu během jízdy po rovném úseku tratě.

- Druhým je kontakt v okolku kola. Tento kontakt je typický menší kontaktní plochou, vysokými kontaktními tlaky (2500–3500 MPa), vyšším opotřebením a vyšším skluzem (5–30 %). Dochází k němu při průjezdu ostrým traťovým obloukem.
- Třetím je dvoubodový kontakt. Je typický tím, že zde dochází ke dvěma odděleným kontaktním oblastem. Tento kontakt je kombinací dvou výše zmíněných a dochází k němu, pokud je opotřebení kola a kolejnice velké.

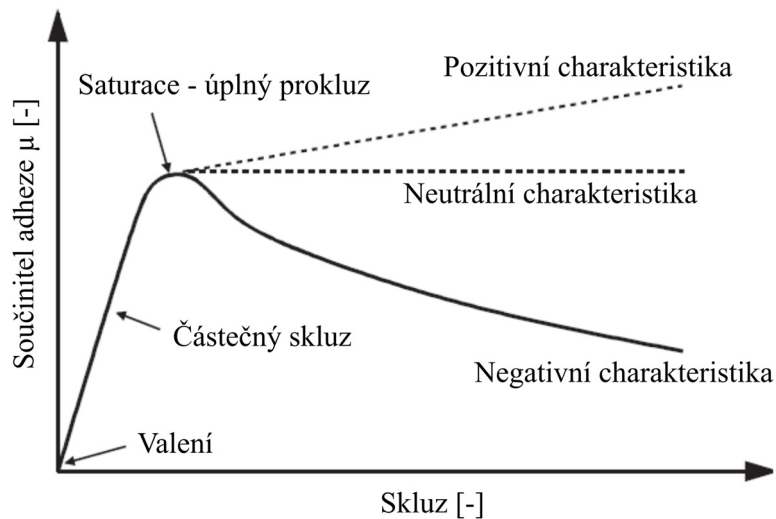


Obr. 2-2: Grafické znázornění oblastí v kontaktu kola a kolejnice [1] - upraveno

## Adheze

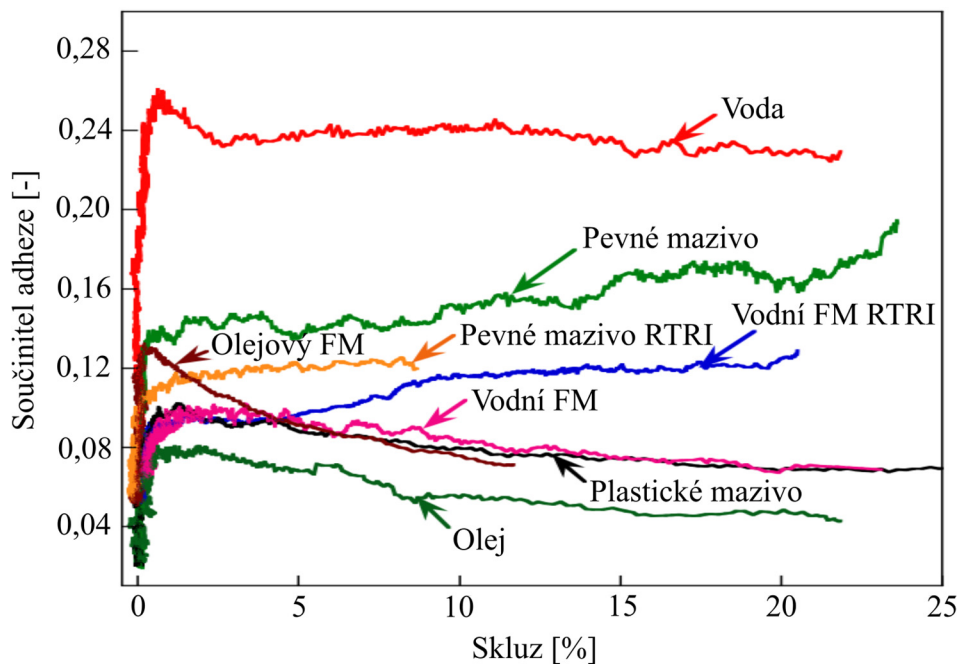
K přenosu trakčních sil z kola na kolejnice dochází díky skluzu mezi kolem a kolejnicí. V literatuře je skluz také často označován jako SRR (slide-to-roll ratio). Takový kontakt bývá označován jako valivě-skluzový (rolling-sliding). Díky narůstajícímu skluzu dochází ke zvětšování součinitele adheze, až do určitého bodu – saturace. Vysvětlením je narůstající podíl skluzové části kontaktu k valivé části kontaktu. Při saturaci dochází k zániku valivé části kontaktu [1]. Adheze může po saturaci při dalším zvětšování skluzu klesat (negativní charakteristika), zůstat stejná (neutrální charakteristika) nebo pozvolna narůstat (pozitivní charakteristika) [2]. Závislost adheze na skluzu je popsána trakční křivkou (Obr. 2-3). Pro suchý kontakt kola a kolejnice trakční křivka saturuje na hodnotách 0,4–0,7 a má neutrální nebo negativní charakteristiku. Vlivem maziv a kontaminantů může saturovaná hodnota významně klesnout [3] a také změnit charakteristiku.

Pro ovlivnění součinitele adheze na temeni kolejnice se používají modifikátory tření (v literatuře označované jako FM), které udržují součinitel adheze na střední úrovni (0,25–0,35) a poskytují pozitivní charakteristiku trakční křivky [2]. Modifikátory tření mohou být tuhé i kapalné [2]. Kapalné modifikátory tření jsou směsí základové složky a částic. Základová složka může být olej nebo voda a jako částice se používají drobné kovové částice [4].



Obr. 2-3: Trakční křivka [2] – upraveno

Pro mazání okolků se používají převážně plastická maziva a cílem je udržet součinitel adheze na co nejnižší úrovni (optimálně pod hodnotou součinitele adheze 0,15) [5]. Trakční křivky pro kontakt mazaný různými typy mazivy jsou na Obr. 2-4.

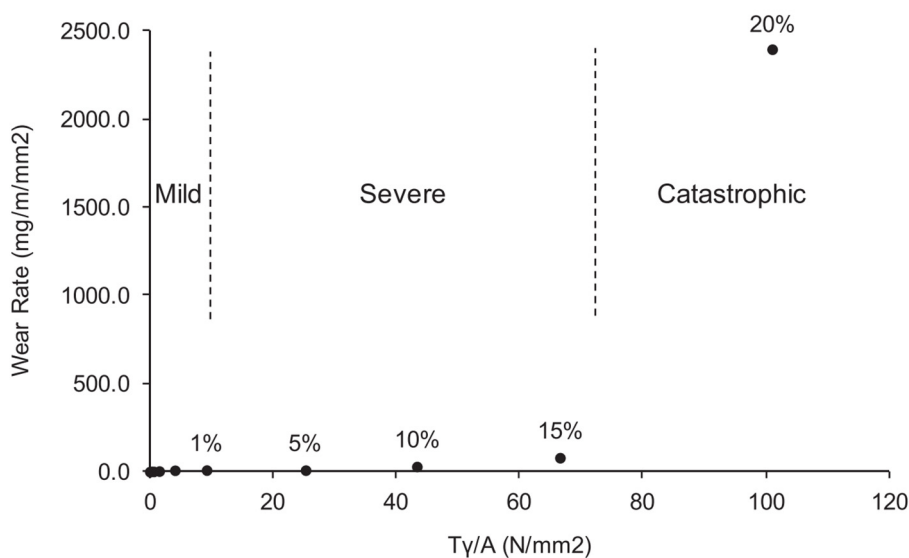


Obr. 2-4: Trakční křivky pro různá maziva [6] - upraveno

### Opotřebení

V kontaktu kola a kolejnice se vyskytuje několik mechanismů opotřebení. Patří mezi ně adhezní opotřebení, abrazivní opotřebení (častěji za přítomnosti třetího tělesa), oxidační opotřebení a tepelné opotřebení [1]. V kolejové dopravě se rychlost opotřebení řadí do třech

kategorií: mírné, závažné a katastrofické [1]. Kontakt na temeni kolejnice se řadí do mírného až závažného režimu opotřebení, zatímco kontakt v okolku se řadí do závažné až katastrofické kategorie. Pro kategorizaci mezi jeden ze zmíněných režimů se využívá parametr  $T\gamma$  – součin trakční síly a skluzu [7]. Pro účely porovnání v rámci několika měřítek se také často parametr  $T\gamma$  dělí kontaktní plochou [8–10]. Využití parametru  $T\gamma$  pro kategorizaci režimu opotřebení je zobrazeno na Obr. 2-5.



Obr. 2-5: Využití parametru  $T\gamma$  pro kategorizaci režimu opotřebení pro různé skluzu [10]

## 2.2.2 Plastická maziva

Plastické mazivo se skládá z několika složek, které ovlivňují jeho finální vlastnosti [11]. Jedná se o:

- základový olej
- zpevňovadlo
- aditiva

Základový olej je uvnitř zpevňovadla držen za pomoci kombinace Van der Waalsových a kapilárních sil [12]. Plastické mazivo se skládá zhruba z 70–97 % základového oleje, 3–30 % zpevňovadla a aditiv [12]. Plastické mazivo vykazuje neneutonské chování, které se nejčastěji popisuje pomocí Herschel-Bulkley reologického modelu [12]. K popisu a rozdělení plastických maziv z hlediska konzistence (viskozita v nezátíženém stavu) se používá penetrační test (ISO 2137) a rozřazení pomocí NLGI třídy [12].

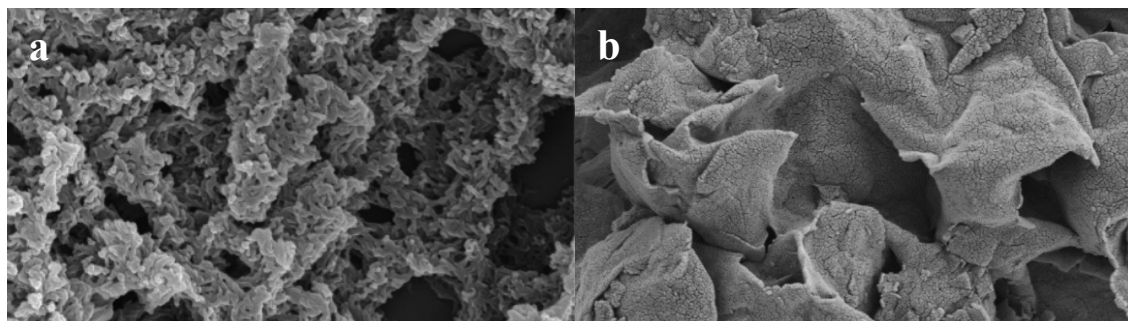
### Základový olej

Základový olej může být jak minerální, tak syntetický, případně i směsí obou. Syntetické oleje mohou být vyrobeny z esterů (PE), polyalfaolefinů (PAO) a dalších [11]. Základový

olej ovlivňuje plastické mazivo svou viskozitou, tlakově-viskozitním koeficientem, teplotní stabilitou a kompatibilitou s aditivy [12].

### Zpevňovadlo

Zpevňovadlo může být z vápenatých mýdel (Ca), lithných mýdel (Li), polymočovinové (PU), bentonitové a další [11]. Zpevňovadlo ovlivňuje zejména reologické vlastnosti v nezátíženém stavu a afinitu vůči vodě. Z hlediska tribologických vlastností ovlivňuje zpevňovadlo zejména tloušťku filmu při nízkých rychlostech [13]. Ovlivňuje také tloušťku filmu za vysokých rychlostí, protože zde dochází k hladovění kontaktu [14]. Dále také ovlivňuje ekologičnost použití maziva z hlediska biologické rozložitelnosti. Na Obr. 2-6 lze vidět, že lithné zpevňovadlo (Obr. 2-6a) tvoří spíše drobnou vláknitou strukturu, zatímco struktura bentonitového zpevňovadla (Obr. 2-6b) je tvořena většími částicemi lamelárního tvaru.



Obr. 2-6: Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu a: Plastické mazivo s lithným komplexním mýdlem b: Plastické mazivo s bentonitovým zpevňovadlem [15]

### Aditiva

Aditiva zlepšují vlastnosti z hlediska snížení opotřebení a koroze kontaktních součástí, snižují oxidaci maziva a zlepšují chování za vysokých kontaktních tlaků [12]. Aditiva mohou mít také formu pevných částic pro zlepšení mezního mazání [12]. Přidávání aditiv do plastického maziva může způsobit ztrátu konzistence a některá aditiva nemusí fungovat dle očekávání [16].

### Tribologické vlastnosti

Typickým projevem při použití plastických maziv je tzv. hladovění. K tomuto jevu dochází při vyšších rychlostech, kdy mazivo nestíhá zaplavovat kontakt [14]. U plastických maziv s vyšší NLGI třídou k tomu dochází při nižších rychlostech než u plastických maziv s nižší NLGI třídou, případně u samotného oleje. Vliv má i viskozita základového oleje. Hladovění se projevuje snížením centrální tloušťky filmu a posunutím menisku [17].

Předpověď tloušťky mazacího filmu a tím pádem režimu mazání je u plastických maziv komplikovanější než u oleje, a to zejména z důvodu komplexnosti složení plastického maziva. Tloušťku filmu ovlivňuje NLGI třída, zpevňovadlo i základový olej. Existují



modely popisující chování maziva (např. Yang – Qian model pro plně zaplavený kontakt [18], Van Zoelenův model pro hladovějící kontakt [19]). Yang – Qian [18] model je založený na úpravě vztahu Hamrock – Dowson [20], Van Zoelenův vztah je založený na jiném matematickém popisu [19].

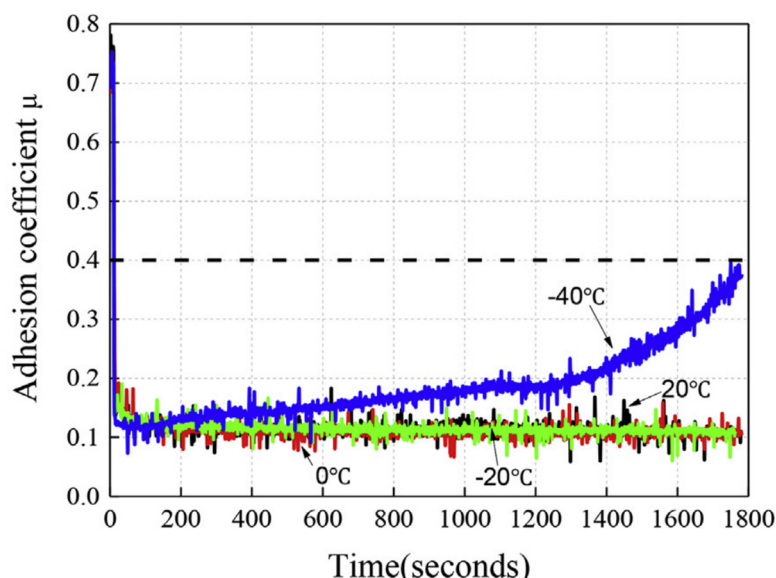
### Specifika plastických maziv používaných v kolejové dopravě

V kolejové dopravě je velmi důležitým parametrem retentivita maziva, která určuje, po jakou dobu je mazivo nebo modifikátor tření schopný udržet součinitel adheze pod určitou hodnotou [5]. Dále je snaha, aby tato maziva byla biokompatibilní a mohla se tak volně rozpadnout do přírody v okolí tratě.

## 2.2.3 Vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na adhezi

### Vliv teploty na součinitel adheze

Vlivem nízkých teplot v kontaktu kola a kolejnice při aplikaci oleje se zabýval Shi [21]. Ukázal, že při plně zaplaveném kontaktu mělo snižování teploty vliv na součinitel adheze pouze v rámci statistické chyby (teploty  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  – Obr. 2-7). Vliv vysokých teplot při aplikaci plastického maziva zkoumal Vásquez-Chacón [22], který zjistil, že při vyšší drsnosti ( $R_a = 4\text{ }\mu\text{m}$ ) se součinitel adheze snižuje se zvyšující se teplotou (testy při  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), zatímco při nižší drsnosti ( $R_a = 0,6\text{ }\mu\text{m}$ ) se součinitel adheze zvyší.



Obr. 2-7: Vývoj součinitele adheze oleje v čase při různých teplotách [21]

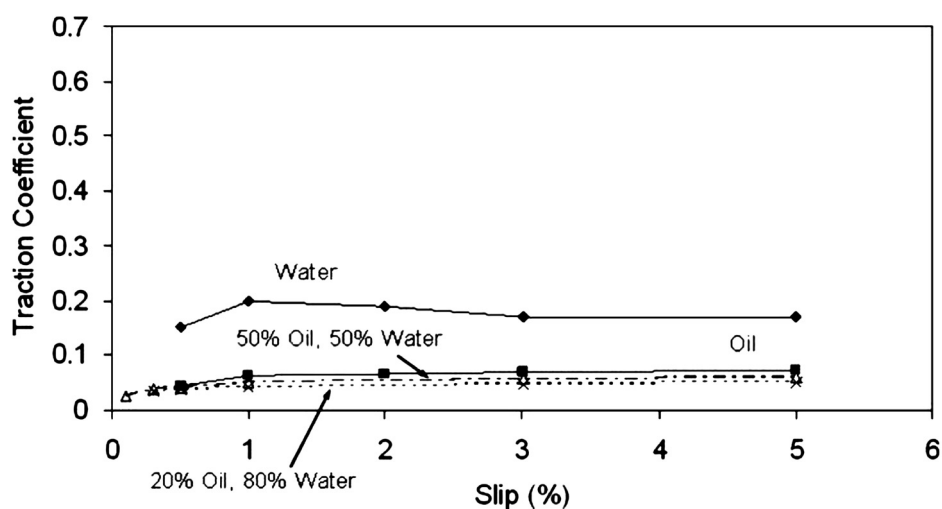
V další práci se teplotou zabýval Kunishima [23], který studoval dvě různá plastická maziva, u kterých zvyšoval teplotu akumulací energie z tření. Ukázalo se, že se zvyšující se teplotou jedno mazivo vykazovalo mírný nárůst ( $\mu_{30-120\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0,04\text{--}0,08$ ) a druhé vykazovalo mírný pokles ( $\mu_{30-120\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0,065\text{--}0,05$ ). Vliv teploty je také zaznamenán v práci od Zhu [24]. V této

práci byl studován olej a z výsledků vyplynulo, že teplota (testy při 5 °C a 20 °C) nemá významný vliv na součinitel adheze. V další práci [25] byla teplota měřena jako vedlejší veličina (testy v reálném prostředí) a bylo ukázáno, že součinitel adheze se s teplotou neměnil (teploty 14, 18 a 27 °C).

#### Vliv vzdušné vlhkosti a vody na součinitel adheze

Vliv vlhkosti na součinitel adheze oleje studoval Beagley [26], který zjistil, že nárůst vzdušné vlhkosti způsobil pokles součinitele adheze. Bylo to však pozorovatelné pouze při velmi malém (reziduálním) množství oleje. Při větším množství oleje pozoroval pokles součinitele adheze pouze, pokud docházelo ke kondenzaci. Vliv vlhkosti studoval také Moreno-Ríos [25], který při změně relativní vzdušné vlhkosti (hodnoty 20, 30 a 35 %) nepozoroval změnu součinitele adheze. Měřil však také směs oleje a vody a zjistil, že došlo k mírnému poklesu součinitele adheze.

Adhezi při aplikaci oleje a vody jakožto směsi do kontaktu zkoumaly také články [27, 28]. Oba články se shodují na tom, že po přidání vody dochází k drobnému poklesu součinitele adheze (Obr. 2-8). Frýza ve své diplomové práci [17] zkoumal vliv nanesení vody před testem a zjistil, že kvůli hydrofobním vlastnostem plastického maziva se do kontaktu dostává velmi malé množství vody, které neovlivňuje součinitel adheze.

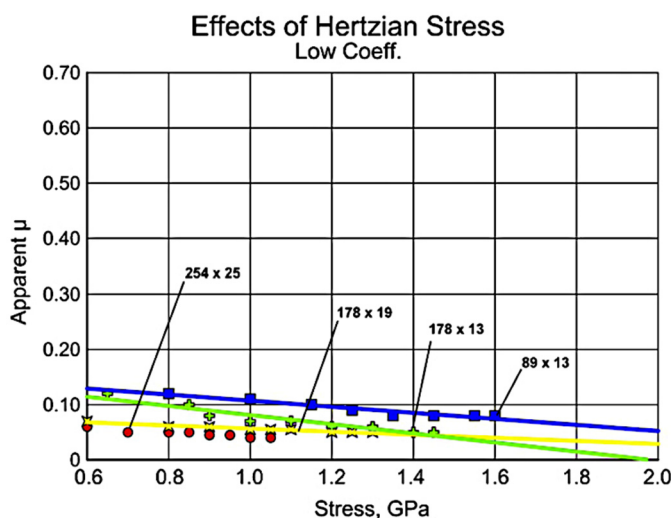


Obr. 2-8: Trakční křivka při aplikaci vody, oleje a jejich směsi [28]

#### Vliv zatížení na součinitel adheze

Vliv zatížení na kontakt mazaný olejem byl zkoumán v práci [24] a ukázalo se, že při zvýšení kontaktního tlaku (700 MPa a 900 MPa) se zvýší součinitel adheze zanedbatelně. Podobného výsledku pro tělesa s nízkou drsností povrchu bylo dosaženo i v dalších pracích zabývajících se vlivem kontaktního tlaku v kontaktu mazaném olejem [27, 28]. V práci [29], kde bylo použito plastické mazivo, také nebyl pozorován významný rozdíl v součiniteli adheze při změně zatížení. V práci [30] se ukázalo, že součinitel adheze mírně klesá se zvyšujícím se

kontaktním tlakem (Obr. 2-9), přičemž míra poklesu byla závislá na rozměrech kontaktních těles. V této práci ale nebylo přesně specifikováno použité mazivo.



Obr. 2-9: Závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku

### Vliv skluzu na součinitel adheze

Vliv skluzu na součinitel adheze je popsán trakční křivkou. Trakční křivky pro kontakt mazaný olejem jsou publikovány v článkách [6, 24, 28] a trakční křivky pro kontakt mazaný plastickým mazivem jsou publikovány v článkách [6, 29]. Trakční křivky pro kontakt mazaný olejem nebo plastickým mazivem běžně saturují na hodnotách skluzu 1–10 % a saturovaná hodnota součinitele adheze se pohybuje v rozmezí  $\mu = 0,05–0,1$  (Tab. 2-2).

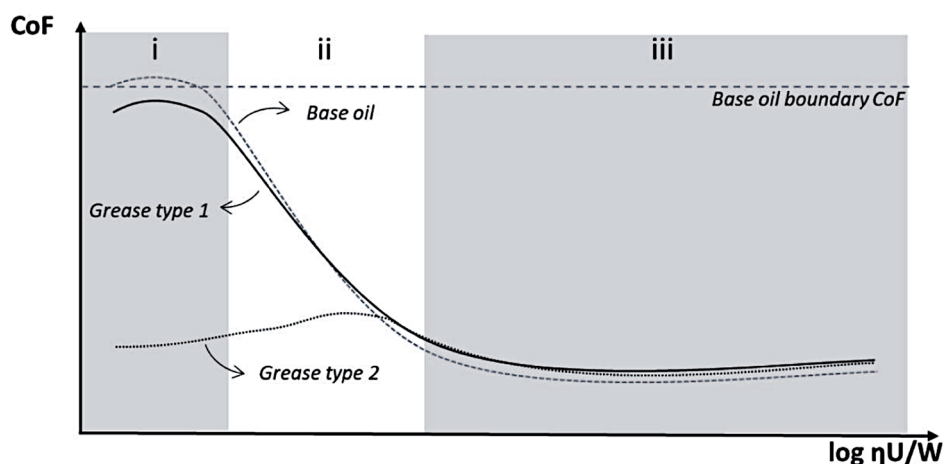
Tab. 2-2: Souhrn měřených trakčních křivek z literatury

Autor	Mazivo	Skluz při saturaci	Saturovaný součinitel adheze	Charakteristika po saturaci
Chen [6]	Plastické	2 %	0,1	Negativní
Areiza [29]	Plastické	5 %	0,08	Pozitivní
Zhu [24]	Olej	10 %	0,02	Pozitivní
Lewis [28]	Olej	1 %	0,05	Pozitivní

### Vliv rychlosti na součinitel adheze

Vliv rychlosti na součinitel adheze popisuje Stribeckova křivka (Obr. 2-10). Stribeckova křivka pro mazání olejem byla měřena v práci [24] a bylo zjištěno, že při drsném povrchu vykazuje součinitel adheze pokles s narůstající rychlostí, zatímco pro hladký povrch byl součinitel adheze nízký již od počátku. V práci [27] byl naměřen pokles součinitele adheze s narůstající rychlostí v kontaktu mazaném olejem. Stribeckova křivka pro kontakt mazaný olejem byla také měřena Galasem [4], přičemž je zde pozorovatelné, že na křivce není pozorovatelný mezní režim mazání. Stribeckova křivka pro kontakt mazaný plastickým

mazivem je zobrazená v článku [13]. Je zde vidět (Obr. 2-10), že křivka může vypadat stejně, jako pro základový olej, může se ale významně lišit ve smíšené a mezní oblasti mazání, přičemž to závisí zejména na zpevňovadle.



Obr. 2-10: Stribeckova křivka pro dvě různá plastická maziva [13]

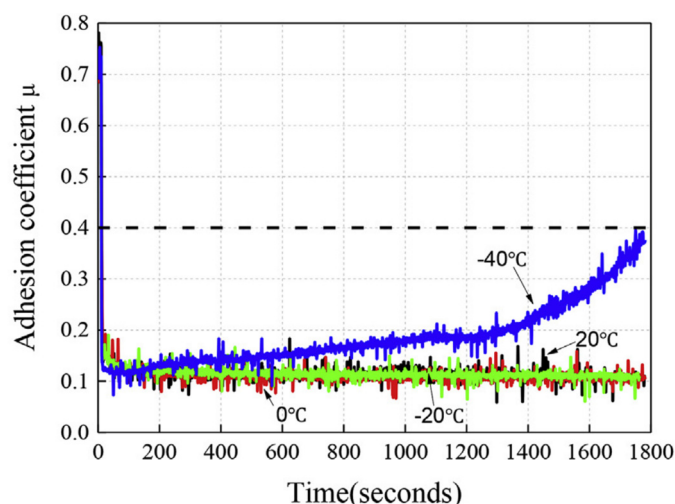
#### Vliv množství maziva na součinitel adheze

Množství maziva neovlivňuje přímo součinitel adheze, ale míru zaplavení kontaktu. Při málo zaplaveném kontaktu pak dochází k hladovění, které se vyznačuje nižší tloušťkou mazacího filmu a tím může dojít k přechodu mazání do smíšeného režimu, a tím může být ovlivněn součinitel adheze. Dalšími mechanismy, kterými může dojít k hladovění jsou vysoké rychlosti a vysoká viskozita maziva. Z důvodu vysoké viskozity je hladovění častým projevem při použití plastického maziva. Hladověním se zabývalo několik prací, ale nebudou zde podrobněji rozebrány [19, 31–33].

#### 2.2.4 Vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu

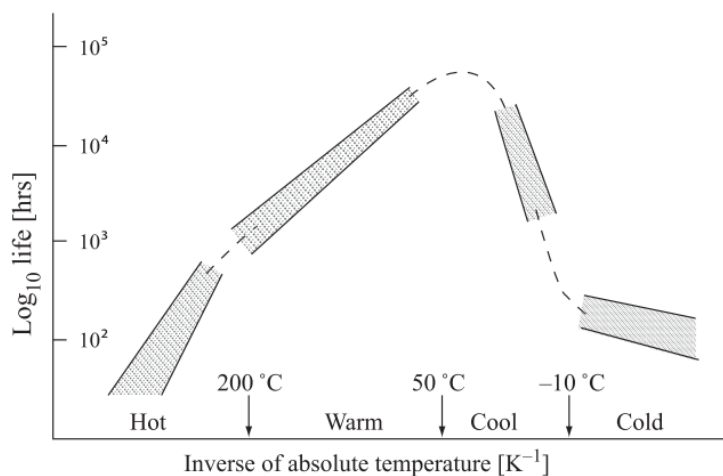
##### Vliv teploty na retentivitu

Vliv nízkých teplot na retentivitu oleje studoval Shi [21]. Zjistil, že při teplotě  $-40\text{ °C}$  byl znatelný nárůst součinitele adheze v čase (Obr. 2-11), zatímco pro teploty  $-20\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$  a  $20\text{ °C}$  tento nárůst nebyl viditelný (pravděpodobně by zde byl pozorován, pokud by test běžel déle). Vliv teploty na retentivitu plastického maziva je zobrazen v článku [22], kde je pozorovatelné, že se retentivita snížila se zvyšující teplotou.



Obr. 2-11: Vývoj součinitele adheze oleje v čase při různých teplotách [21]

Vliv teploty na životnost plastického maziva ve valivém ložisku ukázal Lugt ve své knize [12]. Ukázal, že závislost životnosti na teplotě nemá jednoduchý průběh (Obr. 2-12). Mazivo má maximum své životnosti při zhruba 40 °C, při snížení i zvýšení teploty pak dochází k poklesu životnosti. Snížená životnost při nízkých teplotách je způsobená snížením schopnosti uvolňovat základový olej a dochází tak k převládnutí vlivu zpevňovačů na kontakt. Sníženou životnost při vyšších teplotách pak přisuzuje oxidaci základového oleje.

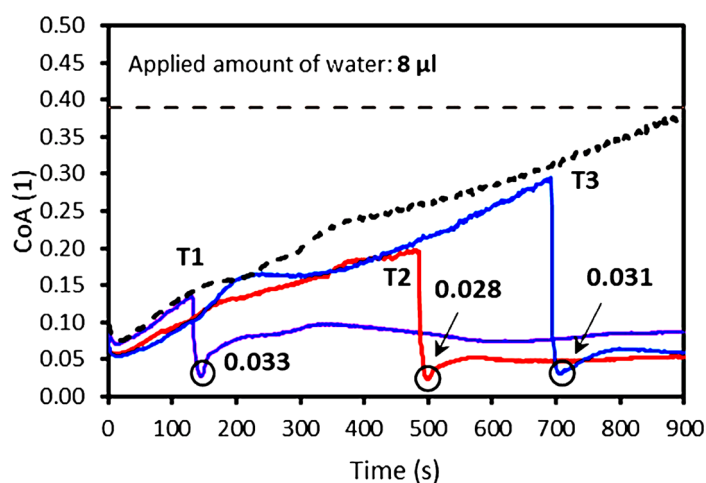


Obr. 2-12: Závislost životnosti plastického maziva ve valivém ložisku na teplotě [12]

#### Vliv vzdušné vlhkosti na retentivitu

Skurka [34] ve svém článku zkoumal vliv vody na retentivitu modifikátorů tření na olejové bázi. Zjistil, že aplikovaná voda v kontaktu způsobila nárůst retentivity (Obr. 2-13). Tento nárůst pak byl úměrný množství aplikované vody. V práci také diskutoval ovlivnění kontaktu mazaného plastickým mazivem vodou a domnívá se, že mechanismus ovlivnění retentivity je stejný jako u modifikátoru tření na olejové bázi: voda ovlivní návrat maziva do oběžné dráhy po průjezdu kontaktního tělesa a tím dojde k ovlivnění tloušťky mazacího

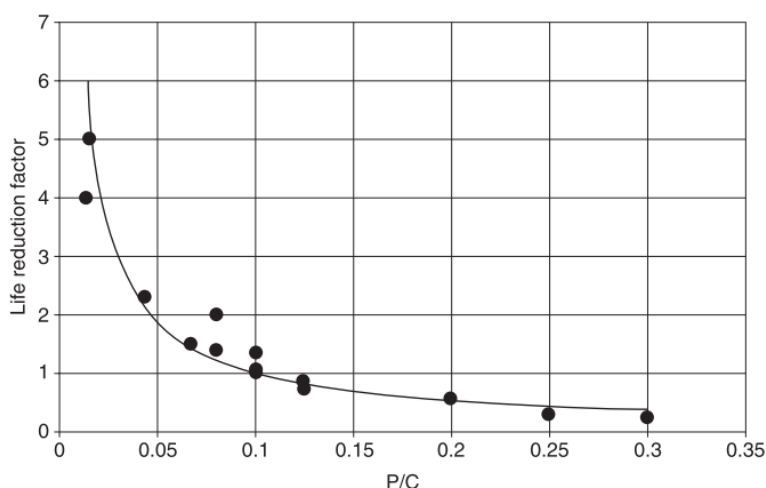
filmu. V této diskuzi se Skurka [34] odkazoval na výzkum vlivu vody na tloušťku filmu mazaného plastickým mazivem, který provedl Cyriac [33]. Cyriac ve své práci ukázal to, že některé plastická maziva s vodou vykazují nárůst tloušťky filmu, jiná zase pokles tloušťky filmu, přičemž hlavním ovlivňujícím faktorem je zpevňovadlo.



Obr. 2-13: Vliv aplikace vody (kontakt s modifikátorem tření na olejové bázi) na součinitel adheze a jeho vývoj v čase [34]

#### Vliv zatížení na retentivitu

Vliv zatížení na retentivitu plastického maziva za čistého skluzu zkoumal Hu [35]. Zjistil, že se zvyšujícím se zatížením (kontaktním tlakem) retentivita klesá. Vliv zatížení ve své práci zahrnul také Trummer [36], který pozoroval zvýšení retentivity při snížení zatížení v kontaktu s modifikátorem tření na vodní bázi. Vliv zatížení na životnost plastického maziva ve valivém ložisku je popsán v knize od Lugta [12]. Ukázal, že se zvyšujícím se zatížením bude exponenciálně klesat životnost maziva ve valivém ložisku (Obr. 2-14).



