

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Testování tuhých maziv pro okolky kolejových
vozidel na dvoukotoučovém stroji**

Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Netolický**
Osobní číslo: **D23447**
Studijní program: **N0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Provoz a údržba vozidel**
Téma práce: **Testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel na dvoukotoučovém stroji**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

V laboratorních podmínkách lze kontakt kola a kolejnice simulovat na dvoukotoučovém stroji. Na pracovišti je k dispozici dvoukotoučový stroj Amsler A-135, v současnosti využívaný zejména k testování výkonnosti tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel. Pro tyto zkoušky je v evropských normách definována metodika, která v některých ohledech není zcela konkrétní. Pro zlepšení informační hodnoty a porovnatelnosti výsledků zkoušek je vhodné zabývat se rozbohem vlivu jednotlivých vstupních faktorů na výslednou úroveň součinitele tření v mazaném kontaktu a další ukazatele. Cílem diplomové práce je rozmnožit právě tyto poznatky.

Úkoly diplomové práce:

- Zpracujte stručný přehled problematiky mazání okolků a testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel, spolu se stručným popisem použitého zkušebního zařízení.
- Proveďte úpravu zkušebního zařízení, která umožní měření součinitele tření s digitálním záznamem místo dosavadního záznamu na papír. Úprava bude zahrnovat návrh přípravků pro uchycení snímače, sestavení měřicího řetězce a vytvoření softwarového nástroje pro zobrazování a ukládání dat.
- Proveďte experimenty pro určení třecích podmínek v mazaném kontaktu v závislosti na přítlaku tuhého maziva ke kotouči, případně v kombinaci s dalšími faktory. Experimenty budou založeny na zkušební metodice normy ČSN EN 15427-2-1.
- Analyzujte výsledky experimentů a formulujte závěry ohledně sledovaných závislostí.

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 15427-2-1 *Železniční aplikace – Řízení tření mezi kolem a kolejnicí – Část 2-1: Vlastnosti a charakteristiky – Maziva okolku*. Česká agentura pro standardizaci, 2022.
- [2] EVANS, M., LEWIS, R.: Alternative twin-disc assessment of solid stick flange lubricants. *10th International Conference on Contact Mechanics CM2015*. Colorado Springs, Colorado, 2015.
- [3] LEWIS, R. et al. Towards a standard approach for the wear testing of wheel and rail materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2017, 231(7). ISSN 2041-3017.
- [4] VOLTR, P., LIBEROVÁ, S.: Faktory ovlivňující hodnocení výkonnosti tuhých maziv pro kontakt ko-lo-kolejnice. *Současné problémy v kolejových vozidlech 2021: sborník příspěvků z XXV. konference s mezinárodní účastí*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021. S. 391-398. ISBN 978-80-7560-377-7.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D.**
Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **7. února 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel na dvoukotoučovém stroji jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 5. 2025

Bc. Jan Netolický v.r.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Voltrovi Ph.D. za pomoc a připomínky při zpracování této práce. Rád bych poděkoval také své rodině za podporu během celého studia.

ANOTACE

V železniční dopravě je snaha o neustálé zvyšování spolehlivosti, bezpečnosti a komfortu cestujících. K tomu, abychom tyto aspekty a mnoho dalších zlepšovali, je potřeba znát velmi dobře kontakt kolo–kolejnice. Nanášení tuhého maziva tento kontakt značně ovlivňuje, a proto má značný význam experimentálně testovat a analyzovat změny v kontaktu po nanesení tuhého maziva.

Tato diplomová práce se zaměřuje na testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel na dvoukotoučovém stroji Amsler A-135. V této práci je provedeno usnadnění a digitalizace zpracování naměřených dat na stroji, porovnání dvou vzorků tuhého maziva a následně provedena diskuse k získaným výsledkům.

KLÍČOVÁ SLOVA

tuhá maziva, dvoukotoučový stroj, součinitel tření, kontakt kolo–kolejnice

TITLE

Testing of solid lubricants for railway vehicle wheel flanges on a twin-disc machine

ANNOTATION

In rail transport, there is an effort to continuously improve reliability, safety and passenger comfort. In order to improve these aspects and many others, we need to know the wheel-rail contact very well. The application of solid lubricant greatly influences this contact, and it is therefore of considerable importance to experimentally test and analyse changes in contact after application of solid lubricant.

This thesis focuses on the testing of solid lubricants for rolling stock flange on an Amsler A-135 twin disc machine. In this thesis, the processing of measured data on the machine is facilitated and digitized, two samples of solid lubricant are compared and then a discussion of the results obtained is made.

KEYWORDS

solid lubricants, twin disc machine, friction coefficient, wheel-rail contact

OBSAH

Seznam symbolů	9
Úvod.....	10
1 Mazání kolo – kolejnice.....	11
1.1 Účel mazání	11
1.2 Nanášení maziva	11
1.3 Způsoby mazání železničních kol a kolejnic	13
1.3.1 Stacionární provedení mazání.....	13
1.3.2 Mobilní provedení mazání	13
1.4 Tuhé mazivo okolků	15
2 Metody testování.....	16
2.1 Testované vlastnosti tuhých maziv	16
2.2 Zkušební kladkový stav	17
2.3 Dvoukotoučový stroj Amsler A-135.....	18
3 Úprava zkušebního zařízení.....	20
3.1 Specifikace a požadavky úpravy.....	20
3.2 Sestavení měřícího řetězce.....	21
3.3 Návrh upevnění snímače.....	22
3.3.1 Varianty uchycení	22
3.3.2 Uchycení pohyblivého konce.....	23
3.3.3 Uchycení pevného konce	24
3.4 Tvorba aplikace.....	25
3.4.1 Kalibrace – geometrický rozbor	26
3.4.2 Kalibrace – funkce pomocí naměřených bodů	27
4 Měření třecích podmínek.....	29
4.1 Parametry zkoušky.....	29
4.2 Metodika zkoušení.....	31
4.3 Hodnocené veličiny	33
4.4 Vzorek maziva M1.....	34

4.4.1	Naměřené hodnoty pro vzorek M1	35
4.4.2	Ustálený součinitel tření během mazání	37
4.4.3	Ustálený součinitel tření bez maziva	38
4.4.4	Návrat na hodnotu suchého tření	39
4.5	Vzorek maziva M2.....	40
4.5.1	Naměřené veličiny pro vzorek M2	40
4.5.2	Ustálený součinitel tření během mazání	42
4.5.3	Ustálený součinitel tření bez maziva	43
4.5.4	Návrat na hodnotu suchého tření	44
5	Diskuse získaných výsledků	45
5.1	Porovnání hodnocených veličin.....	45
5.2	Aplikační plocha a pořadí měření	47
5.3	Vliv korekce součinitele tření během mazání	49
5.4	Teplota kotoučů	50
	Závěr	52
	Použitá literatura	54
	Seznam příloh	56

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Název veličiny
b	[mm]	Poloviční šířka dotykové oblasti
a	[mm]	Poloviční délka dotykové oblasti
d_1	[mm]	Průměr horního kotouče
d_2	[mm]	Průměr dolního kotouče
E	[MPa]	Modul pružnosti
E^*	[MPa]	Přepočtený modul pružnosti
f	[-]	Součinitel tření
f_k	[-]	Přepočtený součinitel tření
F_t	[N]	Tečná síla
i_1	[-]	Převodový poměr na horní kotouč
i_2	[-]	Převodový poměr na dolní kotouč
i_k	[-]	Převodový poměr na kotouč obecně
m	[kg]	Normálová síla v kontaktu kotoučů vyjádřená v jednotkách hmotnosti
m_{zav}	[kg]	Hmotnost závaží pro přítlak vzorků maziva
N	[N]	Normálová síla v kontaktu
n_1	[min ⁻¹]	Otáčky horního kotouče
n_2	[min ⁻¹]	Otáčky dolního kotouče
n_k	[min ⁻¹]	Otáčky pro kotouč obecně
n_m	[min ⁻¹]	Otáčky motoru
p_{max}	[MPa]	Maximální hertzovský tlak
p_s	[MPa]	Střední hertzovský tlak
R	[mm]	Kombinovaný poloměr křivosti
s	[%]	Skluz
S	[mm ²]	Obsah dotykové oblasti
t	[°C]	Teplota
v_1	[m/s]	Obvodová rychlost horního kotouče
v_2	[m/s]	Obvodová rychlost dolního kotouče
ν	[-]	Poissonovo číslo
φ	[%]	Relativní vlhkost
μ	[-]	Součinitel adheze

Úvod

Kolejová vozidla jsou důležitým segmentem dopravy. Jejich bezpečné a spolehlivé využívání závisí na řadě technických parametrů. V rámci snižování opotřebení kol a kolejnic, ale také hluku, se stále více pozornosti věnuje sledování vlivů na třecí podmínky v kontaktu kolo–kolejnice. Jedním z řešení je aplikace maziv v oblasti okolku za účelem snížení součinitele tření v místě kontaktu.

Tuhá maziva se nabízejí jako zajímavé řešení oproti tradičním kapalným mazivům. Jejich vlastnosti, jednoduchost aplikace a omezení úniku maziva z nich činí zajímavé řešení s potenciálem snížení provozních nákladů a environmentálního dopadu. Z tohoto důvodu je jejich výzkum a testování vysoce relevantní.

Tato práce si klade za cíl rozšířit poznatky o testování tuhých maziv pro okolky kolejových vozidel na dvoukotoučovém stroji. Norma EN 15427-2-1 sice pojednává o testování tuhých maziv na dvoukotoučovém stroji (dříve norma EN 16028), ale nejsou zde zcela jasné definovány zkušební podmínky a postupy, které by mohly ovlivnit měření.

V teoretické části práce jsou nejprve objasněny důvody mazání v kontaktu kolo–kolejnice. Dále se zde hovoří o způsobech mazání a co to vlastně je tuhé mazivo. Další část práce je zaměřena na úpravu a digitalizaci stroje pro usnadnění a urychlení zpracování naměřených dat. Následně jsou v práci vyhodnoceny zkoušky dvou různých vzorků maziva a diskuze k získaným výsledkům.

Tato práce přináší poznatky k testování tuhých maziv na dvoukotoučovém stroji. Výsledky a závěry mohou sloužit pro další výzkum tuhých maziv na tomto zařízení.

1 Mazání kolo – kolejnice

Mazání v kontaktu kolo–kolejnice je popsáno normou ČSN EN 15427 – Řízení tření mezi kolem a kolejnici, která se skládá ze dvou částí. První část pojednává o mazacích zařízeních a nanášení maziva, naproti tomu se druhá část zaměřuje na vlastnosti, charakteristiky a popis zkoušení maziv. V této první kapitole je popsáno proč, jak a kam je mazivo nanášeno.

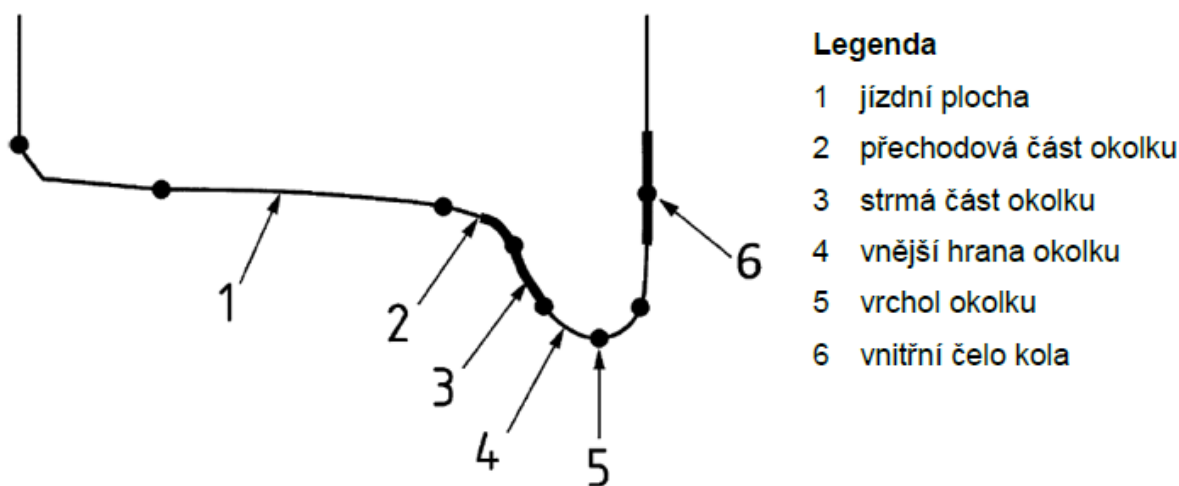
1.1 Účel mazání

Cílem mazání a řízení tření je, aby podmínky v kontaktu kolo–kolejnice dosáhly maximální využitelnosti obou celků, aniž by byl na železnici narušen bezpečný provoz. Instalace mazacího zařízení je závislá na konkrétním účelu použití, abychom dosáhli požadovaného výsledku. [1] Pomocí řízení tření mezi okolkem a kolejnici můžeme dosáhnout [1]:

- Snížení hluku a vibrací,
- Snížení opotřebení kola a kolejnice,
- Snížení počtu vad kola a kolejnice.

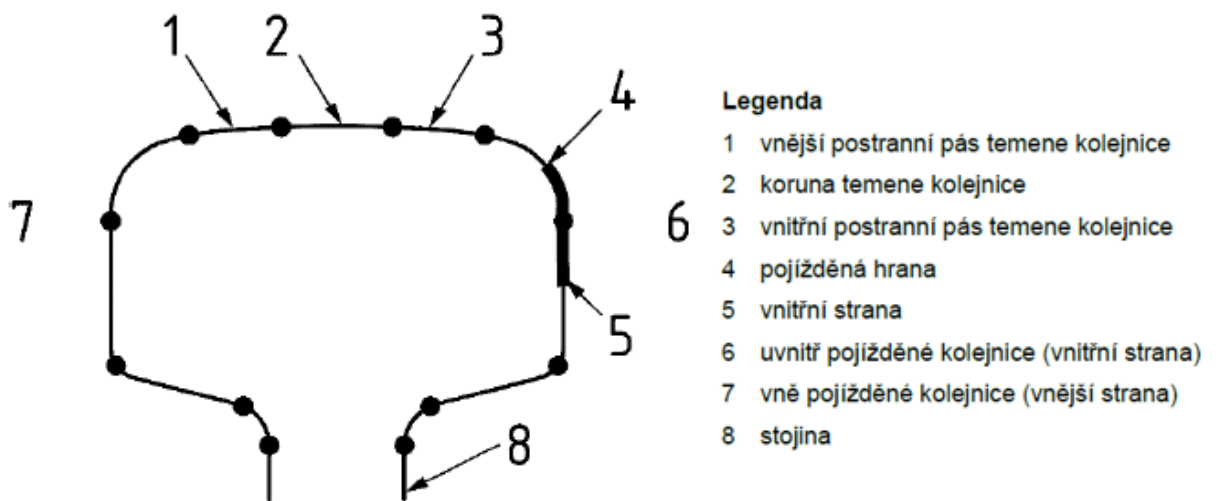
1.2 Nanášení maziva

Nanášené množství maziva musí být neměnné při schválených provozních podmínkách, které jsou v technické specifikaci. Mazivo nanášíme do oblastí „2“ a „3“ pro správné mazání okolek-kolejnice a do oblastí „6“ pro mazání zadního okolku–přídržnice. Tyto oblasti jsou znázorněny na obrázku 1. Mazání ostatních oblastí a přesun maziva je nežádoucí.[1]

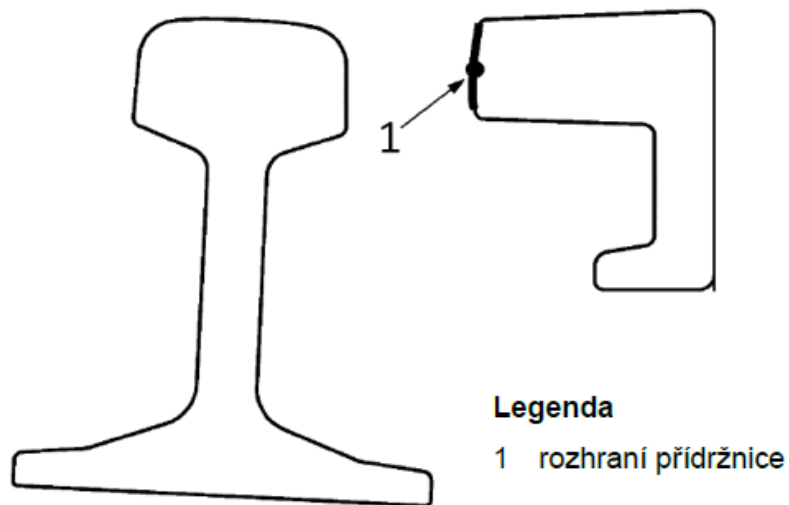


Obrázek 1 Mazané oblasti kola [1]

V případě mazání koleje se mazivo nanáší do oblastí „4“ a „5“ (obrázek 2), případně na rozhraní přídržnice (obrázek 3). [1]



Obrázek 2 Oblasti kolejnice 1 [1]



Obrázek 3 Oblasti kolejnice 2 [1]

1.3 Způsoby mazání železničních kol a kolejnič

Nanášení maziva lze rozdělit na dva způsoby:

- Stacionární,
- Mobilní.

1.3.1 Stacionární provedení mazání

Pokud je řeč o mazání kolejnič, pak se hovoří o tzv. stacionárním provedení mazání. K tomu je využíváno kolejničových mazníků, jakožto zdroje maziva. Mazací lišta se nachází typicky na vnější kolejnič před začátkem oblouku a mazivo je nanášeno na vnitřní stranu této kolejnič. Zásobník maziva je spolu s čerpadlem umístěn vedle tratě. Aktivace probíhá buď mechanicky tlakem kola na mechanický spínač, nebo elektricky pomocí kolejničových senzorů. Toto stacionární provedení je ukázáno na obrázku 4.

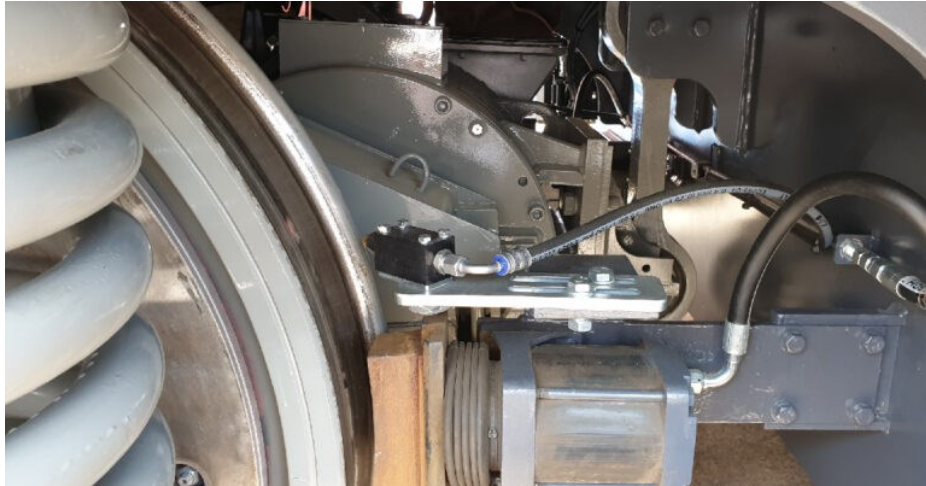


Obrázek 4 Mazací lišta [2]

1.3.2 Mobilní provedení mazání

Mobilní provedení mazání je konstrukčně řešeno tak, že mazací aparatura je upevněna přímo na vozidle. Zařízení je umístěno v prostoru předních podvozků vozidla ve směru jízdy a na lokomotivách. Při tomto provedení existují dvě základní varianty.

První je distribuce kapalného maziva tlakovým systémem, na jehož konci se nacházejí trysky nebo aplikátory. Mazací zařízení pro rozstřík maziva se musí vypínat při nízké rychlosti, avšak dle normy ČSN EN 15427-2-1 by se mělo také zvážit vypínání ve vysoké rychlosti. Toto provedení je znázorněno na obrázku 5.



Obrázek 5 Mazání okolků pro lokomotivy OK-02 [3]

Druhá varianta je umístění držáku maziva směřující přímo k okolku a aplikace přítlakem tuhého maziva na okolek. Příklad takové aplikace je na obrázku 6.



Obrázek 6 Aplikace tuhého maziva [4]

1.4 Tuhé mazivo okolků

Tuhá maziva okolků jsou tvořena polymerovou maticí, která slouží jako nosič a váže na sebe částice, které plní mazací funkci. Jako hlavní složky těchto částic se využívá zpravidla grafitu nebo sulfidu molybdeničitého (MoS_2). [11]

Grafit i MoS_2 jsou velmi využívaná maziva. Jejich krystalová struktura se skládá z kovalentně vázaných lístků. Protože je spojení těchto krystalů silné v jedné rovině a slabé mimo rovinu, jsou mechanické a další vlastnosti značně anizotropní. Na základě toho se při aplikaci dělí na tenké lamely, které drží na kovových materiálech a vytvoří po zajištění hladkou povrchovou vrstvu, díky čemuž po sobě tyto materiály snadno kloužou. Výhodou MoS_2 oproti grafitu je, že nevyžaduje pro příznivé vlastnosti mazání žádnou vzdušnou vlhkost, zatímco grafit potřebuje alespoň malé množství vzdušné vlhkosti. [11] [12]

Výhodou využívání tuhých maziv je jednoduchost systému, aplikace a údržby. Oproti jiným způsobům mazání zde nemůže dojít k úniku maziva na nežádoucí místa, jako je například jízdní plocha kola. Tuhá maziva jsou dodávána ve formě hranolu se zúženými konci, aby do sebe zapadávaly. Tyto hranoly se pak vkládají do aplikátorů, kde jsou silou pružiny přitlačovány na okolek železničního kola. Dodávané hranoly tuhých maziv jsou zobrazeny na obrázku 7. [11]



Obrázek 7 Dodávané hranoly tuhých maziv [10]

2 Metody testování

Jak již bylo zmíněno, vlastnostmi, charakteristikami a metodami testování se zabývá druhá část normy ČSN EN 15427-2-1. Pokud by maziva byla testována v reálném provozu, byly by výsledky ve velké míře ovlivněny okolními vlivy a nelze z těchto výsledků vyvodit reálné vlastnosti. Jelikož je testování prováděno z důvodů dokázání, že dané mazivo lze využívat v železničním prostředí a také že je konzistentní, norma popisuje, jak jednotlivé vlastnosti zkoušet. Tato kapitola se zaměřuje na testování na kladkovém stavu a dvoukotoučovém stroji.

2.1 Testované vlastnosti tuhých maziv

Norma popisuje, jaké vlastnosti a jak se zkouší. Jelikož je ale tato práce zaměřená na tuhá maziva, v následující tabulce jsou vypsány vlastnosti, které se zkouší pro tuhá maziva (ve formě tyčinky):

Tabulka 1 Testované vlastnosti tuhých maziv [5]

Vlastnost	Jednotky	Testovací metoda	Typové zkoušky	Rutinní zkoušky	Datový list
Vzhled	-	Vizuálně	X	X	O
Barva	-	Vizuálně	X	X	X
Bod tání	[°C]	EN ISO 3146	X	-	X
Hodnota tření	[-]	Dvoukotoučový stroj	X	O	X
Chování v ohni	-	-	-	-	-
testování identity pro chemickou analýzu	-	Standardní laboratorní metoda	O	-	O
Hustota při 23 °C	[kg/m ³]	EN ISO 1183-1 Metoda A	X	X	-
Tvrдость	Shore	EN ISO 868	X	X	-
Schopnost znečišťovat vodu	Dle požadavků	Dle specifikace produktu	O	-	-
Retentivita	-	Dvoukotoučový stroj	O	-	O

Typové zkoušky jsou požadované pro účely schvalovacích zkoušek

Rutinní zkoušky jsou požadované pro testování ze schválených sériově vyráběných vzorků.

Datový list uvádí vlastnosti, které mají být uvedeny v dokumentaci k výrobku.

„X“ – Testy nebo informace jsou povinné.

„O“ – Testy nebo informace jsou nepovinné.

V rámci testování tuhých maziv jsou na našem pracovišti k dispozici dvě zkušební zařízení. Jedním je zkušební kladkový stav, kde se kolo odvaluje po nekonečné kolejnici, zatímco na druhém zařízení, dvoukotoučovém stroji, se po sobě odvalují dva kotouče, které na sebe působí pod zatížením.

2.2 Zkušební kladkový stav

Tímto zkušebním zařízením je vybaveno Výukové a výzkumné centrum v dopravě Univerzity Pardubice a nejedná se o standardní stroj. Stroj byl využit pro výzkumnou činnost například v pracích [6], [7], [8] nebo pro diplomovou práci hodnocení tuhých maziv právě na tomto stroji [9].

Zkušební kladkový stav je zařízení, které se skládá z jednoho kola a jedné kladky. Jako kolo je zde použito skutečné tramvajové kolo. To se odvaluje po kladce, která představuje nekonečnou kolejnici.

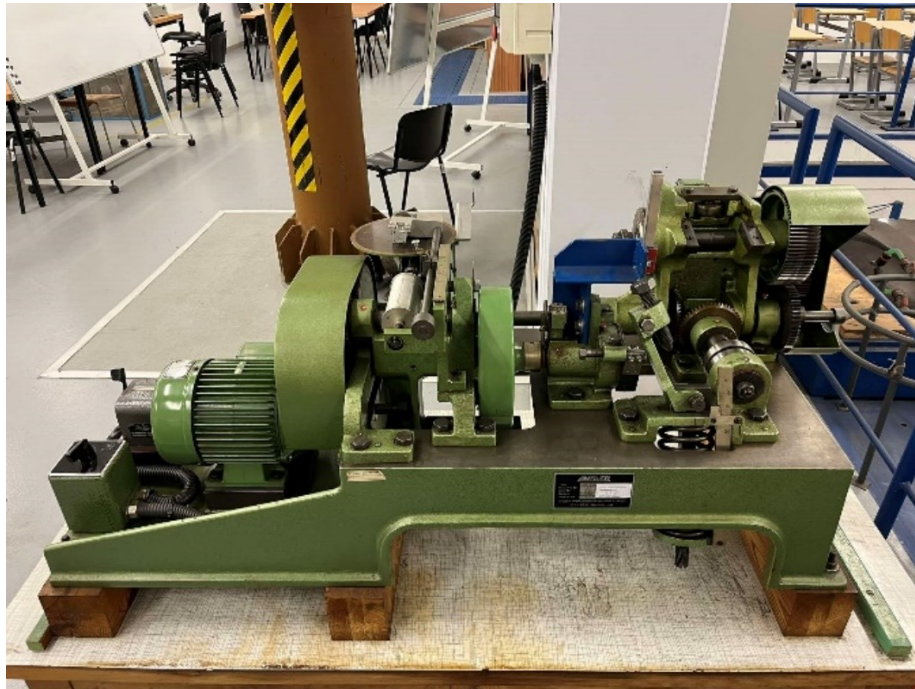
Jakožto zdroj rotace lze použít pouze motor kladky a kolo nechat volně otáčet nebo využít motoru kladky i kola. Ke kladce je připojen asynchronní motor za účelem udržování konstantní rychlosti, zatímco kolo využívá pro trakci a brzdění synchronní motor s permanentními magnety. Díky dvěma na sobě nezávislým pohonům lze na kladkovém stavu plynule měnit skluz. Normálovou sílu lze nastavit tlakem ve vzduchovém měchu, který působí na tramvajové kolo. Výsledná normálová síla se pak vypočítá z vlastní hmotnosti kola, zatížení od kyvného ramene, na kterém je kolo ložiskováno, a součtem se silou od vzduchového měchu. Na hřídeli kladky je umístěn momentový snímač, pomocí kterého si lze dopočítat tečnou sílu. Pomocí vztahu (1) pak lze z normálové a tečné síly vypočítat součinitel adheze. Oba hřídele, kladky i kola, jsou také osazeny snímači otáček.

$$\mu = \frac{F_t}{N} \quad (1)$$

Zkušební kladkový stav lze tak využít k simulaci experimentálních stavů, které ovlivňují adhezní lpění při přenosu tečných sil, jako je například mokré listí na kolejnici. Při testování tuhých maziv se odečítá velikost skluzu, kdy vyjádřením závislosti adheze na skluzu lze zjistit kvalitu kontaktu kolo-kolejnice a schopnost přenosu tečných sil.

2.3 Dvoukotoučový stroj Amsler A-135

Dvoukotoučový stroj Amsler A-135 (obrázek 8), kterým disponuje Výukové a výzkumné centrum v dopravě Univerzity Pardubice, je zkušební zařízení sloužící ke zkoušení vlastností materiálů při valivém kontaktu, kterými jsou například odolnost proti opotřebení a součinitel tření.



Obrázek 8 Dvoukotoučový stroj Amsler A-135

Jako zkušební vzorky při zkoušení odolnosti proti opotřebení používáme dvojici kotoučů o průměru v rozmezí 30 až 70 mm. Tyto kotouče jsou uloženy na dvou rovnoběžných hřídelích a přitlačovány k sobě nastavenou silou. Tuto sílu přitlaku lze měnit pomocí utahování šroubu nebo změnou předpjatosti pružiny. Tento mechanismus je vidět na obrázku 9. Kotouče se po sobě odvalují s konstantním převodem. Pokud mají zkoušené kotouče stejný průměr, tak tento převod zajistí skluz přibližně 10 % (jeden vzorek má 1,1krát větší obvodovou rychlost než druhý). Skluz lze tedy měnit změnou poměru velikosti kotoučů. Dále je také možné si zvolit z jedné ze dvou rychlostí stroje, zajistit kmitavý axiální posuv testovaných kotoučů, nebo lze zajistit periodické přitěžování a odlehčování. Během měření je možnost měřit průběh momentu tečné síly, díky čemuž lze dopočítat součinitel tření. Těto možnosti se využívá především u testování tuhých maziv.



Obrázek 9 Ústrojí pro přítlak kotoučů na zkušebním stroji Amsler A-135

Na začátku měření se vloží připravená tyčinka maziva do držáku (držák lze vidět na obrázku 9 v levé horní části), rozběhne se stroj a mazivo se přiloží k testovacímu kotouči. Pokud je stroj využíván k měření součinitele tření, tak je během měření pomocí převodového mechanismu točivého momentu na výchylku a zapisovacího zařízení udělán záznam průběhu součinitele tření na papír upevněný na váleček. Tento převodový mechanismus a zapisovací zařízení jsou zobrazeny na obrázku 10. Bližší informace k testování tuhých maziv pomocí metodiky popsané v EN 15427-2-1 jsou rozepsány v podkapitole 4.2.



Obrázek 10 Převodový mechanismus a zapisovací zařízení

3 Úprava zkušebního zařízení

Tato kapitola je zaměřena na možné vylepšení zaznamenávání a zpracování součinitele tření naměřeného pomocí dvoukotoučového stroje. Díky úpravě stroje lze výrazně zkrátit čas vyhodnocení naměřených veličin.

3.1 Specifikace a požadavky úpravy

Jak bylo v předchozí kapitole zmíněno, dvoukotoučový stroj Amsler využívá k zaznamenání součinitele tření (průběhu momentu tečné síly) převodový mechanismus, zapisující zařízení a váleček s papírem. Pro přenesení dat do počítače se musí po skončení měření papír se záznamem sundat a naskenovat. V počítači se záznam srovná, zrcadlově převrátí a dle vyznačeného nulového momentu se sestrojí osy. Příklad přeneseného záznamu do počítače bez os je zobrazen na následujícím obrázku 11.



Obrázek 11 Ukázka mechanicky naměřených dat

Tato metoda záznamu je sice odpovídající, ale průběh zpracování je značně zdlouhavý. Dalším problémem pak je, že během měření nemusí vystačit délka záznamového papíru pro dlouhá měření. Proto se nabízí možnost digitalizace měření a zaznamenávání průběhu rovnou do počítače. Tato úprava znamená připevnit ke stroji snímač, přenést data do počítače a vytvořit aplikaci pro zpracování těchto dat. Zadáním pro tuto úpravu je:

- Návrh upevnění snímače,
- Sestavení měřícího řetězce,
- Vytvoření počítačové aplikace pro zobrazení a zpracování dat.

Při této úpravě je vhodné zanechat možnost měřit paralelně také mechanicky, aby bylo možné výsledky poté porovnat s mechanickým zápisem. Důležité je také zanechat možnost využití stroje bez nutnosti počítače. Dále je zapotřebí manuálně zadávat parametry, jako jsou průměry kotoučů, přítlak a rozsah momentu na kterém se provádí měření. Celá úprava bude provedena s využitím součástí dostupných na pracovišti.

3.2 Sestavení měřicího řetězce

Z důvodu využití součástí dostupných na pracovišti, je vhodné se nejprve podívat na dostupné komponenty.

Ke snímání výchylky kyvadla, která je úměrná momentu na hřídeli dolního kotouče, je využito lineárního snímače polohy od výrobce Novotechnik s označením TX2-0200-716. Z názvu lze poznat, že tento snímač má výsuv 0–200 mm, přičemž funguje jako odporník, kdy poloha jezdce určuje poměr odporů. Změna napětí pak odpovídá poloze jezdce. Napájecí napětí u tohoto typu je 5 V. Při nulovém výsuvu je hodnotu napětí přibližně 0 V, zatímco při maximálním výsuvu napětí blíží se napájecímu. Jedná se o konstrukci s tyčí z nerezové oceli a kovovým pouzdem. Snímač je také utěsněn proti vnikání nečistot.

Pro sběr dat je k dispozici NI USB-6212, což je multifunkční zařízení od společnosti National Instruments. Toto zařízení se běžně používá pro sběr dat v laboratořích, při testování, měření, výukové účely a vědecký výzkum. Jeho hlavní výhody jsou přesnost, připojení přes USB a kompatibilita s programy jako je Matlab nebo LabVIEW.