Obr. 2-14: Závislost životnosti plastického maziva ve valivém ložisku na zatížení ložiska [12]

## Vliv skluzu na retentivitu

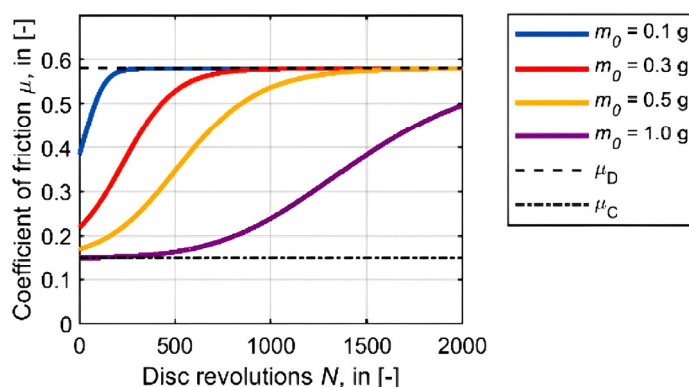
Závislost retentivity plastického maziva na skluzu zkoumal Lewis [37], který ukázal že se snižujícím se skluzem (měření při 7,5 % a 10 %) se zvyšuje retentivita. Tuto závislost potvrdil Galas [4], který pozoroval stejné snížení retentivity se zvyšujícím se skluzem (1, 3, 5 a 10 %) při měření modifikátorů tření na olejové bázi. Trummer [36] snížení retentivity (FM na bázi vody) při zvýšení skluzu (0,5 % a 1 %) pozoroval také.

## Vliv rychlosti na retentivitu

Hu [35] pozoroval vliv skluzové rychlosti na retentivitu. Zjistil, že při vyšší rychlosti má mazivo mírně vyšší retentivitu (měřeno skluzovou vzdáleností), ale má rychlejší čas rozpadu (v sekundách). Ostatní práce nezahrnuly vliv rychlosti.

## Vliv množství maziva na retentivitu

Vliv aplikovaného množství zkoumal Lewis [37] a zjistil, že při zdvojnásobení množství plastického maziva (0,05 a 0,1 g) se retentivita přibližně zdvojnásobila. S tímto výsledkem koresponduje i práce Chenové [6], která aplikovala 2,5násobné množství plastického maziva (2 a 5 ml) a zjistila, že retentivita se také zvýšila přibližně 2,5násobně. Vliv množství maziva (modifikátor tření na bázi vody) studoval také Trummer [36], který vytvořil výpočetní model, který následně verifikoval na experimentu. Na Obr. 2-15 je vidět, že retentivita se zvyšuje se zvyšujícím se množstvím maziva (zhruba lineárně). Retentivitu při čistě skluzovém kontaktu zkoumal Hu [35]. Ukázal, že se zvyšujícím se množstvím maziva se zvyšuje retentivita (odhadem lineárně).

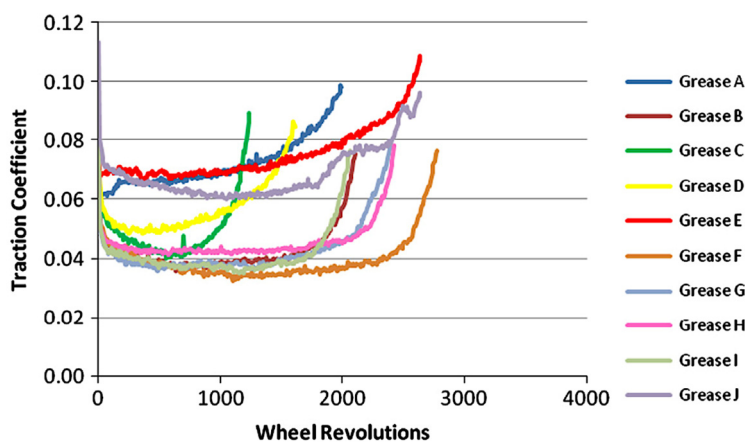


Obr. 2-15: Vliv počátečního množství maziva na vývoj součinitele adheze v čase [20]

## 2.2.5 Vliv druhu plastického maziva na retentivitu

Jeden z prvních článků zabývajících se retentivitou byl publikován Eadiem [5] a ukázal významný rozdíl mezi jednotlivými plastickými mazivy. Navíc zde bylo podotknuto, že testy z laboratoře nejsou stoprocentně přenositelné do reálných podmínek. Na jeho práci navázal Lewis [37], který potvrdil, že mezi jednotlivými plastickými mazivy jsou výrazné rozdíly

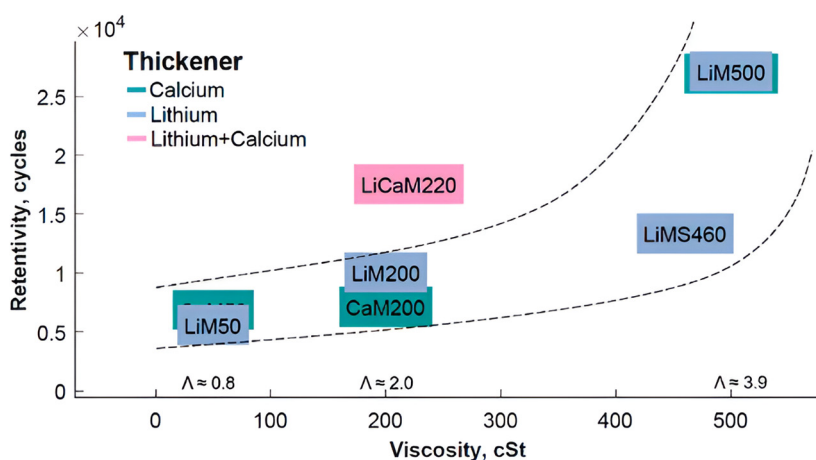
v retentivitě (Obr. 2-16). Zkoumal také vliv drsnosti povrchu, přičemž zjistil, že drsnější povrch způsobuje nižší retentivitu. Rozdíly mezi jednotlivými mazivy potvrdil také Gutsulyak [38], který studoval maziva v laboratoři i v reálném prostředí. Podotknul, že data z laboratoře a z reálného prostředí se shodovala pouze kvalitativně.



Obr. 2-16: Vývoj součinitele adheze v čase pro různá plastická maziva [37]

## 2.2.6 Vliv viskozity základového oleje na retentivitu

Retentivitu studoval také Biazon [39]. Zjistil, že plastické mazivo s vyšší viskozitou základového oleje má vyšší retentivitu (Obr. 2-17). Ukázal, že závislost retentivity na viskozitě je exponenciálně rostoucí. Domnívá se, že viskozita ovlivňuje retentivitu tak, že ovlivňuje počáteční parametr mazání  $\lambda$ . Na jeho práci navázal Ferrer [40]. Měřil součinitel adheze při plně zaplaveném kontaktu a retentivitu v závislosti na viskozitě základového oleje. Zjistil, že viskozita ovlivňuje součinitel adheze při plně zaplaveném kontaktu pouze málo, zatímco potvrdil, že retentivita je závislá na viskozitě základového oleje (retentivita se zvyšuje s viskozitou základového oleje). Z naměřených dat ale nevyplývá, o jakou závislost se jedná.

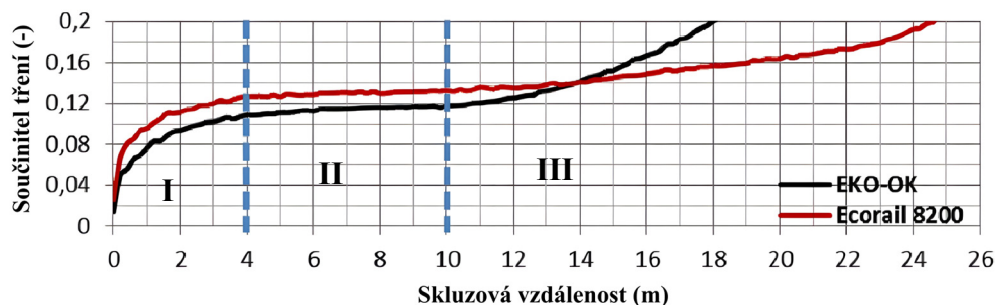


Obr. 2-17: Závislost retentivity na viskozitě základového oleje a parametru mazání [39]



## 2.2.7 Fáze časového testu retentivity

Gutsulyak [38] identifikoval ve své práci dvě fáze testu retentivity – plné oddělení kontaktu mazivem (EHD mazání – stabilní část), které přejde do smíšeného režimu mazání (prudký nárůst součinitele adheze). Podotknul také, že přechod mezi těmito dvěma fázemi je kvůli spotřebování maziva (oxidace, rozpad).



Obr. 2-18: Fáze testu retentivity [17]

Galas [4] studoval modifikátory tření na olejové bázi a také identifikoval zmíněné fáze testu, a navíc identifikoval ještě fázi prudkého nárůstu součinitele adheze na začátku testu, která pak přechází na stabilní fázi. Shodně tyto fáze testu pozoroval ve své diplomové práci i Frýza (Obr. 2-18) [17]. Trummer [36] ve své práci (práce na modifikátor tření na bázi vody) ukázal, že při nízkých aplikovaných množstvích nemusí proběhnout všechny tři fáze, ale může být pozorovatelný pouze prudký nárůst na suchou hodnotu součinitele adheze (fáze 3).

## 2.2.8 Modelování v kolejové dopravě

### Regresní modely

Regresní model slouží k popisu naměřených dat za pomoci matematických funkcí. Důležité je správně zvolit tuto matematickou funkci. Matematická funkce by měla respektovat očekávané chování a okrajové podmínky. Čím lépe je matematická funkce zvolena, tím lépe bude model popisovat data. Je vhodné využívat co nejmenší počet regresních koeficientů [41].

Naměřenými daty je prokládána zvolená funkce za pomoci metody nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců hledá koeficienty zvoleného modelu tak, aby minimalizoval součet čtverců odchylek od naměřených dat [41, 42].

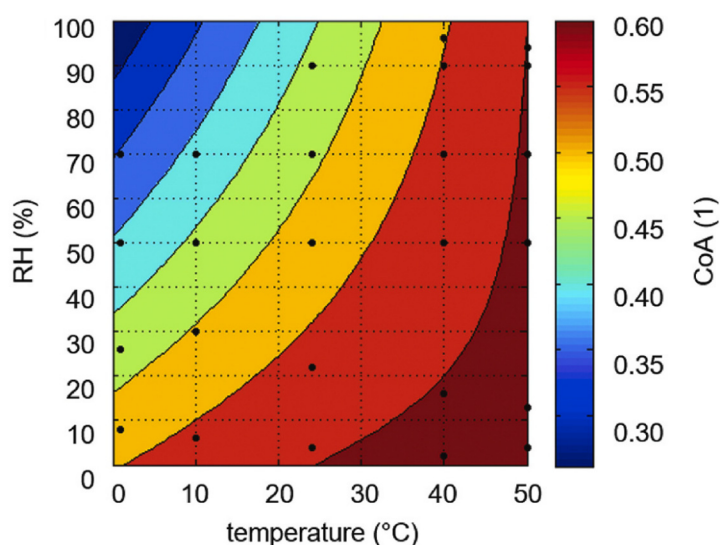
Modely mohou být lineární a nelineární. Model je nelineární, pokud jej nelze přepsat na lineární kombinaci funkcí. Příkladem lineární regrese je přímka, příkladem nelineární regrese jsou mocninné, exponenciální nebo trigonometrické funkce. Exponenciální i mocninné funkce však lze zlogaritmováním přepsat na lineární regresi [41].

Pro vyhodnocení se používá několik metrik, které ukazují na přesnost a vhodnost použitého modelu. Základní metrikou je reziduální součet čtverců (RSS). Jedná se o součet čtverců odchylek měřených hodnot od modelu. Tato metrika nám svou hodnotou však příliš neřekne o kvalitě modelu. Proto je více využívanou metrikou koeficient determinace ( $R^2$ ) [42].

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum y^2} \quad (1)$$

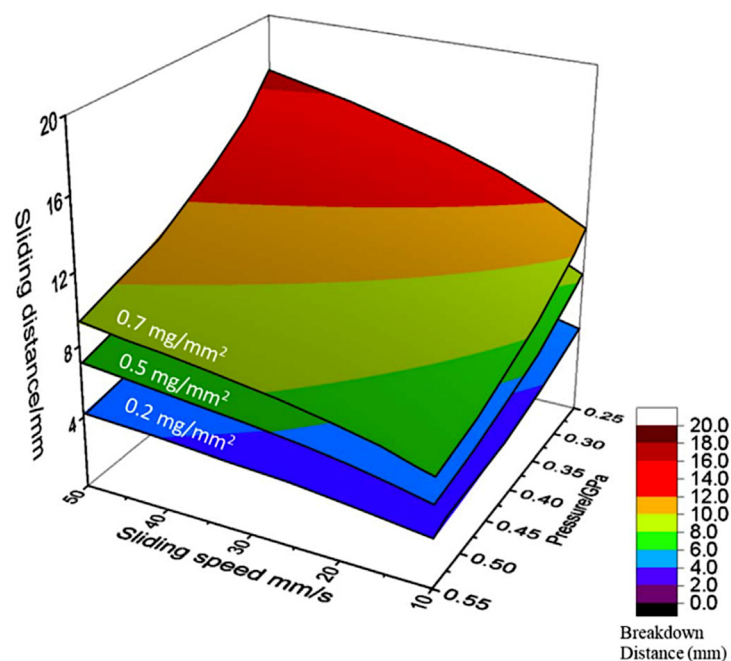
Kde TSS je celkový součet čtverců měřených hodnot. Koeficient determinace vyjadřuje v procentech, kolik variability dat je popsáno pomocí modelu. Zbývající část variability je pak většinou rozptýl hodnot [41]. Nízká hodnota koeficientu determinace může značit vysoký rozptýl měřených výsledků nebo nevhodně zvolenou matematickou funkci.

V praxi je regresní model často využíván pro predikci hodnot mimo naměřená data. Regresní model ve své práci vytvořil Galas [43] pro predikci součinitele adheze při vlivu teploty a relativní vzdušné vlhkosti (Obr. 2-19). Jeho model dosahuje koeficientu determinace  $R^2 = 0,962$  pro čistý kontakt a  $R^2 = 0,725$  pro znečištěný kontakt.



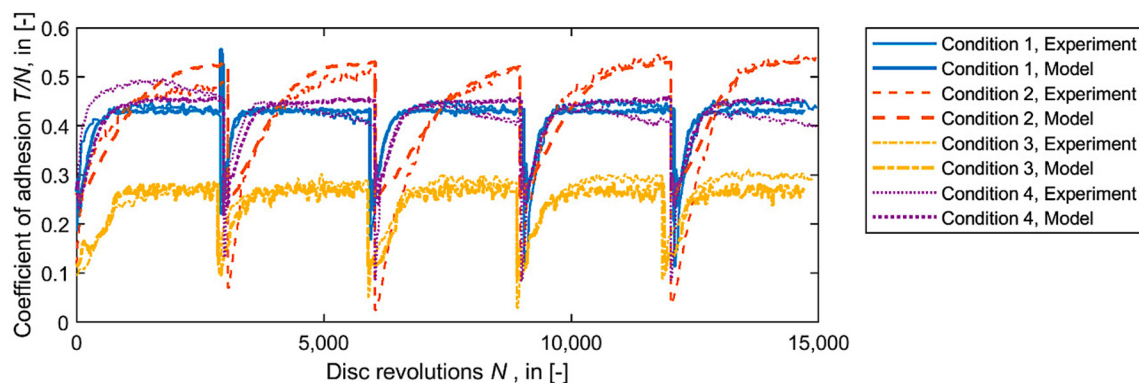
Obr. 2-19: Regresní model popisující závislost součinitele adheze na teplotě a vzdušné vlhkosti suchého kontaktu [43]

Hu ve své práci [35] vytvořil regresní model pro predikci času rozpadu plastického maziva během čistého skluzu (Obr. 2-20). Jeho predikční model je vytvořený na základě počáteční tloušťky maziva, která je postupně po délce roznesena a při kontaktu nerovností povrchu dochází k prudkému nárůstu součinitele adheze – rozpadu mazacího filmu. V článku však nezmiňuje žádné metriky pro posouzení jeho modelu.



Obr. 2-20: Regresní model popisující retentivitu plastického maziva v závislosti na rychlosti a zatížení [35]

Dále regresní model vytvořil Trummer [35] pro predikci retentivity modifikátoru tření na vodní bázi (Obr. 2-21). Do svého modelu zahrnul jak opotřebení vlivem opakovaného kontaktu (retentivita), tak i roznesení po délce kolejničky (carry-down). Ve své práci provedl také experimentální ověření na reálné trati.



Obr. 2-21: Regresní model predikující součinitel adheze modifikátoru tření na vodní bázi [36]

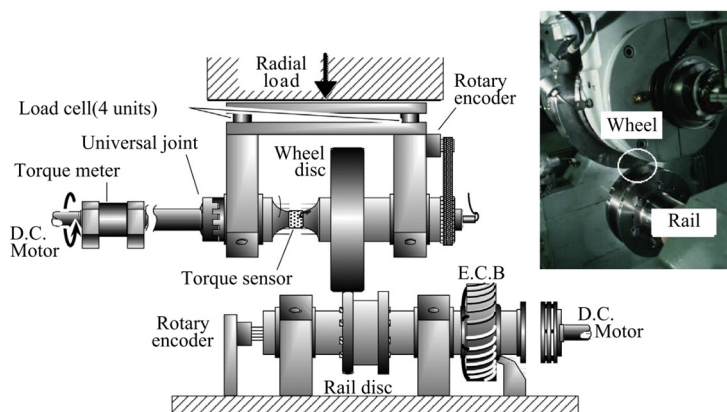
### Numerické modelování

V literatuře se často využívá také numerického modelování [44–46]. Tento přístup zahrnuje využití rovnic pro popis dějů v kontaktu (často jsou to diferenciální rovnice), k jejichž vyřešení se využívá numerických metod. Tyto modely jsou ověřeny experimenty a nezahrnují koeficienty modelu, jako v případě regresního modelování. Využíván je zejména k predikci součinitele adheze. Hlavní výhodou je, že popisuje děje uvnitř kontaktu, a proto může přispět k porozumění tomu, co se v kontaktu děje. Tohle je však také hlavní nevýhodou tohoto přístupu, protože používané rovnice jsou často komplikované.

## 2.2.9 Měření adheze v laboratorních podmínkách

### Twin-disk

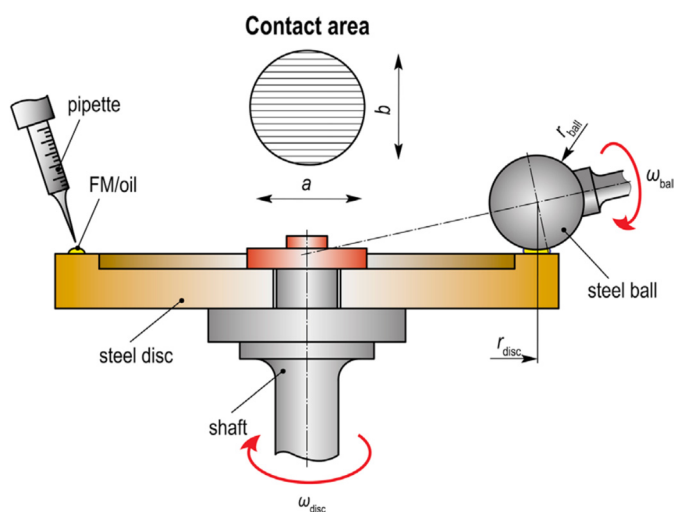
Pro měření adheze a jejího vývoje v čase se využívá několik měřicích zařízení. Nejpoužívanější je zařízení twin-disk (Obr. 2-22), které s pomocí dvou odvalujících se disků simuluje kontakt kola a kolejnice. Twin-disk byl použit v pracích [6, 17, 21, 27, 28, 36–39]. Twin-disk zařízení může být v několika měřítkách velikosti od full-scale [17], kdy je jako jeden z disků využito reálné kolo, až po malá měřítka (disky do průměru 100 mm [37]). Dosahované kontaktní tlaky jsou většinou okolo 1 GPa. Hlavní výhodou těchto zařízení je relativně velká kontaktní plocha.



Obr. 2-22: Schéma dvoudiskového měřicího zařízení [6]

### Ball-on-disk

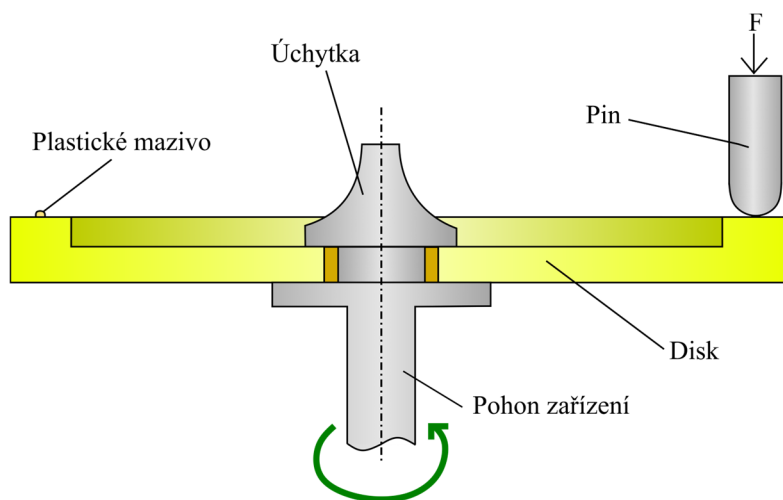
Dále se využívá zařízení v konfiguraci ball-on-disk (Obr. 2-23), jehož zástupcem je například Mini-Traction Machine od firmy PCS Instruments [4, 24, 34, 43]. Dosahované kontaktní tlaky jsou také zhruba 1 GPa, hlavní nevýhodou je však velmi malá kontaktní oblast. Hlavní výhodou je rychlost měření a univerzalita v možnostech testování.



Obr. 2-23: Schéma měřicího zařízení ball-on-disk [4]

## Pin-on-disc

Kontakt lze také testovat za čistě skluzových podmínek. K tomu se používá konfigurace pin-on-disc [22, 35, 40]. Schéma zařízení lze vidět na Obr. 2-24. V této konfiguraci lze dosahovat vysokých kontaktních tlaků, ale dochází zde k významnému opotřebení, kvůli malé kontaktní ploše. Z tohoto důvodu se tato konfigurace často používá pro studium opotřebení.

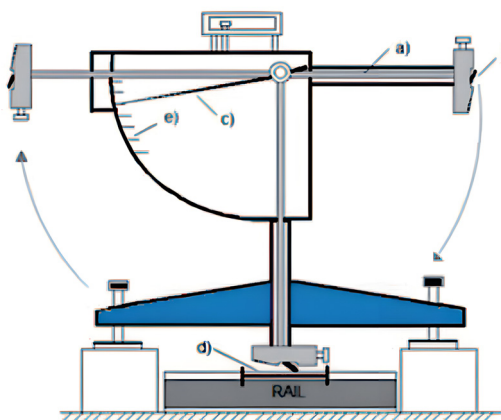


Obr. 2-24: Schéma měřícího zařízení pin-on-disc

## 2.2.10 Měření adheze na reálné trati

### Kyvadlo

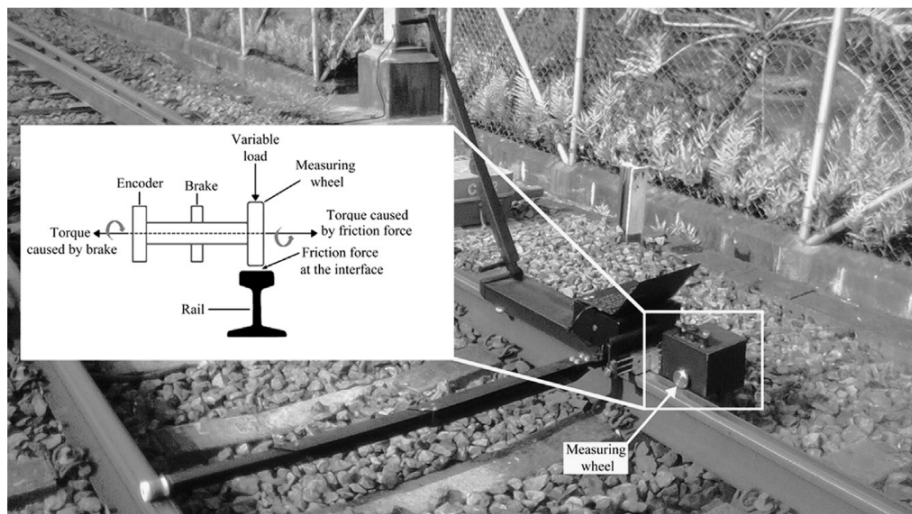
Na reálné trati lze adhezi měřit několika různými způsoby. Je možné použít kyvadlové zařízení (Obr. 2-25), které adhezi měří za pomoci úbytku amplitudy výchylky. Toto měřící zařízení použil ve své práci Moreno-Ríos [25] a Harmon [47]. Jeho hlavní výhodou je rychlé měření. Součinitel adheze je pak měřen pouze na malém úseku (cca 100 mm), měření je prováděno za čistého skluzu.



Obr. 2-25: Schéma kyvadlového měřícího zařízení [25]

## Ručně tlačný tribometr

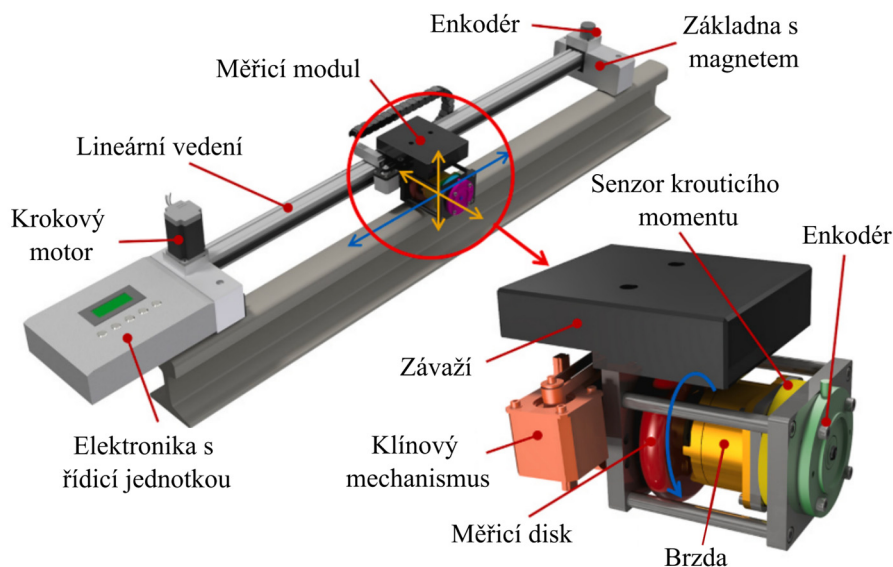
Dále je možné použít ručně tlačný tribometr (Obr. 2-26). Tohle zařízení umožňuje simulovat podmínky skluzově-valivého kontaktu, ale měření je pomalé. Skluz je vyvozován pomocí brzdy, tudíž jej není možné přesně nastavit. Byl využit v práci Areizy [29].



Obr. 2-26: Ručně tlačný tribometr [29]

## Traťový tribometr VUT

Za vylepšenou verzi ručně tlačného tribometru lze považovat traťový tribometr (Obr. 2-27) vyvinutý na Ústavu Konstruování VUT [48], který je plně motorizovaný. Měření je díky tomu rychlejší a přesnější. Na traťovém tribometru je, stejně jako u ručně tlačného tribometru, ovládání skluzu brzdícím momentem. Díky tomu lze říct, že kinematika je stejná jako na reálném kontaktu, způsobuje to však komplikace při laboratorním testování, protože nelze skluz přesně řídit (nelze nastavit požadovanou hodnotu).



Obr. 2-27: Traťový tribometr [49] – upraveno

## 2.2.11 Metodika testování

Ve své práci se Watson [44], spolu s dalšími 26 výzkumníky, snažil zhodnotit práce v oblasti tribologického výzkumu z hlediska kvality metodiky testování. Ukázal, že méně než 30 % prací dělalo 3 a více opakování experimentů za daných podmínek. Dále zjistil, že méně než 10 % prací zahrnuje ve vyhodnocování výsledků statistiku. Podotkl, že výzkumníci v oblasti tribologie berou své testy za plně deterministické a neuvažují například možné rozdíly v materiálech testovaných vzorků. Na závěr pak uvedl několik doporučení pro kvalitní vědecké práce:

- Měřit pouze to co výzkumníka zajímá.
- Ujasnit si požadovanou velikost změny sledované proměnné.
- Zredukovat počet zkoumaných proměnných, za cenu kvalitnějšího a opakovaného měření.
- Randomizace pořadí experimentů.
- Zaslepení testů (při experimentech operátor neví, jaké parametry testuje, aby nemohl podvědomě či vědomě ovlivnit výsledky).
- Analýza dat by měla být automatizovaná a pokud možno, sdílána s ostatními.
- Statistické analýzy by měly být provedeny až po kompletním provedení experimentů. Další testy by již neměly být následně prováděny.
- Je vhodné experiment zopakovat ve více měřítkách, pokud je pozorována významný efekt proměnné.

## 2.3 Shrnutí hlavních zjištění

### 2.3.1 Plastická maziva

Plastická maziva jsou komplexní směs základového oleje, zpevňovačů a aditiv, přičemž všechny tyto složky mají vliv na finální produkt [12]. Vykazují neneutonské reologické chování [12]. Důležitým parametrem je třída NLGI [12]. Typickým projevem je hladovění, které se projevuje snížením tloušťky mazacího filmu. Dochází k němu při nedostatku maziva, vysoké rychlosti nebo vysoké viskozity [14]. V kolejové dopravě je podstatným parametrem maziva retentivita, což je vzdálenost, po kterou mazivo efektivně maže [5]. Pro kolejovou dopravu je dále podstatná biologická rozložitelnost.

### 2.3.2 Adheze

Z rešerše vyplývá, že součinitel adheze je málo ovlivněn teplotou [21–25] (olej, plastické mazivo), vzdušnou vlhkostí [25, 26] (olej, plastické mazivo) a zatížením [24, 27–29] (olej,

plastické mazivo). U vlivu vlhkosti je důležitý poznatek, že při aplikaci směsi oleje a vody je vidět malý pokles součinitele adheze [17, 27, 28]. Dále vyplývá, že vliv skluzu je popsán trakční křivkou [6, 24, 28, 38], která pro olej saturuje při 1–5 % skluzu a satureovaná hodnota je v rozmezí  $\mu = 0,05–0,1$ . Vliv rychlosti je pak popsán Stribeckovou křivkou [4, 13, 24, 27], která může mít jiný průběh než pro základový olej, přičemž to záleží především na typu zpevňovačla [13]. Množství maziva pak ovlivňuje adhezi zejména mírou hladovění [17].

### 2.3.3 Retentivita

Z rešerše vyplývá, že retentivita je mnohem více ovlivněna vnějšími vlivy i provozními parametry než součinitel adheze. Ukazuje se, že retentivita je významně ovlivněna také parametry maziva [5, 37, 38], především pak viskozitou základového oleje [39, 40].

Na ovlivnění retentivity teplotou se práce neshodují. Jedna ukazuje pokles retentivity se zvyšující se teplotou (měření plastického maziva) [22], druhá ukazuje pokles retentivity se snižující se teplotou (měření oleje) [21]. Důležitý poznatek také je, že vliv teploty na životnost plastického maziva ve valivém ložisku není monotónní závislost [12], je však nutné brát v potaz, že podmínky ve valivých ložiscích neodpovídají podmínkám kontaktu kola a kolejnice, zejména co se týče doby životnosti maziva.

Vliv vzdušné vlhkosti je rozebrán v článku [34], kde se ukazuje, že vlhkost má vliv pouze, pokud kondenzuje (měřeno na modifikátoru tření na olejové bázi). V práci je diskutován také mechanismus ovlivnění pro plastická maziva, přičemž je čerpáno z literatury zaměřené na ovlivnění tloušťky mazacího filmu plastického maziva vodou [33].

Vliv zatížení na retentivitu byl zkoumán na plastickém mazivu za čistého skluzu [35] nebo na modifikátoru tření na vodní bázi [36] ve skluzově-valivém kontaktu. Obě práce ukázaly pokles retentivity se zvyšujícím se zatížením. S tím navíc souhlasí také výsledky ze životnosti plastického maziva ve valivém ložisku [12].

Vliv skluzu na retentivitu byl zkoumán na plastickém mazivu [37], na modifikátoru tření na olejové bázi [4] a modifikátoru tření na vodní bázi [36]. Všechny práce ukázaly, že se zvyšujícím se skluzem se snižuje retentivita.

Vliv rychlosti na retentivitu byl zkoumán pouze na plastickém mazivu v čistě skluzových podmínkách [35]. Ukázalo se, že retentivita vyjádřená v čase se zvyšující rychlostí klesne, retentivita vyjádřená ve skluzové vzdálenosti však vzroste.

Vliv množství maziva na retentivitu byl zkoumán pro plastické mazivo ve skluzově valivém kontaktu [6, 37] a také v čistě skluzovém kontaktu [35]. Dále byl zkoumán modifikátor tření na vodní bázi [36]. Všechny práce ukázaly, že při zvětšení množství aplikovaného maziva se zvýší retentivita, přičemž odhadem z dat by se mohlo jednat o lineární závislost.