Dále je zapotřebí mít PC nebo notebook s balíkem ovladačů NI DAQmx a aplikaci pro zpracování a vykreslení dat, která je blíže rozebrána v podkapitole 3.4.



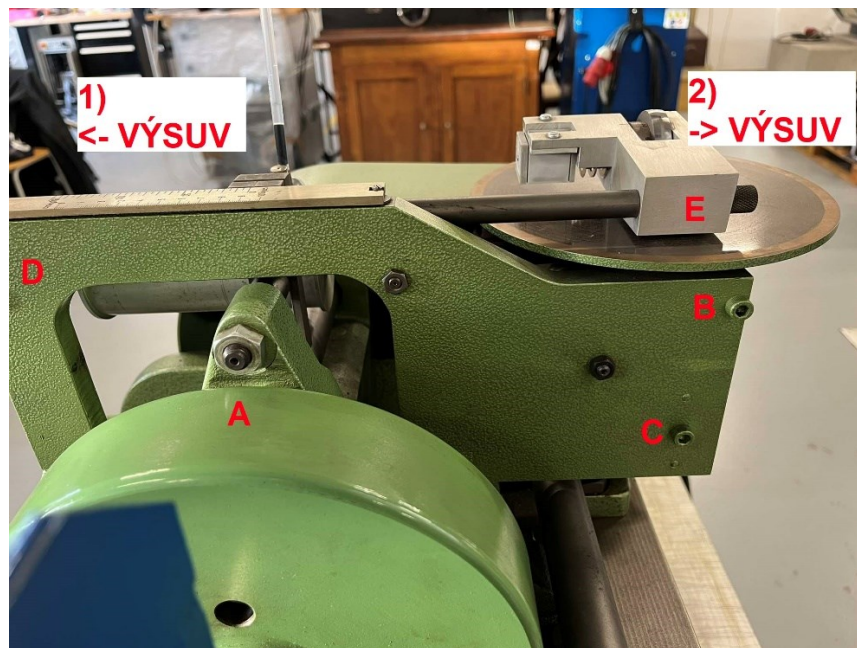
Obrázek 12 Lineární snímač polohy a sběrnice dat

3.3 Návrh upevnění snímače

Návrh upevnění snímače je rozdělen do tří podkapitol – varianty uchycení, uchycení pohyblivého konce a uchycení pevného konce.

3.3.1 Varianty uchycení

Při návrhu upevnění snímače nastává otázka, kam a jak ho uchytit. Po bližším pohledu na stroj přicházely v úvahu dvě varianty, které jsou zobrazeny na obrázku 13.



Obrázek 13 Varianty uchycení lineárního snímače

Pro uchycení snímače existuje více možných variant, ale jako nejlepší možnost se jeví uchycení držáku nepohyblivého konce přímo za šrouby zkušebního stroje. Pro pohyblivý konec se pak nabízí uchycení za závitovou tyč kyvadla nebo v místě převodového mechanismu výkyvu na moment. Tato místa jsou znázorněna v obrázku 13.

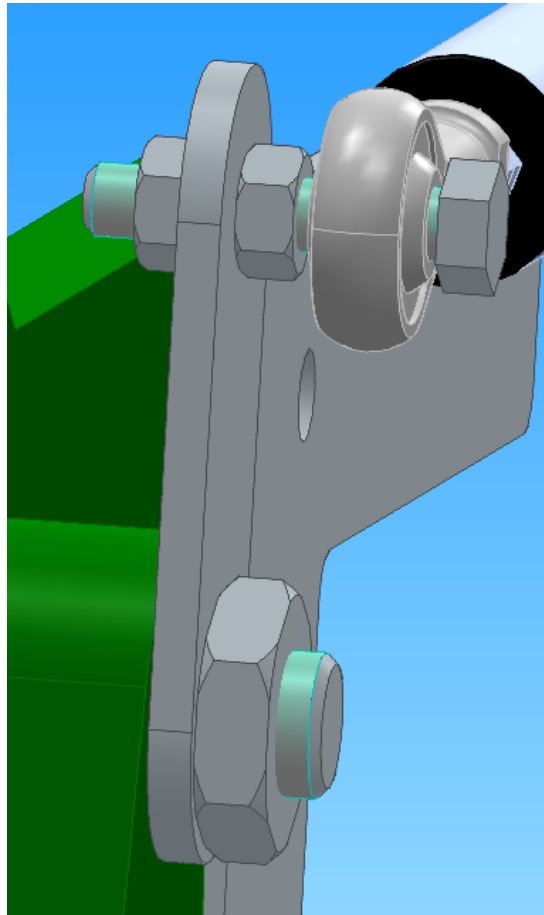
První varianta je výsuv lineárního snímače směrem doleva ve smyslu dle obrázku 13. Při této variantě je držák pevného konce uchycen za šrouby „B“ a „C“, zatímco držák pohyblivého konce za závitovou tyč kyvadla v místě „A“.

Jako druhá varianta se jeví uchycení pevného konce za šroub „D“ a pohyblivý konec v místě převodníku „E“. Výsuv by v tomto případě byl na opačnou stranu než ve variantě 1.

Po zhodnocení obou variant byla vybrána varianta první, jelikož v druhé variantě by byl pevný konec uchycen pouze jedním šroubem a uchycení pohyblivého konce v místě převodníku by bylo oproti variantě 1 složitější.

3.3.2 Uchycení pohyblivého konce

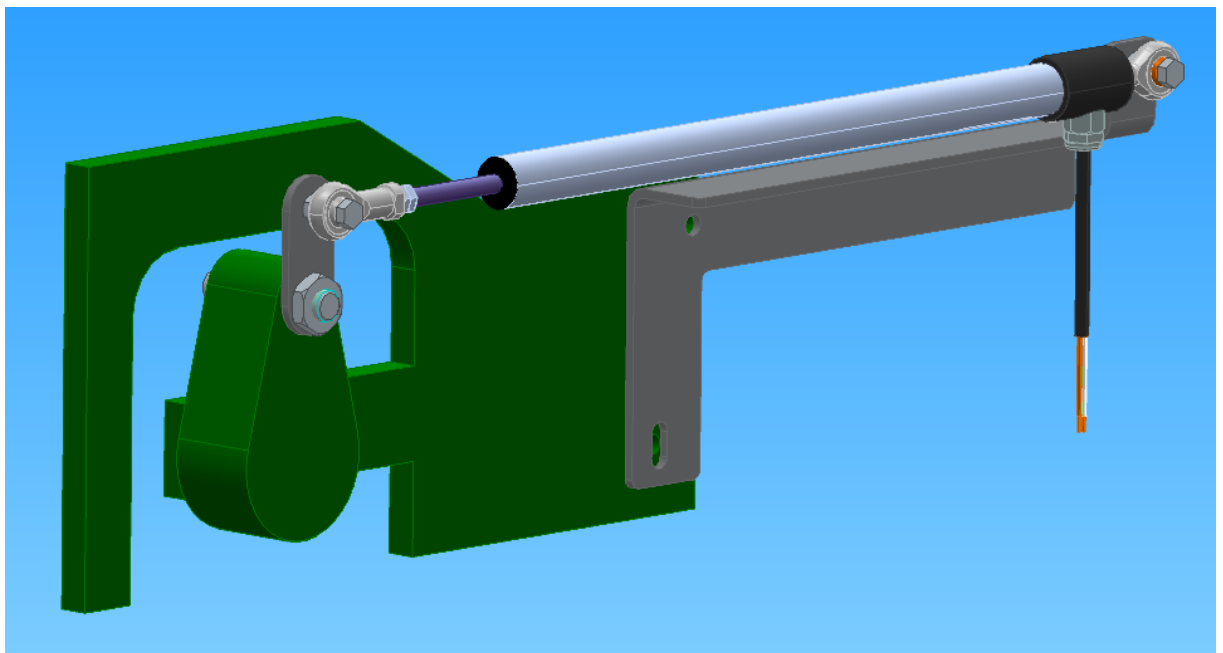
Pro uchycení pohyblivého konce na závitovou tyč je potřeba navrhnout držák, který se zde uchytí pomocí matice ke kyvadlu a ke kterému se následně uchytí pohyblivý konec senzoru. Tento držák nemusí být složitý, stačí pouze „prodloužit“ kyvadlo. Řešení toho držáku je znázorněno na obrázku 14. Jeden konec je uchycen za závitovou tyč a na druhém konci je přes šroub M5 a dvě matice zajištěn senzor. Dle dokumentace mají oka pro uchycení průměr 5 mm. Z tohoto důvodu zde slouží šroub M5 jako čep a pomocí dvou matic pak lze nastavit vůli pro příčný pohyb. Držák je vyroben z nerezového plechu o tloušťce 3 mm. Tento způsob uchycení je funkční a hlavní výhodou je jednoduchost a finanční nenáročnost. Nevýhodou může být uchycení pouze na jednu díru a z toho plynoucí možné pootočení držáku. Odpor proti vysunutí senzoru je také vzhledem k síle kyvadla velmi malý, takže se pootočení nepředpokládá.



Obrázek 14 Uchycení pohyblivého konce

3.3.3 Uchycení pevného konce

Pro uchycení nepohyblivého konce je potřeba navrhnout držák, který bude uchycen na dva šrouby „B“ a „C“. Tento držák se musí vzhledem k délce senzoru vytáhnout mimo stroj. Kyvadlo je při nulovém momentu ve svislé poloze a při měření vykonává pohyb pouze směrem opačným, než je uchycen tento držák. Je však vhodné, aby měl senzor při nulovém momentu počáteční vysunutí. Toto vysunutí zajišťuje, že v případě pohybu kyvadla směrem k uchycení pevného konce nedojde k nežádoucímu působení na senzor a nedojde k jeho poškození. S hodnotou počátečního vysunutí se musí tedy také počítat při návrhu držáku. Tento držák je v sestavě s druhým držákem a počátečním vysunutím zobrazen na obrázku 15. Uchycení senzoru je zde pak řešeno stejně jako u druhého konce přes šroub a dvě matice. Výhody jsou stejné jako u předešlého držáku v jednoduchosti a finanční nenáročnosti. Problémem může být přesah talířku převodníku nad šroubem „B“. Je proto nutné, aby ohyb držáku byl v jedné rovině s horní stranou desky stroje. Kvůli tomuto je také potřeba pohlídat, aby díra pro šroub nebyla moc blízko k ohybu a nedošlo k vyboulení díry. Držák byl navrhnout vzhledem k těmto okolnostem a k žádnému problému nedošlo. Výkresová dokumentace obou držáku a sestavy je v příloze.



Obrázek 15 Sestava uchycení senzoru

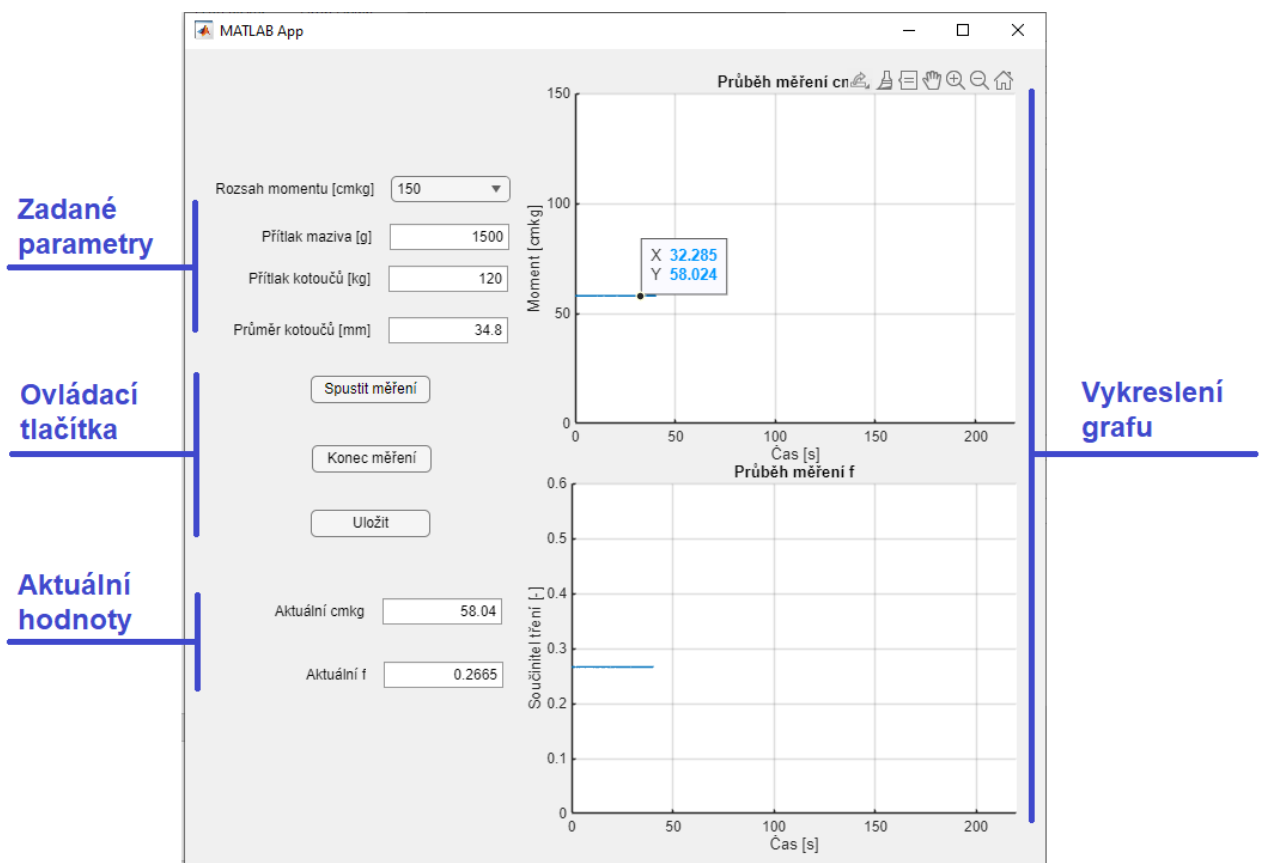
3.4 Tvorba aplikace

Po úpravě stroje a sestavení měřicího řetězce je potřeba vytvořit aplikaci pro zpracování dat z lineárního senzoru. Tato aplikace nahrazuje mechanický zápis průběhu momentu na papír omotaný kolem válečku. Na úvod je vhodné stanovit požadavky, které by měla aplikace splňovat.

Požadavky:

- Manuální zadání parametrů potřebných k vyhodnocení, které nevstupují elektronicky,
- Přepočítání momentu na součinitel tření v reálném čase,
- Zobrazení aktuální hodnoty momentu a součinitele tření,
- Vykreslení grafu v reálném čase,
- Možnost zastavit měření,
- Možnost uložení:
 - o Graf jako .png/.jpg,
 - o Naměřená data spolu s parametry do Excelu.

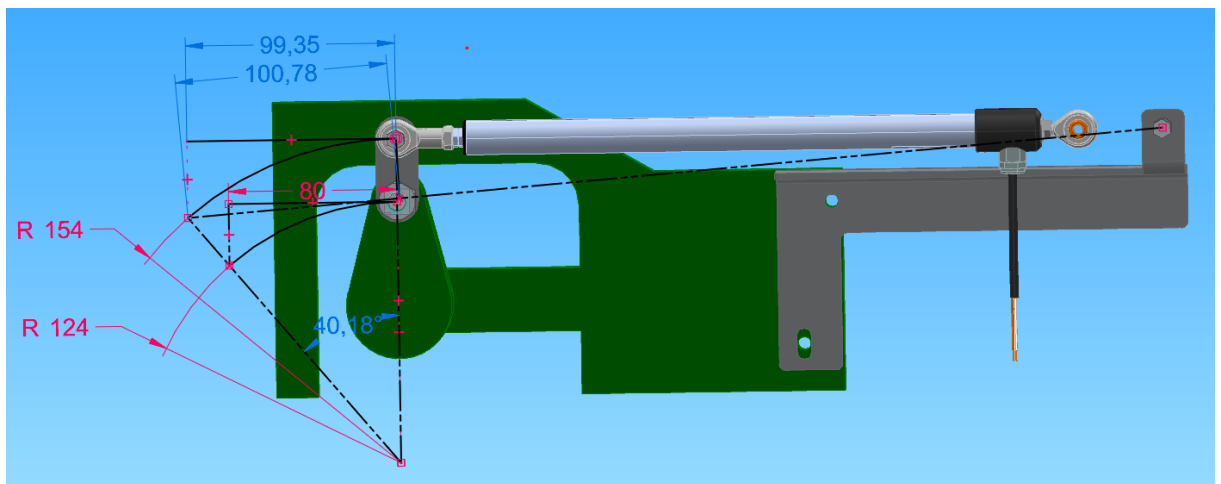
S ohledem na využití a použité komponenty měřicího řetězce se nabízí pro tvorbu aplikace software LabVIEW anebo Matlab App Designer. Naše aplikace byla vytvořena v druhém zmíněném softwaru. Prostředí aplikace je vyobrazeno na obrázku 16.



Obrázek 16 Prostředí aplikace

3.4.1 Kalibrace – geometrický rozbor

Pro zpracování dat je potřeba převést napětí, které je získáno pomocí výsuvu senzoru, na moment, který je výstupem výkyvu kyvadla. Myšlenka této kalibrace je taková, že výsuv 40 mm odpovídá momentu 0 cmkg a výsuv 140,78 mm (výsuv při dosažení maximálního momentu) odpovídá zase maximu z rozsahu zvolené stupnice. Jelikož je pohyblivý konec uchycen na kyvadle, nepohybuje se tento bod po přímce, ale po výseči kružnice. Z tohoto důvodu se musí udělat geometrický rozbor, zda tento předpoklad bude platit a jak velká bude nepřesnost vzhledem k pohybu po výseči. Tento rozbor byl proveden při návrhu v 3D softwaru Solid Edge a je znázorněn na obrázku 17. Pokud by se volný konec pohyboval po přímce, maximální moment 150 cmkg by příslušel výsuvu 99,35 mm (po přičtení počátečního výsuvu 40 mm je pak celkový výsuv 139,35 mm). V případě pohybu po kružnici je maximální moment roven hodnotě výsuvu 100,78 mm (140,78 mm celkově). Rozdíl mezi těmito hodnotami není nějak významný a nepřesnost je přibližně 1,5 %, což je přijatelná hodnota. Jelikož ale na skutečném stroji vstupuje do měření více proměnných, nelze spoléhat na přesnost odměřených rozměrů a pro maximální spolehlivost byla provedena kalibrace.



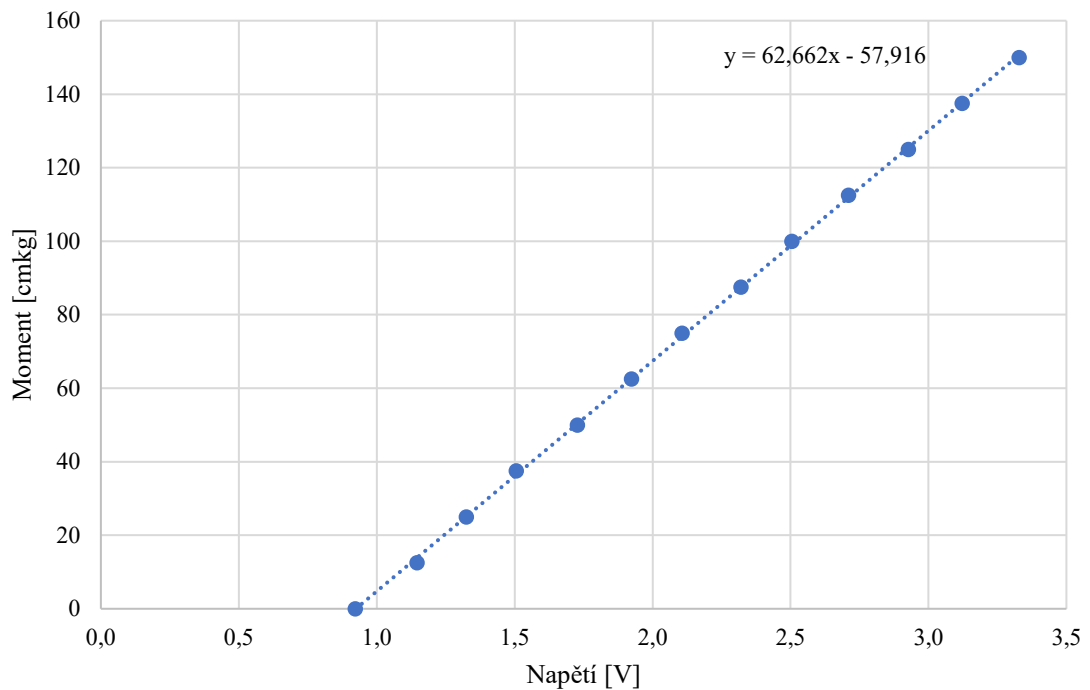
Obrázek 17 Geometrický rozbor výsuvu senzoru

3.4.2 Kalibrace – funkce pomocí naměřených bodů

Jelikož se nedá spoléhat na přesnost naměřených rozměrů, byla provedena kalibrace pomocí naměřených hodnot napětí pro jednotlivé hodnoty momentu. Kalibrace proběhla při vypnutém zkušebním zařízení, rozsah měření byl nastaven na 150 cmkg. Kotouče během kalibrace nebyly v kontaktu a zatížení bylo vyvozeno pomocí ramene přišroubovaného k hřídeli dolního kotouče. Na rameno o známé délce 500 mm se postupně zavěšovala závaží s krokem 250 g. Pro každou hodnotu se zaznamenalo napětí na analogovém vstupu ústředny a zapisoval se tomu odpovídající moment. Hodnota momentu byla pro jistotu kontrolována na stupnici stroje. Celkově bylo tedy odečteno 13 hodnot napětí pro závaží od 0 kg po 3 kg (od 0 cmkg po 150 cmkg). Hodnoty napětí pro jednotlivé kroky jsou zapsány v tabulce 2. Z těchto naměřených dat se následně vytvořil graf, ve kterém je těmito body pak proložena křivka a z ní zjištěný předpis funkce, dle které následně probíhá výpočet momentu z naměřeného napětí. Z geometrického rozboru bylo zjištěno, že je zde z principu nějaká nelinearita, ale naměřené body nevykazovaly nelinearitu větší, než je náhodný rozptyl. Z tohoto důvodu byla zvolena lineární funkce. Naměřené body pro kalibraci a předpis funkce jsou zobrazeny na obrázku 18.

Tabulka 2 Hodnoty napětí a odpovídající moment pro kalibraci

Napětí [V]	Moment [cmkg]
0,922	0
1,146	12,5
1,325	25
1,506	37,5
1,728	50
1,924	62,5
2,107	75
2,321	87,5
2,505	100
2,711	112,5
2,927	125
3,123	137,5
3,329	150



Obrázek 18 Naměřené body pro kalibraci proložené funkcí

Je nutno podotknout, že tato kalibrace je funkční pouze pro daný senzor. Pokud by se senzor vyměnil za jiný, bylo by nutné kalibraci provést znovu. Pro případ, kdy by došlo k pootočení držáku pohyblivého konce senzoru, je vhodné platnost kalibrace po návratu do původní polohy minimálně překontrolovat, případně provést znovu. Po provedení kalibrace se získaná data shodují s mechanickým zápisem a je tedy možné již zaznamenávat průběh měření v reálném čase do počítače.

4 Měření třecích podmínek

Tato kapitola je věnována změně třecích podmínek při testování tuhých maziv na dvoukotoučovém stroji Amsler A-135 při různých hodnotách přítlaku maziva na kotouč. Toto měření bude probíhat dle metodiky z normy EN 15427-2-1. Nejdříve jsou probrány parametry zkoušky, poté metodika zkoušení, a nakonec naměřené hodnoty.

4.1 Parametry zkoušky

Jelikož měření probíhá na dvoukotoučovém stroji Amsler A135, je vhodné uvést parametry tohoto stroje a zkušebních kotoučů. Mezi tyto parametry patří otáčky motoru, převodové poměry, rozsah měření momentu, rozsah přítlaku kotoučů a velikost kotoučů. Motor nabízí 2 stupně rychlostí. Otáčky na prvním stupni jsou rovny 1479 min^{-1} a na druhém stupni 2991 min^{-1} . Od motoru na kotouče jsou pak následující převodové poměry:

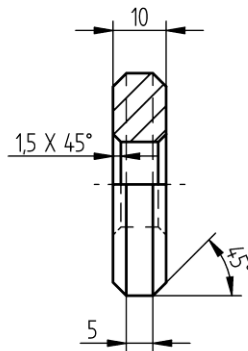
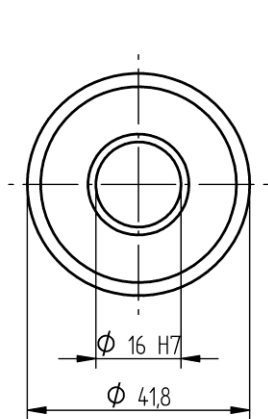
$$\text{Horní kotouč} - 72/31 \times 35/35 \times 100/30 = 7,742$$

$$\text{Dolní kotouč} - 72/31 \times 100/35 \times 76/59 = 8,552$$

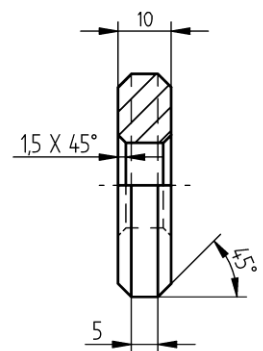
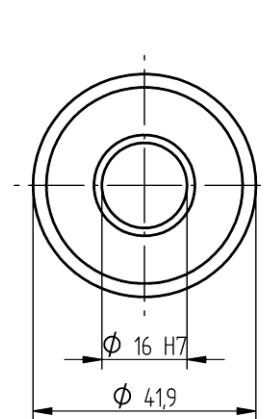
Tyto převodové poměry zajistí při stejném průměru obou kotoučů skluz přibližně 10 %.

Na stroji si lze nastavit rozsah měřeného momentu na 10, 50, 100, 150 cmkg. Tento rozsah se nastavuje přidáním nebo odebráním závaží na kyvadle. Rozsah přítlaku kotoučů je maximálně 200 kg. Nastavení přítlaku je možné pomocí tlačného šroubu, který je vidět na obrázku 9. Při našem měření je využito druhého stupně otáček stroje, rozsahu momentu 150 cmkg, přítlaku kotoučů 95 kg a zkušební kotouče o průměru 41,8 mm horní a 41,9 mm dolní. Měření je provedeno pro dva vzorky maziva, přičemž jedno z nich je běžně používané v provozu. Jelikož zkušební kotouče mají odlišné průměry, je proveden výpočet skluzu, aby se zjistilo, jak významně se bude skluz lišit od hodnoty 10 %. Dále je potřeba provést výpočet kontaktního tlaku. Pro tento výpočet tlaku v kontaktu zkušebních kotoučů je využita Hertzova teorie pro dvourozměrný případ. Rozměry kotoučů jsou na následujícím obrázku 19.

Horní kotouč



Dolní kotouč



Obrázek 19 Zkušební kotouče

V následujících vzorcích pro výpočet parametrů kotoučů je použit index k . Tento index nabývá hodnoty 1 pro horní kotouč a hodnoty 2 pro kotouč dolní.

Otáčky jednotlivých kotoučů:
$$n_k = \frac{n_m}{i_k} \quad (2)$$

Skluz:
$$s = \frac{(v_1 - v_2)}{\frac{v_1 + v_2}{2}} \cdot 100 \quad (3)$$

Přepočtený modul pružnosti E^* :
$$E^* = \frac{E}{2 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4)$$

Kombinovaný poloměr křivosti R :
$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \quad (5)$$

Poloviční délka dotykové oblasti a :
$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot N}{\pi \cdot b \cdot E^*}} \quad (6)$$

Sřeni hertzovský tlak v kontaktu p_s :
$$p_s = \frac{N}{S} = \frac{N}{2 \cdot a \cdot b} \quad (7)$$

Maximální hertzovský tlak v kontaktu p_{max} :
$$p_{max} = \frac{E^* \cdot a}{2 \cdot R} \quad (8)$$

Z výpočtů vychází střední hertzovský tlak 633,98 MPa a maximální hertzovský tlak 810,63 MPa, což je hodnota, která je v doporučeném rozsahu přítlaku popsáném v normě.

Skluz 9,677 % je trochu nižší, ale neliší se významně od rozsahu doporučeného normou.

Všechny parametry zkoušky jsou pak přehledně vypsány v následující tabulce.

Tabulka 3 Parametry měření

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Teplota	t	[°C]	22,4
Vlhkost	φ	[%]	18,4
Rozsah momentu		[cmkg]	150
Přítlak kotoučů	m	[kg]	95
Otáčky motoru	n_m	[min ⁻¹]	2991
Převodový poměr horní	i_1	[-]	7,742
Převodový poměr dolní	i_2	[-]	8,552
Otáčky horního kotouče	n_1	[min ⁻¹]	386,334
Otáčky dolního kotouče	n_2	[min ⁻¹]	349,743
Obvodová rychlost horního kotouče	v_1	[m/s]	0,845
Obvodová rychlost dolního kotouče	v_2	[m/s]	0,767
Skluz	s	[%]	9,677
Průměr horního kotouče	d_1	[mm]	41,8
Průměr dolního kotouče	d_2	[mm]	41,9
Šířka kontaktu	$2b$	[mm]	5
Modul pružnosti	E	[GPa]	210
Poissonovo číslo	ν	[-]	0,3
Normálová síla v kontaktu	N	[N]	931,95
Přepočtený modul pružnosti	E^*	[GPa]	115,385
Kombinovaný poloměr křivosti	R	[mm]	10,462
Poloviční délka dotykové oblasti	a	[mm]	0,147
Plocha dotykové oblasti	S	[mm ²]	1,47
Střední hertzovský tlak	p_s	[MPa]	633,98
Maximální hertzovský tlak	p_{max}	[MPa]	810,63

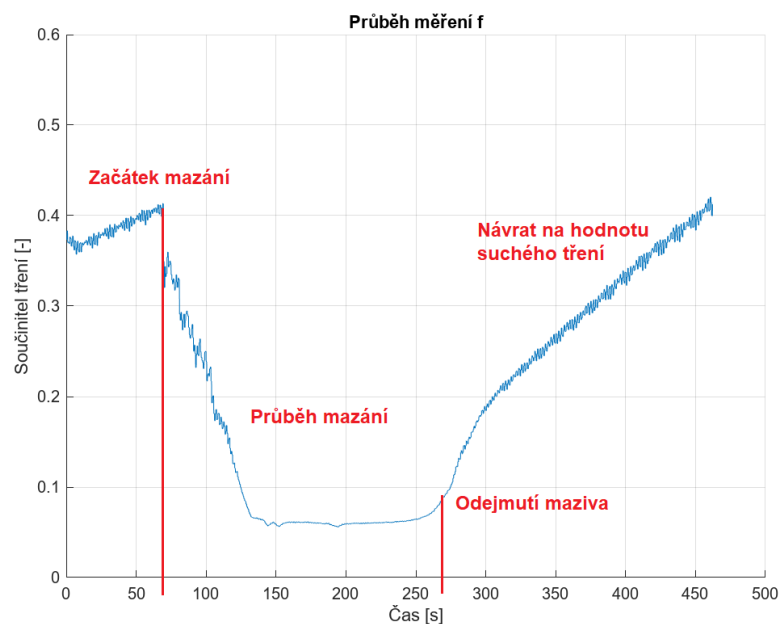
4.2 Metodika zkoušení

Metodiku zkoušení tuhých maziv pro testování na dvoukotoučovém stroji popisuje norma EN 15427-2-1, která nahrazuje normu EN 16028. Postup při měření dle normy a námi zvolený lze shrnout do následujících kroků:

- 1) Upnutí kotoučů a nastavení síly jejich přitlaku.
- 2) Spuštění stroje na požadované otáčky a ponechání kotoučů bez mazání, než hodnota součinitele tření dosáhne hodnoty 0,4, což představuje hodnotu suchého tření.
- 3) Po dosažení požadované hodnoty se přiloží tuhé mazivo a pokud je mazivo účinné, klesne součinitel tření.
- 4) Kotouče jsou mazány po dobu 200 sekund a následně je odejmuto mazivo.
- 5) Po odejmutí maziva součinitel tření opět narůstá na hodnotu suchého tření. Po dosažení hodnoty 0,4 je zkouška ukončena.
- 6) Po dokončení zkoušky je možné vzorek maziva zvážit, a tak zjistit úbytek maziva.