Časový průběh testu retentivity má pak několik fází. Některé práce identifikovaly dvě fáze [36, 38], jiné identifikovaly tři fáze [4, 17]. První fází je prudký nárůst na stabilní hodnotu



součinitele adheze. V pracích, které identifikovala pouze dvě fáze pak chyběla tato první fáze. Následuje fáze stabilního součinitele adheze a poté nastává prudký nárůst součinitele adheze až na suché hodnoty. Jedna z prací [38] porovnávala tyto fáze testu se Stribeckovou křivkou a domnívá se, že stabilní součinitel adheze nastává, pokud je v kontaktu elastohydrodynamické mazání, prudký nárůst pak nastává při smíšeném mazání.

### 2.3.4 Modelování v kolejové dopravě

V rámci rešerše byly nalezeny dva možné přístupy – numerické a regresní modelování. Pro numerický přístup je však potřeba znát rovnice popisující děje v kontaktu. V rámci rešerše však nebyl nalezen žádný matematický popis dějů v kontaktu popisující retentivitu, případně vývoj součinitele adheze v čase. Proto bylo rozhodnuto, že bude využit přístup regresního modelování.

V rámci regresního modelování je důležité správně zvolit matematickou funkci pro popis dat [41]. Základní metrikou pro vyhodnocování kvality modelu je koeficient determinace  $R^2$  [42]. Regresní modely byly v literatuře vytvořeny jak pro predikci součinitele adheze [43], tak pro predikci retentivity [35, 36]. Jeden z těchto modelů byl dokonce ověřen na reálné trati [36]. Z toho tedy vyplývá, že regresní modelování je přenositelné do reálných podmínek. Přenositelnost do reálných podmínek ukazují i práce, ve kterých nebylo prováděno modelování [38]. V jedné práci bylo prováděno normování (podělení skutečné hodnoty konstantou o stejné jednotce) [36], v další [35] byly využity bezrozměrné parametry. Využití bezrozměrných parametrů by mělo zajistit lepší přenositelnost do reálných podmínek.

### 2.3.5 Měření

Z rešerše plyne, že pro testování v laboratorních i reálných podmínkách se používá široké spektrum měřicích zařízení. Bylo také ukázáno, že relevantních výsledků se dá dosáhnout na všech zmíněných [29]. Pro dosažení kvalitní práce by mělo být dodrženo několik zásad [50]. V této práci byla snaha tyto zásady dodržovat a v závěru práce je vyhodnoceno, zda se tyto zásady podařilo dodržet.

## 2.4 Mezera v poznání

Z rešerše vyplývá, že součinitel adheze je dobře prozkoumaná veličina, na kterou většina z parametrů nemá významný vliv. To však neplatí u retentivity. Retentivita plastického maziva je studována pouze v několika pracích [5, 6, 22, 35, 37–40]. Tyto práce vždy nesplňují jednu z následujících podmínek:

- skluzově valivý kontakt
- více než 2 hodnoty měření vlivu

Z toho vyplývá, že mazivo bylo studováno buď v neadekvátních podmínkách, nebo nebyla problematika studována dostatečně, aby bylo možné retentivitu maziva popsat. Zároveň nebyly v žádné práci studovány všechny zmíněné vlivy zároveň. Pro komplexní pohled je potřeba sloučit závěry z více prací, které často používají různá měřicí zařízení, jiná maziva a jiné podmínky, a tudíž je sloučení těchto poznatků v současné době velice obtížné. Tato práce by měla vyplnit mezeru v poznání komplexním popisem vlivu klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu plastického maziva a navrhnout modelový přístup k predikci retentivity plastického maziva za různých klimatických podmínek a provozních parametrů.

## 3 CÍLE PRÁCE

### 3.1 Výzkumné otázky

**O1:** Jaký bude vliv klimatických podmínek a provozních parametrů na retentivitu plastického maziva?

Klimatické podmínky a provozní parametry jsou:

- a) teplota,
- b) vlhkost,
- c) zatížení,
- d) skluz,
- e) rychlost,
- f) množství aplikovaného maziva.

### 3.2 Cíle výzkumu

#### 3.2.1 Hlavní cíl

Hlavním cílem diplomové práce je vytvořit regresní model, který popisuje vliv vlhkosti, teploty, zatížení, skluzu, rychlosti a množství maziva na retentivitu plastického maziva v kontaktu okolku a kolejnice.

#### 3.2.2 Dílčí cíle

- Návrh metodiky experimentů a metodiky zpracování dat
- Provedení experimentů pro získání dat pro regresní model
- Analýza výsledků měření a vytvoření regresního modelu
- Ověření modelu na geometrii bližší reálnému kontaktu kola a kolejnice
- Vypracování textu diplomové práce
- Příprava odborné publikace

### 3.3 Hypotézy

**H1:** Se zvyšující se teplotou se bude snižovat retentivita.

Vlivem teploty na retentivitu se zabývaly dvě práce. První [21] ukázala, že při zvýšení teploty se retentivita zvýší, zatímco druhá [22] ukázala, že při zvýšení teploty dojde k poklesu retentivity. Důležité jsou však také práce zabývající se vlivem viskozity na retentivitu, protože maziva na bázi oleje vykazují exponenciální změnu viskozity při změně teploty. Tyto práce [39, 40] ukázaly, že při zvýšení viskozity základového oleje dojde k nárůstu retentivity.

**H2:** Zvyšující se vlhkost nebude mít vliv na retentivitu až do momentu, kdy bude nastávat kondenzace vlhkosti na kontaktních tělesech. Při kondenzaci nastane nárůst retentivity.

Tato hypotéza je vystavěna na zjištění z práce p. Skurky [34], který toto chování pozoroval pro modifikátory tření na olejové bázi a predikoval to i pro plastické mazivo na základě práce Cyriaca [33]. Cyriac však ve své práci ukázal, že to platí pouze pro některé typy plastických maziv, a že to závisí zejména na zpevňovadle. Zpevňovadlo (bentonit) využitě v plastickém mazivu použitém v této práci nestudoval.

**H3:** Se zvyšující se vykonanou prací třecích sil se bude úměrně snižovat retentivita.

Tato hypotéza slučuje vliv zatížení a skluzu. Vlivem zatížení na retentivitu plastického maziva se zabývala práce [35], která ukázala pokles retentivity při zvýšení zatížení. Vlivem skluzu na retentivitu plastického maziva se zabývala práce [37]. Stejně výsledky však byly ukázány také pro modifikátor tření na olejové i vodní bázi [4, 36]. Předpokladem je využití parametru  $T\gamma$ , který se v kolejové dopravě využívá pro hodnocení míry opotřebení [1, 7–10], společně s absorbovanou energií.

**H4:** Se zvyšující se rychlostí se bude úměrně zvyšovat retentivita vyjádřená ve skluzové vzdálenosti.

Vlivem rychlosti na retentivitu plastického maziva se zabývala pouze jedna práce [35], která ukázala mírně vyšší retentivitu vyjádřenou v ujeté vzdálenosti při čistě skluzovém kontaktu. Důležitý je však také dílčí poznatek z práce [39], kdy u měření byl počítán i parametr mazání. Rychlost má významný vliv na parametr mazání, a proto je tento poznatek také důležitý pro tuto hypotézu.

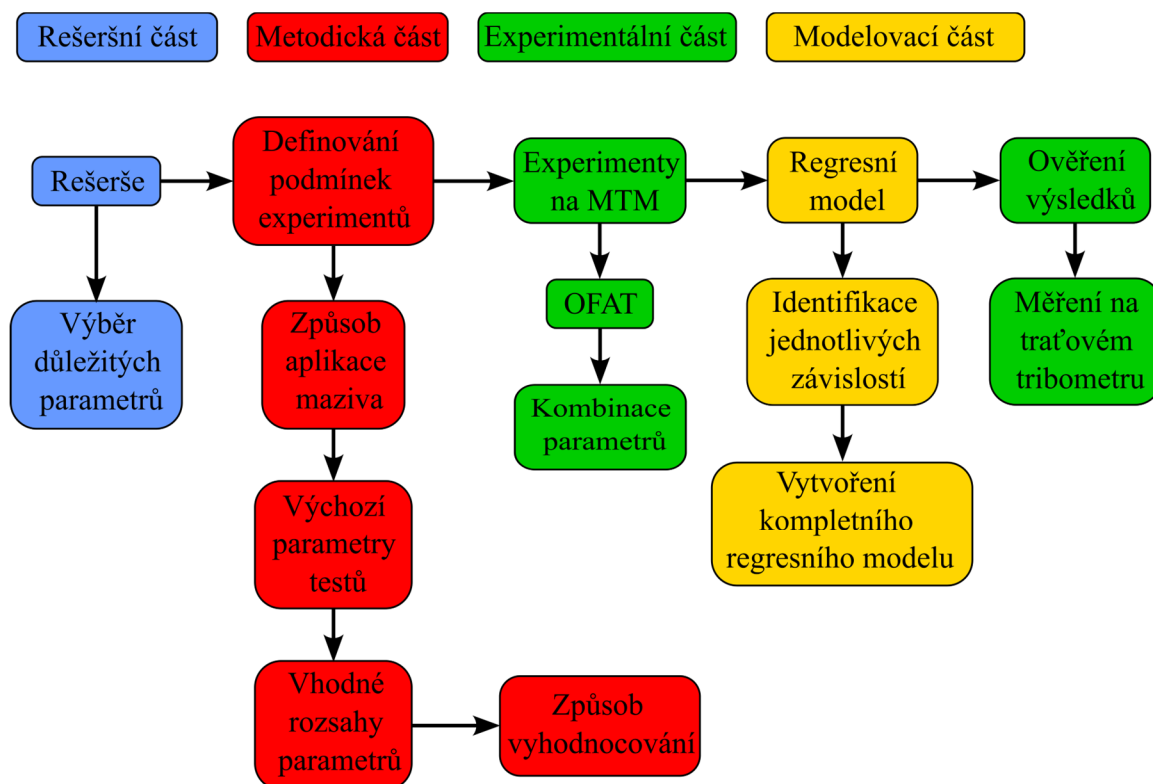
**H5:** Retentivita se bude lineárně zvyšovat se zvyšujícím se množstvím maziva.

Vlivem množství maziva se zabývalo několik prací [6, 35–37] a všechny potvrdily zvyšování retentivity se zvyšujícím se množstvím maziva pro plastické mazivo nebo modifikátor tření na vodní bázi v čistě skluzovém nebo skluzově-valivém kontaktu. Žádná práce však tuto závislost nepopsala. Odhadem z dostupných dat by zde měla být lineární závislost.

## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Metodika

Cílem výzkumu je vytvoření regresního modelu. Pro vytvoření modelu bylo potřeba provést sadu experimentů, na základě kterých, byl tento model následně vytvořen. Účelem měření bylo zjistit vliv zatížení, skluzu, množství maziva, rychlosti, vzdušné vlhkosti a teploty na retentivitu plastického maziva. Retentivita byla vyhodnocována jako čas, případně skluzová vzdálenost, při kterém došlo k překročení určité hodnoty součinitele adheze. Jednalo se o relační výzkumný problém, pro jehož řešení bylo využito empirických vědeckých metod. Nejdříve byly provedeny testy pro stanovení optimální metody aplikace maziva. Na základě těchto testů pak byly definovány vhodné výchozí parametry pro testy. Následovalo měření, kdy z výchozích parametrů byl vždy měněn jeden z parametrů v určitém rozsahu (metodika testování OFAT). Experimenty byly opakovány nejméně třikrát a jejich výsledky byly následně statisticky vyhodnoceny (průměr a směrodatná odchylka). Ze statisticky zpracovaných dat byly vyhodnoceny závislosti na jednotlivých parametrech a byl vytvořen regresní model. Regresní model byl pak doplněn o testy se změnou více než jednoho parametru pro zachycení vzájemných vlivů parametrů. Regresní model byl následně ověřen na geometrii bližší reálnému kontaktu pomocí testů na traťovém tribometru. Schéma postupu zpracování diplomové práce je znázorněno na Obr. 4-1.



Obr. 4-1: Schéma postupu zpracování diplomové práce

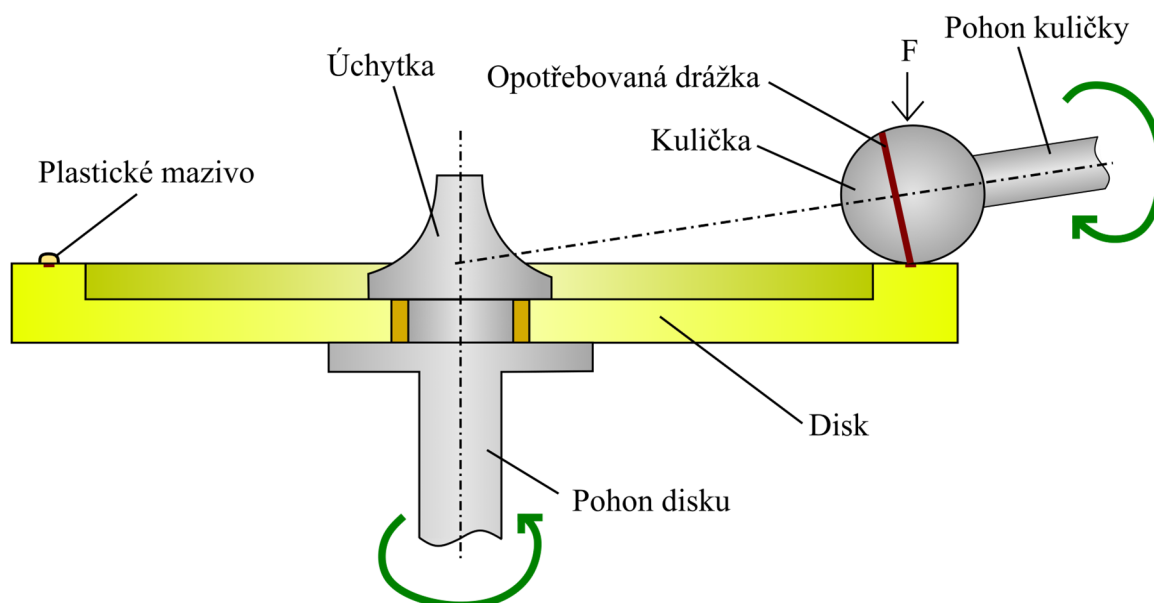
## 4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

### 4.2.1 Mini-Traction Machine (MTM)

MTM je zařízení od firmy PCS Instruments umožňující studovat součinitel adheze v konfiguraci ball-on-disk (Obr. 4-2). Kulička má průměr 19,05 mm, disk má průměr 46 mm. Disk i kulička jsou vyrobené z oceli AISI 52100. Zařízení může dosáhnout kontaktního tlaku až 1,25 GPa a rychlosti až 4 m/s. Kontaktní tlak je vyvozen pomocí páky uvnitř zařízení. Zařízení měří zátěžnou sílu (přesnost  $\pm 0,3 \text{ N}$ ) a dokáže ji v čase korigovat. Disponuje dále senzorem třecí síly, dvěma senzory teploty a senzorem opotřebení. Zařízení má poháněný disk i kuličku a je proto možné přesně řídit skluz. Umožňuje testy při skluzově-valivém kontaktu, čistě skluzovém kontaktu a také reciproční pohyb. Veškeré parametry jsou shrnuty v Tab. 4-1. Data o součiniteli adheze jsou získávána s frekvencí 1 Hz.

Tab. 4-1: Parametry laboratorního zařízení MTM

Parametr	Hodnota
Průměr kuličky	19,05 mm
Průměr disku	46 mm
Materiál	AISI 52100
Rychlost	0–4 m/s
Kontaktní tlak	0,8–1,25 GPa
Skluz (SRR)	0–10 000 %
Teplota	Okolní–150 °C



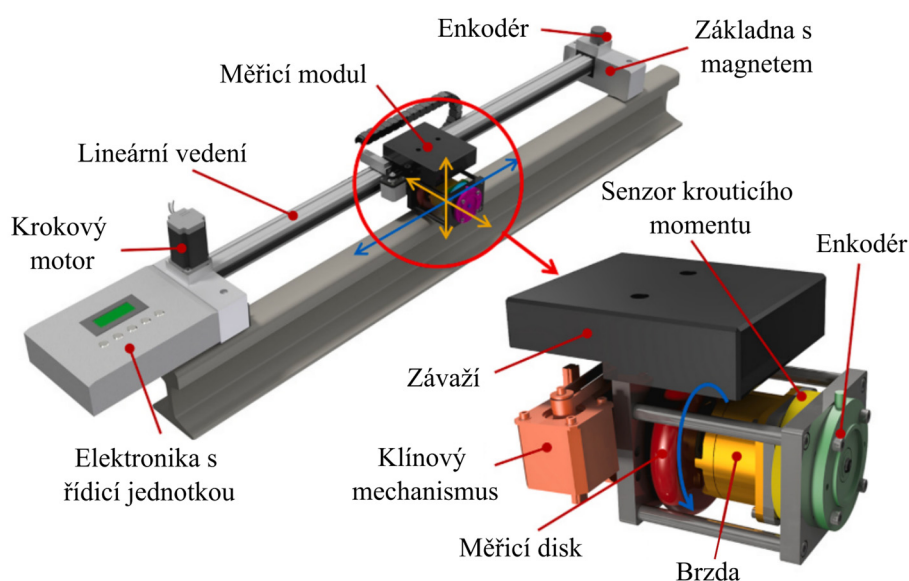
Obr. 4-2: Schéma zařízení MTM

## 4.2.2 Traťový tribometr

Traťový tribometr je zařízení umožňující testování součinitele adheze na reálné kolejnici (Obr. 4-3). Kontaktní pár je reálná kolejnice a disk z ložiskové oceli AISI 52100. Průměr disku je 100 mm, rádius zaoblení disku je 10 mm. Měřítka kontaktu vzhledem k reálnému kontaktu je 1:10. Lze dosáhnout kontaktního tlaku až 1 GPa. Kontaktní tlak je vyvozován pomocí závaží, 1 GPa odpovídá hmotnosti závaží 15,5 kg. Zařízení pracuje při rychlosti 0,26 m/s. Zařízení umožňuje nastavit pouze brzdný moment a skluz je pak důsledkem brzdění disku, tudíž jej není možné řídit [48, 49]. Řídicí jednotka extrahuje data o poloze, skluzu, brzděném momentu a krouticím momentu vyvozeného třecí silou. Součástí zařízení je také klínový mechanismus, který umožňuje posun disku v příčném směru až o 8 mm. Hlavní parametry zařízení jsou v Tab. 4-2. Kompletní informace o zařízení jsou k dispozici v [49].

Tab. 4-2: Souhrn parametrů traťového tribometru

Parametr	Hodnota
Průměr disku	100 mm
Rádius zaoblení disku	10 mm
Délka chodu	200–800 mm
Materiál	AISI 52100, reálná kolejnice
Rychlost	0,26 m/s
Kontaktní tlak	0,8–1 GPa
Skluz (SRR)	0–100 %
Teplota	Okolní



Obr. 4-3: Traťový tribometr [49] – upraveno

### 4.2.3 Jednotka pro úpravu vlhkosti vzduchu

Jednotka pro úpravu vlhkosti vzduchu od firmy Rtec Instruments (Obr. 4-4), která byla součástí tribometru Rtec Instruments MFT-500, umožňuje regulovat relativní vzdušnou vlhkost v rozsahu od 0 do 100 %. Jako médium pro vytvoření požadované vlhkosti je použita destilovaná voda. Regulace je řízená pomocí PID regulátoru, který zajišťuje rychlý přechod na novou hodnotu a stabilizaci hodnoty relativní vzdušné vlhkosti. PID regulátor bylo nutné před měřením kalibrovat, aby správně reguloval v malé komoře MTM.



Obr. 4-4: Jednotka pro úpravu vlhkosti vzduchu

### 4.2.4 Další laboratorní zařízení

K aplikaci maziva byla použita pipeta (Eppendorf Multipette Xstream – přesnost aplikace  $\pm 0,04 \mu\text{l}$ ) s nástavcem pro aplikaci  $1 \mu\text{l}$  maziva. Pro kontrolu reálně aplikovaného množství byla použita laboratorní váha (KERN ABJ 320 - 4NM s rozsahem od 10 mg do 320 gramů a opakovatelností 0,1 mg). K měření teploty byl použit dotykový teploměr (Tenma 72-7715 s termočlánkem typu K). Pro zvýšení teploty kontaktních těles byla použita horkovzdušná pistole (Bosch, rozsah teplot 50-600 °C). Pro kontrolu šířky drážky byl používán optický profilometr (Bruker Contour GT-X) s objektivem o zvětšení 5 $\times$ , bez předsádky. Profilometr byl také využit pro stanovení drsnosti povrchu oběžné drážky disku a kuličky pro zjištění režimu mazání při testech.



### 4.3 Materiál a testovací podmínky

Testované plastické mazivo bylo Bechem Ecorail 2009. Základový olej tohoto maziva je syntetický ester, zpevňovač je bentonit. Toto mazivo vykazuje dobrou environmentální kompatibilitu, je odolné UV záření, dobrou odolnost vůči vodě a korozní ochranu. Mazivo také obsahuje pevné mazací částice [51]. Přehled parametrů maziva je v tabulce Tab. 4-3.

Tab. 4-3: Parametry měřeného plastického maziva

Parametr	Hodnota
Kinematická viskozita základového oleje při 40 °C	46 mm <sup>2</sup> /s
Kinematická viskozita základového oleje při 100 °C	9 mm <sup>2</sup> /s
Rozsah pracovních teplot	-30–80 °C
Tlakově-viskozitní koeficient	19,5 GPa

Pro testy na zařízení MTM byly využity vzorky dodávané společností PCS Instruments. Jednalo se o kuličku o průměru 19,05 mm a disk o průměru 46 mm. Tyto vzorky byly vyrobeny z ložiskové oceli AISI 52100. Pro testování s využitím traťového tribometru byl využit vzorek kolejnice R65 o délce 1500 mm, disk na tomto zařízení je z ložiskové oceli AISI 52100.

Všechny experimenty byly prováděny v laboratoři kvůli kontrolovatelnosti zejména klimatických podmínek. Experimenty pro stanovení vlivu provozních parametrů (zatížení, skluz, množství maziva, rychlost) byly prováděny při pokojové teplotě 22–23 °C a relativní vzdušné vlhkosti 30–35 %. Během měření byla průběžně měřena teplota kuličky i disku a bylo zjištěno, že teplota po ukončení testu byla zhruba 40 °C (záleželo na konkrétních podmínkách testu). Proto je jako referenční teplota zvoleno právě 40 °C. Experimenty pro stanovení vlivu klimatických podmínek byly prováděny s teplotou v rozsahu 40–70 °C (aby nedošlo k překročení rozsahu teplot povolených výrobcem maziva) a relativní vzdušnou vlhkostí 25–100 %.

### 4.4 Metody

Pro výzkum vlivu reálných provozních podmínek na retentivitu maziv bylo provedeno několik experimentů za různých podmínek. Kvůli větší nejistotě měřených výsledků byly měření za stejných podmínek prováděny vícekrát (minimálně 3 opakování). Testy za stejných podmínek nebyly prováděny ihned po sobě, ale byly mezi nimi prováděny testy za jiných podmínek. Tím docházelo k minimalizaci možné systematické chyby. Vyhodnocovanými parametry retentivity byly čas překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$

a součinitele adheze  $\mu = 0,25$ . Tyto hodnoty byly vybrány proto, že hodnota součinitele adheze  $\mu = 0,15$  je považována za přechodovou hranici mezi nízkým (požadováno v kontaktní oblasti okolku) a středně vysokým součinitelem adheze (požadováno mezi temenem kolejnice a kolem). Hodnota překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  byla vybrána jako kontrolní, protože výsledky pro překročení součinitele  $\mu = 0,15$  vykazovaly vyšší rozptyl, zejména kvůli různé hodnotě počátečního součinitele adheze. Vyhodnocované parametry byly následně statisticky zpracovány. Z parametrů byl vyhodnocován průměr času překročení dané hodnoty součinitele adheze (dále pouze retentivita) a směrodatná odchylka.

#### 4.4.1 Měření retentivity na MTM

Postup testu na zařízení MTM:

1. Záběh nových těles
2. Očištění vzorků acetonem
3. Záběh 5 minut pro odstranění reziduí po čištění
4. Aplikace požadovaného množství maziva
5. Rozmáčknutí maziva
6. Instalace klimatické komory
7. Ohřev
8. Nastavení relativní vzdušné vlhkosti
9. Provedení experimentu
10. Vyhodnocení
11. Opakování bodů 2–7 dokud vzorky nepřekročí limit opotřebení

Body 6-8 byly zahrnuty pouze v případě, že testy zahrnovaly vliv teploty nebo vliv relativní vzdušné vlhkosti. Důležité bylo také kontrolovat opotřebení vzorků. Při testech vznikala na disku i na kuličce drážka, která ovlivňovala reálně aplikované množství maziva a reálný kontaktní tlak. Pro omezení rychlého rozvoje opotřebení bylo nutné při použití nových vzorků udělat počáteční záběh o délce 60 minut. Délka záběhu byla stanovena dle metodiky od Galase [52]. Počátečním záběhem došlo k vytvoření drážky, která se rozšiřovala rovnoměrně a pomalu. Optimální šířka drážky byla 0,65–0,85 mm. Pokud došlo k překročení šířky drážky 0,85 mm, bylo nezbytné vzorky vyměnit. Měření drážky bylo prováděno průběžně na optickém profilometru s využitím objektivu o zvětšení 5x, bez využití předsádky.

#### 4.4.2 Aplikace maziva na MTM

Vzhledem k tomu, že kontaktní oblast na zařízení MTM byla velice malá, měl na výsledky velký vliv způsob aplikace maziva. Pro reprezentativnost výsledků bylo potřeba zajistit

především opakovatelnost aplikace maziva. Z toho důvodu byly provedeny prvotní testy, kdy byly vyhodnocovány tyto parametry u několika způsobů aplikace maziva:

- opakovatelnost
- minimálně 3 úrovně dávky
- možnost stanovení reálně aplikovaného množství (kvantifikovatelnost)

Opakovatelnost byla vyhodnocována tak, že dva provedené testy musely mít podobný průběh. Tři dávky byly vyhodnocovány tak, že u všech třech musí dojít k nárůstu na suchou hodnotu součinitele adheze do 15 minut. To bylo z toho důvodu, že počet experimentů byl vysoký, a proto nebylo možné provádět dlouhé testy. Možnost vyhodnocení reálně stanoveného množství byla zkoumána posledně, a spočívala ve vytvoření predikce aplikovaného množství a následného ověření. Vyhodnocované způsoby aplikace byly:

- aplikace maziva přímo do oběžné dráhy (klasická aplikace)
- aplikace maziva do drážky za běhu zařízení
- aplikace roztáhnutím maziva po určité délce
- aplikace maziva přes přípravek
- klasická aplikace maziva, roznesení (30 sekund běhu zařízení) a očištění disku
- klasická aplikace maziva, roznesení (30 sekund běhu zařízení) a očištění kuličky
- aplikace rozmáčknutím maziva

Hodnocení jednotlivých aplikací bylo pomocí třech hodnot: splňuje dobře (✓), splňuje dostatečně (✓) a nesplňuje (✗). Vyhodnocení je zobrazeno v tabulce (Tab. 4-4). V této kapitole je uveden popis a důvody vyřazení. Klasická aplikace byla vyřazena z důvodu nemožnosti alespoň třech úrovní dávky. Aplikace za běhu dopadla obdobně jako klasická aplikace.

Aplikace roztáhnutím po délce spočívala v tom, že do oběžné dráhy byl aplikován 1  $\mu$ l maziva, který byl následně rozmáčknut a roztáhnut pohybem o délce cca 10 mm. Více úrovní dávky bylo dosaženo opakováním tohoto postupu na více místech na disku. Aplikace roztáhnutím po délce dopadla dobře z hlediska počtu úrovní dávky, dobře dopadla i opakovatelnost pro 1, 3 a 4  $\mu$ l. Špatně však dopadla opakovatelnost pro 2  $\mu$ l. Tato aplikace byla považována za dobrou, a i když opakovatelnost nedopadla dobře u všech dávek, tak zde byla možnost, že bude vybrána jako finální.

Aplikace maziva přes přípravek spočívala v tom, že mazivo není aplikováno přímo do oběžné dráhy, ale do přípravku, který umožní dostat se na disk pouze určitému množství maziva. U této aplikace nebylo možné provést více jak dvě úrovně dávky maziva. Opakovatelnost také nebyla příliš dobrá.

Aplikace s očištěním spočívala v tom, že na disk bylo nanесeno požadované množství maziva klasickým způsobem, následně byl spuštěn cyklus roznesení, kdy se po dobu 30 sekund mazivo roznášelo po oběžné dráze (bez skluzu, nízkou rychlostí) a následně byl očištěn buď disk nebo kulička. Očištění bylo prováděno s acetonem i bez něj, výsledky byly

obdobné. U aplikace maziva s očištěním disku se ukázalo, že všechny testy začínají na příliš vysoké hodnotě součiniteli adheze, a proto není možné je v dalších fázích testu rozumně vyhodnocovat. U aplikace maziva s očištěním kuličky se ukázalo, že není možné mít alespoň tři úrovně dávky.

Poslední aplikací je rozmáčknutí. Tento způsob aplikace spočíval v přimáčknutí elementu na aplikované mazivo a následně jej bez pohybu směrem do boku odejmout. Tato aplikace je velmi podobná aplikaci roztáhnutím, která byla relativně úspěšná. Ukázalo se, že tato metoda má lepší opakovatelnost a zachovává možnosti úrovní dávky.

Tab. 4-4: Hodnocení metod aplikace maziva

Způsob aplikace	Opakovatelnost	Několik úrovní dávky	Kvantifikovatelnost
Klasická aplikace	✓	✗	✓
Aplikace za běhu	✓	✗	✓
Roztáhnutí	✗	✓	✓
Přes přípravek	✗	✗	✓
Očištění disku	✓	✓	✗
Očištění kuličky	✓	✗	✓
Rozmáčknutí	✓	✓	✓

Vyplývá tedy, že vybraná metoda aplikace je rozmáčknutí. Dále bylo nutné stanovit přesné aplikované množství. To bylo analyticky stanoveno z poměru šířky drážky ku celkové šířce disku s tím, že na disku zůstává 50 % aplikovaného maziva a 50 % ulpí na rozmáčkávacím elementu (bylo změřeno pomocí analytické váhy). Množství maziva bylo následně ověřeno s pomocí optického profilometru, kdy na základě rozdílu výšky interference maziva a výšky interference povrchu byla zjištěna tloušťka aplikovaného filmu (výška maziva byla zjišťována v 10 místech, následně byl vyhodnocen průměr). S pomocí tloušťky filmu, šířky drážky a délky aplikace pak bylo spočítáno aplikované množství.

#### 4.4.3 OFAT testování na MTM

Výchozí zatížení bylo nastaveno v polovině rozsahu měřicího zařízení (Tab. 4-5). Výchozí rychlost byla zvolena tak, aby na zařízení nastával stejný režim mazání, jako na reálném vlaku v kontaktu okolku při rychlosti 60 km/h. Výchozí skluz byl zvolen dle literatury [37]. Výchozí množství maziva bylo zvoleno tak, aby testy měly optimální časový průběh a začínaly na vhodné hodnotě součinitele adheze ( $\mu \approx 0,1$ ). Výchozí teplota byla zvolena měřením teploty kontaktních těles po experimentech bez vlivu teploty. Výchozí relativní

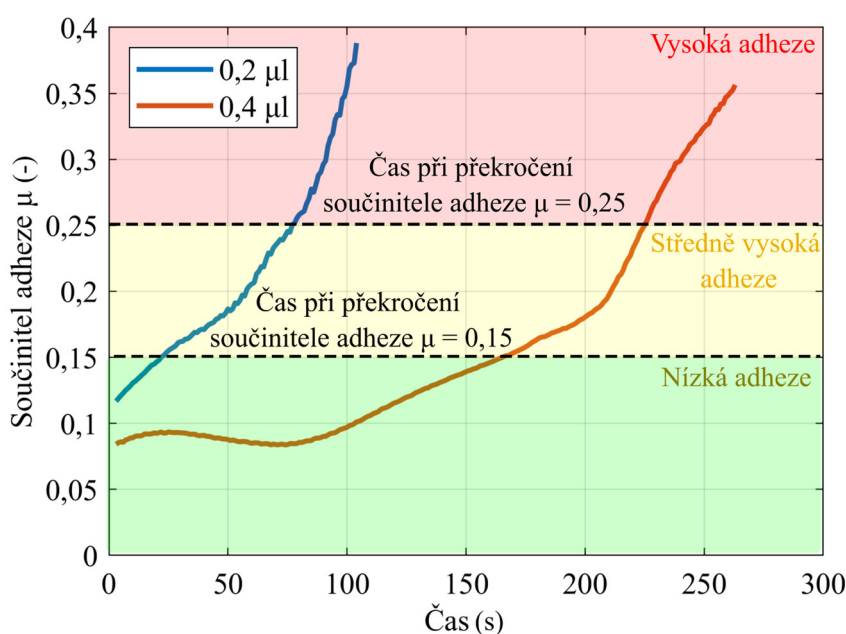
vlhkost byla stanovena měřením podmínek v laboratoři, aby při testech bez vlivu vlhkosti nemuselo být používáno přídavné zařízení kontrolující relativní vlhkost vzduchu.

Tab. 4-5: Výchozí hodnoty pro OFAT testování a hodnoty při změnách parametru

Parametr	Výchozí hodnota	Hodnoty pro OFAT testy
Zatížení	37 N	19 N, 37 N, 65 N
Skluž	10 %	5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 50 %
Množství maziva	0,2 $\mu$ l	0,1 $\mu$ l, 0,2 $\mu$ l, 0,3 $\mu$ l, 0,4 $\mu$ l, 0,5 $\mu$ l
Rychlost	1 m/s	0,5 m/s, 1 m/s, 2 m/s
Relativní vzdušná vlhkost	35 %	25 %, 35 %, 75 %, 100 %
Teplota	40 °C	40 °C, 55 °C, 70 °C

#### 4.4.4 Vyhodnocování dat na MTM

Při experimentech na MTM byl zaznamenáván průběh součinitele adheze v čase (Obr. 4-5). Z tohoto zaznamenaného průběhu byly zjišťovány dva parametry: překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  a  $\mu = 0,25$ . Hodnota součinitele adheze  $\mu = 0,15$  byla vybrána proto, že tato hodnota se považuje za hraniční pro definování nízké adheze, hodnota součinitele adheze  $\mu = 0,25$  pak byla vybrána jako kontrolní. Z těchto zjišťovaných parametrů byly následně stanoveny průměry a rozptyly pro konkrétní hodnoty klimatických podmínek a provozních parametrů. Každá kombinace testovaných parametrů je tedy popsán pomocí čtyř výsledných hodnot (dva průměry a dva rozptyly).



Obr. 4-5: Grafické znázornění zpracování testů pro získání výsledků

Pro vyhodnocení hypotézy H3 (vliv skluzu a zatížení) bylo z testů nutné určit také energii absorbovanou mazivem. Absorbovaná energie byla spočítána pomocí rovnic ( 2 ) a ( 3 ).

$$MMC_i = \frac{\mu_i - \mu_{kapalinové}}{\mu_{suché} - \mu_{kapalinové}} \quad (2)$$

$$E_i = \sum_{i=1}^{i=t} v \cdot \mu_{kapalinové} \cdot F \cdot \frac{SRR}{100} \cdot (1 - MMC_i) \cdot \Delta t \quad (3)$$

Kde  $i$  je jedna časová hodnota,  $MMC_i$  je aktuální poměr kapalného a mezného režimu mazání,  $\mu_i$  je aktuální součinitel adheze,  $\mu_{kapalinové}$  je součinitel adheze při plně zaplaveném kontaktu  $\mu_{suché}$  je součinitel adheze při suchém kontaktu,  $v$  je rychlost,  $F$  je zatížení,  $SRR$  je skluz a  $\Delta t$  je časový krok záznamu dat. Suma byla počítána od počátku testu do překročení požadované hodnoty součinitele adheze. Pro výpočet bylo použito  $\mu_{kapalinové} = 0,08$ ,  $\mu_{suché} = 0,76$  a  $\Delta t = 1$  s. Hodnota kapalinového součinitele adheze byla určena dle testů s vysokým aplikovaným množstvím maziva, hodnota suchého součinitele adheze byla určena dle literatury [24, 52].

Pro zpětný výpočet retivity byl vyjádřen z rovnice ( 3 ) čas. Dále bylo nutné určit absorbovanou energii, která byla stanovena jako průměrná absorbovaná energie z dat pro vliv zatížení a skluzu. Poté bylo potřeba určit, jaký je poměr mezi energií absorbovanou kontaktem výstupků povrchu a mazivem. Vzhledem k tomu, že průběh součinitele adheze v čase není lineární, nemohlo to být stanoveno průměrem. Byl tedy stanoven parametr MMC při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  a následně s pomocí opravného koeficientu určeno průměrné MMC tak, aby model dobře popisoval naměřená data.

#### 4.4.5 Regresní model

Pro vytvoření regresního modelu byl využit software MATLAB. Před tvorbou samotného modelu musel být vytvořen způsob zobrazování dat, protože do modelu bylo použito 6 nezávislých proměnných, a tudíž nebylo možné zobrazit všechny proměnné najednou ve 3D prostoru. Za tímto účelem byl tedy vytvořen skript, který na základě vstupu od uživatele (GUI) volí některé proměnné konstantní a zobrazuje je ve 3D a 2D grafech.

Regresní model byl tvořen za pomoci funkce nlinfit. Tato funkce slouží k nelineární regresi dat. Vstupem do této funkce jsou data ( $X$  – hodnoty parametrů a  $Y$  – naměřený výsledek), předpis funkce a počáteční odhad koeficientů ( $b_0$ ). Volitelným vstupem jsou váhy. Tato funkce neumožňuje zahrnout omezení koeficientů. Výstupem z této funkce jsou hodnoty koeficientů a rezidua (vážená rezidua, pokud jsou zahrnuty váhy). Výstupem z funkce mohou být i další parametry (jakobián funkce, kovarianční matice, ...), které nebyly v této práci využity. Jako vstup  $X$  byla použita data o parametrech testu – každý test měl zaznamenáno zatížení, skluz, množství maziva, rychlost, vlhkost, teplotu. Jako vstup  $Y$  byly

použity průměrné hodnoty retentivity při překročení požadovaného součinitele adheze. Průměrné hodnoty byly využity proto, že koeficient determinace pak lépe vystihuje, zda zvolená funkce popisuje trend dat, a koeficient determinace je méně ovlivněn rozptylem dat. Pro překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  a součinitele adheze  $\mu = 0,25$  byly vytvořeny samostatné modely – každý má jiné koeficienty. Dále byla použita matematická funkce, pomocí které byla data prokládána (4). Tato funkce byla vybrána na základě analýzy vlivů jednotlivých parametrů (kap. 5.2 a 5.3).

$$f(x) = b_1 \cdot W^{b_2} \cdot SRR^{b_3} \cdot (b_4 + b_5 \cdot M) \cdot (b_6 + b_7 \cdot T) \cdot (b_8 + b_9 \cdot e^{b_{10} \cdot RH}) \cdot U^{b_{11}} \quad (4)$$

Kde  $W$  je bezrozměrný parametr zatížení,  $SRR$  je skluz,  $M$  je bezrozměrné množství maziva,  $U$  je bezrozměrný parametr rychlosti,  $T$  je teplota,  $RH$  je relativní vlhkost a  $b_1 - b_{11}$  jsou koeficienty modelu. Bezrozměrné parametry  $W$ ,  $M$  a  $U$  jsou uvedeny v rovnicích (5), (6) a (7).

$$W = \frac{\varepsilon' \cdot F}{E' \cdot R_x^2 \cdot (k')^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

$$M = \frac{V_m}{b \cdot l \cdot R_x \cdot (k')^{\frac{2}{3}}} \quad (6)$$

$$U = \frac{\eta \cdot v_e}{E' \cdot R_x \cdot (k')^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

Kde  $\varepsilon'$  je zjednodušený eliptický integrál,  $F$  je zatížení kontaktu,  $E'$  je redukovaný modul pružnosti,  $R_x$  je redukovaný poloměr křivosti ve směru valení,  $k'$  je zjednodušený parametr elipticity,  $V_m$  je aplikované množství maziva,  $b$  je šířka aplikace maziva,  $l$  je délka aplikace maziva,  $\eta$  dynamická viskozita maziva a  $v_e$  je rychlost vstupu maziva (entrainment speed). Rychlost vstupu maziva na MTM je shodná se zadávanou rychlostí pro experiment a je nezávislá na skluzu. Bezrozměrné parametry jsou převzaty a následně upraveny z publikace Hamrock – Dowson, která je široce rozšířena pro predikci tloušťky mazacího filmu v kontaktu mazaném olejem [20]. Tyto bezrozměrné parametry byly upraveny tak, aby byly co nejvíce podobné mezi MTM a traťovým tribometrem při specifických podmínkách (podobný parametr  $W$  při stejném kontaktním tlaku a podobný parametr  $U$  při stejném součiniteli mazání). Pro bezrozměrný parametr maziva  $M$  byla hlavní inspirací bezrozměrná tloušťka mazacího filmu z publikace Hamrock – Dowson [20], která byla následně upravena dle porovnání MTM a traťového tribometru. Pomocné parametry se vypočtou z následujících rovnic:

$$\varepsilon' = 1,0003 + \frac{0,5968 \cdot R_x}{R_y} \quad (8)$$

$$k' = 1,0339 \cdot \left(\frac{R_y}{R_x}\right)^{0.636} \quad (9)$$

$$R_x = \frac{1}{\frac{1}{r_{1x}} + \frac{1}{r_{2x}}}, R_y = \frac{1}{\frac{1}{r_{1y}} + \frac{1}{r_{2y}}} \quad (10)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (11)$$

$$\nu_e = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2} \quad (12)$$

Kde  $R_y$  je redukovaný poloměr křivosti v příčném směru,  $r_{1x}$  a  $r_{2x}$  jsou poloměry křivosti jednotlivých těles ve směru valení,  $r_{1y}$  a  $r_{2y}$  jsou poloměry křivosti jednotlivých těles v příčném směru,  $E$  je modul pružnosti v tahu,  $\nu$  je Poissonova konstanta,  $\nu_1$  je rychlost prvního kontaktního tělesa a  $\nu_2$  je rychlost druhého kontaktního tělesa. Důležité je zmínit, že redukovaný modul pružnosti  $E'$  je ve zjednodušené formě, která platí pouze pokud oba materiály mají stejný modul pružnosti a Poissonovu konstantu.

Dalším vstupem do funkce nlinfit byly počáteční odhady koeficientů  $\mathbf{b}_0$ . Volba vektoru  $\mathbf{b}_0$  probíhala takovým způsobem, že na začátku byl stanoven nulový vektor a postupně byly jednotlivé hodnoty vektoru měněny, aby funkce nlinfit zkonvergovala a vypočítala výsledné koeficienty. Při volbě počátečního vektoru  $b_0$  došlo k tomu, že se nepodařilo najít vhodný počáteční bod. To bylo způsobeno řádkovými rozdíly v jednotlivých parametrech (např.  $U = 1,17 \cdot 10^{-8}$  a  $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Kvůli tomu bylo provedeno normování jednotlivých parametrů (převod na násobky počáteční hodnoty). Díky tomu všechny parametry měly rozsah od 0,25 do 5 a byly bezrozměrné. Tento postup umožnil lepší stabilitu výsledků a velmi rychle byl nalezen vhodný počáteční vektor koeficientů. Vektor počátečních hodnot ( $b_0$ ) koeficientů byl zvolen následovně:

$$\mathbf{b}_0 = (0; 0; 0; 0; 1; 0; 1; 1; 0; 0; 0) \quad (13)$$

Pro budoucí využití modelu není vhodné, aby bylo normování prováděno z důvodu jednoduššího použití. Proto musely být finální koeficienty normovaného modelu přepočítány na koeficienty použitelné v modelu bez normování. Rovnice pro přepočet byly odvozeny z předpisu funkce (4). Odvozené rovnice pro přepočet vypadají následovně:

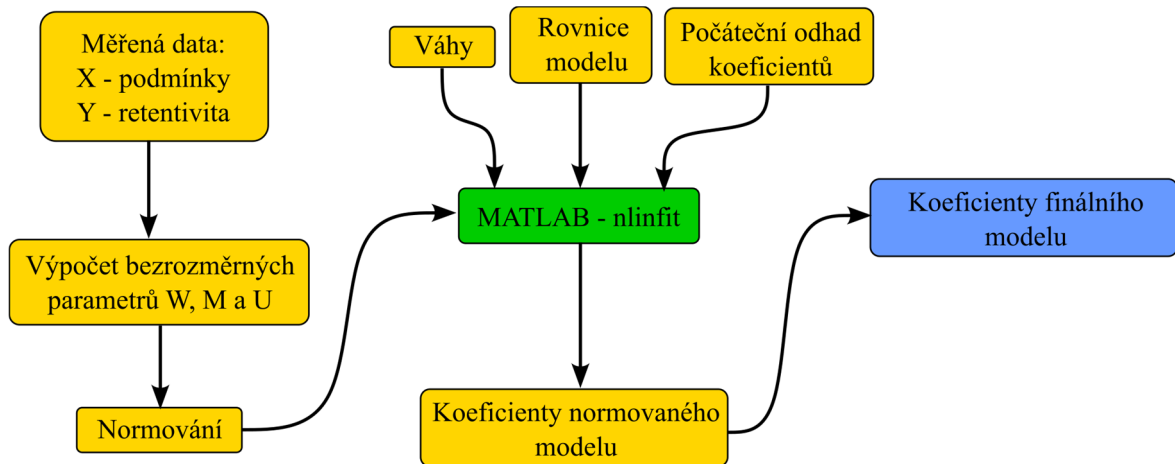
$$b_1 = \frac{b_{1n}}{W_n^{b_{2n}} \cdot SRR_n^{b_{3n}} \cdot U_n^{b_{11n}}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} b_2 &= b_{2n}, b_3 = b_{3n}, b_4 = b_{4n}, b_6 = b_{6n}, b_8 = b_{8n}, \\ b_9 &= b_{9n}, b_{11} = b_{11n} \end{aligned} \quad (15)$$



$$b_5 = \frac{b_{5n}}{M_n}, b_7 = \frac{b_{7n}}{T_n}, b_{10} = \frac{b_{10n}}{RH_n} \quad (16)$$

Kde  $b_n$  jsou koeficienty získané z normalizovaného modelu a  $W_n, SRR_n, U_n, M_n, T_n$  a  $RH_n$  jsou konstanty použité pro normování modelu. V kapitole výsledků (5.4) jsou uvedeny již finální přepočítané koeficienty. Grafické zobrazení postupu zpracování regresního modelu je znázorněno na Obr. 4-6.



Obr. 4-6: Grafické znázornění postupu zpracování regresního modelu

Dále bylo jako vstup do funkce nlinfit použito vážení reziduí, aby došlo ke správnému proložení nízkých hodnot retentivity. Váhy byly nastaveny pomocí převrácené hodnoty retentivity (17). Tím došlo k tomu, že funkce nlinfit neprokládá body na základě absolutní odchylky od měřené hodnoty, ale na základě procentuální odchylky od měřené hodnoty.

$$Váha = \frac{1}{y} \quad (17)$$

#### 4.4.6 Měření retentivity na traťovém tribometru

Měření na traťovém tribometru bylo nastaveno tak, aby co nejvíce odpovídalo testům na MTM. Testy byly prováděny na délce kolejnice 200 mm z důvodu menšího množství aplikovaného maziva. Zatížení bylo nastaveno na 152 N (závaží o hmotnosti 15,5 kg), což odpovídá kontaktnímu tlaku 1 GPa. Skluz nemohl být nastaven na konstantní hodnotu, protože to zařízení neumožňuje. Brzdný moment byl nastaven tak, aby se postupně zvyšoval (počáteční hodnota nebyla nulová) a aby makroskopický prokluz ( $SRR = 100\%$ ) nastal zhruba v polovině testované vzdálenosti a mazivo tak bylo při průjezdech tam a zpět namáháno zhruba rovnoměrně. Porovnání s MTM bylo prováděno na základě ekvivalentního skluzu. Množství maziva bylo zvoleno tak, aby po roznesení odpovídalo tloušťkou vrstvy na MTM. Aplikaci 0,1  $\mu\text{l}$  na MTM odpovídá aplikaci 2,5  $\mu\text{l}$  na traťovém tribometru. Aplikace maziva probíhala pomocí roztažení po celé testované délce 200 mm

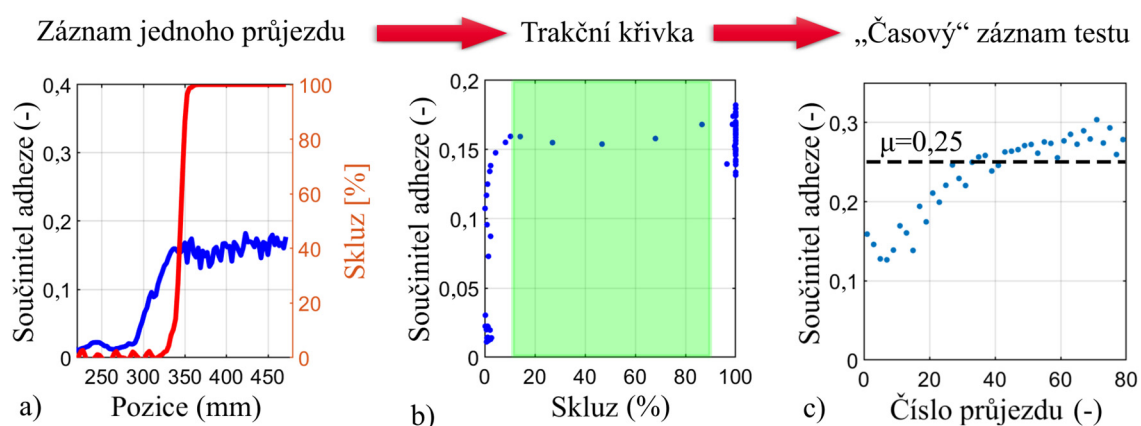
v šířce 5 mm. Tím bylo dosaženo rovnoměrné vrstvy maziva. Vlhkost nebyla v laboratoři regulována, pohybovala se však na stejných hodnotách jako v laboratoři s MTM. Teplota kontaktních těles byla stejná jako okolní teplota, tudíž byla nižší než na MTM.

Postup testu na traťovém tribometru:

1. Očištění acetonem
2. Aplikace požadovaného množství maziva v rovnoměrných vzdálenostech
3. Roztažení pomocí disku
4. Testování s průjezdy v obou směrech

#### 4.4.7 Vyhodnocování dat na traťovém tribometru

Při vyhodnocování dat na traťovém tribometru bylo postupováno obdobně jako při vyhodnocování dat na MTM. Z traťového tribometru byla získávána hodnota součinitele adheze a hodnota skluzu v závislosti na poloze (Obr. 4-7a). Z těchto dat byla následně vytvořena trakční křivka. Z trakční křivky byla vyhodnocena průměrná adheze při skluzu 10–90 % (Obr. 4-7b). Tato hodnota adheze pak byla zanesena do grafu znázorňující průběh součinitele adheze v závislosti na počtu průjezdů. Z těchto dat pak byl vyhodnocován počet průjezdů při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  (Obr. 4-7c). Překročení hodnoty součinitele adheze  $\mu = 0,15$  nebylo vyhodnocováno, protože testy začínaly na hodnotě součinitele adheze okolo  $\mu = 0,15$ , takže by to nemělo význam. Z průjezdů byl navíc vyhodnocován vždy pouze lichý průjezd, protože lichý a sudý průjezd se od sebe trochu lišily (nárůst byl stejný, absolutní hodnoty součinitele adheze byly trochu rozdílné). Došlo tím ke snížení rozptylu vyhodnocovaných výsledků.



Obr. 4-7: Popis postupu vyhodnocení měření na traťovém tribometru. a) záznam součinitele adheze a skluzu v závislosti na poloze z jednoho průjezdu, b) trakční křivka jednoho průjezdu, c) „Časový“ záznam součinitele adheze v závislosti na počtu průjezdů

#### 4.4.8 Porovnání predikce modelu a měření na traťovém tribometru

Pro porovnání modelu s výsledky traťového tribometru muselo být určeno, jaké hodnoty parametrů do modelu dosadit (Tab. 4-6). Pro některé parametry je to zřejmé ( $F, V_m, T, RH, R_x, R_y$ ), pro některé je potřeba dovysvětlení. Délka roztažení maziva ( $l$ ) se skládá z testované délky (200 mm), rozjezdové vzdálenosti (80 mm), dojezdové vzdálenosti (80 mm) a obvodu disku (314 mm). Šířka roztažení ( $b$ ) byla určena měřením po roztažení maziva. Parametry maziva a materiálu jsou stejné jako u testů na MTM. Skluz byl vypočten jako průměrný ze všech průjezdů v experimentech za daných podmínek. Je důležité také zmínit, že skluz na traťovém tribometru není úplně stejný jako SRR na MTM. Na MTM se SRR vypočítá dle rovnice ( 18 ), na traťovém tribometru se skluz vypočítá dle rovnice ( 19 ).

$$SRR = 200 \cdot \frac{\omega_{kul} \cdot r_{kul} - \omega_{disk} \cdot r_{disk}}{\omega_{kul} \cdot r_{kul} + \omega_{disk} \cdot r_{disk}} \quad (18)$$

$$Skluz = 100 \cdot \frac{v_{disk} - \omega_{disk} \cdot r_{disk}}{v_{disk}} \quad (19)$$

V těchto rovnicích je  $\omega_{kul}$  úhlová rychlost kuličky,  $r_{kul}$  je poloměr oběžné dráhy kuličky,  $\omega_{disk}$  je úhlová rychlost disku,  $r_{disk}$  je poloměr oběžné dráhy na disku a  $v_{disk}$  je dopředná rychlost disku na traťovém tribometru. Z výše uvedených rovnic vyplývá, že na MTM nastává úplný skluz (jedno z těles je bez rotace) při  $SRR = 200 \%$ , zatímco na traťovém tribometru dochází k zablokování kola při skluzu 100 %. Při vyjádření skluzových rychlostí lze zjistit, že skluzová rychlost na traťovém tribometru je stejná jako na MTM při stejném skluzu. Skluz je tedy ekvivalentní na obou zařízeních a dále bude označován jednotně  $SRR$ .

Tab. 4-6: Parametry dosazené do modelu pro predikci retentivity

Parametr	Označení	Hodnota
Zatížení	$F$	152 N, 76,3 N
Skluz	$SRR$	18–40 %
Rychlost	$v_{disk}$	0,26 m/s
Množství maziva	$V_m$	5–20 $\mu$ l
Teplota	$T$	28 °C
Vzdušná vlhkost	$RH$	35 %
Šířka roznesení maziva	$b$	5 mm
Délka roznesení maziva	$l$	674 mm
Redukovaný poloměr křivosti ve směru valení	$R_x$	50 mm
Redukovaný poloměr křivosti v příčném směru	$R_y$	10 mm

Další důležitou veličinou je rychlost vstupu maziva do kontaktu  $v_e$  (entrainment speed). Zařízení MTM z principu pracuje tak, že při změně skluzu dojde ke změně rychlosti kuličky i disku tak, aby rychlost vstupu maziva  $v_e$  zůstávala konstantní. Na traťovém tribometru však dochází k ovlivnění rychlosti  $v_e$  skluzem. To lze zjistit analýzou rovnic ( 19 ) a ( 13 ). Při nulovém skluzu je  $v_e$  rovna dopředné rychlosti pohybu disku, při skluzu 100 % je pak poloviční. Průměrná rychlost vstupu maziva je tedy zjištěna z průměrného skluzu a dopředné rychlosti dle rovnice ( 20 ).

$$v_e = v_{disk} \cdot \left(1 - \frac{SRR}{200}\right) \quad (20)$$

Výsledek modelu pak vyjde v sekundách běhu na MTM, což je potřeba přepočítat na počet cyklů. Jeden cyklus je brán jako ujetí obvodu disku a obvodu kuličky, což vychází na 200 mm. Počet cyklů je pak vypočítán pomocí rovnice ( 21 ), kde  $N$  je počet cyklů,  $v_{disk}$  je dopředná rychlost disku traťového tribometru a  $O$  je součet obvodu oběžné dráhy kuličky a disku (zmíněných 200 mm).

$$N = \frac{v_{disk} \cdot t}{O} \quad (21)$$

## 4.5 Testované predikce

### 4.5.1 Pokles retentivity se zvyšující se teplotou

První predikcí bylo, že při zvýšení teploty dojde k poklesu retentivity a míra poklesu retentivity bude úměrná změně viskozity základového oleje. Testování predikce bylo provedeno zvyšováním teploty kontaktních těles pro jednotlivé testy. Závisle proměnnou byla retentivita. Nezávisle proměnnou byla teplota. Kontrolované proměnné byly vzdušná vlhkost, zatížení, skluz, množství maziva a rychlost.

### 4.5.2 Nezávislost retentivity na vlhkosti až do bodu kondenzace, prudký nárůst retentivity nad bodem kondenzace vlhkosti

Tato predikce uvažovala nezávislost retentivity na vzdušné vlhkosti až do hodnoty relativní vlhkosti, kdy dojde ke kondenzaci vlhkosti na kontaktních tělesech. Po kondenzaci vlhkosti na kontaktních tělesech dojde k prudkému nárůstu retentivity. Predikce byla testována navyšováním vzdušné vlhkosti v okolí kontaktu pro jednotlivé testy. Závisle proměnnou byla retentivita. Nezávisle proměnnou byla relativní vzdušná vlhkost. Kontrolované proměnné byly teplota, zatížení, skluz, množství maziva a rychlost.

#### 4.5.3 Ekvivalence vlivu zatížení a skluzu na retentivitu

Tato predikce uvažovala, že zvýšení zatížení má stejný vliv na retentivitu jako zvýšení skluzu a bude je možné popsat společně. Predikce byla testována zvýšením zatížení v jednom testu, zvýšením skluzu v druhém testu a následném vzájemném porovnání. Pokud tato predikce je pravdivá, pak by měl fungovat popis vlivu zatížení a skluzu absorbovanou energií mazivem. Závisle proměnnou byla retentivita. Nezávislými proměnnými byly zatížení a skluz. Kontrolované proměnné byly teplota, vzdušná vlhkost, množství maziva a rychlost.

#### 4.5.4 Nárůst retentivity při zvýšení rychlosti

Tato predikce uvažovala zvýšení retentivity při zvýšení rychlosti. Predikce byla testována zvyšováním rychlosti pro jednotlivé testy. Závisle proměnnou byla retentivita. Nezávisle proměnnou byla rychlost. Kontrolované proměnné byly teplota, vzdušná vlhkost, zatížení, skluz a množství maziva.

#### 4.5.5 Lineární nárůst retentivity při zvýšení aplikovaného množství maziva

Tato predikce uvažovala lineární nárůst retentivity při zvýšení aplikovaného množství maziva. Predikce byla testována zvyšováním aplikované dávky maziva pro jednotlivé testy. Predikce bude splněna, pokud přímka proložená testy ukáže koeficient determinace vyšší než 0,9. Závisle proměnnou byla retentivita. Nezávisle proměnnou bylo množství maziva. Kontrolované proměnné byly teplota, vzdušná vlhkost, zatížení, skluz

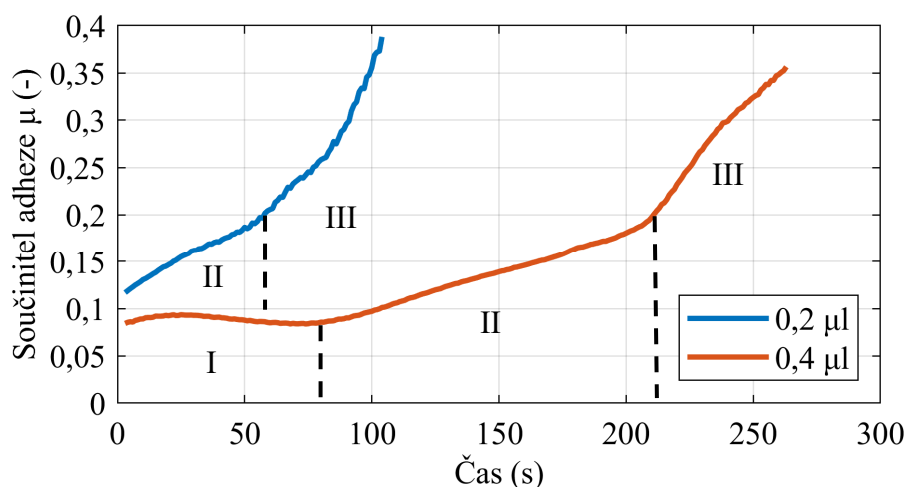
## 5 VÝSLEDKY

V této části diplomové práce jsou popsány výsledky testů retentivity plastického maziva BECHEM EcoRail 2009 při různých klimatických a provozních podmínkách. Z výsledků je vytvořen regresní model, který je následně ověřen na geometrii bližší reálnému kontaktu s pomocí traťového tribometru. Všechny testy jsou prováděny za stejných výchozích podmínek, ze kterých je následně měněn pouze pozorovaný parametr (Tab. 4-5).

V kapitole výsledků jsou zobrazovány jednak grafy zobrazující průměrné výsledky a směrodatné odchylky, tak i grafy zobrazující časové průběhy. Časový průběh je vždy vybrán pouze jeden, a to ten, který je nejvíce reprezentativní dle průměrných hodnot. Dále je zde komentována možná matematická závislost (vždy pro jeden parametr) popisující naměřená data, na základě čehož jsou nastavena omezení pro regresní model. V těchto závislostech nejsou využívány bezrozměrné parametry, takže hodnoty koeficientů se můžou lišit od finálních koeficientů. V dílčích matematických modelech je využívána pouze retentivita při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$ .

### 5.1 Fáze časového testu retentivity

Z naměřených dat je patrné, že během testu nastávají 2 až 3 různé fáze (Obr. 5-1). Počet fází závisí na podmínkách testu. Dvě fáze se vyskytují, pokud je do kontaktu aplikováno malé množství maziva. Počet fází může být ovlivněn také zatížením, skluzem, rychlostí, teplotou a přítomností vody. Tyto vlivy však nemají takový vliv na počet fází testu jako množství maziva. Důležité je také zmínit, že za různých podmínek dochází k rozdílnému počátečnímu součiniteli adheze. To je pozorovatelné i na grafu znázorňující fáze časového testu retentivity (Obr. 5-1).

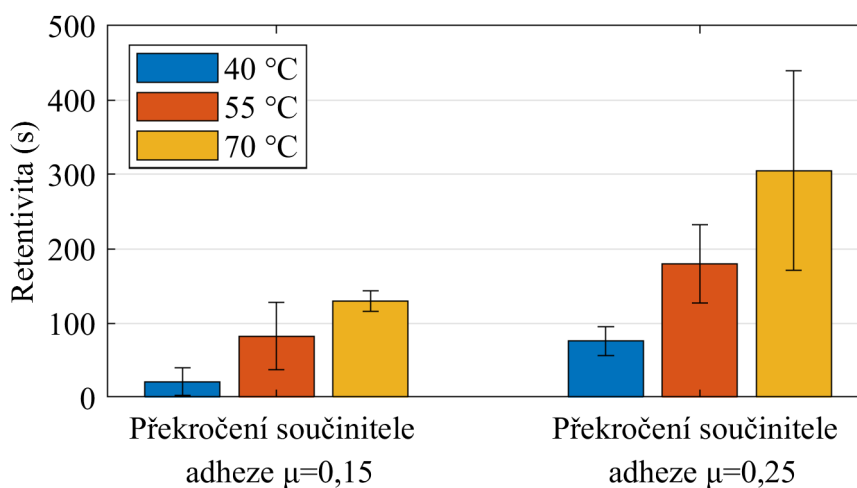


Obr. 5-1: Fáze časového testu retentivity

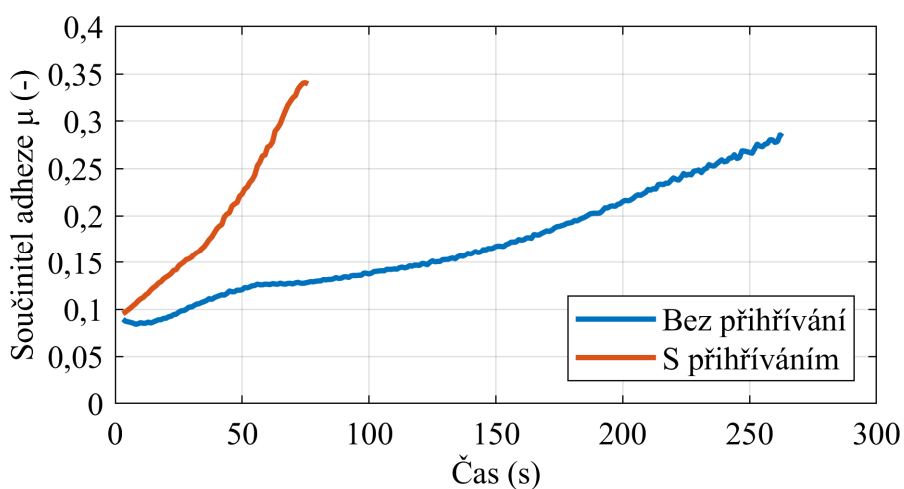
## 5.2 Vliv klimatických podmínek na retentivitu

### 5.2.1 Vliv teploty na retentivitu

Vliv teploty na retentivitu lze pozorovat na grafu (Obr. 5-2). Je zde vidět, že s narůstající teplotou se zvyšuje retentivita. Důležité je zmínit, že tento nárůst nepokračuje do vyšších teplot. Limitní teplota použitelnosti měřeného plastického maziva je 80 °C. Nad touto teplotou dochází k výraznému snížení retentivity. Tento jev byl pozorován v případě, když byla snaha udržet teplotu disku na 70 °C. Bylo totiž nutné horkovzdušnou pistoli nastavit na 100 °C, a tudíž pravděpodobně docházelo k lokálnímu přehřátí plastického maziva. Porovnání testu s přehříváním a bez přehřívání lze vidět na Obr. 5-3. Důležité je také zmínit, že u testů při 55 °C nemělo přehřívání žádný vliv na výsledek, protože stačilo mít horkovzdušnou pistoli nastavenou na 70 °C, což je pod horní hranicí teplotní použitelnosti maziva.