Testovací kotouče je vhodné vyrobit z materiálů, které se reálně používají pro výrobu železničních kol a kolejnic. Díky tomu pak lze při testování a dosažení požadovaného Hertzova tlaku dosáhnout reprezentativního poškození povrchové vrstvy a mazání kontaktní plochy. Testovací vzorky tuhého maziva jsou ve formě tyčinek vyrobených z dodaných vzorků maziva tak, aby bylo možné je umístit do držáku na stroji. Pro testování je dle normy potřeba tento vzorek zajet tak, aby se tvarově přizpůsobil. Přítlak kotoučů je doporučený 800–1000 MPa. Skluz mezi kotouči je doporučen v rozmezí 10–20 %. [5]

Vyhodnocení probíhá z průběhu součinitele tření, který je během testu zapisován na papír omotaný kolem válečku. Jelikož byla ale v rámci tohoto testování provedena úprava stroje, výsledný graf průběhu součinitele tření se v reálném čase vykresluje přímo do počítače. Takový průběh je znázorněn na obrázku 20. Začátek měření po spuštění stroje začíná nárůstem součinitele tření na hodnotu typickou pro suché tření 0,4. Následně se přiloží mazivo a při správné funkci mazání hodnota součinitele klesne. Mazání kotoučů probíhá přibližně 200 sekund. Průběh hodnoty součinitele tření závisí na použitém vzorku maziva jak při mazání, tak při odejmutí vzorku. [5]



Obrázek 20 Průběh měření součinitele tření

Dle normy jsou sledovány následující parametry [5]:

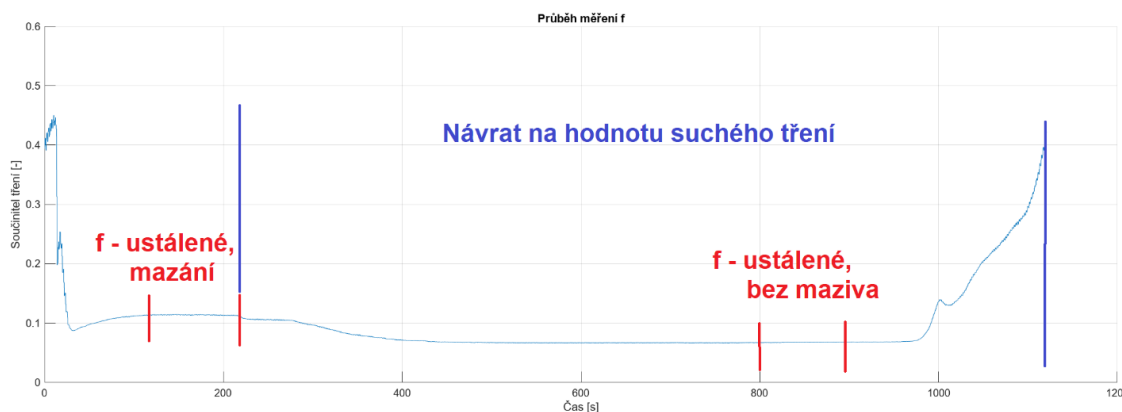
- 1) Rychlost poklesu součinitele při přiložení maziva,
- 2) Ustálená hodnota během mazání,
- 3) Rychlost návratu součinitele na hodnotu suchého tření po odebrání vzorku maziva.

V normě je uvedeno, že tato metodika je srovnávací pro měření na jednom zařízení. Všechny tyto parametry maziva lze tedy srovnávat pouze pokud jsou naměřeny na stejném zkušebním zařízení. Norma však nedefinuje zcela jasně zkušební podmínky a postupy, které mohou ovlivnit výsledky.

Jako podmínky testování jsou uvedeny normální vlhkost a teplota laboratoře. Jelikož ale při tření dochází ke vzniku tepla, kotouče se značně zahřívají a v normě není specifikováno případné chlazení. V našem případě tak kotouče během testování chladíme vzduchem a nové měření probíhá až když jsou kotouče ochlazeny zpět na teplotu laboratoře. Jako další není dostatečně definován vzorek maziva a jeho aplikační plocha dle normy může způsobit nepřesnost měření. Aplikační plocha má být plošná jako ve skutečném provozu. Pokud se však vzorek mírně vychýlí, plocha se změní a výsledky mohou být ovlivněné. Dále mohou mít různé vzorky odlišnou pórovitost a tím ovlivnit účinnost maziva. V neposlední řadě také v normě není předepsána síla přitlaku vzorku maziva. Tento faktor však významně ovlivňuje účinnost maziva, a proto se tato práce zabývá testováním a hodnocením vlivu síly přitlaku maziva na třecí podmínky v kontaktu na dvoukotoučovém stroji.

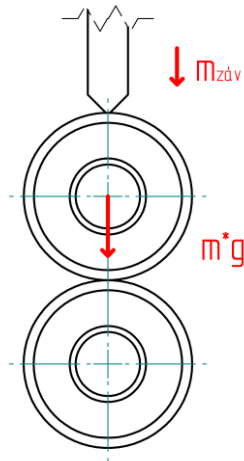
4.3 Hodnocené veličiny

Již v podkapitole 4.2 je popsáno, jaké veličiny se hodnotí zkušební metodikou dle normy EN 15427-2-1, proto je potřeba specifikovat, na hodnocení, jakých veličin se zaměřuje tato práce. Námi hodnocené veličiny jsou názorně zobrazeny v obrázku 21. Červeně označené jsou úseky, z nichž jsou počítány průměrné hodnoty ustáleného součinitele tření během mazání a po odejmutí maziva. Průměrné hodnoty jsou počítány z hodnot svislé osy z nejvíce ustálených úseků o délce alespoň 100 s. Modře vyznačenou hodnocenou veličinou je celková doba návratu součinitele na hodnotu suchého tření od okamžiku odejmutí maziva.



Obrázek 21 Námi hodnocené veličiny

Jelikož je mazivo přitlačováno svisle, jak je zobrazeno na obrázku 22, je potřeba toto zatížení do přítlaku kotoučů zahrnout a naměřený součinitel tření přepočíst. Během měření stroj počítá s normálovou silou v kontaktu nastavenou přítlakem horního kotouče. Při přiložení maziva je zapotřebí do výpočtu přičíst i normálovou sílu vyvozenou hmotností závaží pro přítlak maziva.



Obrázek 22 Znárodnění působení přítlaku maziva

Přepočtený součinitel tření pak získáme ze vztahu:

$$f_k = f \cdot g \cdot \frac{m}{m + m_{zav}} \quad (9)$$

4.4 Vzorek maziva M1

Jako první byl testován vzorek maziva M1. Tento vzorek je běžně používaný v praxi. Tyčinka maziva nemá téměř žádnou pórovitost a kontaktní plocha je upravena do špičky. Styk maziva s kotoučem je tedy plocha o délce válcové části kotouče a šířce přibližně 1 mm (dle stavu aktuálního opotřebení vzorku).



Obrázek 23 Vzorek maziva M1

4.4.1 Naměřené hodnoty pro vzorek M1

Zkoušení vzorku proběhlo pro různé hodnoty přítlaku v rozmezí 1–5 kg. Před každou zkouškou byl vzorek očištěn kusem látky, aby byly odstraněny zbytky maziva z předešlé zkoušky. Zkoušení probíhalo na vychlazených kotoučích, aby počáteční podmínky byly pro všechny zkoušky stejné. Mezi každým měřením se tedy kotouče nechaly minimálně 10 minut chladit vzduchem. Po vychladnutí se spustil stroj spolu se záznamem a po dosažení hodnoty součinitele tření 0,4 (suché tření) byl přiložen vzorek se závažím. Pro každé nové zatížení byla kontaktní plocha vzorku upravena, aby byla stejná pro všechna měření. Vzhledem k zatěžování maziva (obrázek 22) byl ustálený součinitel tření během mazání přepočten pomocí vztahu (9).

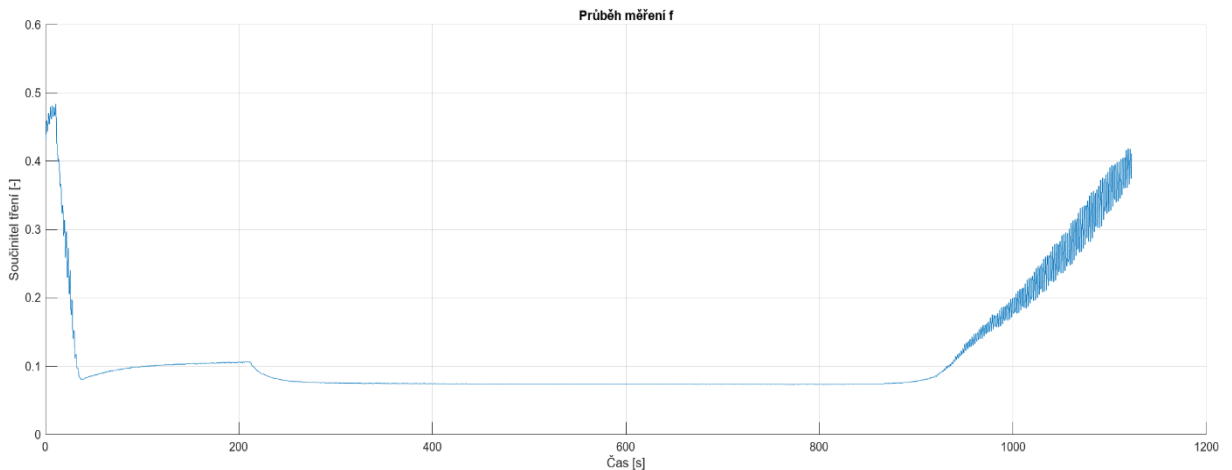
Naměřené a přepočtené hodnocené veličiny jsou vypsány v tabulce 4.

Tabulka 4 Naměřené hodnocené veličiny vzorku M1

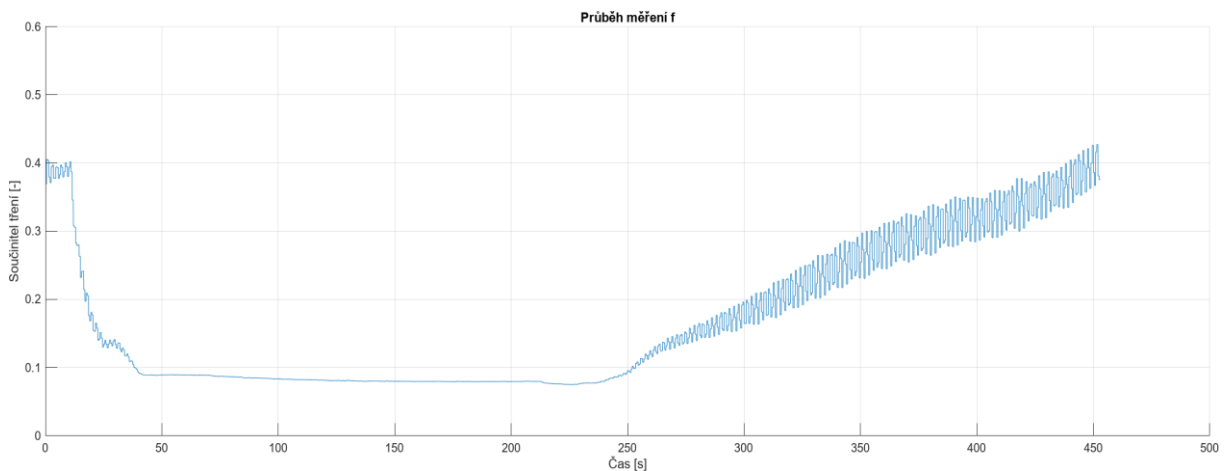
Označení měření	Závaží ¹⁾	f – ustálené, mazání	f _k – ustálené, mazání	f – ustálené, bez maziva	Návrat na hodnotu suchého tření
	[kg]	[-]	[-]	[-]	[s]
2025-02-25_17-33-45	1	0,1111	0,1096	0,0803	900
2025-02-25_17-48-08	1	0,0939	0,0927	0,0685	460
2025-02-25_18-34-34	1	0,0909	0,0897	0,0713	490
2025-02-26_17-58-23	1	0,0892	0,0880	0,0782	370
2025-02-26_12-30-12	1,5	0,1026	0,1007	0,0747	430
2025-02-26_12-40-15 ²⁾	1,5	0,0812	0,0797	XX	180
2025-02-26_13-02-42	1,5	0,0969	0,0951	0,0728	520
2025-02-26_17-32-54	2	0,1186	0,1158	0,0813	1140
2025-02-28_10-39-46	2	0,1163	0,1136	0,0775	870
2025-02-28_11-02-40	2	0,0888	0,0867	0,0736	620
2025-02-28_11-25-03	2	0,0929	0,0907	0,0849	330
2025-02-28_12-06-04	2,5	0,1090	0,1059	0,0796	910
2025-02-28_12-15-01 ²⁾	2,5	0,0875	0,0850	XX	240
2025-02-28_12-38-29 ²⁾	2,5	0,0880	0,0855	XX	330
2025-02-26_13-51-01	3	0,0965	0,0933	0,0708	660
2025-02-26_14-27-22	3	0,1060	0,1025	0,0780	1040
2025-02-26_15-07-24	3	0,1019	0,0985	0,0801	750
2025-03-04_12-26-53	4	0,1268	0,1214	0,0736	1370
2025-03-04_13-08-07	4	0,0979	0,0937	0,0719	1450
2025-03-04_14-01-16	4	0,1051	0,1006	0,0736	2150
2025-03-04_14-41-43 ³⁾	4	0,0855	0,0818	XX	170
2025-03-04_15-08-03 ³⁾	4	0,0999	0,0956	XX	200
2025-02-26_16-01-22	5	0,1087	0,1030	0,0724	890
2025-02-26_16-27-10	5	0,1162	0,1101	0,0769	1250
2025-02-26_16-52-37	5	0,1169	0,1108	0,0739	900

- 1) K závaží je nutno přičíst hmotnost závitové tyče, na které je závaží uchyceno. Hmotnost této tyče činí 262 g.
- 2) Součinitel tření se u těchto měření po odejmutí maziva neustálil.
- 3) Tato měření probíhala s aktivním čištěním kotoučů během mazání (jemný brusný papír ve stálém kontaktu s dolním kotoučem).

Během měření byl průběh pro všechny zatížení velmi podobný. Po přiložení maziva součinitel tření klesl, následně trochu povyrosl na hodnotu, kde se ustálil a po odejmutí maziva se ustálil na nové hodnotě. Ve třech případech byl však průběh odlišný. Po přiložení maziva součinitel tření stále klesal a po odejmutí začal téměř ihned růst na hodnotu suchého tření. Proč tomu tak bylo nelze říct, počáteční podmínky měření byly vždy stejné a tento průběh nastal pouze 3krát z 25 měření. Tyto odlišné průběhy jsou znázorněny na obrázku 24 a 25.



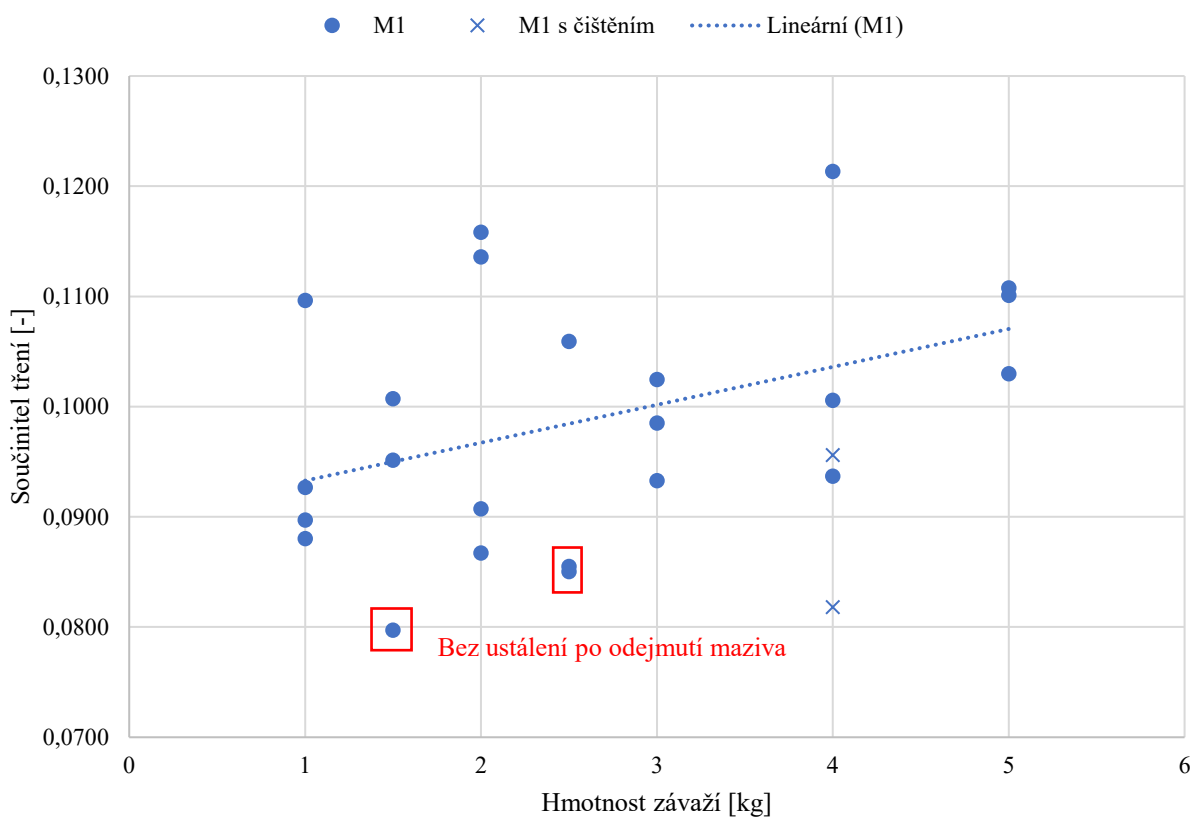
Obrázek 24 Průběh měření s následným ustálením pro závaží 2,5 kg



Obrázek 25 Průběh měření bez následného ustálením pro závaží 2,5 kg

4.4.2 Ustálený součinitel tření během mazání

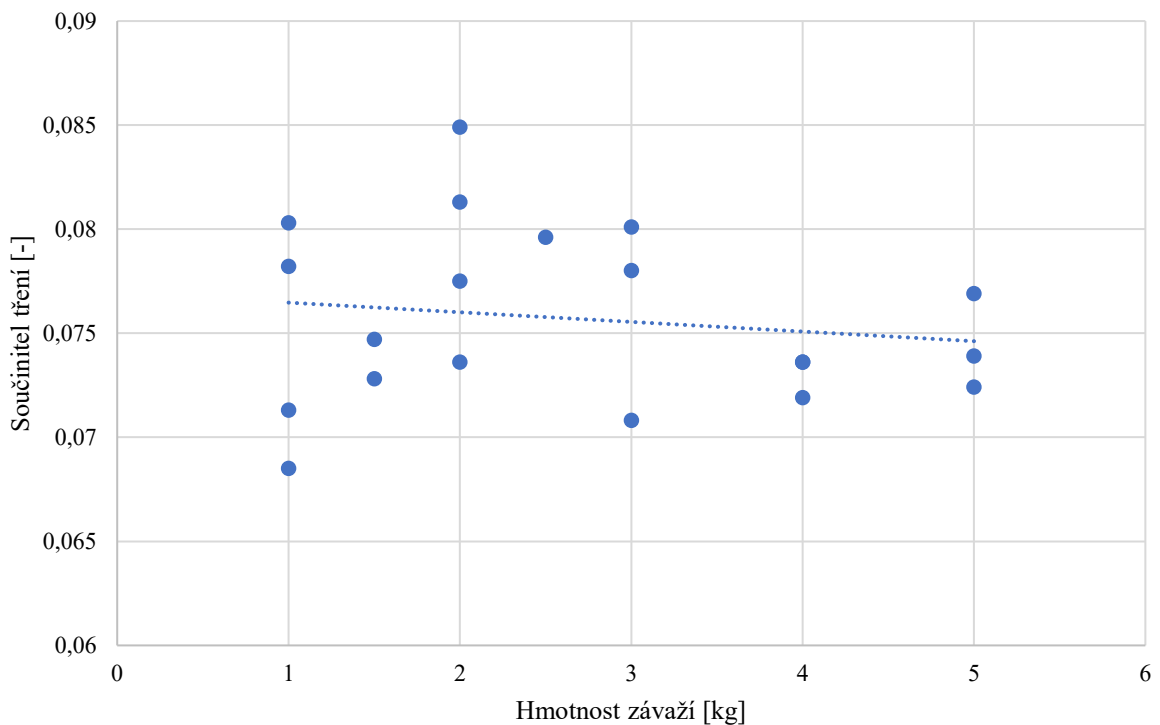
Jak již bylo zmíněno, ustálený součinitel tření během mazání je potřeba kvůli vlivu závaží přepočíst. Tyto přepočtené hodnoty se však nějak významně neliší od původních. Hodnoty jsou zaneseny do grafu, který je na obrázku 26. Při bližším pohledu a proložení lineární spojnice se zdá, že s vyšším přitlakem je součinitel tření mírně vyšší než při přitlaku nižším. Lineární spojnice ukazuje mírně rostoucí trend, ale s velkým rozptylem. Na základě studia literatury [10] se nabízí vysvětlení tohoto trendu tak, že čím vyšším přitlakem působíme, tím se více maziva nanese na povrch kotouče. To znamená, že při vyšším přitlaku se lamely maziva, které se přenesly na kotouče, nestíhají zajet a tím zvyšují součinitel tření oproti nižšímu přitlaku. V grafu jsou také znázorněny dva body křížkem. Tyto body jsou pro měření, které probíhalo s aktivním čištěním kotoučů během mazání. Měření s čištěním kotoučů proběhlo pouze pro přitlak 4 kg. Z grafu je vidět, že součinitele tření jsou v těchto případech spíše nižší než bez čištění. To však může být způsobeno tím, že čištěním odstraňujeme nadbytečné mazivo. Další možností je také nahromadění maziva na čistící aparatuře, díky čemuž se sníží čistící efekt a zajistí se dodatečný tlak pro zajetí lamel maziva. Červeně jsou vyznačeny odlišné průběhy bez následného ustálení. V těchto případech byl součinitel tření nižší než u ostatních měření pro dané závaží.



Obrázek 26 Ustálený součinitel během mazání pro vzorek M1

4.4.3 Ustálený součinitel tření bez maziva

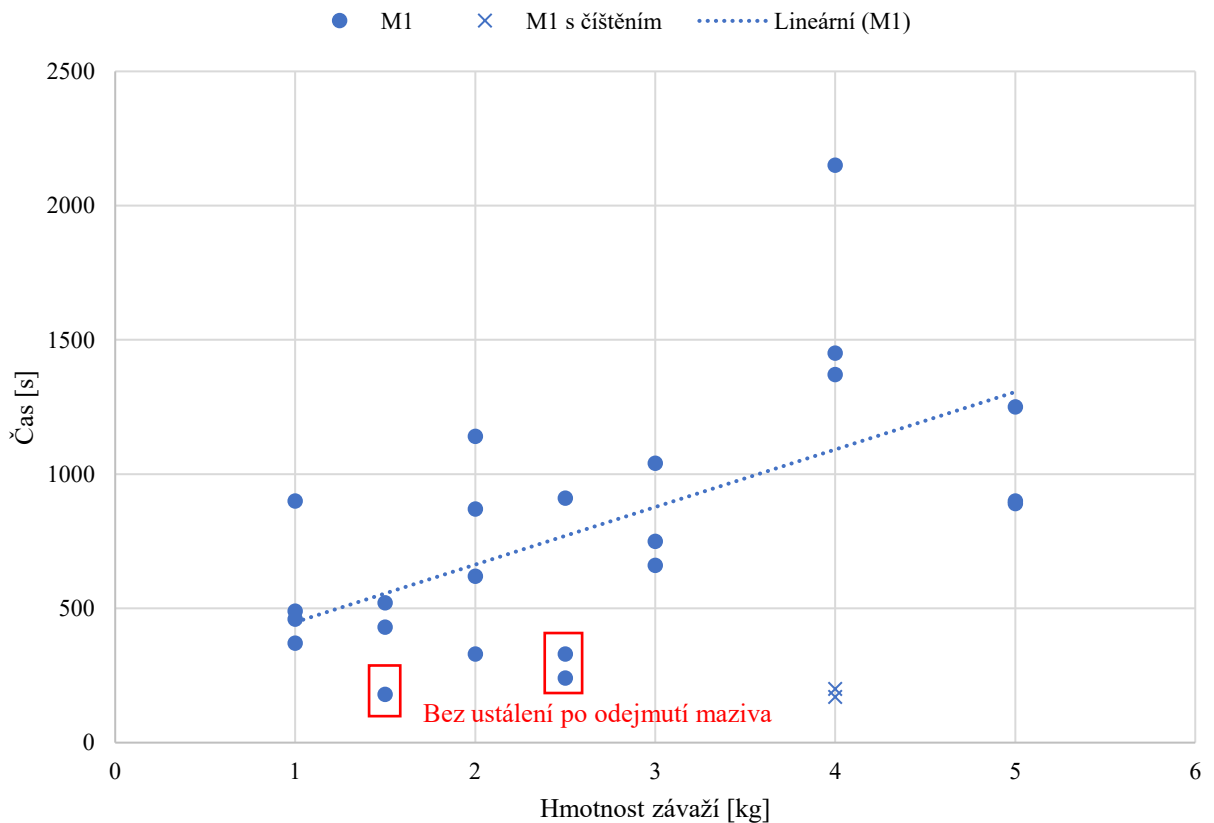
Po odejmutí maziva se ve většině případů součinitel tření snížil na nižší hodnotu než během mazání. To je s největší pravděpodobností způsobeno tím, že již není dodáváno nové mazivo a uchycené lamely maziva se začínají zajíždět a tím snižují součinitel tření mezi kotouči. Hodnoty jsou znázorněny v grafu na obrázku 27. V případech, kdy byl odlišný průběh mazání, se součinitel tření neustálil na nové hodnotě v délce alespoň 100 s, takže hodnoty po odejmutí maziva nejsou pro tyto průběhy v grafu znázorněny a nebyly hodnoceny. Po odejmutí maziva se nám také neustálily hodnoty při aktivním čištění kotoučů, což bylo také očekáváno. Při pohledu na graf nelze říct, že přítlak maziva má vliv na ustálenou hodnotu po odejmutí maziva. Proložená lineární spojnice trendů sice ukazuje mírný pokles, ale to je zapříčiněno mírně vyššími hodnotami u závaží 2 kg. Všechny hodnoty jsou velmi podobné a ve většině případů se pohybují v intervalu 0,07 až 0,08.



Obrázek 27 Ustálený součinitel tření po odejmutí maziva pro vzorek M1

4.4.4 Návrat na hodnotu suchého tření

Doba návratu na hodnotu suchého tření je hodnocená veličina, u které se ukázal vzrůstající trend, jak ukazuje proložená lineární spojnice trendů (také s velkým rozptylem). V grafu na obrázku 28 je vidět, že při závaží 1 kg byla doba návratu ve většině případů okolo 500 s, zatímco při závažích 4 a 5 kg se doba návratu protáhla na přibližně 1000 s a více. Důvod by mohl být stejný jako u ustálené hodnoty během mazání. Během mazání se s vyšším závažím mazivo více otírá a díky tomu je získána lepší vrstva maziva, která vydrží na kotoučích déle. Dalším vysvětlením by mohlo být, že při vyšší hmotnosti závaží mazivo lépe přilne na kotouče. V grafu jsou také zaneseny červeně průběhy, kdy se hodnota součinitele tření bez mazání neustálila a křížkem měření s aktivním čištěním kotoučů. Hodnoty z těchto měření jsou nízké a nerespektují vzrůstající trend.



Obrázek 28 Doba návratu na hodnotu suchého tření pro vzorek M1

4.5 Vzorek maziva M2

Vzorek maziva M2 je zbytek testovacího vzorku, který sloužil k porovnání se vzorkem jiného složení. Přesné složení vzorku není však pro testování závislosti přítlaku na součinitele tření potřeba. Vzhled vzorku M2 je na obrázku 29. Tyčinka je oproti vzorku M1 lesklejší a méně špiní. Na dotek tyčinka působí tvrdší. Co se týče pórovitosti nebo úpravy kontaktní plochy, tak tyto parametry jsou stejné jako u vzorku M1.



Obrázek 29 Vzorek maziva M2

4.5.1 Naměřené veličiny pro vzorek M2

Naměřené a přepočtené hodnoty jsou vypsány v tabulce 5. Dále se v tabulce také nacházejí hodnoty vyznačené oranžově. U těchto měření bylo po 1200 s přiloženo čištění, jelikož by zkoušení trvalo příliš dlouho. Bylo usouzeno, že pokračování zkoušky by nepřineslo informace, které by odpovídali zvýšené časové náročnosti. Průběh, parametry a podmínky zkoušky byly stejné jako u vzorku M1. Měření probíhalo pro přítlak v rozmezí 0,5–5 kg, jelikož se ale součinitel tření pro 0,5 kg neustálil a stále rostl, tak tato měření nebyly zahrnuty do vyhodnocení. Součinitel tření sice poklesl, ale postupně začal zase růst. V tabulce 5 jsou tak hodnoty pro toto měření vypočítány od času zkoušky od 100 s po odejmutí maziva. Stejně jako u předchozího vzorku byly kotouče po zkoušce očištěny kusem látky, mezi zkouškami se kotouče alespoň 10 minut chladily vzduchem a pro každý nový přítlak byla upravena kontaktní plocha maziva. Také zde byla potřeba přepočíst součinitel tření dle vztahu (9).

Tabulka 5 Naměřené hodnocené veličiny vzorku M2

Označení měření	Závaží ¹⁾	f – ustálené, mazání	f _k – ustálené, mazání	f – ustálené, bez maziva	Návrat na hodnotu suchého tření
	[kg]	[-]	[-]	[-]	[s]
2025-03-14_11-24-54 ²⁾	0,5	0,3548	0,3520	XX	10
2025-03-14_11-38-14 ²⁾	0,5	0,3208	0,3182	XX	5
2025-03-14_11-51-10 ²⁾	0,5	0,2748	0,2726	XX	5
2025-03-10_10-44-47 ²⁾	1	0,0783	0,0773	XX	60
2025-03-10_10-50-22 ²⁾	1	0,0813	0,0802	XX	90
2025-03-10_11-01-10 ²⁾	1	0,0745	0,0735	XX	100
2025-03-10_13-08-26	1	0,0797	0,0787	0,0742	340
2025-03-14_12-09-25	1,5	0,1002	0,0984	0,0828	320
2025-03-14_12-29-19	1,5	0,0981	0,0963	0,0826	480
2025-03-14_12-53-17	1,5	0,0974	0,0956	0,0830	370
2025-03-14_13-56-16	1,8	0,0990	0,0969	0,0815	380
2025-03-14_14-28-04	1,8	0,0990	0,0969	0,0830	950
2025-03-14_14-58-59	1,8	0,0940	0,0920	0,0741	920
2025-03-10_11-15-34 ²⁾	2	0,0795	0,0777	XX	190
2025-03-10_11-30-57 ²⁾	2	0,0836	0,0817	XX	230
2025-03-10_12-01-33	2	0,0992	0,0969	0,0784	1070
2025-03-10_12-39-05	2	0,1009	0,0986	0,0772	1090
2025-03-10_13-47-24 ³⁾	3	0,1061	0,1026	0,0778	1070
2025-03-10_14-18-12 ³⁾	3	0,0875	0,0846	0,0747	1050
2025-03-10_14-58-22 ³⁾	3	0,1058	0,1023	0,0915	1130
2025-03-11_11-06-54 ³⁾	4	0,1067	0,1021	0,1007	1090
2025-03-11_11-37-11 ³⁾	4	0,0880	0,0842	0,0873	1080
2025-03-11_12-08-44 ³⁾	4	0,1048	0,1003	0,0981	1090
2025-03-11_12-35-01 ⁴⁾	4	0,0746	0,0714	XX	40
2025-03-11_12-46-06 ⁴⁾	4	0,0802	0,0768	0,0779	220
2025-03-11_13-34-39 ³⁾	5	0,0828	0,0785	0,0769	1040
2025-03-11_14-04-33	5	0,0902	0,0855	0,0848	1060
2025-03-11_14-48-12 ³⁾	5	0,1164	0,1103	0,0912	1030
2025-03-04_15-58-47 ³⁾	5	0,1226	0,1162	0,0797	1140

1) K závaží je nutno přičíst hmotnost závitové tyče, na které je závaží uchyceno. Hmotnost této tyče činí 262 g.

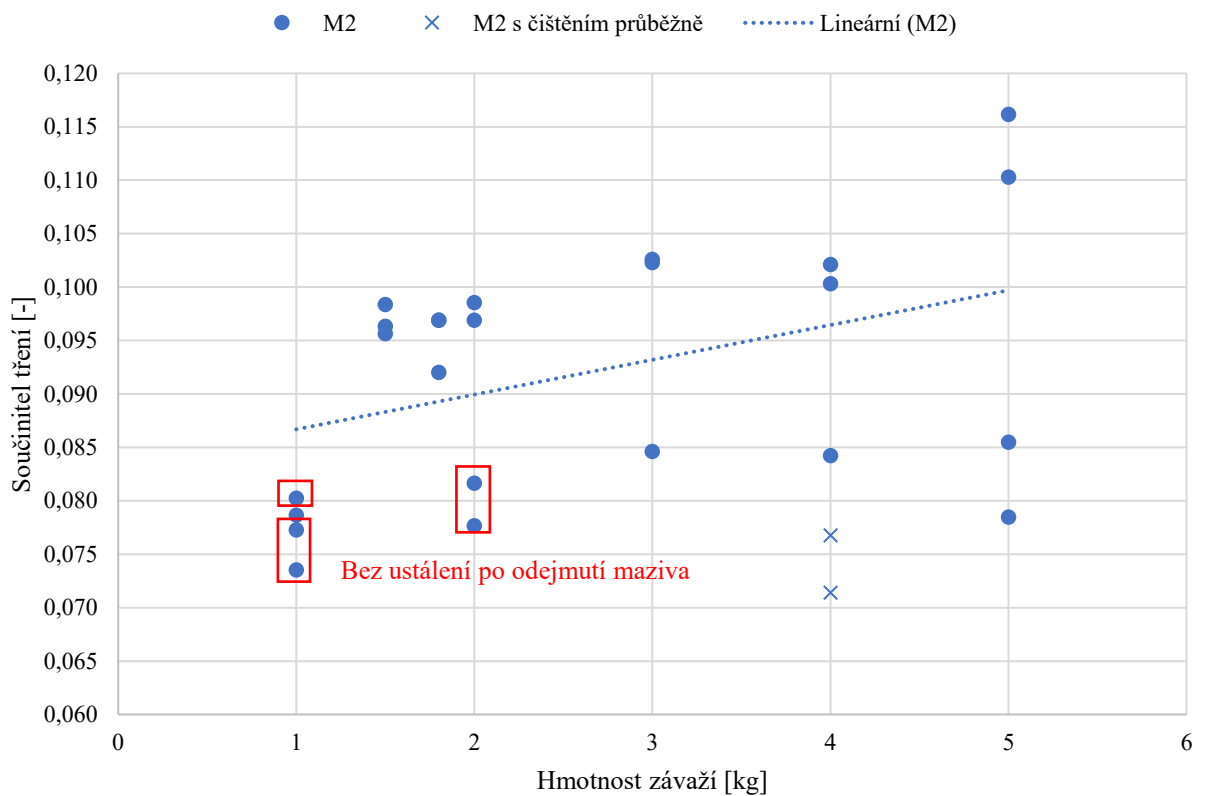
2) Součinitel tření se u těchto měření po odejmutí maziva neustálil.