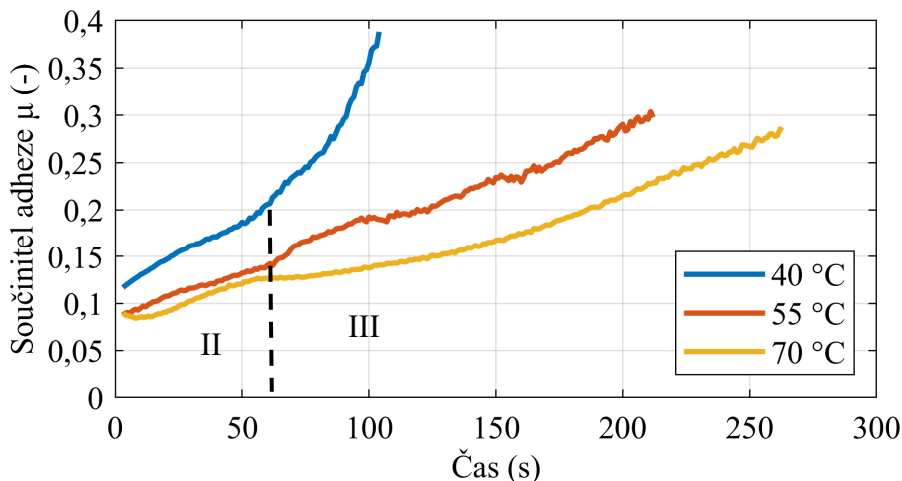


Obr. 5-2: Vliv teploty na retentivitu plastického maziva



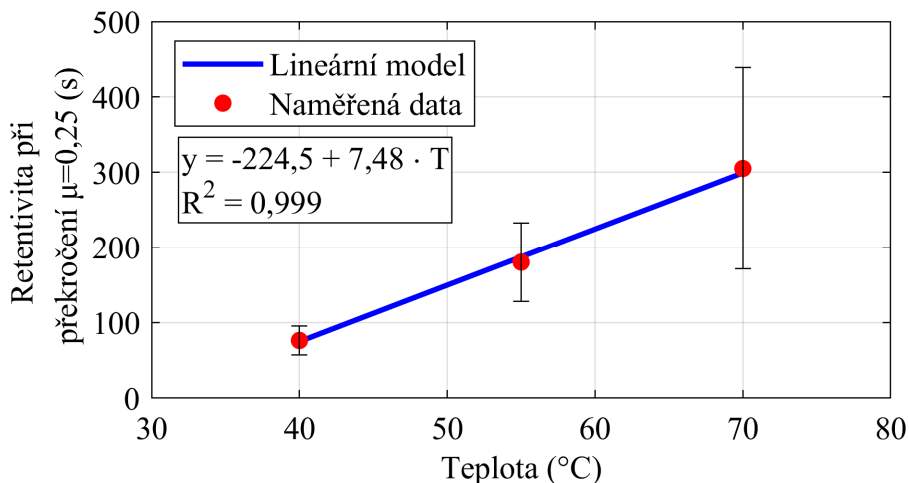
Obr. 5-3: Porovnání dvou typů testu vlivu teploty – jeden s přehříváním, druhý bez přehřívání

Na grafu zobrazující časové průběhy testů pro různé teploty (Obr. 5-4) lze pozorovat, že teplotou je ovlivněný počáteční součinitel adheze, který se zvyšující se teplotou klesá. Dále je zde pozorovatelný podobný průběh ve fázi č. 2. Následně je vidět odlišné chování ve fázi č. 3. Pro nižší teploty nastává nárůst součinitele adheze, zatímco pro vyšší teploty zůstává rychlost nárůstu zhruba stejná (55 °C) nebo dokonce rychlost nárůstu klesá (70 °C).



Obr. 5-4: Časové průběhu testu pro různé teploty

Na grafu zobrazující matematickou závislost retentivity na teplotě (Obr. 5-5), lze vidět, že lineární závislost vystihuje naměřená data velice dobře. Nicméně je důležité zmínit, že tato závislost predikuje nulovou retentivitu při zhruba 30 °C. Znamená to, že všechny experimenty při teplotě nižší než 30 °C (za stejných ostatních podmínek) by měly dle predikce modelu mít vyšší počáteční součinitel adheze než  $\mu = 0,25$ .



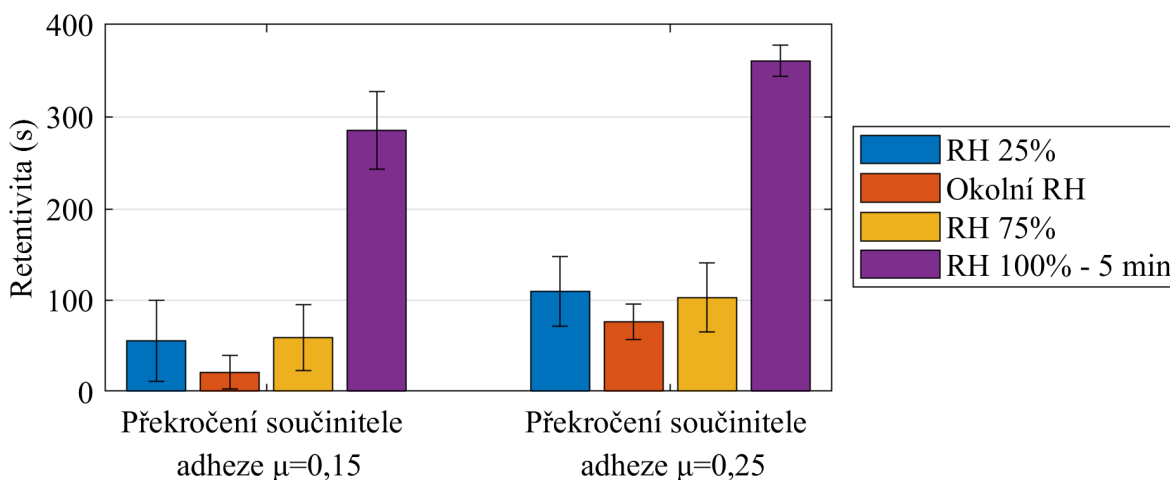
Obr. 5-5: Závislost retentivity na teplotě

## 5.2.2 Vliv vlhkosti na retentivitu

U vlivu relativní vlhkosti se ukazuje (Obr. 5-6), že zvýšení relativní vlhkosti nemá vliv na retentivitu, pokud nedochází ke kondenzaci. Pokud ke kondenzaci dochází, pak nastává

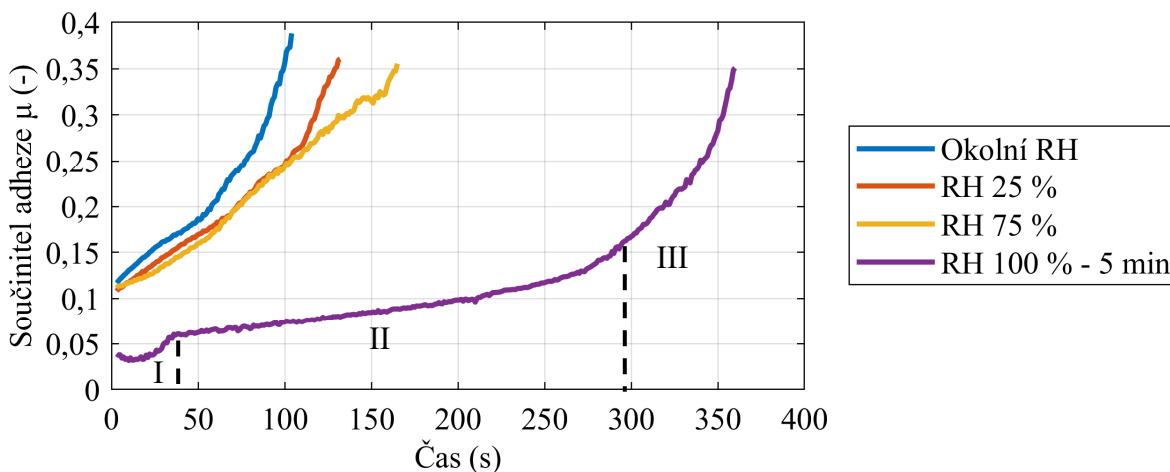


nárůst retentivity. U okolní vlhkosti je vidět drobný pokles, ale dle naměřených dat nic nenaznačuje tomu, že by se opravdu mělo jednat o jiný výsledek, než u RH 25 % a 75 %. Výsledek je totiž v rámci statistické chyby u překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  i  $\mu = 0,25$ .



Obr. 5-6: Vliv vlhkosti na retentivitu plastického maziva

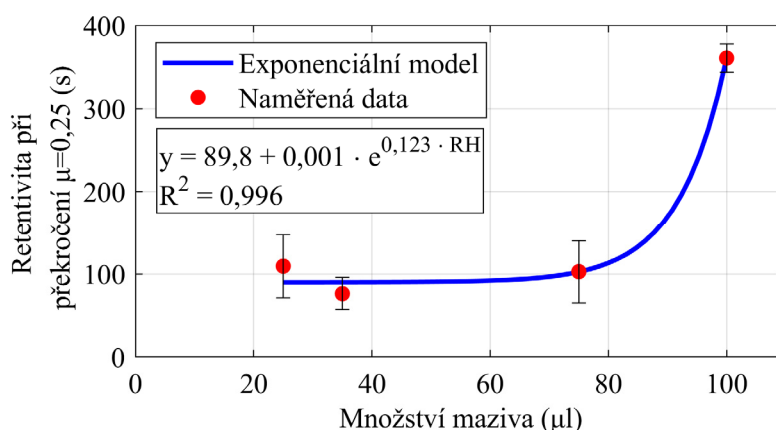
Na grafu zobrazující časové testy (Obr. 5-7) lze vidět, že testy při okolní vlhkosti, RH 25 % a RH 75 % jsou téměř identické. U průběhu při vlhkosti 100 % a ponechání kondenzace po dobu 5 minut je vidět významný nárůst trvání fáze č. 2 a pozvolný přechod do fáze č. 3. Na začátku testu by se dalo říct, že se zde nachází i krátká fáze č. 1. Test s kondenzací vody byl jediný ze všech testů, ve kterém došlo k poklesu součinitele adheze pod hodnotu  $\mu = 0,05$ .



Obr. 5-7: Časové testy pro různé vzdušné vlhkosti

U vyhodnocení matematické závislosti (Obr. 5-8) lze pozorovat, že dobře data popisuje exponenciální funkce. Problematická však může být predikce mezi 75 % a 100 % vzdušné vlhkosti. Na testovacím zařízení nebylo možné držet takto vysoké hodnoty vzdušné vlhkosti, aniž by nedocházelo k částečné kondenzaci (způsobeno PID regulací), takže nebylo možné tato data naměřit. V případě, že je vzdušná vlhkost například 90 % a teplota kontaktních

těles není pod teplotou rosného bodu, pak by ke kondenzaci nemělo docházet a retentivita by měla být nezměněna.

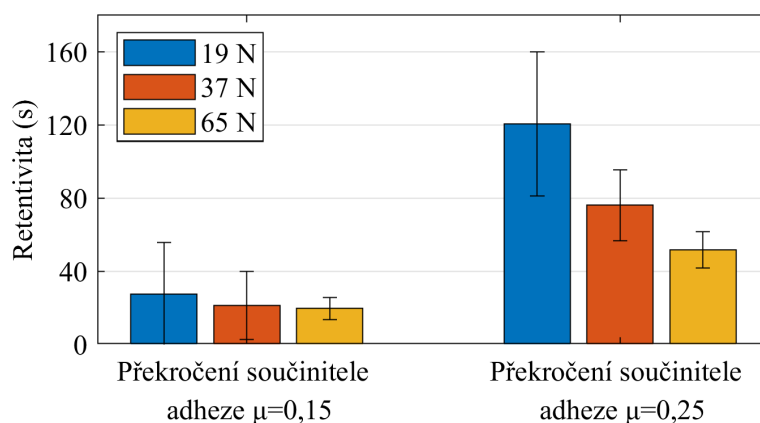


Obr. 5-8: Vyhodnocení matematické závislosti retentivity na vzdušné vlhkosti

## 5.3 Vliv provozních parametrů

### 5.3.1 Vliv zatížení na retentivitu

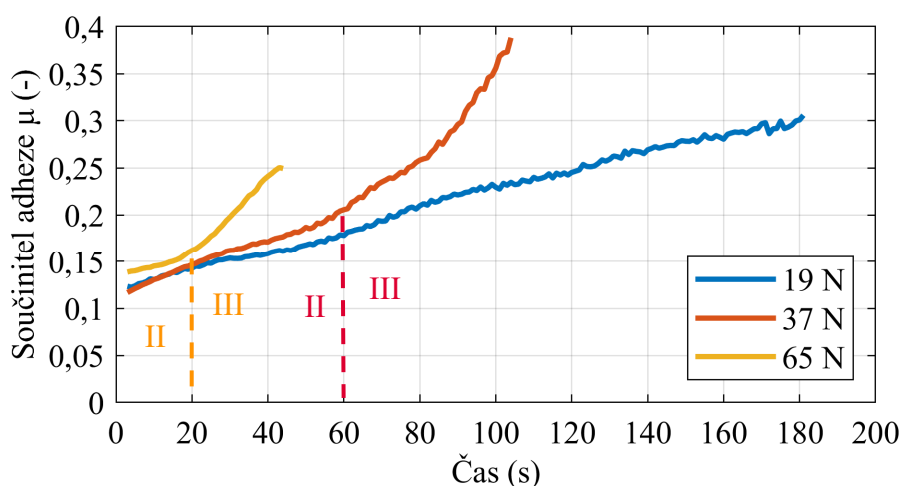
Na grafu (Obr. 5-9) je vidět, že s narůstajícím zatížením se snižuje retentivita. Zároveň je zde také pozorovatelné, že při nízkém zatížení není popis pomocí překročení součinitele adheze 0,15 úplně vhodný. Je to způsobené zejména proměnným počátečním součinitelem adheze, který je často okolo hodnoty 0,15. Zároveň je zde pozorovatelné, že pokud je kontakt více namáhán, pak dochází k nižšímu rozptylu výsledků. Tohle je pozorovatelné víceméně napříč všemi výsledky testů ze zařízení MTM.



Obr. 5-9: Vliv zatížení na retentivitu plastického maziva

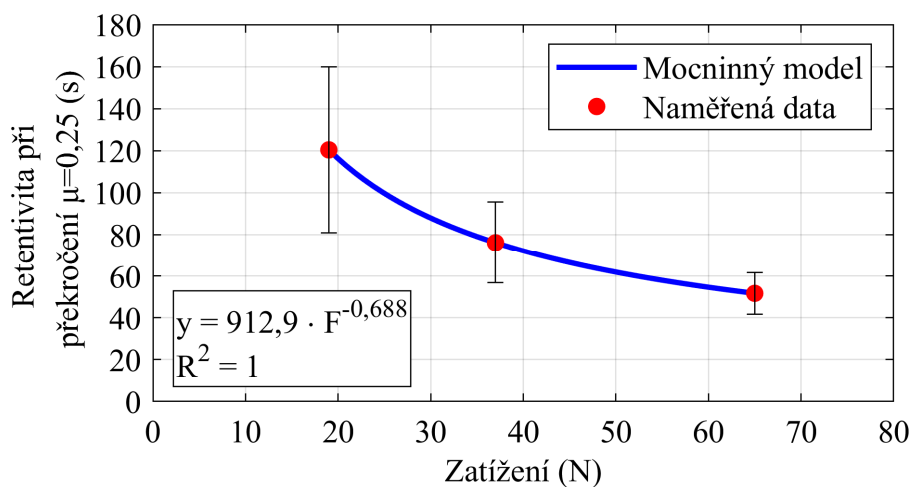
U časových testů pro různé zatížení (Obr. 5-10) lze pozorovat, že dochází k prodloužení fáze č. 2 s klesajícím zatížením. Vlivem toho se posouvá přechod mezi fázemi č. 2 a č.3, přičemž

u zatížení 19 N dokonce není tento přechod vůbec pozorovatelný a nárůst se zdá být po celou dobu testu téměř lineární.



Obr. 5-10: Časové testy pro různé zatížení

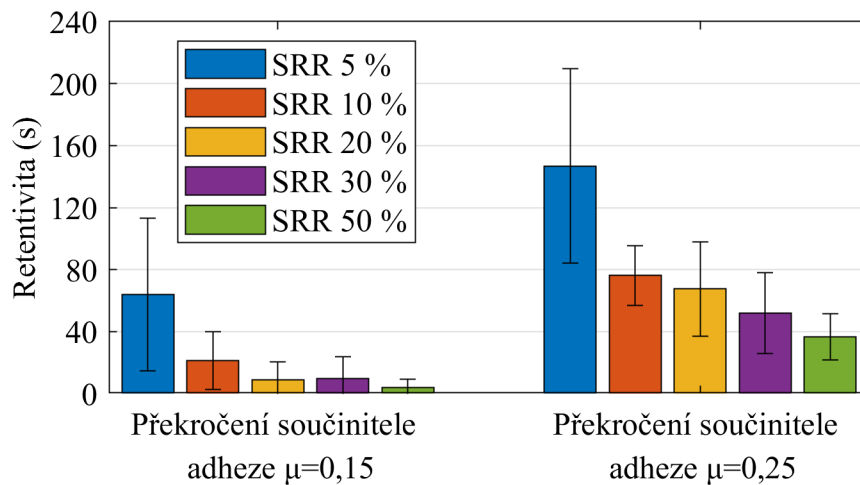
U vyhodnocení matematické závislosti vlivu zatížení na retentivitu (Obr. 5-11) je vidět, že data jsou velmi dobře vystižena mocninnou závislostí se záporným mocnitelem. Důležité je zmínit, že při zatížení 0 N se retentivita dle modelu limitně blíží nekonečnu, což dává fyzikálně smysl, a proto lze předpokládat, že tento model je správný.



Obr. 5-11: Vyhodnocení matematické závislosti pro vliv zatížení na retentivitu

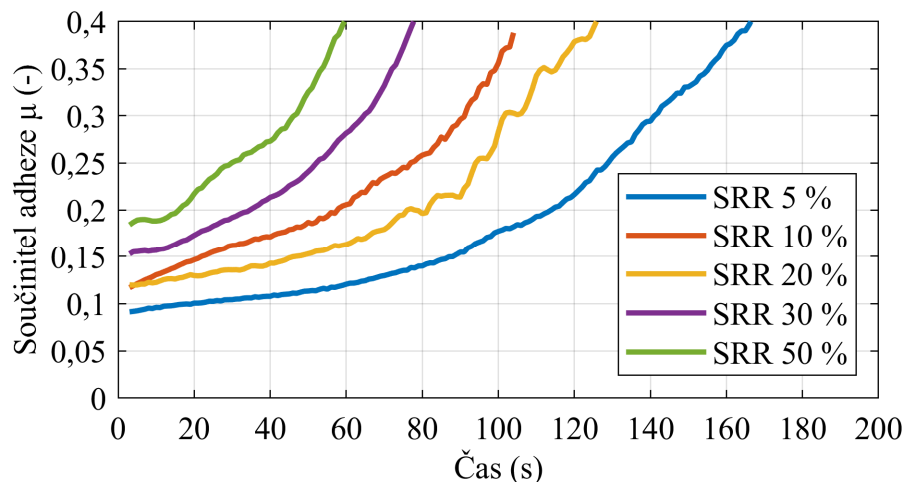
### 5.3.2 Vliv skluzu na retentivitu

Retentivita vykazuje pokles při zvyšování skluzu (Obr. 5-12). Výsledky při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  i  $\mu = 0,15$  vypadají, že vykazují nelineární pokles. Lze pozorovat vyšší rozptyl u skluzu 20 % a 30 %, přičemž příčinou jsou rozdílné počáteční součinitele adheze mezi jednotlivými testy za stejných podmínek.



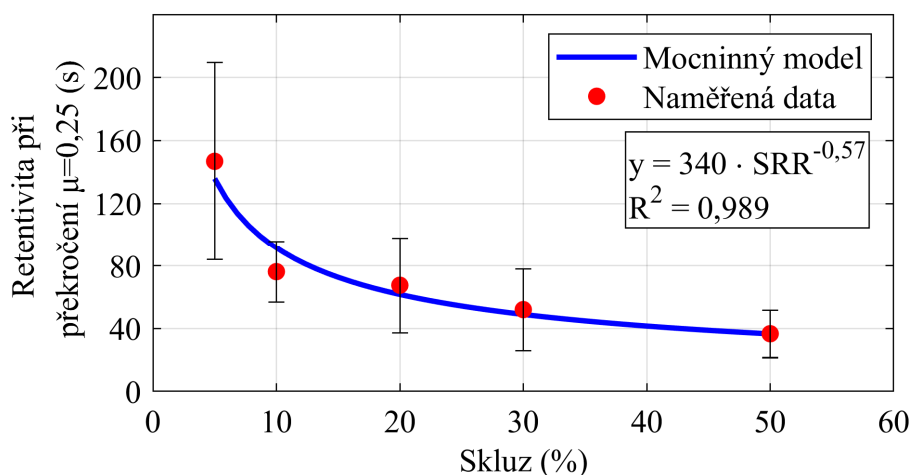
Obr. 5-12: Vliv skluzy na retentivitu plastického maziva

U časových testů pro různé skluzy (Obr. 5-13) lze pozorovat, že mají všechny testy podobný průběh, ale začínají na jiné hodnotě součinitele adheze. Časové testy zde mají spíše exponenciální průběh, než několik lineárních fází popsaných v kapitole 5.1. Dochází zde i k prodlužování fáze č.2 s klesajícím skluzem, není z výsledků však patrné, zda to není způsobeno pouze rozdílným počátečním součinitelem adheze.



Obr. 5-13: Časové testy pro různé skluzy

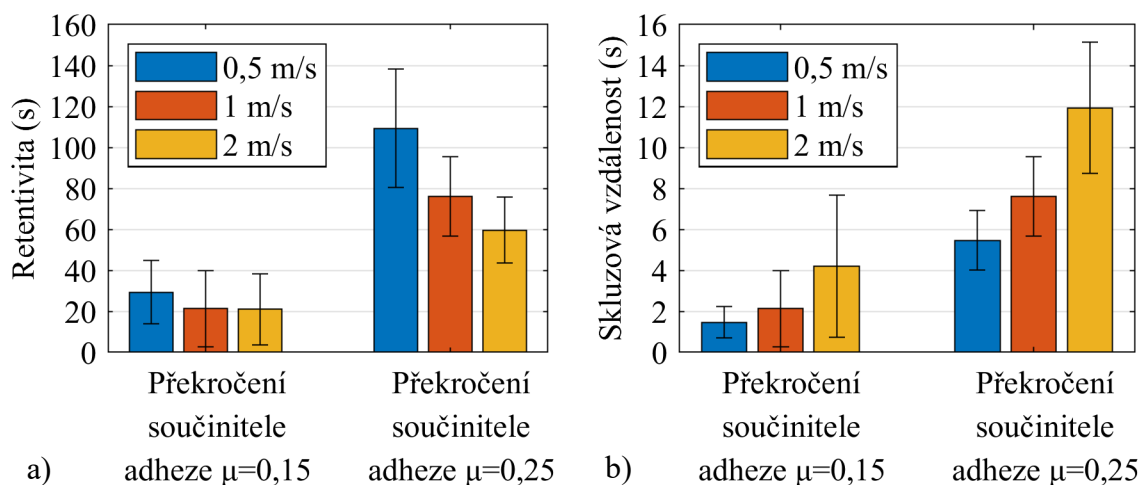
U grafu zobrazující matematickou závislost vlivu skluzy na retentivitu (Obr. 5-14) lze vidět, že je to dobře vystihnuto mocninnou funkcí se záporným mocnitelem. Lze opět pozorovat, že při nízkém skluzu se retentivita blíží nekonečnu. To lze odůvodnit tím, že při nízkých skluzech může být i při suchém kontaktu součinitel adheze nižší než  $\mu = 0,25$ , a proto nikdy nemůže dojít k překročení této hodnoty a takto vyhodnocovaná retentivita tedy opravdu je nekonečná.



Obr. 5-14: Matematický model závislosti retentivity na skluzu

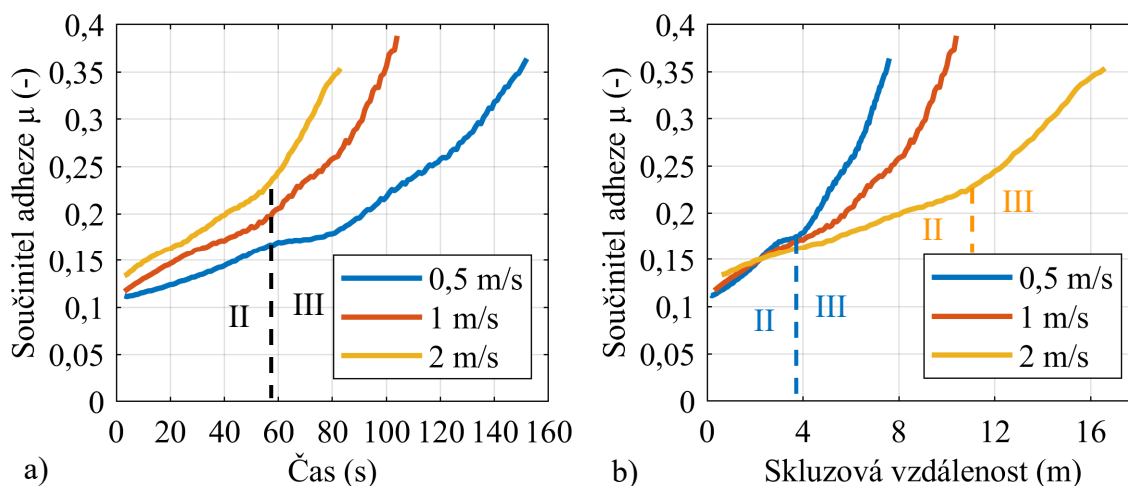
### 5.3.3 Vliv rychlosti na retentivitu

U vlivu rychlosti je pozorovatelné, že je důležitý způsob vyhodnocování retentivity. Retentivita vyjádřená v sekundách (Obr. 5-15a) s rostoucí rychlostí klesá, zatímco retentivita vyjádřená ve skluzové vzdálenosti (Obr. 5-15b) naopak roste. Vyjádření ve skluzové vzdálenosti je ekvivalentní k počtu cyklů, kolika mazivo bylo zatíženo.



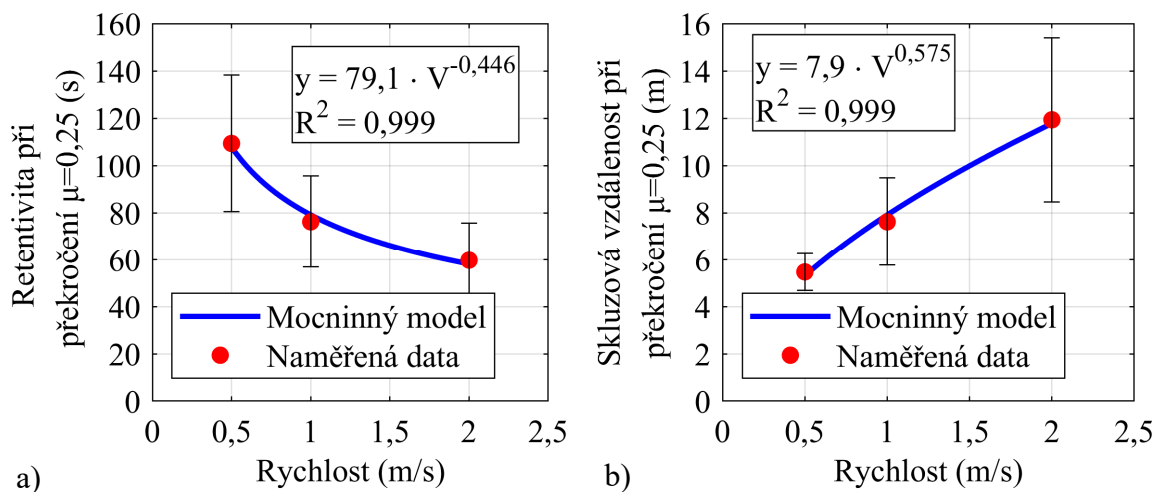
Obr. 5-15: Vliv rychlosti na retentivitu plastického maziva a) vyhodnoceno ve vteřinách, b) vyhodnoceno ve skluzové vzdálenosti

U časových testů pro různé rychlosti lze pozorovat, že při vyjádření v sekundách (Obr. 5-16a) dochází k přechodu mezi fázemi č. 2 a č. 3 zhruba ve stejný okamžik a rozdíly jsou tvořené zejména odlišným počátečním součinitelem adheze. Je zde také pozorovatelné, že u rychlosti 0,5 m/s dochází k pozvolnějšímu nárůstu ve fázi č.3. U časových testů vyhodnocené v ujeté vzdálenosti (Obr. 5-16b) je pozorovatelné, že začátek testů je velmi podobný, ale je zde pozorovatelná kratší fáze č. 2 při nižší rychlosti.



Obr. 5-16: Časové testy pro různé rychlosti a) vyhodnocené v sekundách, b) vyhodnocené ve skluzové vzdálenosti

Na grafech závislosti retentivity (Obr. 5-17a) a skluzové vzdálenosti (Obr. 5-17b) na rychlosti lze pozorovat, že data jsou dobře vystihnuta mocninnou závislostí v obou případech. Při nízké rychlosti by retentivita měla být velmi vysoká, protože mazivo se bude do kontaktu dostávat méně často, zatímco skluzová vzdálenost by měla být malá, protože při nízké rychlosti bude skluzová vzdálenost přibývat velmi pomalu. Naměřená data pro skluzovou vzdálenost by šla dobře proložit také přímkou, vznikla by však nenulová skluzová vzdálenost pro nulovou rychlost, což fyzikálně nedává smysl.

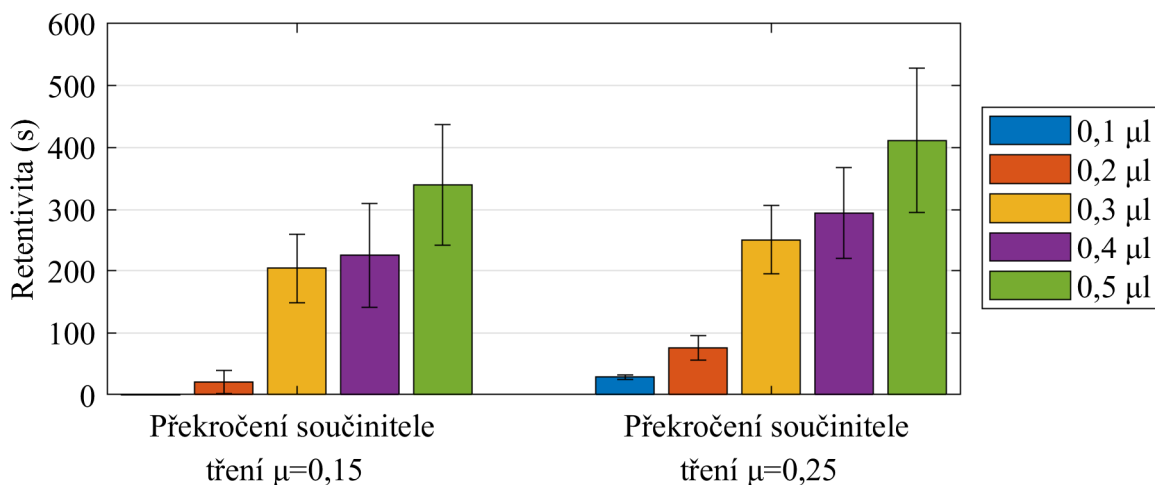


Obr. 5-17: Matematický model pro popis vlivu rychlosti na retentivitu a) vyjádřenou v sekundách, b) vyjádřenou ve skluzové vzdálenosti

### 5.3.4 Vliv množství maziva na retentivitu

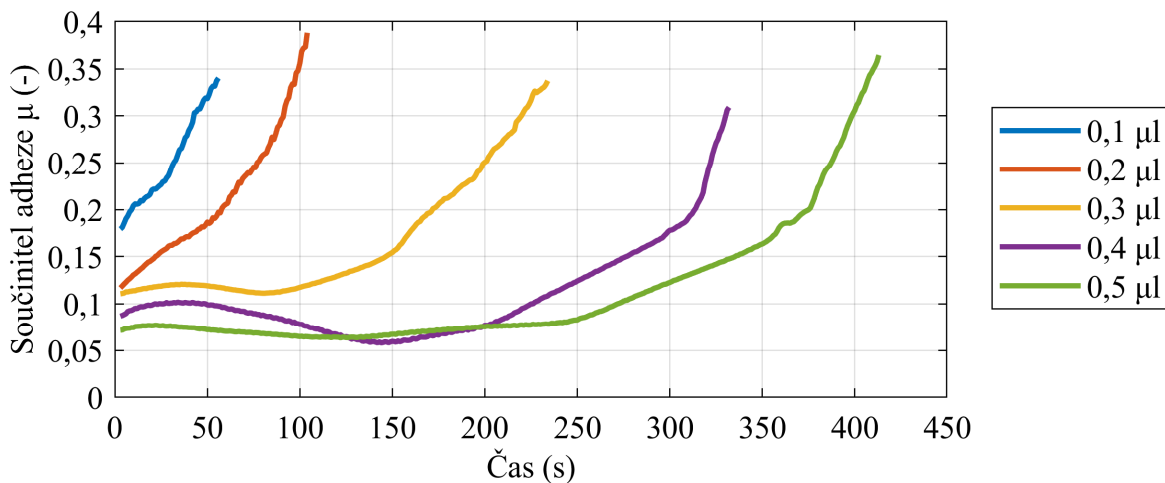
Posledním testovaným vlivem bylo množství aplikovaného maziva na retentivitu. Z naměřených dat je vidět (Obr. 5-18), že retentivita s množstvím aplikovaného maziva

roste. Je zde pozorovatelné, že pro 1  $\mu\text{l}$  nelze vyhodnotit čas při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$ , protože všechny testy měly počáteční součinitel adheze nad touto hodnotou.