3) Po 1200 s byla přiložena čistící aparatura z důvodu dlouhé doby návratu.

4) Tato měření probíhala s aktivním čištěním kotoučů během mazání. (jemný brusný papír ve stálém kontaktu s dolním kotoučem).

4.5.2 Ustálený součinitel tření během mazání

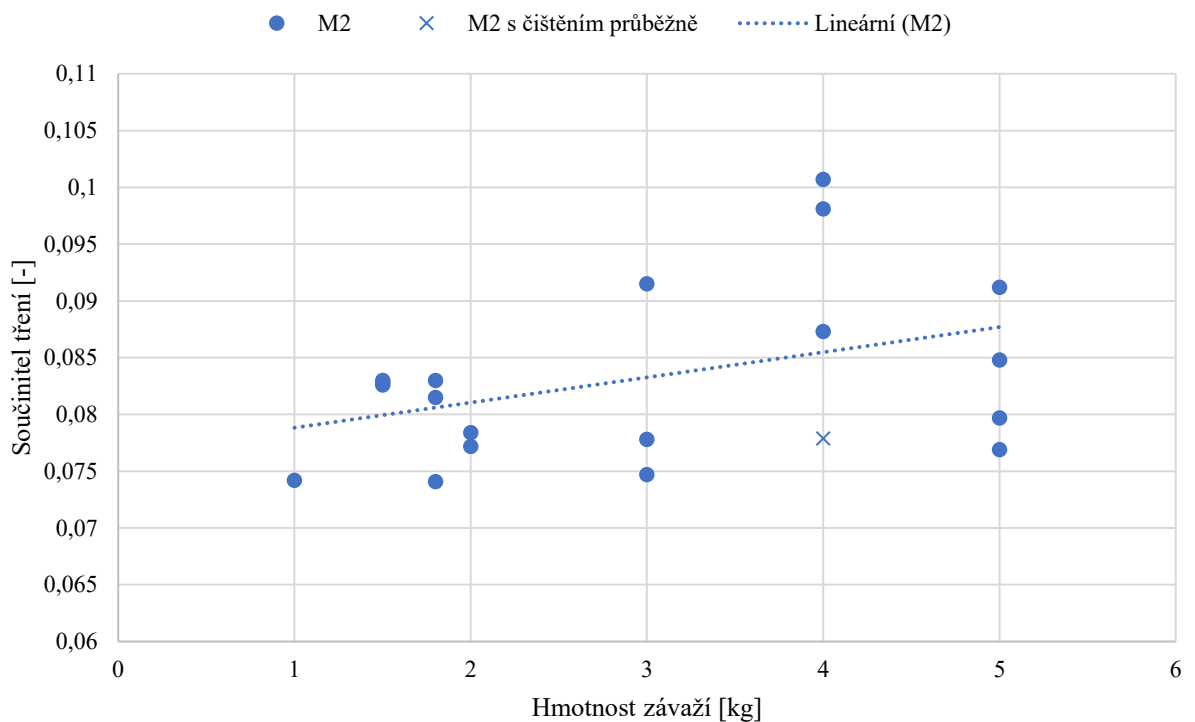
Ustálený součinitel tření během mazání vykazuje mírný růst s navyšováním závaží. Se závažím 1 kg bylo dosaženo hodnot mezi 0,07 až 0,08. Při tomto zatížení byly hodnoty nejvíce podobné. U větších závaží se v průměru dosahovalo vyššího součinitele tření, kromě měření s aktivním čištěním během mazání při závaží 4 kg. Od zatížení 2 kg jsou hodnoty z jednotlivých měření ve větším intervalu, ale při pohledu na graf na obrázku 30 lze říct, že vzrůstající trend tu opravdu je. Proložená spojnice trendu tento vzrůstající trend také ukazuje. Hodnoty vyznačené křížkem jsou s aktivním čištěním během celého měření. Je zde vidět, že tato měření vykazují nižší součinitel tření během mazání než bez aktivního čištění. Jak již bylo zmíněno u předchozího vzorku, je možné, že čištěním je odebráno nadbytečné mazivo a díky tomu se lamely lépe zajedou.



Obrázek 30 Ustálený součinitel tření během mazání pro M2

4.5.3 Ustálený součinitel tření bez maziva

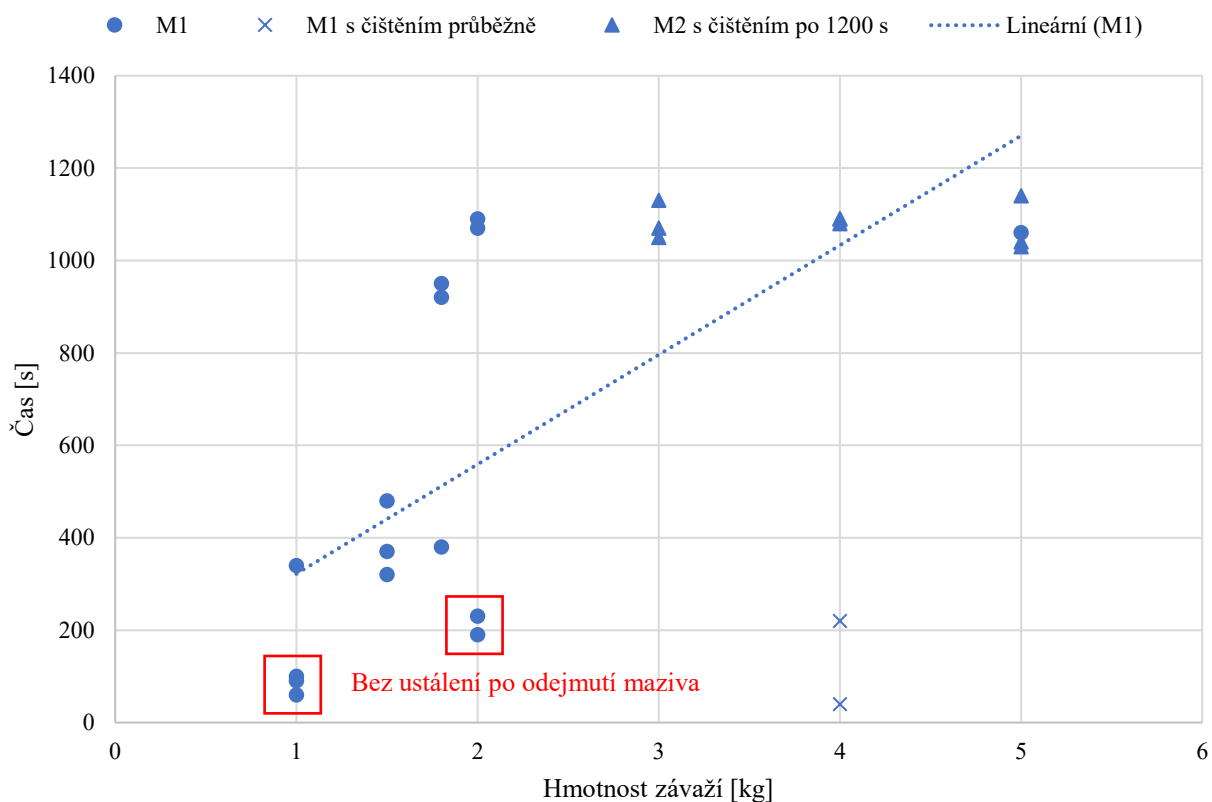
U tohoto vzorku nebyl při menším závaží dosažen ustálený součinitel tření po odejmutí maziva. Z tohoto důvodu se může z grafu na obrázku 31 zdát, že je zde s větším závažím růst součinitele tření. Proložená lineární spojnice trendů ukazuje také vzestupný trend, ale rozptyly jsou od zatížení 3 kg poměrně velké a minimální dosažené hodnoty jsou pro téměř všechna zatížení velmi podobné. Jelikož se ale pro nižší závaží hodnota neustálila, nelze s jistotou říct, že tento trend tu opravdu je. Mírně vyšší hodnoty jsou pouze pro zatížení 4 kg. Stejně jako u ustáleného součinitele tření během mazání, je i zde u závaží nad 2 kg větší rozptyl hodnot. Při měřeních s aktivním čištěním se u jednoho testu součinitel neustálil, avšak u druhého byla hodnota ustáleného součinitele nejnižší pro dané zatížení. Celkově z grafu lze říct, že zatížení by mohlo mít vliv na velikost součinitele tření po odejmutí maziva tím způsobem, že při nižších zatíženích jsou výsledky s menším rozptylem než u většího závaží. Dále by zatížení mohlo mít vliv na to, zda se součinitel tření po odejmutí maziva ustálí.



Obrázek 31 Ustálený součinitel tření po odejmutí maziva pro vzorek M2

4.5.4 Návrat na hodnotu suchého tření

Doba návratu na hodnotu suchého tření se při zatížení 1 kg pohybovala v průměru okolo 300 s. S vyšším zatížením se ukázal vzrůstající trend a už při zatížení 2 kg se tato doba při dvou testech dostala nad hodnotu 1000 s. Jelikož je očekávání, že při vyšších zatíženích by se tato doba ještě prodloužila, byla po celkovém času testu 1200 s přiložena čisticí aparatura. Všechna další měření nad závaží 2 kg byla tedy po daném čase urychlena. Pouze v jednom případě u závaží 5 kg nebylo nutné začít aktivně čistit kotouče. U závaží 4 kg byly dva testy provedeny s aktivním čištěním po celou dobu měření a doba návratu se tím razantně zkrátila. Pro potvrzení stoupajícího trendu byla provedena měření se závaží 1,5 a 1,8 kg. Tato měření potvrdila rostoucí trend doby návratu. Lze tedy říct, že pro tento vzorek se s vyšším přítlakem prodlužuje doba návratu na hodnotu suchého tření a již při závaží 2 kg se lze vyšplhat nad hranici 1000 s.



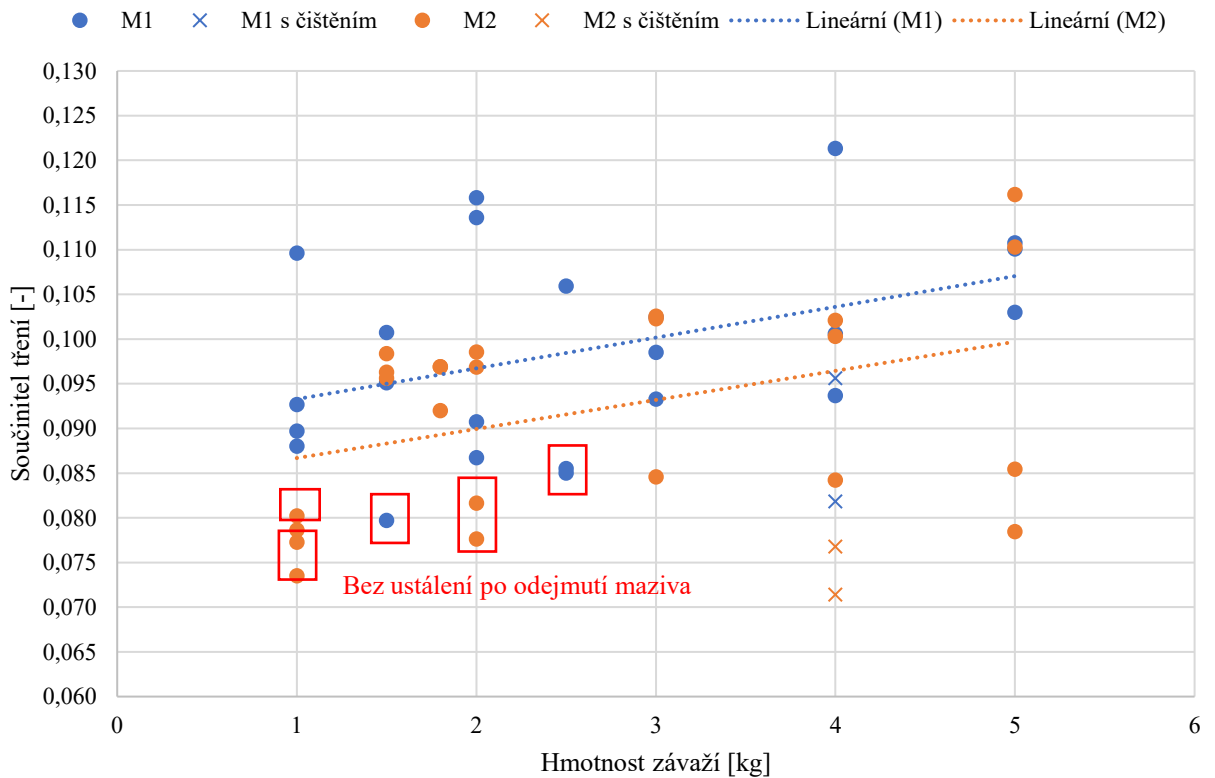
Obrázek 32 Doba návratu na hodnotu suchého tření pro vzorek M2

5 Diskuse získaných výsledků

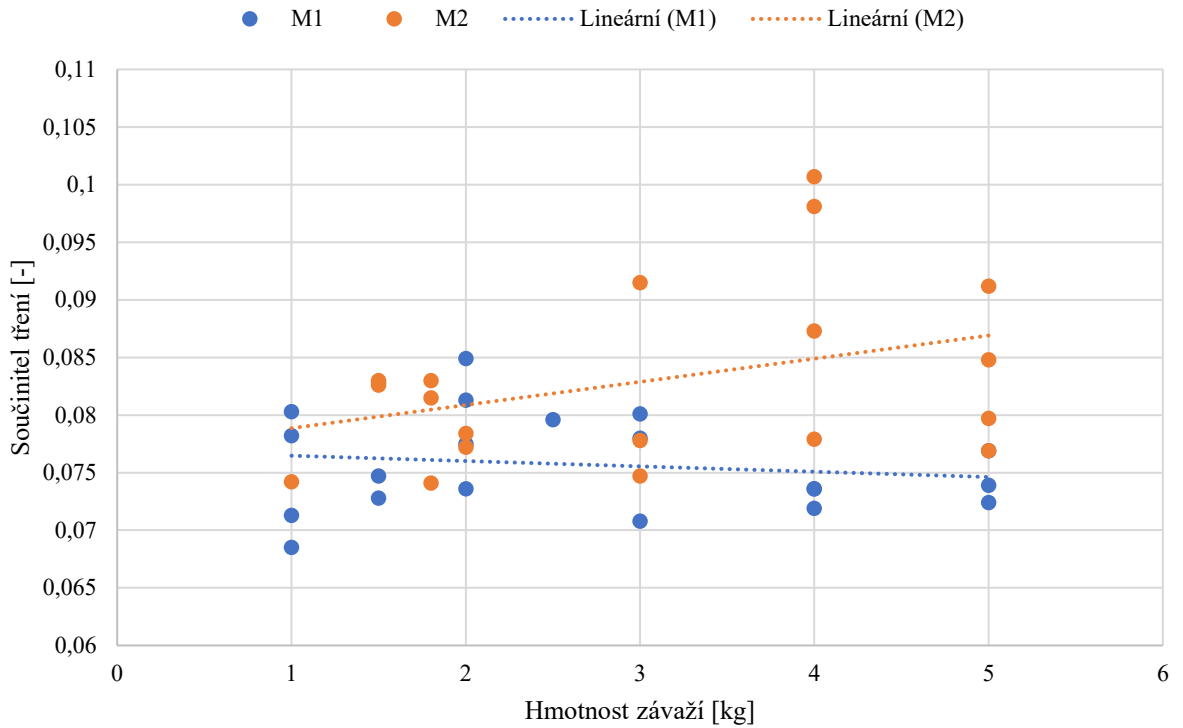
Během testování vzorků maziva byly zjištěny poznatky k nedostatečnému definování parametrů podmínek zkoušení dle normy. Tato kapitola je zaměřena na porovnání testovaných vzorků, teplotu kotoučů a na vliv pořadí měření s ohledem na aplikační plochu maziva.