Obr. 5-18: Vliv množství aplikovaného maziva na retentivitu

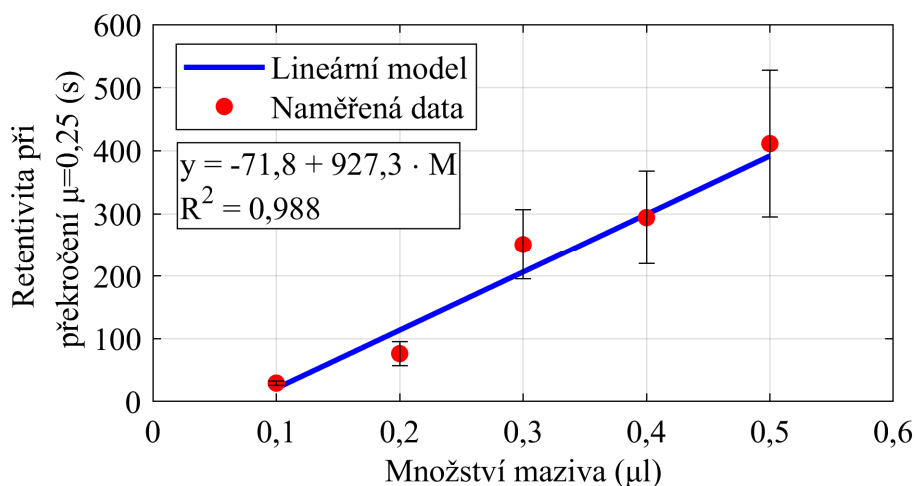
U časových testů pro různá množství maziva (Obr. 5-19) se ukazuje, že všechny tři identifikované fáze se v testech objevují od aplikace 0,3  $\mu\text{l}$  maziva. Množství maziva má největší vliv na fázi č. 1, kterou s rostoucím množstvím maziva významně prodlužuje. Fáze č. 2 u všech testů končí zhruba na hodnotě součiniteli adheze  $\mu = 0,18$ . Fáze č. 3 má pro všechny testy podobný sklon.



Obr. 5-19: Časové testy pro různá množství maziva

U matematické závislosti vlivu množství aplikovaného maziva na retentivitu (Obr. 5-20) lze pozorovat dobrý popis pomocí lineární závislosti. Lze si všimnout, že lineární závislost neprochází počátkem. Na grafu s časovými testy vlivu množství maziva (Obr. 5-19) lze pozorovat, že počáteční součinitel adheze s klesajícím množstvím aplikovaného maziva roste. Lze tedy předpokládat, že při aplikaci ještě méně maziva, by počáteční součinitel adheze dále rostl a dala by se nalézt limitní hodnota, při které by byla retentivita nulová. Nulovou

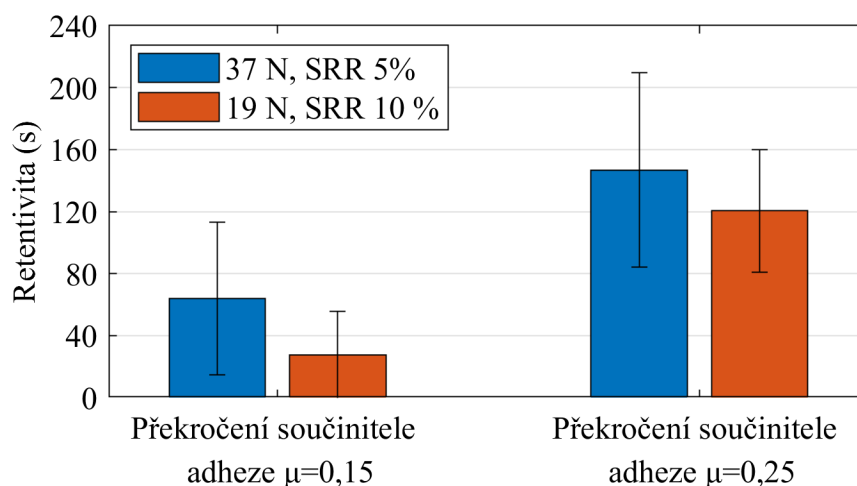
retentivitu lze pozorovat také u retentivity při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  při aplikaci 0,1  $\mu\text{l}$  maziva ze stejného důvodu (Obr. 5-18).



Obr. 5-20: Matematický popis vlivu množství aplikovaného maziva na retentivitu

### 5.3.5 Ekvivalence zatížení a skluzu

V grafu (Obr. 5-21) lze pozorovat, že snížení skluzu o polovinu (výchozí hodnoty jsou dle OFAT: 37 N, SRR 10 %) má zhruba stejný vliv na retentivitu jako snížení zatížení o polovinu. Snížení zatížení sice není přesně na polovinu, ale vzhledem k vysokým rozptylům nemá změna zatížení o 0,5 N významný vliv. Lze si všimnout, že snížení zatížení zvýšilo retentivitu o trochu méně, což je pozorovatelné zejména u překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$ . U překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  si lze všimnout, že chybová úsečka při testech 19 N, SRR 10 % nepřekročí chybovou úsečku u testu 37 N, SRR 5 %.

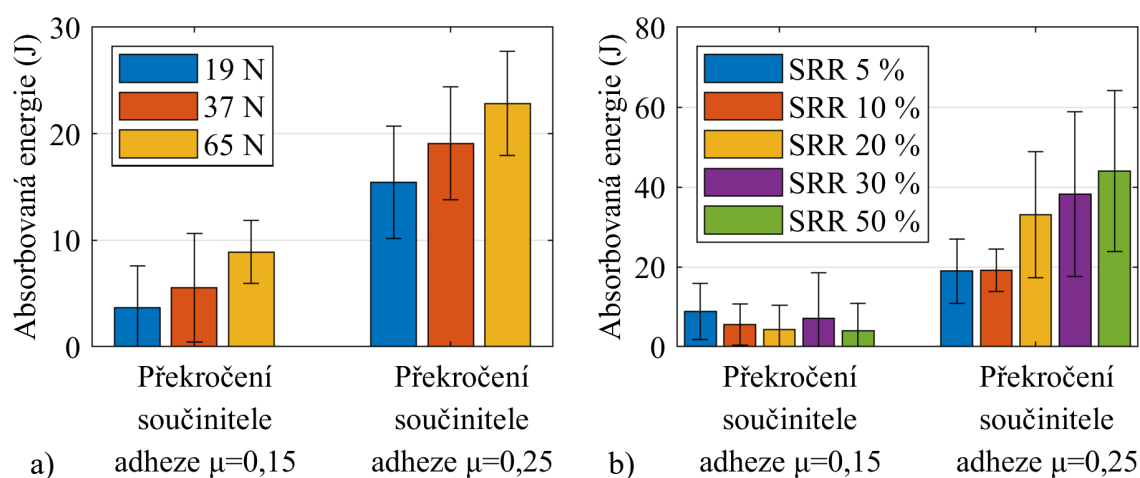


Obr. 5-21: Ekvivalence vlivu skluzu a zatížení



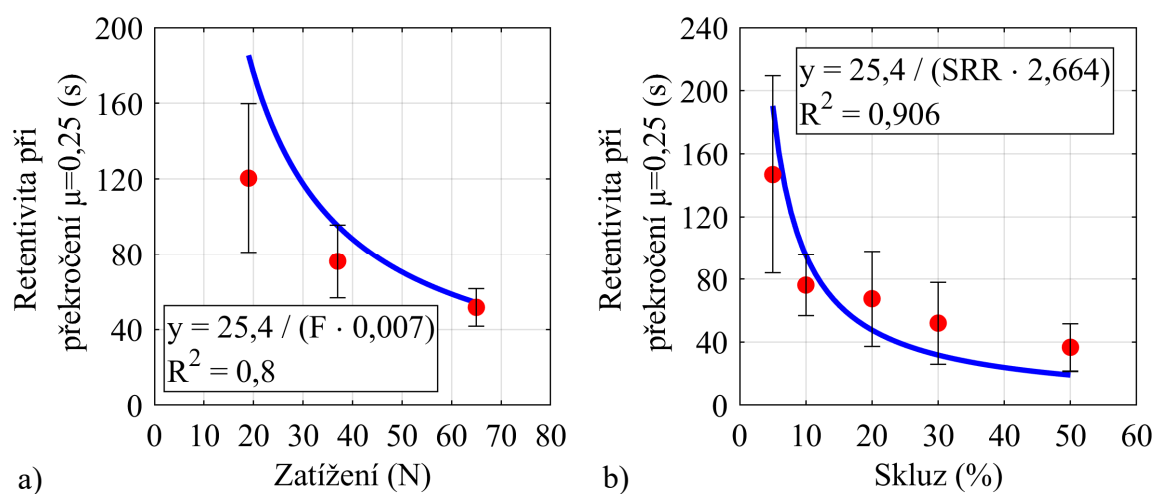
### 5.3.6 Množství absorbované energie mazivem

Vzhledem k tomu, že v předchozí kapitole (5.3.5) bylo ukázáno, že vliv zatížení a skluzu by mohl být ekvivalentní, bylo přistoupeno také k vyhodnocení absorbované energie, ve kterém figuruje parametr  $T\gamma$ . Postup vyhodnocení je popsán v kapitole 4.4.4. Z výsledků je vidět, že u zatížení roste absorbovaná energie pouze velmi mírně s rostoucím zatížením (Obr. 5-22a). Bylo by zde však možné stanovit jednu hodnotu absorbované energie, která by se dala použít pro všechny tři úrovně zatížení. Co se týče absorbované energie se zvětšujícím se skluzem je zde vidět (Obr. 5-22b), že u prvních dvou hodnot zůstává téměř konstantní, ale pro překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  začíná absorbovaná energie od skluzu 20 % významně růst. Zvětšuje se však také rozptyl výsledků, což by mohlo naznačovat, že průměrná absorbovaná energie by nemusela příliš růst.



Obr. 5-22: Energie absorbovaná mazivem a) pro různá zatížení, b) pro různé skluzu

Na grafech zobrazujících matematický model pro vliv zatížení (Obr. 5-23a) a skluzu (Obr. 5-23b) s využitím absorbované energie lze pozorovat, že tento model nepopisuje data



Obr. 5-23: Matematické modely s využitím absorbované energie a) vliv zatížení, b) vliv skluzu

nejlépe. Jsou zde vidět významné odchylky, zejména u vlivu a zatížení. Model pro vliv zatížení má koeficient determinace pouze 0,8. Je to způsobené tím, že model s využitím energie má společné koeficienty pro vliv zatížení i skluzu a tím je omezena možnost ideálního proložení obou parametrů. Vliv skluzu má koeficient determinace, který by se dal považovat za dostatečný.

## 5.4 Regresní model

K vytvoření regresního modelu byly využity výsledky získané z vyhodnocení závislosti jednotlivých vlivů. Pro vliv zatížení a skluzu nebyla využita metoda popisu s využitím absorbované energie pro lepší přesnost modelu. Veškeré omezení pro model tedy jsou:

- Vliv teploty je lineárně rostoucí a neprochází počátkem.
- Vliv vlhkosti je exponenciálně rostoucí.
- Vliv zatížení je mocninný se záporným mocnitelem.
- Vliv skluzu je mocninný se záporným mocnitelem.
- Vliv rychlosti je mocninný se záporným mocnitelem (vyhodnocováno bude v sekundách).
- Vliv množství maziva je lineární a neprochází počátkem.

Dalším omezením jsou bezrozměrné parametry, které jsou využity pro možnost přenosu modelu do jiných měřítek a případně i do reálného kontaktu. Tyto parametry jsou detailně popsány v kap. 4.4.5. S pomocí těchto poznatků byla vytvořena funkce s neznámými koeficienty, která respektuje tato omezení. Do regresní analýzy vstupuje tato funkce, všechny naměřené průměrné hodnoty, prvotní odhad koeficientů modelu a váhy. Výstupem je pak finální regresní model ( 22 ) se všemi koeficienty (Tab. 5-1).

$$f(x) = b_1 \cdot W^{b_2} \cdot SRR^{b_3} \cdot (b_4 + b_5 \cdot M) \cdot (b_6 + b_7 \cdot T) \cdot (b_8 + b_9 \cdot e^{b_{10} \cdot RH}) \cdot U^{b_8} \quad (22)$$

Koeficient determinace modelu při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$  je  $R^2 = 0,954$ , koeficient determinace modelu při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  je  $R^2 = 0,849$ . Ukazuje to na vhodné zvolení modelu. Model tedy vystihuje 95,4 % (respektive 84,9 %) variability dat. Důležité je podotknout, že vzhledem k tomu, že jsou prokládány průměrné hodnoty, koeficient determinace vystihuje pouze trendy v těchto průměrech. Není do tohoto parametru zahrnuta variabilita jednotlivých měření.

Model nelze přímo vykreslit ve 3D grafu, protože má šest nezávisle proměnných. Je tedy nutné vždy nastavit čtyři z proměnných jako konstantní. U grafů je vždy napsáno nastavení konstantních proměnných. Do grafů je vykreslen model a také průměrné naměřené hodnoty. Do 3D grafu nejsou z důvodu přehlednosti vykreslovány chybové úsečky. Chybové úsečky jsou zahrnuty pouze u následných 2D grafů, které zobrazují model s nastavenými pěti

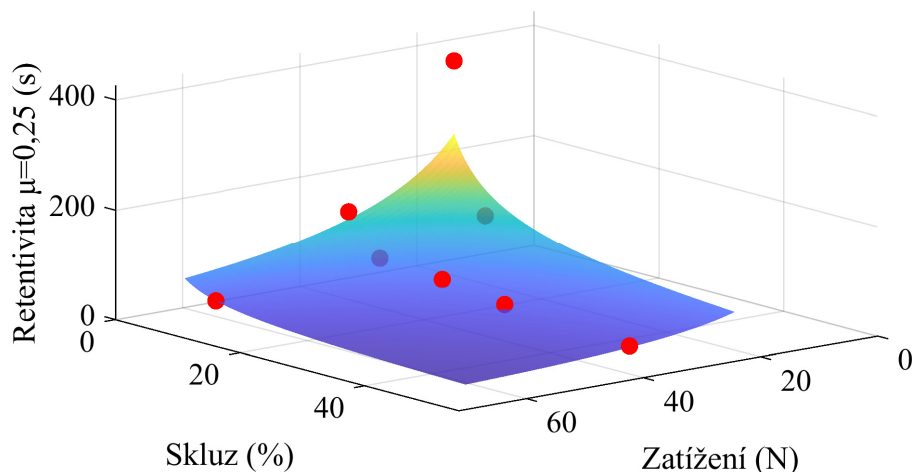
proměnnými jako konstantní (výchozí parametry dle OFAT – Tab. 4-5). Model je popisován na grafech pouze pro retentivitu při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$ . Je to z toho důvodu, že výsledky jsou reprezentativnější, pro přenos do reálné aplikace však bude důležitější model při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$ . Grafy pro retentivitu při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  jsou bez slovního popisu v příloze č.1.

Tab. 5-1: Souhrn parametrů modelů

Koeficienty	Překročení součinitele adheze $\mu = 0,15$	Překročení součinitele adheze $\mu = 0,25$
$b_1$	0,091	$4,641 \cdot 10^{-6}$
$b_2$	-0,401	-0,963
$b_3$	-1,012	-0,594
$b_4$	-0,507	-0,512
$b_5$	$7,624 \cdot 10^3$	$1,021 \cdot 10^4$
$b_6$	-0,65	-0,751
$b_7$	0,026	0,029
$b_8$	4,565	2,800
$b_9$	$6,514 \cdot 10^{-4}$	$1,130 \cdot 10^{-5}$
$b_{10}$	0,106	0,135
$b_{11}$	-0,210	-0,351

Model nelze přímo vykreslit ve 3D grafu, protože má šest nezávisle proměnných. Je tedy nutné vždy nastavit čtyři z proměnných jako konstantní. U grafů je vždy napsáno nastavení konstantních proměnných. Do grafů je vykreslen model a také průměrné naměřené hodnoty. Do 3D grafu nejsou z důvodu přehlednosti vykreslovány chybové úsečky. Chybové úsečky jsou zahrnuty pouze u následných 2D grafů, které zobrazují model s nastavenými pěti proměnnými jako konstantní (výchozí parametry dle OFAT – Tab. 4-5). Model je popisován na grafech pouze pro retentivitu při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,25$ . Je to z toho důvodu, že výsledky jsou reprezentativnější, pro přenos do reálné aplikace však bude důležitější model při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$ . Grafy pro retentivitu při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  jsou bez slovního popisu v příloze č.1.

Na prvním grafu (Obr. 5-24) lze vidět závislost retentivity na zatížení a skluzu. Je vidět, že model vystihuje všechna měření s relativně dobrou přesností. Lze si všimnout, že hodnotu s nejvyšší retentivitou neprokládá tak dobře jako ostatní data. To je způsobeno zahrnutím vah do modelu, které zajišťují, aby při regresní analýze byla rezidua brána poměrově k velikosti retentivity. To způsobuje, že model se snaží být co nejbližší datům procentuálně. U grafu zobrazující pouze vliv zatížení (Obr. 5-27a) je pozorovatelné, že model ukazuje vyšší hodnoty, než jsou naměřená data. U vlivu skluzu je proložení velmi dobré (Obr. 5-27b).



Konstanty:

$$M = 0,2 \mu\text{l}$$

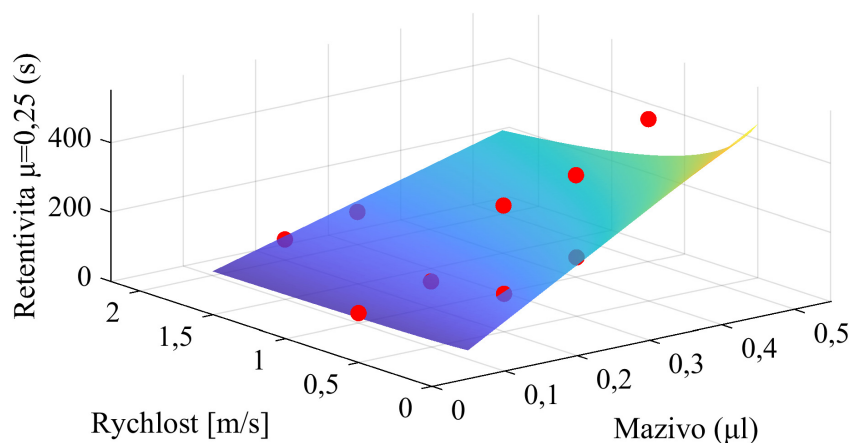
$$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$RH = 35 \%$$

$$v = 1 \text{ m/s}$$

Obr. 5-24: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv zatížení a skluzu

U vlivu aplikovaného množství maziva a rychlosti na retentivitu je vidět (Obr. 5-25), že zde platí to stejné, co bylo popisováno u předchozího grafu – vysoké hodnoty retentivity jsou prokládány méně přesně v absolutních hodnotách. To způsobuje neideální proložení závislosti množství maziva (Obr. 5-27c). Zároveň je zde pozorovatelné, že model vlivu rychlosti je v celém rozsahu vyšší než měřené hodnoty (Obr. 5-27d).



Konstanty:

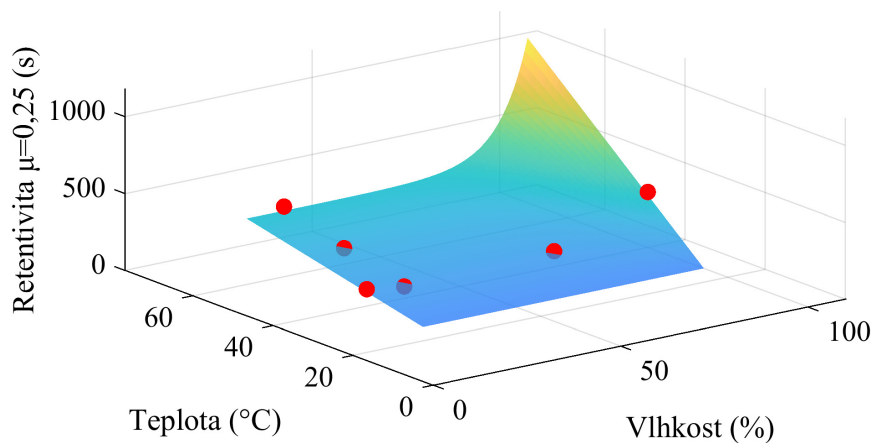
$$F = 37 \text{ N}$$

$$SRR = 10 \%$$

$$RH = 35 \%$$

$$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Obr. 5-25: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv maziva a rychlosti



Konstanty:

$$F = 37 \text{ N}$$

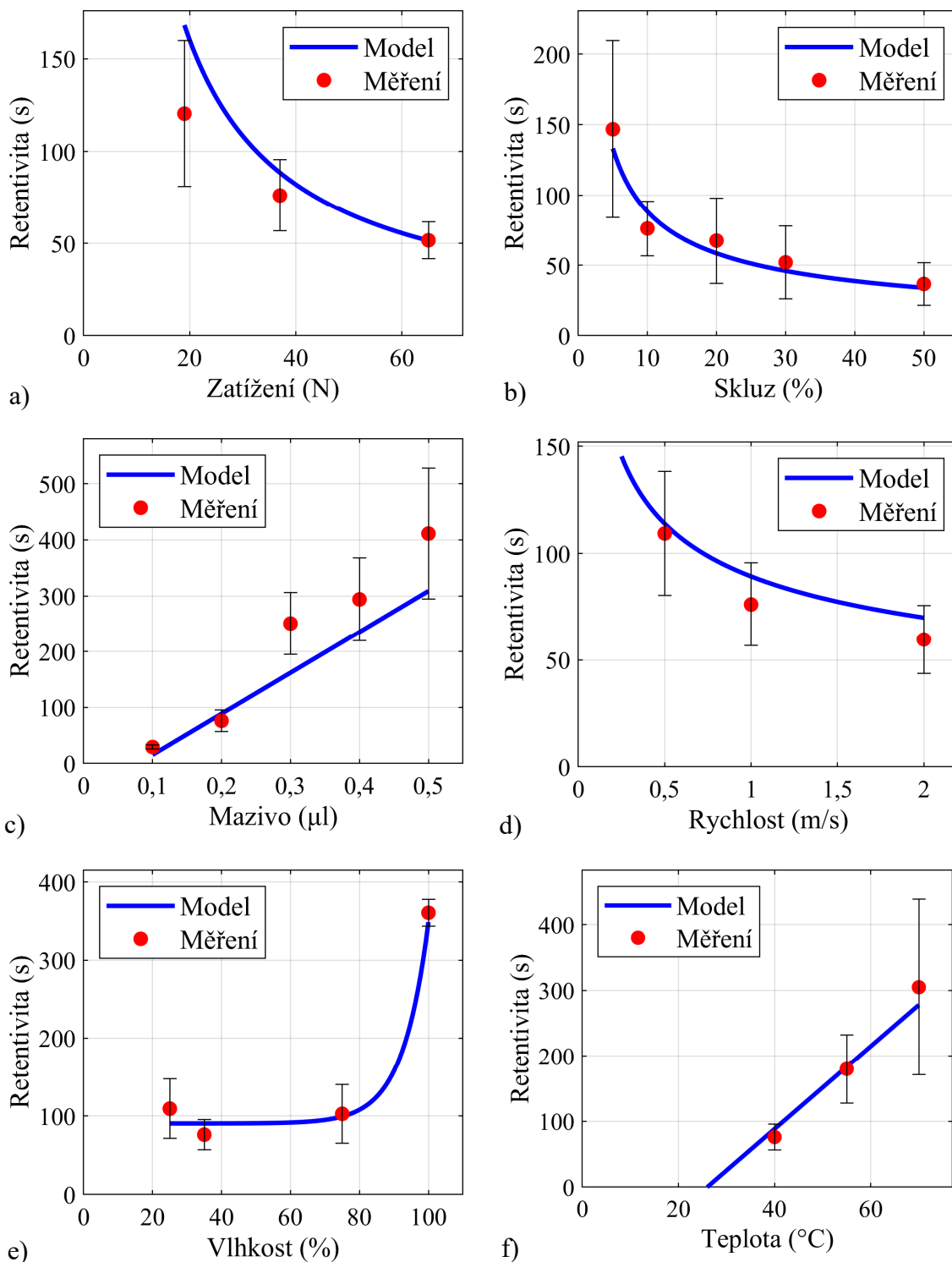
$$SRR = 10 \%$$

$$M = 0,2 \mu\text{l}$$

$$v = 1 \text{ m/s}$$

Obr. 5-26: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv vzdušné vlhkosti a teploty

U vlivu vlhkosti a teploty na retentivitu je vidět dobré proložení měřených hodnot (Obr. 5-26). Je zde však také pozorovatelné, že model predikuje velmi vysoké hodnoty retentivity pro vysoké teploty a vysokou vlhkost vzduchu. Na grafech jednotlivých vlivů je vidět dobré proložení u vlhkosti (Obr. 5-27e) i teploty (Obr. 5-27f).

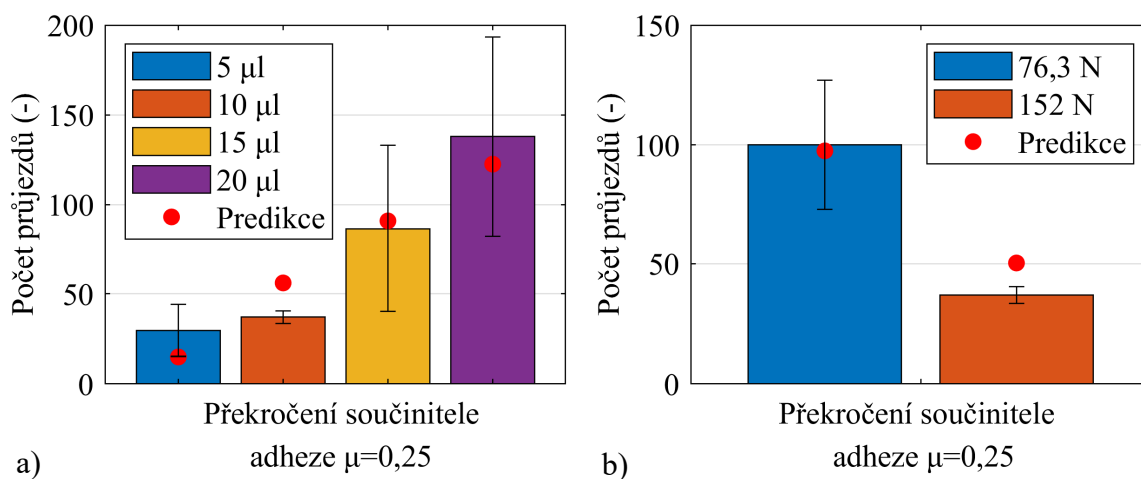


Obr. 5-27: Grafy závislostí pro jednotlivé vlivy. a) vliv zatížení, b) vliv skluzu, c) vliv množství maziva, d) vliv rychlosti, e) vliv vzdušné vlhkosti, f) vliv teploty

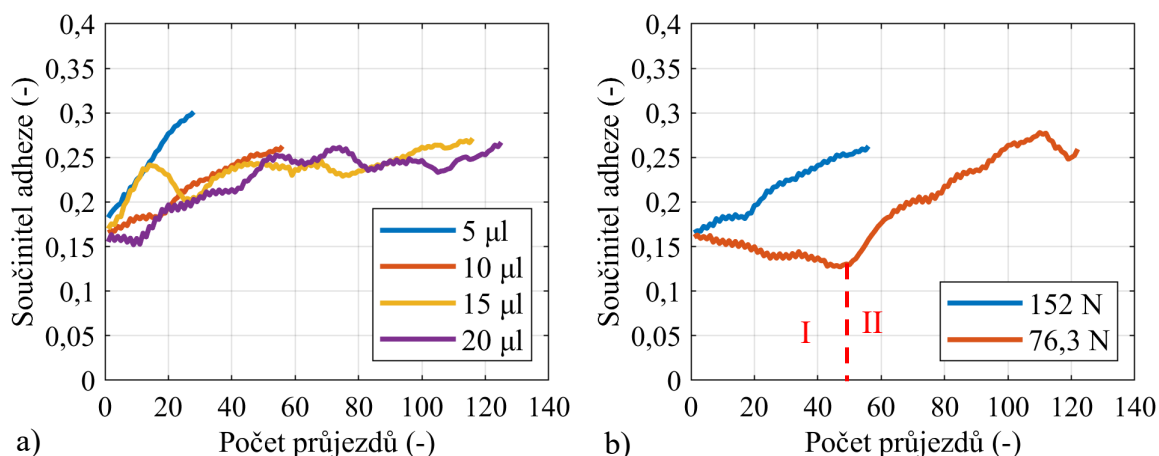
## 5.5 Ověření regresního modelu s pomocí traťového tribometru

Pro ověření přenositelnosti modelu do reálných podmínek byly provedeny experimenty na traťovém tribometru. Podmínky na traťovém tribometru sice neodpovídají přesně reálnému kontaktu, je tomu však mnohem blíže než zařízení MTM, na kterém byly prováděny hlavní experimenty.

Naměřené výsledky pro různá množství maziva a jejich predikce s pomocí modelu jsou vidět na Obr. 5-28a. Lze zde vidět, že model predikuje výsledky velmi dobře. Lze si všimnout, že model predikuje správně absolutní hodnoty i trend zvyšování. Dále byly provedeny experimenty i pro nižší zatížení (Obr. 5-28b). Zde lze vidět, že model při snížení zatížení predikuje retentivitu také velmi dobře.



Obr. 5-28: Měření retentivity na traťovém tribometru a predikce s pomocí modelu a) s různým množstvím maziva při zatížení 152 N, b) s různým zatížením při aplikaci 10  $\mu\text{l}$  maziva



Obr. 5-29: Vývoj součinitele adheze s počtem průjezdů při měření na traťovém tribometru a) s různým množstvím maziva při zatížení 152 N, b) s různým zatížením při aplikaci 10  $\mu\text{l}$  maziva

Dále byl vyhodnocen také nárůst součinitele adheze s počtem průjezdů. Je zde vidět (Obr. 5-29a), že u všech testů s různým množstvím maziva je poměrně podobný počáteční rychlý nárůst součinitele adheze, rozdíl pak nastává především u součinitele adheze okolo  $\mu = 0,2$ , kdy dochází k snížení rychlosti nárůstu součinitele adheze. Míra ovlivnění je závislá především na množství maziva. Na grafu s různým zatížením (Obr. 5-29b) je pozorovatelné, že při nižším zatížení jsou zde identifikovatelné dvě fáze – stabilní součinitel adheze (zde mírně klesá), která přejde do fáze nárůstu součinitele adheze.

## 6 DISKUZE

### 6.1 Interpretace výsledků

Důležité je podotknout, že veškeré diskuze uvedené v této kapitole jsou pouze částečně založeny na provedených experimentech. V experimentech totiž byla zjišťována kvantitativní změna pozorované veličiny a nebyly použité žádné metody, které by mohly objasnit příčiny této změny. Všechny diskuze týkající se mechanismů, které by to mohly způsobovat jsou tedy založené na přečtené literatuře a nelze je brát za plně platné. Pro ověření těchto diskuzí bude třeba provést časové testy retentivity na zařízení s interferometrií (zjišťování tloušťek filmu v průběhu experimentu), případně fluorescencí (zjišťování podílu složky zpevňovačla a základového oleje v kontaktu).

Lze si všimnout, že většina výsledků má poměrně velký rozptyl. Je to dáno tím, že aplikace maziva není perfektní a dochází tak k aplikaci o trochu jiného množství maziva. V literatuře se navíc uvádí, že u měření plastických maziv může docházet k vysokým rozptylům výsledků [53], což je způsobeno náhodným průchodem částic zpevňovačla plastického maziva. Dále je důležité okomentovat směrodatné odchylky, které jdou do záporných hodnot. Záporná retentivita je samozřejmě nemožná, ale nulová retentivita možná je a znamená, že test začal na vyšším než vyhodnocovaném součiniteli adheze. Směrodatné odchylky jsou do záporných hodnot lze interpretovat tak, že nějaké procento testů může začít na vyšší hodnotě součinitele adheze, než je vyhodnocovaná pro retentivitu, a tím pádem budou mít tyto testy retentivitu nulovou.

#### 6.1.1 Fáze testu retentivity

Změřené fáze testu retentivity se drobně liší od fází změřených od jiných autorů. Prvním důvodem je limitace senzoriky MTM, kvůli čemuž nemohly být testy ponechány až do suchých hodnot součinitele adheze ( $\mu = 0,7-0,8$  pro skluz  $> 5\%$ ) a nebyly tedy pozorovány S-křivky, které jsou popsány v literatuře [36, 37]. Ve výsledcích v této práci je zachycena pouze první polovina S-křivky (Obr. 5-1). V jiných pracích bylo identifikováno, že průběh by měl být exponenciální, jedná se však také pouze o první část již zmíněné S-křivky [37, 38]. Z výsledků v této práci se však zdá, že jednotlivé fáze jsou spíše lineární s relativně ostrým přechodem mezi nimi (Obr. 5-1). Domnívám se, že je to způsobené měřítkem a konfigurací kontaktu. Zmíněné práce [36–38] totiž měřily na zařízeních v konfiguraci twin-disk. Jediná práce, zabývající se retentivou v ball-on-disk konfiguraci je od Galase [4], ve které lze také pozorovat spíše lineární fáze. Měřil však modifikátor tření na olejové bázi, nikoliv plastické mazivo.



Gutsulyak [38] ve své práci také komentoval jednotlivé fáze, přičemž se domníval, že různé fáze znamenají různé režimy mazání. Stabilní fázi spojil s elastohydrodynamickým (EHD) mazáním, prudký nárůst pak asocioval se smíšeným mazáním a poslední fázi S-křivky pak přechodem do mezního mazání. Dle propočtů tloušťky filmu dle rovnice Hamrock – Dowson [20] by v mém měření nemělo nastávat plné oddělení povrchů kapalným filmem a celé testy by tak měly být ve smíšeném režimu mazání, přesto byla pozorována stabilní fáze testu. Predikce dle Hamrock – Dowson [20] je však platná pouze pro olej a v literatuře je ukázáno [12, 13, 53], že plastické mazivo může, avšak nemusí korespondovat s výsledky dle rovnice Hamrock – Dowson. Může to tedy poukazovat na to, že stabilní fáze nemusí souviset s hydrodynamickým mazáním (plně oddělené kontaktní povrchy).

Otázkou dále zůstává, co stojí za fází č. 2 ve výsledcích prezentovaných v této práci (Obr. 5-1). Mohlo by se jednat o hromadění částic opotřebení, protože v literatuře při měření modifikátorů tření na olejové bázi [4, 34] je pozorovatelná fáze s pozvolným nárůstem součinitele adheze v čase. Modifikátory tření obsahují kovové částice, které se v kontaktu mohou chovat podobně jako částice opotřebení při aplikaci plastického maziva. Vysvětlovalo by to také, proč při experimentech na twin-disku [37, 38] tato fáze nebyla pozorována – částice opotřebení jsou příliš malé na to, aby měly na této větší kontaktní oblasti nějaký vliv na součinitel adheze.

## 6.1.2 Vliv klimatických podmínek na retentivitu

### Vliv teploty na retentivitu

U vlivu teploty bylo ukázáno, že se zvyšující se teplotou vzrostla retentivita (Obr. 5-2). Bylo však nutné dávat pozor na to, aby nedošlo k ohřátí maziva nad horní limit teplotního rozsahu maziva (Obr. 5-2). Celková teplota kontaktních těles sice zůstávala při přehřívání konstantní, ale mohlo docházet k lokálnímu přehřívání maziva. Otázkou však zůstává, zda jsou výsledky vlivu teploty přenositelné do reálného kontaktu, nebo zda to platí pouze pro konfiguraci ball-on-disk. Hypotézou totiž bylo, že teplota ovlivní viskozitu základového oleje, a tím negativně ovlivní retentivitu dle výzkumů provedených pro různé viskozity [39, 40]. Ukázalo se, že to zde neplatí. Lze se domnívat, že to může být způsobeno tím, že zvýšení teploty zvýší schopnost maziva vracet se po průjezdu kuličky zpět do dráhy.

Výsledky korespondují s literaturou, kde byl zkoumán vývoj součinitele adheze v čase při aplikaci plastického maziva na vzorky s drsným povrchem [22] a z výzkumu vlivu teploty na vývoj součinitele adheze v čase [21]. U druhé zmíněné práce je však potřeba brát korespondenci s určitou opatrností, protože v mé práci nebyly měřeny nízké teploty.

Mohlo by zde docházet k ovlivnění konzistence maziva, díky čemuž se mazivo bude lépe vracet do kontaktu, nebo zde může docházet ke zvýšení „oil bleeding“, což by způsobilo pouze vracení oleje do kontaktu. Problematika „oil bleeding“ je však složitá a je většinou

funkcí času. Vzhledem k tomu, že experimenty s „oil bleeding“ běžně trvají několik hodin [12], zatímco experimenty v této práci trvaly řádově minuty, pak je složité vyvozovat nějaké závěry. Stejně je to s teplotní degradací maziva, která se také měří v dlouhých experimentech a je tedy otázkou, zda by to mohlo mít vliv i v takhle krátkém testu. Na základě toho, že výsledky z této práce korespondují s výsledky z měření oleje [21], pak to ukazuje spíše na to, že by se mělo do kontaktu více vracet mazivo jako celek.

V časových testech lze pozorovat, že ovlivněná je především třetí fáze testu (prudký nárůst součinitele adheze), což by mohlo indikovat vyšší míru navrácení maziva do oběžné dráhy a tím zpomalení nárůstu součinitele adheze.

### Relativní vlhkost vzduchu

U relativní vlhkosti vzduchu bylo zjištěno, že nedochází k významnému ovlivnění retentivity, pokud nedochází ke kondenzaci vlhkosti, což je v souladu s literaturou [34]. Drobný pokles retentivity je sice vidět u snížení vlhkosti vzduchu na 25 %, ale tento pokles je v rámci statistické chyby. Kondenzace způsobila nárůst retentivity. Je však důležité poznamenat, že tento výsledek je platný pouze pro tento konkrétní typ maziva, protože Cyriac [33] ukázal, že voda v kontaktu ovlivňuje každé mazivo jinak – u některých maziv zlepšuje vlastnosti, u některých vlastnosti zhoršuje. Otázkou však zůstává mechanismus ovlivnění retentivity. Na časovém testu (Obr. 5-7) lze pozorovat, že dochází k významnému poklesu počátečního součinitele adheze. První fáze testu je krátká, ale součinitel adheze je menší než  $\mu < 0,05$  (nebylo pozorováno v žádném jiném experimentu). To by mohlo indikovat, že v první fázi se voda přímo podílí na mazání kontaktu. Následuje dlouhá, ale velmi pozvolná fáze č. 2, což by mohlo indikovat, že voda ovlivňuje navrácení maziva do kontaktu [33, 34], ale postupně dochází k vysoušení vody a snižování tohoto efektu. Bude však nutné provést další experimenty s možností pozorování kontaktu, aby mohly být tyto diskuze potvrzeny.

### 6.1.3 Vliv provozních parametrů

#### Vliv zatížení

U vlivu zatížení bylo ukázáno, že se zvyšujícím se zatížením klesá retentivita. Tento výsledek souhlasí s výsledky při měření modifikátoru tření na vodní bázi [36], s výsledky při měření plastického maziva za čistě skluzového kontaktu [35] i s výsledky z oblasti valivých ložisek [12]. Ukázalo se, že vliv zatížení lze modelovat pomocí mocninné funkce se záporným mocnitelem. Modelováním s pomocí této funkce dostáváme nekonečnou retentivitu při nulovém zatížení, což dává fyzikálně smysl. Zároveň retentivita nikdy nemůže poklesnout do záporných hodnot.

Z časových testů (Obr. 5-10) lze pozorovat, že zatížení příliš neovlivňuje počáteční součinitel adheze, ani rychlost nárůstu součinitele adheze ve druhé i třetí fázi. Významně je

však ovlivněna doba trvání druhé fáze testu. Dle předchozích diskuzí (kap. 6.1.1) by to mohlo znamenat, že při nižším zatížení je vyšší tloušťka mazacího filmu, a proto trvá delší dobu, než částice opotřebení zcela zaplní kontakt. Opět je však nutné zmínit, že pro potvrzení bude nutné provést další experimenty.

#### Vliv skluzu

U vlivu skluzu se ukázalo, že se zvyšujícím skluzem se snižuje retentivita. Souhlasí to s výsledky z literatury [4, 36, 37]. Ukázalo se, že vliv skluzu lze modelovat pomocí mocninné funkce se záporným mocnitelem. Při nulovém skluzu pak dostáváme nekonečnou retentivitu, což je pravda pouze částečně. Při nulovém skluzu totiž součinitel adheze nemůže nikdy narůst (viz. trakční křivka Obr. 2-3), ale z valivých ložisek víme, že i při nulovém skluzu je životnost maziva omezená [12]. Jsou to však miliony cyklů, a to pro aplikaci tohoto modelu do reálných podmínek není podstatné.

U časových testů vlivu skluzu lze pozorovat, že je ovlivněn především počáteční součinitel adheze, přičemž následný průběh je potom velice podobný u všech testů. To by mohlo být způsobeno tím, že při vyšším skluzu je v kontaktu vyšší skluzová rychlost a tím se zvyšuje pravděpodobnost, že u výstupku povrchu na disku dojde ke kontaktu s výstupkem na povrchu kuličky.

#### Ekvivalence vlivu zatížení a skluzu

Z grafu (Obr. 5-21) lze vidět, že vliv skluzu a zatížení je ekvivalentní v rámci statistické odchylky. Bylo to však ukázáno pouze na dvou testech. Vzhledem k tomu, že se parametr  $T\gamma$  v kolejové dopravě používá pro hodnocení režimu opotřebení [1, 7–10], lze předpokládat, že by se dal využít i v rámci odhadu životnosti maziva. Následné predikce s využitím absorbované energie však ukázaly nepřilíš dobrou přesnost.

#### Absorbovaná energie

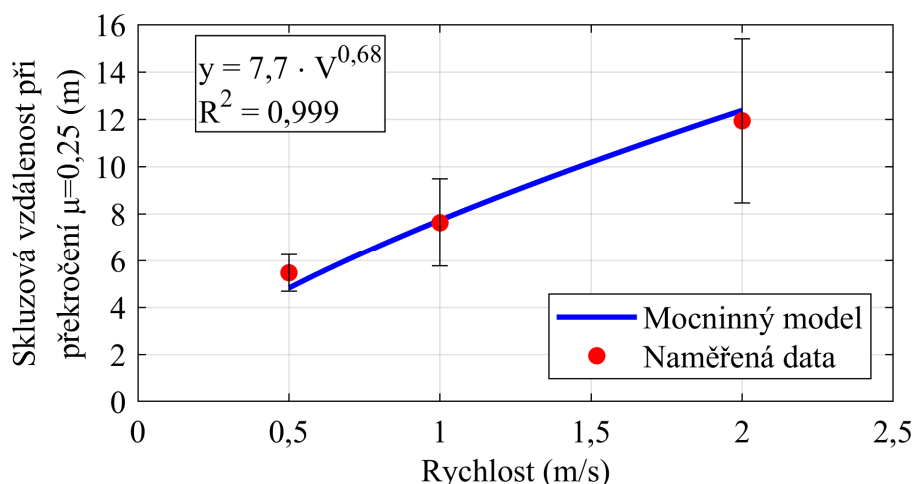
Ukázalo se, že v omezené míře je použitelné modelování s pomocí energie absorbované mazivem. Odchylky, které zde nastaly si vysvětlují tímto:

- Nedokonalé určování absorbované energie mazivem. Je náročné přesně určit podíl zatížení přenášeného mazivem a kontaktem povrchů těles, navíc pokud v kontaktu dochází k hladovění. Ukazuje se však, že i jednoduchý model může být relativně přesný.
- V kontaktu jsou přítomny částice opotřebení, které budou ovlivňovat energii absorbovanou mazivem.

Porovnání s literaturou nelze udělat, protože se tímto způsobem vyhodnocování retentivity zatím nikdo nezabýval. V následujícím výzkumu by mohl být výpočet absorbované energie zpřesněn a doplněn například i o vliv rychlosti nebo přepočten na jednotkové množství maziva a tím obsáhnout i vliv maziva.

## Vliv rychlosti

U vlivu rychlosti se ukázalo, že záleží na způsobu vyhodnocování retentivity. Pokud je retentivita definována v čase, pak se zvyšující se rychlostí retentivita klesá. Pokud je retentivita vyhodnocována ve skluzové vzdálenosti (ekvivalent počtu zátěžných cyklů), pak retentivita roste. Ukazuje se tedy, že zvyšování rychlosti vede k mazání po delší skluzovou vzdálenost. Tyto zjištění korespondují s výsledky z literatury [35]. Může to být způsobeno tím, že rychlost významně ovlivňuje tloušťku mazacího filmu. V časových testech (Obr. 5-16b) při vyhodnocování ve skluzové vzdálenosti lze pozorovat prodlužování druhé fáze testu. Dále je také vidět rozdílná rychlost nárůstu adheze v čase ve třetí fázi. To by mohlo souviset s tloušťkou mazacího filmu tak, že trvá delší dobu, než se kontakt zaplní částicemi opotřebenými. Pokud jsou data průměrné skluzové vzdálenosti proložena mocninnou funkcí s mocnitelem dle rovnice Hamrock – Dowson [20], lze zde vidět dobrou korelaci (Obr. 6-1). Je důležité zmínit, že není naměřeno velké množství bodů, a proto jak toto proložení, tak nejlepší proložení v kapitole výsledků (Obr. 5-17b) jsou velmi dobré. Jsou to však zatím pouze korelace (nikoliv kauzalita) a bude nutné to ověřit s pomocí jiných měřicích zařízení v následujícím výzkumu.



Obr. 6-1: Proložení dat rychlosti funkcí pro tloušťku mazacího filmu

## Vliv množství maziva

U vlivu množství maziva byl ukázán nárůst retentivity s rostoucím množstvím aplikovaného maziva. Ukázalo se také, že množství maziva nejvíce ovlivňuje počet fází, které v testu budou. Všechna tato zjištění korespondují s literaturou [6, 35–37]. Dále bylo zjištěno, že množství maziva lze modelovat pomocí lineární závislosti, přičemž lineární závislost nezačíná v počátku. To naznačuje, že je potřeba nějaké určité množství maziva, aby bylo možné získat součinitel adheze pod určitou hodnotou. Ukazuje se to i na počátečním součiniteli adheze, který s klesajícím množstvím maziva významně roste (Obr. 5-19). Při testech nebyla nalezena horní mez množství maziva, kdy by přestala platit lineární závislost. Pokud by se ukázalo, že rychlost opravdu ovlivňuje retentivitu počáteční tloušťkou mazacího filmu, pak se lze domnívat, že by zde měl být limit maziva, při kterém dojde

k vytlačení nadbytečného maziva z kontaktu a počáteční podmínka pro retentivitu bude plně zaplavený kontakt. V literatuře bylo totiž ukázáno [17], že při vyšším množství aplikovaného maziva nedochází k dalšímu navyšování tloušťky filmu, ale dojde k vytlačení přebytečného maziva mimo kontakt. U časových testů lze vidět (Obr. 5-19), že množství maziva významně ovlivňuje první fázi testu a počáteční součinitel adheze. To ukazuje na to, že množství maziva ovlivňuje především míru hladovění kontaktu.

#### 6.1.4 Regresní model

Regresní model byl vytvořen na základě naměřených dat. Při analýze jednotlivých vlivů se ukázalo, že:

- Vliv teploty je lineárně rostoucí a neprochází počátkem.
- Vliv vlhkosti je exponenciálně rostoucí.
- Vliv zatížení je mocninný se záporným mocnitelem.
- Vliv skluzu je mocninný se záporným mocnitelem.
- Vliv rychlosti je mocninný se záporným mocnitelem (pokud je vyhodnocováno v sekundách).
- Vliv množství maziva je lineární a neprochází počátkem.

Vliv zatížení, skluzu, rychlosti a množství maziva se ukázalo, jako dobře predikované, jednotlivé podmodely splňují všechny fyzikální předpoklady. U vlivu vlhkosti je modelováno tak, že nad 75 % relativní vlhkosti již dochází k nárůstu retentivity. To však není podloženo experimentálními daty a předpokladem je spíše to, že zvýšení retentivity způsobuje přítomnost vody (v podobě kondenzátu). Bylo by tedy do budoucna vhodné v modelu nahradit vzdušnou vlhkost za množství vody v kontaktu. U teploty je pozorována lineárně rostoucí závislost, testy však ukázaly, že při vyšší teplotě, než je použitelnost maziva dochází k výraznému poklesu retentivity (Obr. 5-3). To není do modelu zahrnuto a při využívání modelu je potřeba s tím počítat. Dále model teploty předpokládá nulovou retentivitu při teplotě zhruba 25 °C. To nejspíš nebude úplně pravdivé, a proto musí být důrazně zmíněno, že model teploty je platný pouze v rozsahu, který je podpořen experimentálními daty (40–70 °C).

Dále model předpokládá velmi vysokou retentivitu při vysoké vlhkosti vzduchu a vysoké teplotě. To také není podloženo experimentálními daty, protože konfigurace a způsob testování neumožňovaly testování těchto dvou vlivů zároveň.

#### 6.1.5 Ověření modelu s pomocí traťového tribometru

Díky tomu, že v modelu jsou jednotlivé parametry vlivů vytvořeny pomocí bezrozměrných parametrů, je možné finální model přenést do větších měřítek. To bylo ověřeno pomocí traťového tribometru. Traťový tribometr pracuje za jiných skluzových podmínek, za jiného

množství maziva, za jiných zatížení (podobných kontaktních tlaků), za jiné teploty a za jiné rychlosti. Přesto se predikce s pomocí modelu shoduje s výsledky z traťového tribometru velice dobře (Obr. 5-28). Na časových průbězích (Obr. 5-29) je však pozorovatelné, že při vyšším zatížení se časové průběhy a fáze v testu neshodují s časovými průběhy z MTM. Při nižším zatížení by se však dalo říct, že zde je pozorovatelná nějaká podobnost (fáze č. 1 a fáze č. 2). Tato zjištění by tedy mohla implikovat, že časový průběh může být závislý na konfiguraci kontaktu.

### 6.1.6 Limitace práce a naznačení dalšího výzkumu

Důležité je na začátek této kapitoly zmínit, že tato práce vznikla za účelem využití výsledků pro vývoj digitálního dvojčete a mazacího algoritmu. Z toho důvodu je nutné zmínit několik poznatků, které je nutné při implementaci mít na paměti.

Hlavní limitací této práce je, že vše bylo testováno pouze v laboratorních podmínkách. Zejména je důležité podotknout, že povrchy kontaktních těles byly vždy dokonale očištěné s pomocí acetonu. To v reálných podmínkách určitě nebude a bude nutné to zohlednit. Někteří autoři však ve svých pracích neměly s aplikací svých zjištění do reálných podmínek problém [25, 36].

V modelu jsou zahrnuté pouze bezrozměrné parametry popisující eliptickou kontaktní oblast. To je sice v pořádku pro implementaci do reálných podmínek, v případě ověřování výsledků s využitím měřicího zařízení s liniovým kontaktem (twin-disk) bude nejspíše nutné přepracovat bezrozměrné parametry. Dále do modelu není zahrnut bezrozměrný parametr materiálu  $G$  (viz. model Hamrock – Dowson [20]). To způsobuje, že do modelu není zahrnut tlakově viskozitní koeficient, který popisuje chování maziva při vysokých kontaktních tlacích. Je to kvůli tomu, že v této práci bylo měřeno pouze jedno mazivo, a nebylo tedy možné tento parametr zahrnout.

Dále je nutné podotknout omezené rozsahy jednotlivých parametrů. Zatímco skluz a rychlost jsou měřeny v rozsahu dostatečném pro reálnou aplikaci, zatížení není. Zatížení je měřeno pouze do 1,2 GPa z důvodu dostupných měřicích zařízení na Ústavu Konstruování. Teplota byla měřena od základní teploty do horní teploty pro limit použitelnosti plastického maziva. Otázkou však stále zůstávají nízké teploty. Důležité je také zmínit, že teploty v kontaktu okolku mohou snadno překročit horní limit použitelnosti maziva. Dále je důležité zmínit, že v této práci byla měřena pouze vzdušná vlhkost, zatímco na reálné kolejnici se mohou vyskytnout srážky v různém množství. Proto by bylo vhodné v dalším výzkumu změřit vliv množství aplikované vody do kontaktu, nízké teploty a širší rozsah zatížení, pokud to bude na některým z dostupných zařízení proveditelné.

Dále by měl proběhnout také výzkum vlivu drsnosti povrchu na retentivitu. V literatuře to již bylo částečně řešeno [22, 37], ale v této práci to nebylo zahrnuto. Vliv drsnosti povrchu by pak pravděpodobně neměl figurovat jako samostatný člen, ale měl by být součástí některých bezrozměrných parametrů (rychlost, množství maziva). Otázkou však zůstává, jak při implementaci zjišťovat reálnou drsnost povrchu kola a kolejnice. Pokud je drsnost spíše stejná v různých místech kolejnice, pak by bylo možné model pouze korigovat opravnými součiniteli.

Důležité je také zmínit, že při všech experimentech na MTM byly hodnoty parametrů udržovány na konstantní hodnotě. V reálné aplikaci se však můžou rychle měnit (rychlost, zatížení). Pokud by tedy mezi aplikacemi maziva došlo ke změně parametrů, pravděpodobně bude nutné na tuto změnu reagovat posunutím další aplikace maziva. Je možné, že tento model pro tyto účely nemusí být dostačující a bude nutné jej nějakým způsobem upravit.

Poslední, co je nutné zmínit, je typ měření, který byl v této práci prováděn. V práci bylo prováděno měření retentivity maziva, což znamená opakované namáhání maziva. V reálných podmínkách však dochází k ulpívání maziva z kola na kolejnici a následné zatěžování dalším dvojkolím a odběr části maziva tímto dvojkolím. Z toho vyplývá, že v této práci byl měřen pouze jeden ze dvou mechanismů úbytku maziva na reálné kolejnici. Druhý mechanismus (ulpívání na kolejnici a redistribuce na další dvojkolí) je potřeba před aplikací do reálných podmínek zjistit a implementovat společně s modelem zjištěným v této práci.

#### Ověření kvality práce dle Watsona [50]

V této kapitole je shrnuto splnění požadavků na kvalitní vědeckou práci dle specifikací Watsona [50]. Dobře se podařilo splnit omezení měřených veličin. Měřených veličin sice bylo hodně (výchozí nastavení měřicího zařízení), všechny nepotřebné však byly ihned v prvním kroku zpracování dat vyřazeny a nebyl na ně brán ohled.

Nebyla stanovena žádná požadovaná velikost změny sledované veličiny, protože před samotným měřením nebylo možné určit, v jakých hodnotách měření se budou výsledky pohybovat. Vzhledem k velkému rozptylu v měřených výsledcích byl za významný vliv považován, pokud byl vidět posun jak v průměrné hodnotě, tak v rozptylu.

Požadavek méně proměnných za cenu více opakování byl splněn částečně. Proměnných je v této práci zkoumáno hodně, ale všechny měřené hodnoty jsou měřeny alespoň třikrát. Pokud by však bylo zvoleno méně proměnných, mohlo být měřeno více kombinací parametrů.

Pořadí experimentů bylo randomizováno vždy v rámci jednoho měřicího dne. Zaslepení experimentů být provedeno nemohlo, protože vždy muselo být aplikováno mazivo ručně a tím mohlo docházet k nevědomému ovlivňování aplikovaného množství maziva.

Pro vyhodnocení výsledků byl vytvořen skript v programu MATLAB, který u všech testů vyhodnotil překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  a  $\mu = 0,25$  a následně u všech kombinací měřených parametrů vyhodnotil průměr, rozptyl a směrodatnou odchylku.

Nebyly provedeny nejdříve všechny experimenty a následně zpracování dat. Posledním bodem je provedení experimentů ve více měřítkách. To provedeno bylo, ale ne pro všechny parametry, protože zařízení (traťový tribometr) neumožňovalo všechny parametry ověřit.

Vyhodnocení (Tab. 6-1) proběhlo tak, že pokud byl bod splněn zcela (✓), pak byl započten bod, pokud částečně (✓), pak bylo započteno půl bodu a pokud nebyl splněn (✗), nebylo započteno nic. Následně bylo vyhodnoceno, kolik procent z celkového možného počtu bodů bylo splněno. Výsledek je 50 %. Pokud je bráno v potaz, že by bylo v nějakých případech velmi náročné splnit požadavky (zaslepení experimentů, nejdříve provést všechny testy a následně vyhodnocení), pak tento výsledek lze hodnotit pozitivně.

Tab. 6-1: Vyhodnocení kvality vědecké práce

Parametr	Hodnocení
Omezení měřených veličin	✓
Požadovaná velikost změny sledované veličiny	✗
Méně proměnných za cenu více opakování	✓
Randomizace pořadí	✓
Zaslepení testů	✗
Automatická analýza výsledků	✓
Nejdříve všechna měření, následně zpracování	✗
Více měřítek experimentů	✓
<b>CELKEM</b>	<b>50 %</b>

## 6.2 Verifikace hypotéz

### 6.2.1 Hypotéza č.1 – Vliv teploty

**H1:** Se zvyšující se teplotou se bude snižovat retentivita.

**Hypotéza pro vliv teploty byla ZAMÍTNUTA.** Předpokladem pro vystavení hypotézy bylo, že teplota ovlivní viskozitu základového oleje, přičemž vliv viskozity základového oleje na retentivitu byl již popsán v literatuře a na základě toho jsem předpokládal pokles retentivity se zvýšenou teplotou. Při zvýšení teploty však dochází k nárůstu retentivity.



Detailnější popis je poskytnut v kapitole 6.1.2. Nové hypotéza tedy cílí na ověření výsledku na jiných zařízeních a na mechanismus ovlivnění retentivity:

**NH1:** Zvýšení teploty způsobí nárůst retentivity i na experimentálních zařízeních s jinou konfigurací kontaktních těles.

**NH2:** Zvyšující teplota způsobí vyšší míru návratu maziva do dráhy kontaktu po průjezdu kontaktního tělesa.

## 6.2.2 Hypotéza č.2 – Vliv vlhkosti

**H2:** Zvyšující se vlhkost nebude mít vliv na retentivitu až do momentu, kdy bude nastávat kondenzace vlhkosti na kontaktních tělesech.

**Tato hypotéza byla POTVRZENA.** Ukázalo se, že tento vliv na retentivitu je, že po kondenzaci se retentivita významně zvýší. Ukázalo se tedy, že v kontaktu nepřevládnu hydrofobní vlastnosti plastického maziva. Naopak plastické mazivo se s vodou buď smísí, nebo ji absorbuje a zlepší mazací vlastnosti. Detailnější vysvětlení je poskytnuto v kapitole 6.1.2.

## 6.2.3 Hypotéza č.3 – Vliv zatížení a skluzu

**H3:** Se zvyšující se vykonanou prací třecích sil se bude úměrně snižovat retentivita.

**Hypotéza byla ČÁSTEČNĚ POTVRZENA.** Ukázalo se, že ekvivalence zatížení a skluzu platí pouze v omezené míře. Použitelný tento způsob vyhodnocování je, avšak je nutné dobře určit poměr energie absorbované mazivem a kontaktem dvou povrchů. Není možné tímto přístupem dosáhnout nejlepších výsledků. Detailnější popis je poskytnut v kapitole 6.1.3.

## 6.2.4 Hypotéza č.4 – Vliv rychlosti

**H4:** Se zvyšující se rychlostí se bude úměrně zvyšovat retentivita vyjádřená ve skluzové vzdálenosti.

**Tato hypotéza byla POTVRZENA.** Retentivita by také mohla být vyjádřena v počtu cyklů nebo odvalené vzdálenosti a také by tato hypotéza byla potvrzena. Toto vyjádření je totiž ekvivalentní ke skluzové vzdálenosti. Podrobnější popis je poskytnut v kapitole 6.1.3.

## 6.2.5 Hypotéza č.5 – Vliv množství maziva

**H5:** Retentivita se bude lineárně zvyšovat se zvyšujícím se množstvím maziva.

**Tato hypotéza byla POTVRZENA.** Na základě výsledků však nelze tuto hypotézu zobecnit na vyšší množství maziva. Je možné, že existuje limitní množství maziva, po kterém již nedochází k nárůstu retentivity s dalším množstvím maziva, protože přebytečné mazivo je vytlačeno z kontaktu. Podrobnější popis je poskytnut v kapitole 6.1.3.

## 7 ZÁVĚR

V této diplomové práci byla řešena adheze v kontaktu kola a kolejnice za různých klimatických podmínek a provozních parametrů. Pozorovaným parametrem byla retentivita, což je čas nebo vzdálenost, po kterou mazivo dokáže efektivně mazat. První část diplomové práce byla experimentální, ve které byly studovány jednotlivé vlivy na retentivitu a výsledky byly porovnávány s hypotézami dle nastudované literatury. V této části bylo použito komerční laboratorní zařízení MTM v konfiguraci ball-on-disk. V druhé části diplomové práce proběhla regresní analýza výsledků a vznikl regresní model. V poslední části práce pak došlo k experimentálnímu ověření modelu s využitím traťového tribometru. Hlavní zjištění z experimentální části práce jsou:

- Zvýšení teploty způsobí nárůst retentivity. Hypotéza pro vliv teploty předpokládala pokles retentivity dle syntézy poznatků z vlivu viskozity základového oleje a znalosti závislosti viskozity na teplotě.
- Retentivita plastického maziva není ovlivněna vzdušnou vlhkostí, ale pouze kondenzací vlhkosti. Po kondenzaci vlhkosti nastává nárůst retentivity.
- Pro popis mechanického namáhání maziva bylo využito parametru  $T\gamma$  a absorbované energie. Využití tohoto přístupu je použitelné s omezenou přesností. Přesnost je dána zejména přesností stanovení absorbované energie mazivem.
- U vlivu rychlosti na retentivitu záleží na způsobu vyhodnocování retentivity. Pokud je retentivita vyhodnocována v sekundách, pak s narůstající rychlostí klesá, pokud je však vyhodnocována ve skluzové vzdálenosti (ekvivalent počtu cyklů), pak s rostoucí rychlostí roste. Existují zde však pochyby, zda to není způsobeno konfigurací testu, kdy odstředivá síla dopraví více maziva do oběžné dráhy.
- U vlivu množství maziva bylo zjištěno, že s rostoucím množstvím maziva se zvyšuje retentivita. To dobře souhlasí s výsledky z předchozích výzkumů. Není však jisté, že neexistuje horní hranice množství maziva, po kterou platí lineární závislost.

Hlavním přínosem experimentální části jsou zjištění o širokém spektru vlivů na retentivitu plastického maziva. V literatuře žádná práce nenabídla takto široký rozsah vlivů. Důležité je však také podotknout, že u plastických maziv hodně záleží na typu maziva, a proto výsledky z této části práce nejsou použitelné pro všechna plastická maziva. Z části práce zabývající se regresním modelováním plynou tato hlavní zjištění:

- Množství maziva a teplota mají lineární rostoucí vliv.
- Zatížení, skluz a rychlost mají klesající mocninný vliv se záporným mocnitelem.
- Vliv vzdušné vlhkosti není ideální modelovat. Do modelu by mělo mnohem větší význam zahrnout množství vody v kontaktu.

Finální rovnice regresního modelu má tvar dle rovnice ( 23 ) a hodnoty koeficientů pro modely při překročení součinitele adheze  $\mu = 0,15$  a  $\mu = 0,25$  jsou uvedeny v Tab. 7-1.

$$f(x) = b_1 \cdot W^{b_2} \cdot SRR^{b_3} \cdot (b_4 + b_5 \cdot M) \cdot (b_6 + b_7 \cdot T) \cdot (b_8 + b_9 \cdot e^{b_{10} \cdot RH}) \cdot U^{b_8} \quad (23)$$

Tab. 7-1: Finální hodnoty koeficientů modelů

Koeficienty	Překročení součinitele adheze $\mu = 0,15$	Překročení součinitele adheze $\mu = 0,25$
$b_1$	0,091	$4,641 \cdot 10^{-6}$
$b_2$	-0,401	-0,963
$b_3$	-1,012	-0,594
$b_4$	-0,507	-0,512
$b_5$	$7,624 \cdot 10^3$	$1,021 \cdot 10^4$
$b_6$	-0,65	-0,751
$b_7$	0,026	0,029
$b_8$	4,565	2,800
$b_9$	$6,514 \cdot 10^{-4}$	$1,130 \cdot 10^{-5}$
$b_{10}$	0,106	0,135
$b_{11}$	-0,210	-0,351

Do regresního modelu byly zahrnuty bezrozměrné parametry, které mají za cíl umožnit přenos výsledků do jiných měřítek, případně i do reálného kontaktu. Pro ověření správnosti modelu a bezrozměrných parametrů byly provedeny experimenty na vzorku kolejnice s traťovým tribometrem. Regresní model predikoval výsledky z traťového tribometru dostatečně dobře.

Co se týče dalšího výzkumu, pak bych jej rozdělil na dvě části – výzkum, který je potřeba provést v rámci zpracování projektu digitálního dvojčete ve spolupráci se ŠKODA Transportation a.s. a dále výzkum, který není k dispozici v literatuře, ale není potřeba pro zpracování tohoto projektu.

V první kategorii doporučuji prozkoumat vliv množství vody v kontaktu na retentivitu. Dále doporučuji provést ověření vlivu teploty, vody v kontaktu a rychlosti na jiném měřítku – nejlépe na twin-disku, který byl v době řešení této diplomové práce v rekonstrukci a nebylo jej tedy možné využít. Dále by bylo vhodné prozkoumat vliv zatížení a teploty v širším rozsahu. Bylo by také vhodné prozkoumat i vliv drsnosti povrchu, ačkoliv toto bylo již v rámci literatury částečně řešeno.

Jako další výzkum, který však není potřeba pro zpracování projektu bych doporučil zaměřit se na sjednocení poznatků retentivity a tloušťky mazacího filmu. V rámci výsledků zde totiž jsou vidět korelace, ale s použitými metodami nebylo možné stanovit příčinné souvislosti.

## 8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Výsledkem výzkumu podle RIV je finalizovaný manuskript článku Jimp.

**Název článku:** Modelling of grease retentivity in wheel-rail contact

**Stav:** Finalizovaný rukopis

**Autoři:** Kuchař T., Kvarda D., Omasta M., Křupka I., Hartl M.

**Bibliografická citace:**

KUCHAŘ, Tomáš, Daniel KVARDA, Milan OMASTA, Ivan KŘUPKA, Martin HARTL.  
Modelling of grease retentivity in wheel-rail contact.

**Abstrakt:**

This study addressed grease retentivity, which is defined as the distance or time for which the grease can efficiently lubricate the contact. The main objective was to develop a model describing the retentivity of grease under various operating conditions. The studied grease was BECHEM EcoRail 2009, composed of a bentonite thickener and a synthetic ester base oil. Tests were conducted on a Mini-Traction Machine (MTM) in a ball-on-disc configuration. The effects of temperature, air humidity, load, slip, speed, and lubricant quantity on retentivity were investigated. It was found that increasing the load and slip caused a decrease in retentivity, which could be described by the energy absorbed by the lubricant. Increasing the velocity caused a decrease in retentivity expressed in time but an increase in retentivity expressed in slip distance. Increasing the amount of lubricant caused a linear increase in retentivity. An increase in temperature led to an increase in retentivity, but only if the temperature remained within the operating range of the grease. Air humidity only had an effect if condensation occurred, resulting in an observed increase in retentivity. The created model was verified with a rail tribometer, showing consistency between predicted and measured results.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LEWIS, R. Basic tribology of the wheel-rail contact. *Wheel–Rail Interface Handbook* [online]. 2009. Dostupné z: doi:10.1533/9781845696788.1.34
- [2] HARMON, M. a R. LEWIS. *Review of top of rail friction modifier tribology* [online]. B.m.: Taylor and Francis Ltd. 2. červenec 2016. ISSN 1751584X. Dostupné z: doi:10.1080/17515831.2016.1216265
- [3] LEWIS, R., R.S. DWYER-JOYCE, S.R. LEWIS, C. HARDWICK a E.A. GALLARDO-HERNANDEZ. Tribology of the Wheel-Rail Contact: The Effect of Third Body Materials. *International Journal of Railway Technology* [online]. 2012, 1(1), 167–194. ISSN 2049-5358. Dostupné z: doi:10.4203/ijrt.1.1.8
- [4] GALAS, Radovan, Milan OMASTA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear* [online]. 2016, 368–369, 230–238. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2016.09.015
- [5] EADIE, Donald T., Kevin OLDKNOW, Marco SANTORO, Gene KWAN, Marcia YU a Xin LU. Wayside gauge face lubrication: How much do we really understand? In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2013, s. 245–253. ISSN 09544097. Dostupné z: doi:10.1177/0954409712459306
- [6] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear* [online]. 2014, 314(1–2), 228–235. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.12.006
- [7] IDÁRRAGA ALARCÓN, Guillermo, Nico BURGELMAN, Juan Meza MEZA, Alejandro TORO a Zili LI. The influence of rail lubrication on energy dissipation in the wheel/rail contact: A comparison of simulation results with field measurements. *Wear* [online]. 2015, 330–331, 533–539. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.01.008
- [8] BOLTON, P J a P CLAYTON. *ROLLING-SLIDING WEAR DAMAGE IN RAIL AND TYRE STEELS*. 1984.
- [9] LEWIS, R. a R. S. DWYER-JOYCE. Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2004, 218(6), 467–478. ISSN 13506501. Dostupné z: doi:10.1243/1350650042794815
- [10] HARDWICK, C., R. LEWIS a D. T. EADIE. Wheel and rail wear-Understanding the effects of water and grease. *Wear* [online]. 2014, 314(1–2), 198–204. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.11.020

- [11] ALLMAIER, Hannes. Increase Service Life for Rail Wheel Bearings—A Review of Grease Lubrication for This Application. *Lubricants* [online]. 2022, **10**(3). ISSN 20754442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants10030036
- [12] LUGT, Piet M. *Grease lubrication in rolling bearings*. 2013. ISBN 9781118353912.
- [13] COUSSEAU, Tiago. Grease Lubrication: Formulation Effects on Tribological Performance. In: *Tribology of Machine Elements - Fundamentals and Applications* [online]. B.m.: IntechOpen, 2022. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.101549
- [14] CANN, P. M.E. a A. A. LUBRECHT. Bearing performance limits with grease lubrication: The interaction of bearing design, operating conditions and grease properties. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2007, **40**(18), 5446–5451. ISSN 00223727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/40/18/S05
- [15] ZHOU, Changjiang, Guanlin REN, Xiaoqiang FAN a Yunyan LV. Probing the effect of thickener microstructure on rheological and tribological properties of grease. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2022, **111**, 51–63. ISSN 22345957. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2022.03.010
- [16] LUGT, Piet M. *A review on grease lubrication in rolling bearings* [online]. 2009. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402000802687940
- [17] FRÝZA, Josef. *Experimentální studium mazání okolku kolejových vozidel*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení Technické. Fakulta strojního inženýrství.
- [18] YANG, Z. a X. QIAN. A study of grease film thickness in elastohydrodynamic rolling point contacts. In: *ImechE*. 1987, s. 97–10.
- [19] VAN ZOELLEN, M. T., C. H. VENNER a P. M. LUGT. The prediction of contact pressure-induced film thickness decay in starved lubricated rolling bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2010, **53**(6), 831–841. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2010.492925
- [20] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III-Fully Flooded Result. *Journal of Tribology* [online]. 1977, **99**(2), 264–275. ISSN 15288897. Dostupné z: doi:10.1115/1.3453074
- [21] SHI, L. B., L. MA, J. GUO, Q. Y. LIU, Z. R. ZHOU a W. J. WANG. Influence of low temperature environment on the adhesion characteristics of wheel-rail contact. *Tribology International* [online]. 2018, **127**, 59–68. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2018.05.037

- [22] VÁSQUEZ-CHACÓN, Irvin A., Ezequiel A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, Marisa MORENO-RÍOS a Manuel VITE-TORRES. Influence of surface roughness and contact temperature on the performance of a railway lubricant grease. *Materials Letters* [online]. 2021, **285**. ISSN 18734979. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2020.129040
- [23] KUNISHIMA, T., S. NAGAI, T. KUROKAWA, J. GALIPAUD, G. GUILLONNEAU, G. BOUVARD, J. Ch ABRY, C. MINFRAY, V. FRIDRICI a Ph KAPSA. Effects of temperature and addition of zinc carboxylate to grease on the tribological properties of PA66 in contact with carbon steel. *Tribology International* [online]. 2021, **153**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106578
- [24] ZHU, Y., U. OLOFSSON a K. PERSSON. Investigation of factors influencing wheel-rail adhesion using a mini-traction machine. *Wear* [online]. 2012, **292–293**, 218–231. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2012.05.006
- [25] MORENO-RÍOS, Marisa, Ezequiel A. GALLARDO-HERNÁNDEZ, Manuel VITE-TORRES a Alejandro PEÑA-BAUTISTA. Field and laboratory assessments of the friction coefficient at a railhead. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2016, **230(1)**, 313–320. ISSN 20413017. Dostupné z: doi:10.1177/0954409714536383
- [26] BEAGLEY, T M, I J MCEWEN a C PRITCHARD. Wheel/Rail adhesion - Boundary lubrication by oily fluids. *Wear* [online]. 1975, 77–88. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/0043-1648(75)90123-4
- [27] WANG, W. J., H. F. ZHANG, H. Y. WANG, Q. Y. LIU a M. H. ZHU. Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions. *Wear* [online]. 2011, **271(9–10)**, 2693–2698. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2010.12.019
- [28] LEWIS, R., E. A. GALLARDO-HERNANDEZ, T. HILTON a T. ARMITAGE. Effect of oil and water mixtures on adhesion in the wheel/rail contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2009, **223(3)**, 275–283. ISSN 09544097. Dostupné z: doi:10.1243/09544097JRRT248
- [29] 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* [online]. 2015, **82(PB)**, 274–279. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2014.08.009



- [30] HARRISON, Harold. The development of a low creep regime, hand-operated tribometer. *Wear* [online]. 2008, **265**(9–10), 1526–1531. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2008.03.028
- [31] PETR SVOBODA, DAVID KOSTAL, JIRI KUNAK a IVAN KRUPKA. STUDY OF GREASE BEHAVIOUR IN A STARVED ELASTOHYDRODYNAMICALLY LUBRICATED CONTACT. *MM Science Journal* [online]. 2014, 465–469. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2014\_06\_201405
- [32] VENGUDUSAMY, Balasubramaniam, Marius KUHN, Michael RANKL a Reiner SPALLEK. Film Forming Behavior of Greases Under Starved and Fully Flooded EHL Conditions. *Tribology Transactions* [online]. 2016, **59**(1), 62–71. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2015.1071450
- [33] CYRIAC, F., P. M. LUGT, R. BOSMAN a C. H. VENNER. Impact of Water on EHL Film Thickness of Lubricating Greases in Rolling Point Contacts. *Tribology Letters* [online]. 2016, **61**(3). ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-016-0642-6
- [34] SKURKA, Simon, Radovan GALAS, Milan OMASTA, Bingnan WU, Haohao DING, Wen Jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. The performance of top-of-rail products under water contamination. *Tribology International* [online]. 2023, **188**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2023.108872
- [35] HU, Y., L. WANG, D. J. POLITIS a M. A. MASEN. Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behaviour during sliding wear. *Tribology International* [online]. 2017, **110**, 370–377. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.11.005
- [36] TRUMMER, Gerald, Zing Siang LEE, Roger LEWIS a Klaus SIX. Modelling of frictional conditions in the wheel–rail interface due to application of top-of-rail products. *Lubricants* [online]. 2021, **9**(10). ISSN 20754442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants9100100
- [37] LEWIS, S. R., R. LEWIS, G. EVANS a L. E. BUCKLEY-JOHNSTONE. Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester. *Wear* [online]. 2014, **314**(1–2), 205–212. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2013.11.033
- [38] GUTSULYAK, Dmitry V., Louisa J.E. STANLAKE a Hao QI. Twin disc evaluation of third body materials in the wheel/rail interface. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces* [online]. 2021, **15**(2), 115–126. ISSN 1751584X. Dostupné z: doi:10.1080/17515831.2020.1829878
- [39] BIAZON, L., B. P. FERRER, A. TORO a T. COUSSEAU. Correlations between rail grease formulation and friction, wear and RCF of a wheel/rail tribological pair. *Tribology International* [online]. 2021, **153**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106566

- [40] FERRER, B. P., L. BIAZON, A. ZUIN, P. TAYER, A. TORO a T. COUSSEAU. Rail Grease Formulation Effect on Its Tribological Performance Under Pure Sliding Conditions. *Tribology Transactions* [online]. 2022. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2022.2123754
- [41] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. B.m.: Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [42] ZVÁRA, Karel. *Regresní analýza*. B.m.: Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0125-5.
- [43] GALAS, Radovan, Milan OMASTA, Lu bing SHI, Haohao DING, Wen jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. The low adhesion problem: The effect of environmental conditions on adhesion in rolling-sliding contact. *Tribology International* [online]. 2020, **151**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106521
- [44] KVARDA, Daniel, Radovan GALAS, Milan OMASTA, Lu bing SHI, Haohao DING, Wen jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Asperity-based model for prediction of traction in water-contaminated wheel-rail contact. *Tribology International* [online]. 2021, **157**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2021.106900
- [45] ZHU, Yi, Ulf OLOFSSON a Anders SÖDERBERG. Adhesion modeling in the wheel-rail contact under dry and lubricated conditions using measured 3D surfaces. *Tribology International* [online]. 2013, **61**, 1–10. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2012.11.022
- [46] YANG, Jialong, Daofei WANG, Pengchong WEI a Wei PU. A mixed EHL model of grease lubrication considering surface roughness and the study of friction behavior. *Tribology International* [online]. 2021, **154**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106710
- [47] HARMON, M. a R. LEWIS. New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2021, **235**(2), 191–200. ISSN 20413017. Dostupné z: doi:10.1177/0954409720913759
- [48] VALENA, Martin, Daniel KVARDA, Milan OMASTA, Radovan GALAS a Martin HARTL. *Vývoj traťového tribometru pro hodnocení adheze na reálné kolejnici*. 2021.
- [49] VALENA, Martin, Milan OMASTA, Daniel KVARDA, Radovan GALAS, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. An approach for the creep-curve assessment using a new rail tribometer. *Tribology International* [online]. 2024, **191**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2023.109153

- [50] WATSON, Michael a Christoforou PETER. An analysis of the quality of experimental design and reliability of results in tribology research. *Wear* [online]. 2019, **426–427**, 1712–1718. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2018.12.028
- [51] BECHEM. *Rail Lubricants* [online]. 2024 [vid. 2024-04-18]. Dostupné z: [https://bechem.eu/wp-content/blogs.dir/1/files\\_mf/1622545425BECHEM\\_Rail\\_Lubricants\\_2019\\_en.pdf](https://bechem.eu/wp-content/blogs.dir/1/files_mf/1622545425BECHEM_Rail_Lubricants_2019_en.pdf)
- [52] GALAS, Radovan, Simon SKURKA, Martin VALENA, Daniel KVARDA, Milan OMASTA, Haohao DING, Qiang LIN, Wen jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. A benchmarking methodology for top-of-rail products. *Tribology International* [online]. 2023, **189**. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2023.108910
- [53] COUSSEAU, Tiago, Beatriz GRAÇA, Armando CAMPOS a Jorge SEABRA. Grease aging effects on film formation under fully-flooded and starved lubrication. *Lubricants* [online]. 2015, **3(2)**, 197–221. ISSN 20754442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants3020197

# 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

## 10.1 Seznam zkratek

MTM	Mini-Traction Machine
LCF	Low Coefficient of Friction mazivo
SRR	Skluz (Slip to Roll Ratio)
FM	Mdifikátor tření (Friction Modifier)
NLGI	Třída konzistence plastického maziva
PE	Ployester
PAO	Polyalfaolefin
PU	Polymočovina (Polyurea)
PID	Proporciálně integračně derivační regulátor
RH	Relativní vzdušná vlhkost (Relative Humidity)

## 10.2 Seznam veličin

$\mu$	(–)	Součinitel adheze
$T\gamma$	(N)	Parametr $T\gamma = T \cdot \gamma$
$RSS$	(–)	Reziduální součet čtverců (Residual Sum of Squares)
$TSS$	(–)	Celkový součet čtverců (Total Sum of Squares)
$R^2$	(–)	Koeficient determinace
$y$	(s)	Měřená retentivita
$\hat{y}$	(s)	Predikovaná retentivita modelem
$MMC$	(–)	Poměr přenášeného zatížení kontaktem povrchů
$\mu_{kapalinové}$	(–)	Součinitel adheze při plně zaplaveném kontaktu
$\mu_{suché}$	(–)	Součinitel adheze při suchém kontaktu
$E$	(J)	Energie absorbovaná mazivem
$F$	(N)	Zatížení kontaktu

$v$	(m/s)	Rychlost zadávaná do měřicího zařízení
$SRR$	(%)	Skruz (slip-to-roll ratio)
$\Delta t$	(s)	Časový krok
$b_1 - b_{11}$	(-)	Koeficienty modelu
$W$	(-)	Bezrozměrné zatížení
$\varepsilon'$	(-)	Zjednodušený eliptický integrál
$k'$	(-)	Zjednodušený parametr elipticity
$E'$	(MPa)	Redukovaný modul pružnosti v tahu
$E$	(MPa)	Modul pružnosti v tahu
$\nu$	(-)	Poissonova konstanta
$R_x$	(mm)	Redukovaný poloměr křivosti ve směru pohybu
$R_y$	(mm)	Redukovaný poloměr křivosti v příčném směru
$r_{1x}, r_{1y}$	(mm)	Poloměry křivosti těles ve směru pohybu
$r_{2x}, r_{2y}$	(mm)	Poloměry křivosti těles v příčném směru
$M$	(-)	Bezrozměrné množství maziva
$V_m$	( $\mu$ l)	Aplikované množství maziva do kontaktu
$b$	(mm)	Šířka roznesení maziva
$l$	(mm)	Délka roznesení maziva
$\eta$	(Pa·s)	Dynamická viskozita maziva
$U$	(-)	Bezrozměrná rychlost
$T$	(°C)	Teplota
$RH$	(%)	Relativní vzdušná vlhkost (Relative Humidity)
$b_0$	(-)	Vektor počátečních hodnot koeficientů
$W_n$	(-)	Normovací konstanta zatížení
$SRR_n$	(%)	Normovací konstanta skruzu
$U_n$	(-)	Normovací konstanta bezrozměrné rychlosti
$M_n$	(-)	Normovací konstanta bezrozměrného množství maziva
$T_n$	(°C)	Normovací konstanta teploty
$RH_n$	(%)	Normovací konstanta relativní vzdušné vlhkosti

$b_{1n} - b_{11n}$	(-)	Koeficienty normalizovaného modelu
<i>Váha</i>	(-)	Váhy pro zajištění lepšího proložení dat
$v_e$	(m/s)	Rychlost vstupu maziva do kontaktu
$v_1$	(m/s)	Rychlost prvního kontaktního tělesa
$v_2$	(m/s)	Rychlost druhého kontaktního tělesa
<i>Skluz</i>	(%)	Skluz vyhodnocovaný na traťovém tribometru
$\omega_{kul}$	(s <sup>-1</sup> )	Úhlová rychlost kuličky
$\omega_{disk}$	(s <sup>-1</sup> )	Úhlová rychlost disku
$r_{kul}$	(m)	Poloměr oběžné dráhy kuličky
$r_{disk}$	(m)	Poloměr oběžné dráhy kuličky
$v_{disk}$	(m/s)	Dopředná rychlost disku
<i>N</i>	(-)	Počet cyklů na traťovém tribometru
<i>O</i>	(m)	Součet obvodu oběžné dráhy kuličky a disku

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1: PRISMA diagram .....	20
Obr. 2-2: Grafické znázornění oblastí v kontaktu kola a kolejnice [1] - upraveno .....	21
Obr. 2-3: Trakční křivka [2] – upraveno .....	22
Obr. 2-4: Trakční křivky pro různá maziva [6] - upraveno .....	22
Obr. 2-5: Využití parametru $T\gamma$ pro kategorizaci režimu opotřebení pro různé skluzu [10] .....	23
Obr. 2-6: Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu a: Plastické mazivo s lithným komplexním mýdlem b: Plastické mazivo s bentonitovým zpevňovadlem [15] .....	24
Obr. 2-7: Vývoj součinitele adheze oleje v čase při různých teplotách [21] .....	25
Obr. 2-8: Trakční křivka při aplikaci vody, oleje a jejich směsi [28] .....	26
Obr. 2-9: Závislost součinitele adheze na kontaktním tlaku .....	27
Obr. 2-10: Stribeckova křivka pro dvě různá plastická maziva [13] .....	28
Obr. 2-11: Vývoj součinitele adheze oleje v čase při různých teplotách [21].....	29
Obr. 2-12: Závislost životnosti plastického maziva ve valivém ložisku na teplotě [12] ...	29
Obr. 2-13: Vliv aplikace vody (kontakt s modifikátorem tření na olejové bázi) na součinitel adheze a jeho vývoj v čase [34] .....	30
Obr. 2-14: Závislost životnosti plastického maziva ve valivém ložisku na zatížení ložiska [12] .....	30
Obr. 2-15: Vliv počátečního množství maziva na vývoj součinitele adheze v čase [20]...	31
Obr. 2-16: Vývoj součinitele adheze v čase pro různá plastická maziva [37] .....	32
Obr. 2-17: Závislost retentivity na viskozitě základového oleje a parametru mazání [39]	32
Obr. 2-18: Fáze testu retentivity [17].....	33
Obr. 2-19: Regresní model popisující závislost součinitele adheze na teplotě a vzdušné vlhkosti suchého kontaktu [43] .....	34
Obr. 2-20: Regresní model popisující retentivitu plastického maziva v závislosti na rychlosti a zatížení [35] .....	35
Obr. 2-21: Regresní model predikující součinitel adheze modifikátoru tření na vodní bázi [36] .....	35
Obr. 2-22: Schéma dvoudiskového měřicího zařízení [6].....	36
Obr. 2-23: Schéma měřicího zařízení ball-on-disk [4] .....	36

Obr. 2-24: Schéma měřicího zařízení pin-on-disk .....	37
Obr. 2-25: Schéma kyvadlového měřicího zařízení [25] .....	37
Obr. 2-26: Ručně tlačný tribometr [29] .....	38
Obr. 2-27: Traťový tribometr [49] – upraveno .....	38
Obr. 4-1: Schéma postupu zpracování diplomové práce.....	45
Obr. 4-2: Schéma zařízení MTM.....	46
Obr. 4-3: Traťový tribometr [49] – upraveno.....	47
Obr. 4-4: Jednotka pro úpravu vlhkosti vzduchu .....	48
Obr. 4-5: Grafické znázornění zpracování testů pro získání výsledků.....	53
Obr. 4-6: Grafické znázornění postupu zpracování regresního modelu .....	57
Obr. 4-7: Popis postupu vyhodnocení měření na traťovém tribometru. a) záznam součinitele adheze a skluzu v závislosti na poloze z jednoho průjezdu, b) trakční křivka jednoho průjezdu, c) „Časový“ záznam součinitele adheze v závislosti na počtu průjezdů .....	58
Obr. 5-1: Fáze časového testu retentivity .....	62
Obr. 5-2: Vliv teploty na retentivitu plastického maziva .....	63
Obr. 5-3: Porovnání dvou typů testu vlivu teploty – jeden s přehříváním, druhý bez přehřívání .....	63
Obr. 5-4: Časové průběhu testu pro různé teploty .....	64
Obr. 5-5: Závislost retentivity na teplotě .....	64
Obr. 5-6: Vliv vlhkosti na retentivitu plastického maziva .....	65
Obr. 5-7: Časové testy pro různé vzdušné vlhkosti.....	65
Obr. 5-8: Vyhodnocení matematické závislosti retentivity na vzdušné vlhkosti.....	66
Obr. 5-9: Vliv zatížení na retentivitu plastického maziva .....	66
Obr. 5-10: Časové testy pro různé zatížení .....	67
Obr. 5-11: Vyhodnocení matematické závislosti pro vliv zatížení na retentivitu.....	67
Obr. 5-12: Vliv skluzu na retentivitu plastického maziva.....	68
Obr. 5-13: Časové testy pro různé skluzu.....	68
Obr. 5-14: Matematický model závislosti retentivity na skluzu.....	69
Obr. 5-15: Vliv rychlosti na retentivitu plastického maziva a) vyhodnoceno ve vteřinách, b) vyhodnoceno ve skluzové vzdálenosti .....	69



Obr. 5-16: Časové testy pro různé rychlosti a) vyhodnocené v sekundách, b) vyhodnocené ve skluzové vzdálenosti .....	70
Obr. 5-17: Matematický model pro popis vlivu rychlosti na retentivitu a) vyjádřenou v sekundách, b) vyjádřenou ve skluzové vzdálenosti .....	70
Obr. 5-18: Vliv množství aplikovaného maziva na retentivitu .....	71
Obr. 5-19: Časové testy pro různá množství maziva.....	71
Obr. 5-20: Matematický popis vlivu množství aplikovaného maziva na retentivitu.....	72
Obr. 5-21: Ekvivalence vlivu skluzu a zatížení .....	72
Obr. 5-22: Energie absorbovaná mazivem a) pro různá zatížení, b) pro různé skluzu .....	73
Obr. 5-23: Matematické modely s využitím absorbované energie a) vliv zatížení, b) vliv skluzu .....	73
Obr. 5-24: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv zatížení a skluzu .....	76
Obr. 5-25: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv maziva a rychlosti.....	76
Obr. 5-26: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv vzdušné vlhkosti a teploty .....	76
Obr. 5-27: Grafy závislostí pro jednotlivé vlivy. a) vliv zatížení, b) vliv skluzu, c) vliv množství maziva, d) vliv rychlosti, e) vliv vzdušné vlhkosti, f) vliv teploty .....	77
Obr. 5-28: Měření retentivity na traťovém tribometru a predikce s pomocí modelu a) s různým množstvím maziva při zatížení 152 N, b) s různým zatížením při aplikaci 10 $\mu$ l maziva.....	78
Obr. 5-29: Vývoj součinitele adheze s počtem průjezdů při měření na traťovém tribometru a) s různým množstvím maziva při zatížení 152 N, b) s různým zatížením při aplikaci 10 $\mu$ l maziva.....	78
Obr. 6-1: Proložení dat rychlosti funkcí pro tloušťku mazacího filmu .....	84
Obr. 13-1: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv zatížení a skluzu .....	108
Obr. 13-2: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv maziva a rychlosti.....	108
Obr. 13-3: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv teploty a vzdušné vlhkosti .....	108
Obr. 13-4: Grafy závislostí pro jednotlivé vlivy. a) vliv zatížení, b) vliv skluzu, c) vliv množství maziva, d) vliv rychlosti, e) vliv vzdušné vlhkosti, f) vliv teploty .....	109

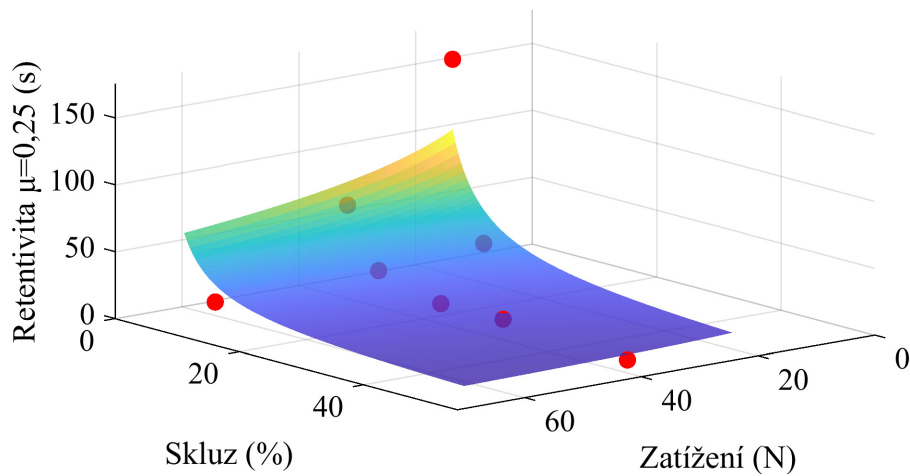
## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1: Výsledky vyhledávání pro jednotlivé rešeršní dotazy .....	19
Tab. 2-2: Souhrn měřených trakčních křivek z literatury .....	27
Tab. 4-1: Parametry laboratorního zařízení MTM .....	46
Tab. 4-2: Souhrn parametrů traťového tribometru .....	47
Tab. 4-3: Parametry měřeného plastického maziva .....	49
Tab. 4-4: Hodnocení metod aplikace maziva .....	52
Tab. 4-5: Výchozí hodnoty pro OFAT testování a hodnoty při změnách parametru .....	53
Tab. 4-6: Parametry dosazené do modelu pro predikci retentivity .....	59
Tab. 5-1: Souhrn parametrů modelů .....	75
Tab. 6-1: Vyhodnocení kvality vědecké práce .....	88
Tab. 7-1: Finální hodnoty koeficientů modelů .....	92

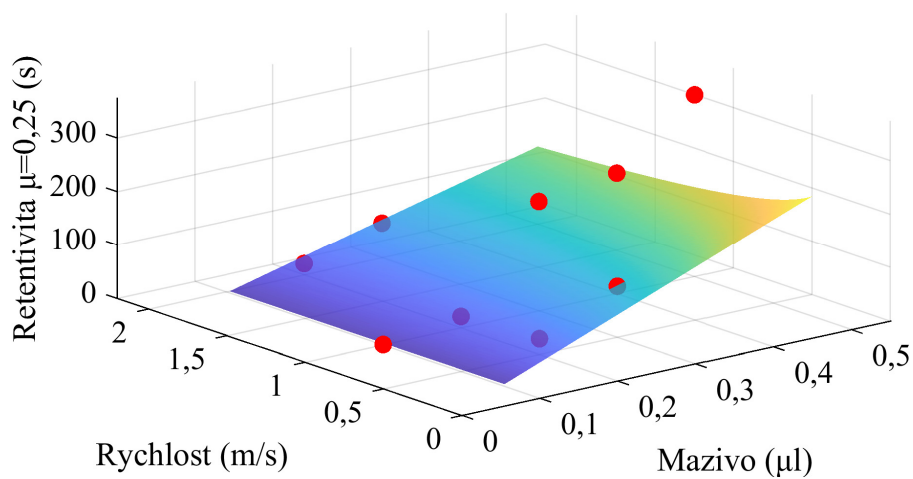
## 13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – Grafy zobrazující model při překročení retentivity  $\mu = 0,15$

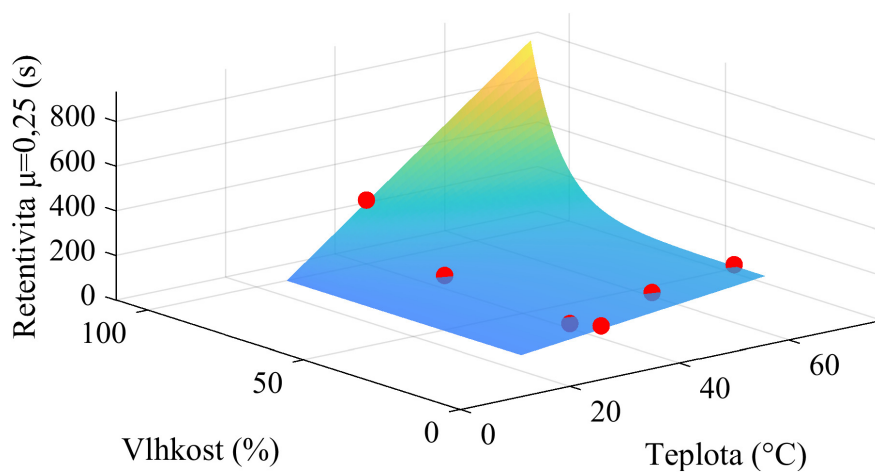
# PŘÍLOHA Č.1 – GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ MODEL PRO PŘEKROČENÍ SOUČINITELE ADHEZE $\mu = 0,15$



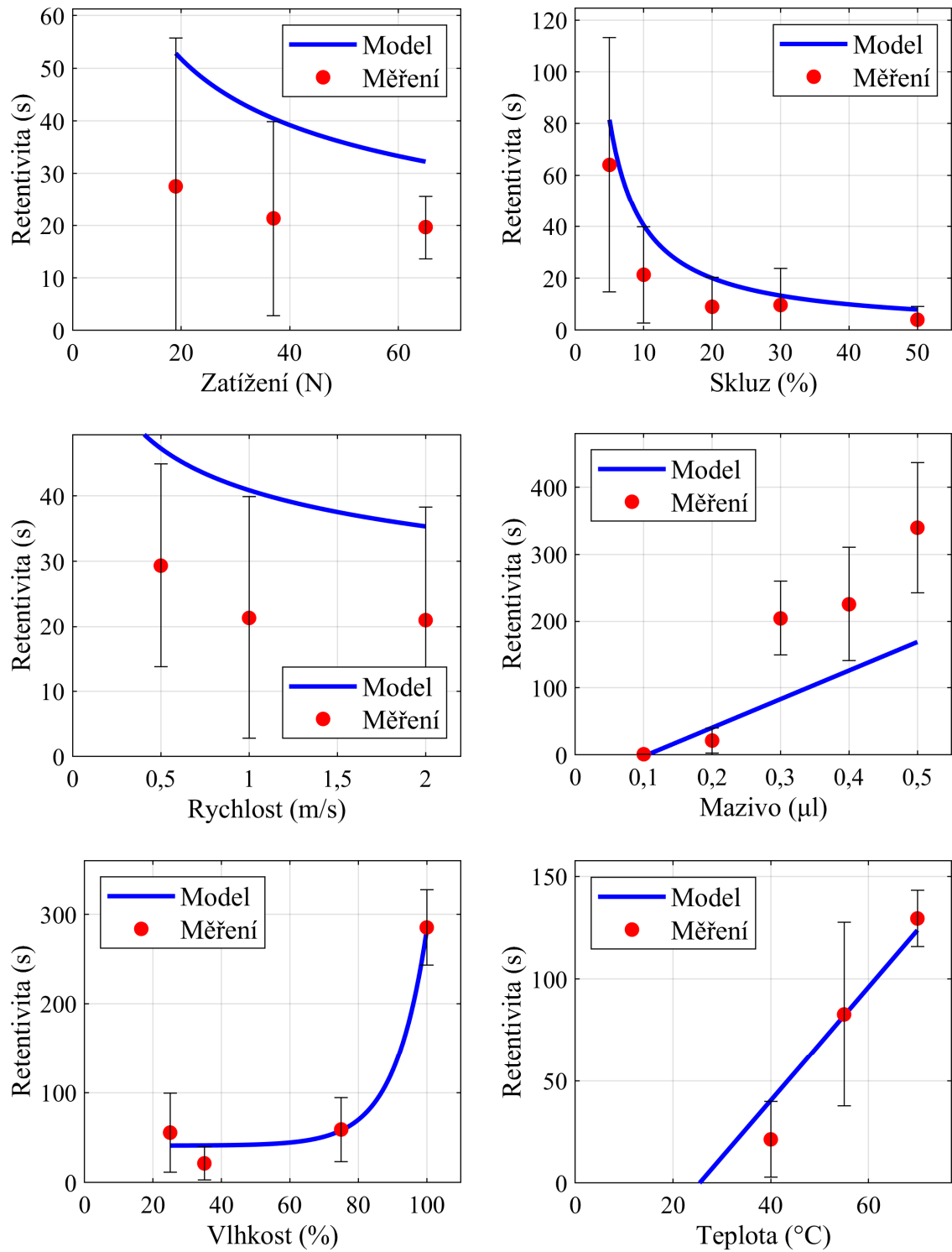
Obr. 13-1: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv zatížení a skluzu



Obr. 13-2: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv maziva a rychlosti



Obr. 13-3: Zobrazení modelu ve 3D pro vliv teploty a vzdušné vlhkosti



Obr. 13-4: Grafy závislostí pro jednotlivé vlivy. a) vliv zatížení, b) vliv skluzu, c) vliv množství maziva, d) vliv rychlosti, e) vliv vzdušné vlhkosti, f) vliv teploty