5.1 Porovnání hodnocených veličin

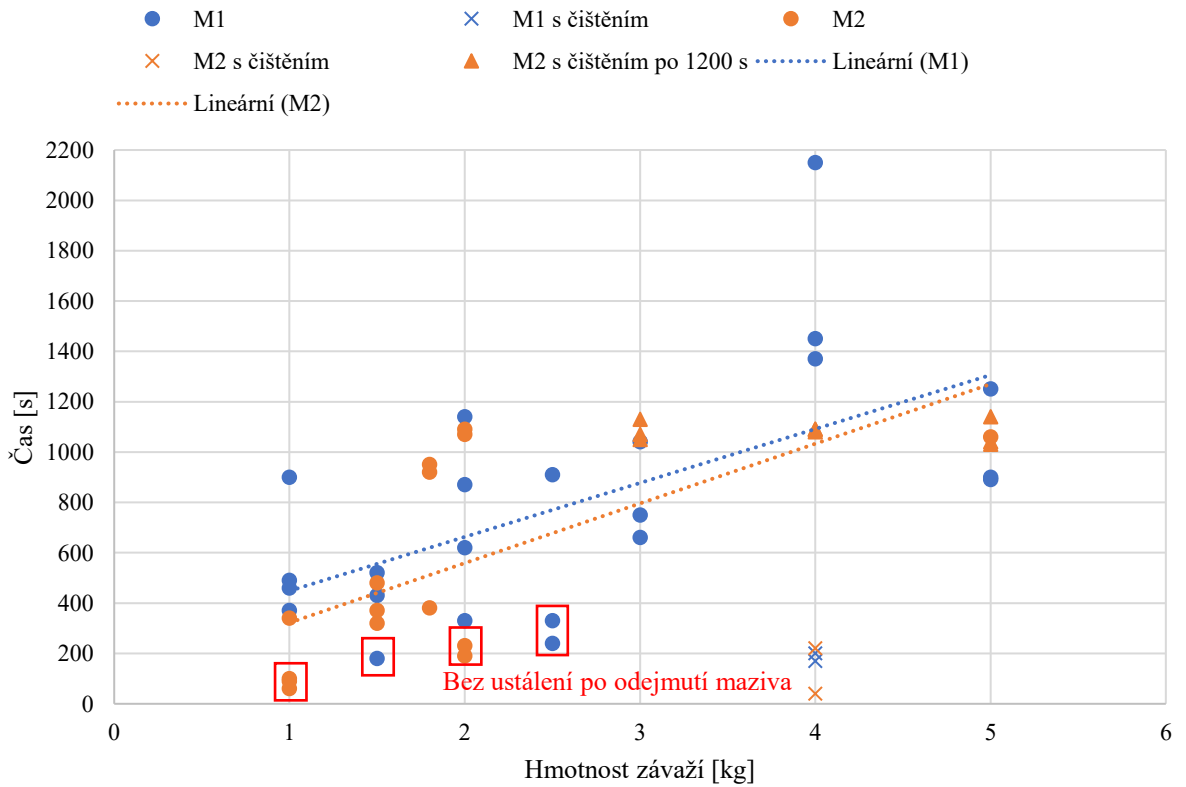
Při testování dvou vzorků je vhodné výsledky z obou testování porovnat a potvrdit tak vysledované závislosti. V této části je tedy porovnání hodnocených veličin obou vzorků maziva. Hodnoty hodnocených parametrů obou vzorků jsou zaneseny do následujících grafů na obrázcích 33, 34 a 35.



Obrázek 33 Porovnání ustáleného součinitele tření během mazání



Obrázek 34 Porovnání ustáleného koeficientu tření bez maziva



Obrázek 35 Porovnání doby návratu na hodnotu suchého tření

Z grafu na obrázku 33 lze vypořadovat, že u obou testovaných vzorků došlo se zvyšováním přitlaku maziva k mírnému nárůstu součinitele tření během mazání. To se shoduje s výsledky v [10], kde byly navíc měřeny úbytky maziva. Sledovaný jev lze vysvětlit tak, že s větším přitlakem je přeneseno více maziva, které však zpočátku nemá optimální mazací vlastnosti (orientaci lamel) a tím je méně efektivní při snížení součinitele tření. Během mazání je tak s vyšší hmotností přitlaku vyšší součinitel tření. V obou případech při použití aktivního čištění během mazání vykazoval součinitel tření nižší hodnoty než bez použití této aparatury. To odpovídá výše uvedenému mechanismu, kdy při odstranění přebytečného nezajetého maziva se může součinitel tření snížit. Tato měření jsou vyznačena křížky. Červeně jsou vyznačeny pak testy s odlišným průběhem bez ustálení po odejmutí maziva. Celkově vzorek maziva M2 dosahoval nižších hodnot součinitele tření během mazání.

Ustálený součinitel tření po odejmutí maziva v obou případech nevykazuje jednoznačně rostoucí charakter a je spíše v celém rozsahu přitlaků vzorku maziva velmi podobný. Tato vlastnost je vidět v grafu na obrázku 34. Vzorek maziva M2 má ale oproti vzorku M1 při vyšším přitlaku větší rozptyl hodnot. Tento jev může být zkraslen tím, že se součinitel při nižších zatížení v některých testech neustálil alespoň po dobu 100 s. Po odejmutí maziva vykazuje mazivo M1 nižší hodnoty oproti mazivu M2.

Doba návratu na úroveň suchého tření má v obou případech rostoucí charakter v závislosti na hmotnosti závaží. Mazivo M1 dosahuje vyšších nebo srovnatelných hodnot pro zatížení do 2 kg. Nad 2 kg se ukazuje, že vzorek M2 by mohl vydržet na kotoučích déle a protáhnout tak dobu návratu. Nutno podotknout, že nad 2 kg se u vzorku M2 téměř vždy přiložilo čištění kotoučů po uplynutí času zkoušky 1200 s. Pouze v jednom případě u závaží 5 kg nebylo potřeba čištění přiložit, jelikož se součinitel tření začal sám zvyšovat po přibližně 1000 s. Hodnoty by tak pro vzorek M2 mohly být ještě vyšší. K podobným závěrům došla také již zmiňovaná studie [10]. Hodnota přitlaku maziva tak tedy ovlivňuje celkovou dobu mazání. Větší přitlak znamená větší množství přeneseného maziva, které vydrží na kotoučích déle. Větší množství maziva ale nesníží součinitel tření více než menší množství, dokud je stále dostatečné. Doba návratu je porovnána v grafu na obrázku 35.

5.2 Aplikační plocha a pořadí měření

Aplikační plocha maziva je v normě zmíněna, jak již bylo řečeno v podkapitole 4.2, ale může vykloněním maziva způsobit nepřesné výsledky. Při měření byla aplikační plocha čárový styk o šířce přibližně 1 mm, ale jelikož při měření dochází k úbytku maziva, plocha se po větším množství měření zvětší, tedy klesá tlak v kontaktu. Z tohoto důvodu byla aplikační plocha před každým zvýšením hmotnosti závaží upravena na šířku o výše zmíněné hodnotě. Počáteční aplikační plocha při každé změně závaží byla tedy pokaždé stejná. Z důvodu zvětšování aplikační plochy je na místě se podívat, jak moc velký vliv na hodnotu součinitele tření má

pořadí zkoušky pro dané zatížení. Porovnání součinitele tření pro jednotlivé zkoušky je zaneseno do tabulky 6 a 7. Nejvyšší součinitel pro dané závaží je vyznačen oranžovou barvou.

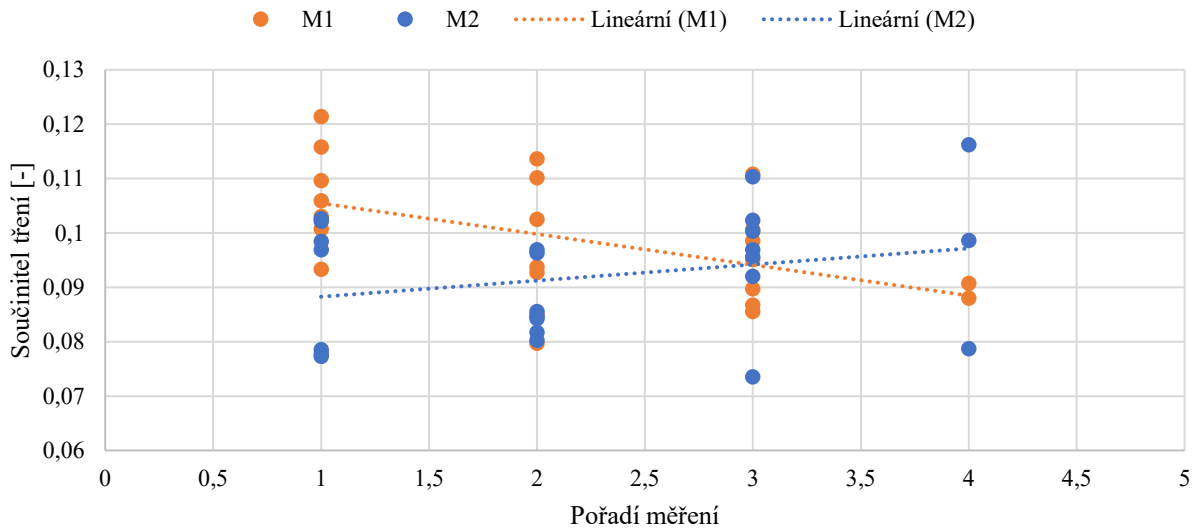
Tabulka 6 Porovnání součinitele tření jednotlivých měření pro vzorek M1

M1				
Závaží	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření
[kg]	f_k – mazání [-]			
1	0,1096	0,0927	0,0897	0,0880
1,5	0,1007	0,0797	0,0951	XX
2	0,1158	0,1136	0,0867	0,0907
2,5	0,1059	0,0850	0,0855	XX
3	0,0933	0,1025	0,0985	XX
4	0,1214	0,0937	0,1006	XX
5	0,1030	0,1101	0,1108	XX

Tabulka 7 Porovnání součinitele tření jednotlivých měření pro vzorek M2

M2				
Závaží	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření
[kg]	f_k – mazání [-]			
1	0,0773	0,0802	0,0735	0,0787
1,5	0,0984	0,0963	0,0956	XX
1,8	0,0969	0,0969	0,092	XX
2	0,0777	0,0817	0,0969	0,0986
3	0,1026	0,0846	0,1023	XX
4	0,1021	0,0842	0,1003	XX
5	0,0785	0,0855	0,1103	0,1162

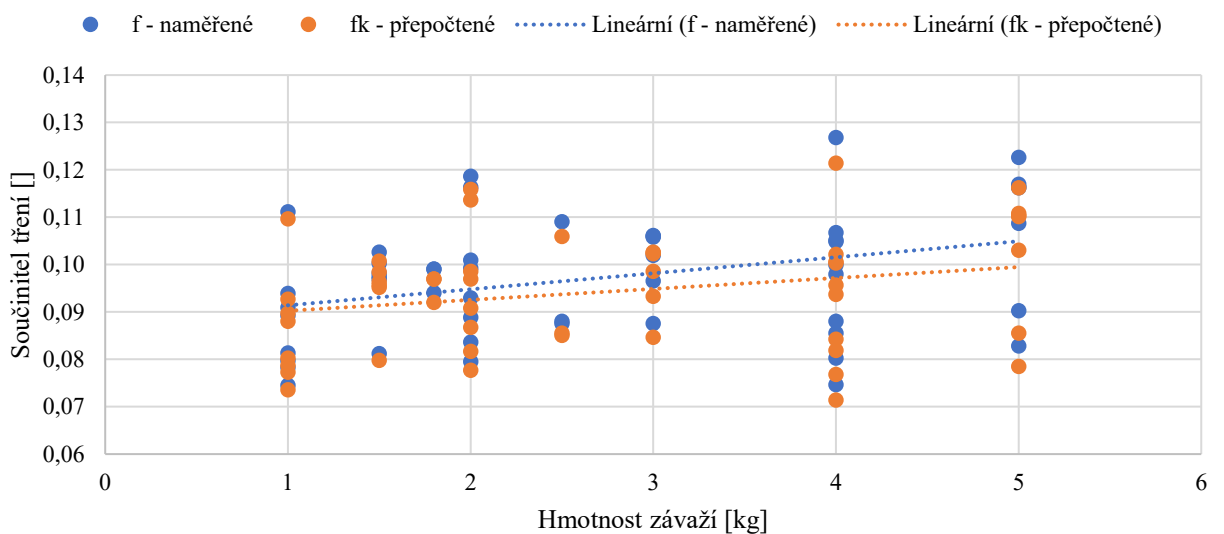
V tabulce 6 vykazuje vzorek M1 pro první měření ve většině případů vyšší hodnotu součinitele tření. To samé platí i pro tabulku 7 vzorku M2. Při bližším pohledu na hodnoty je vidět, že nejsou v některých případech zas tak odlišné pro první a poslední měření daného zatížení. Pro lepší grafickou ukázkou jsou tak jednotlivé hodnoty součinitele tření pro dané číslo měření zaneseny do grafu na obrázku 36. Z tohoto grafu je vidět, že to není tak jednoznačné. Pro vzorek M1 se zde ukazuje klesající trend součinitele tření s pořadím měření bez úpravy aplikační plochy, zatímco pro vzorek M2 je tento trend opačný. Nelze tedy s jistotou říct, že pořadí měření má jednotný vliv na výsledek měření.



Obrázek 36 Vliv pořadí měření na jednotlivé vzorky maziva

5.3 Vliv korekce součinitele tření během mazání

V podkapitole 4.3 je zmíněno o nutnosti přepočíst součinitel tření během mazání z důvodu zatížení maziva a tím zvýšení přtlaku kotoučů, není tedy špatný nápad se podívat, jak moc tento přtlak maziva ovlivní naměřený součinitel tření. Hodnoty pro naměřený a přepočtený součinitel tření jsou zaneseny do grafu na obrázku 37. Z grafu je vidět, že pro nižší zatížení je rozdíl malý oproti vyšším závažím. Změna součinitele tření po zavedení korekce je však poměrně malá vzhledem k rozptylu naměřených hodnot.



Obrázek 37 Vliv korekce součinitele tření během mazání

5.4 Teplota kotoučů

Dalším vypočítaným aspektem, který může ovlivnit měření, byla teplota testovacích kotoučů. Při prvních testech se zdálo, že výsledky na zahřátých kotoučích mohou vykazovat odlišné hodnoty než při testování na kotoučích vychlazených přibližně na teplotu laboratoře. U skutečného železničního kola se teplo rozvede do velkého množství materiálu a proudí okolo něj vzduch. Nárůst teploty tak není při běžném provozu tak velký. V našem případě se ale teplo téměř neodvádí a kotouče jsou po celou dobu v kontaktu se stálým skluzem, což vede k nárůstu teploty. Z tohoto důvodu byly kotouče během měření závislosti součinitele tření na přítlaku chlazeny vzduchem. Po dokončení měření byla provedena dodatečná měření na zahřátých a studených kotoučích. Měření probíhalo s mazivem M1 pro závaží 2 kg. Teplota kotoučů byla měřena vždy na stejném místě a před každou novou dvojicí měření byla upravena aplikační plocha maziva.

Tabulka 8 Porovnání hodnot pro zahřáté a studené kotouče

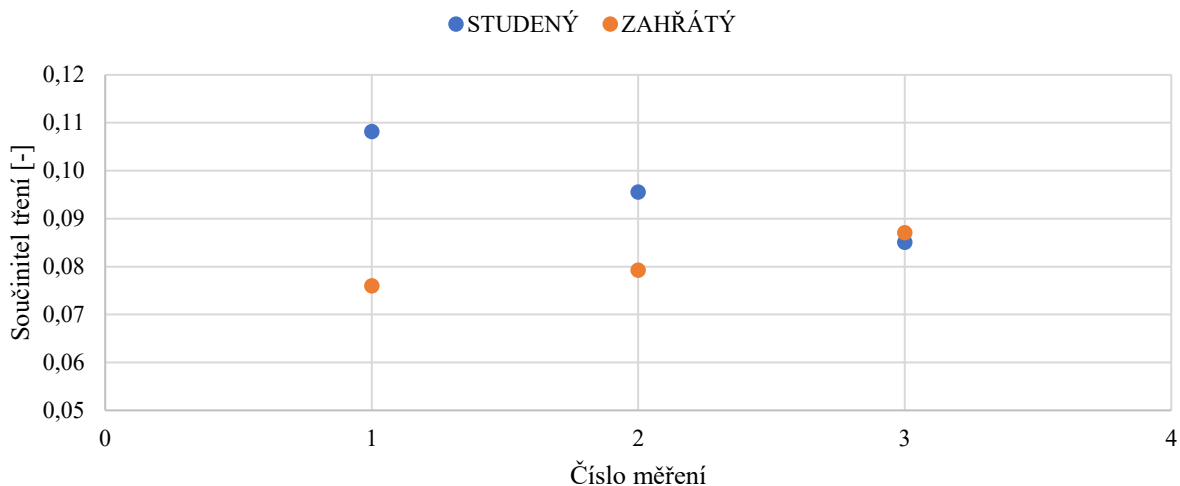
Mazivo M1	Číslo měření	Označení měření	Závaží	Počáteční teplota	Konečná teplota	f_k – mazání	f – ustálené, bez maziva
			[kg]	[°C]	[°C]	[-]	[-]
Studený	1	2025-03-11_15-35-38	2	23,7	32,1	0,1081	0,0794
	2	2025-03-14_15-32-11	2	23,5	32,3	0,0955	0,0761
	3	2025-03-14_16-05-22	2	23,8	32,6	0,0851	0,0769
Zahřátý	1	2025-03-11_15-01-37	2	32,1	38,5	0,0760	0,0585
	2	2025-03-14_15-42-10	2	32,3	37,9	0,0792	0,0642
	3	2025-03-14_16-21-54	2	32,6	38,4	0,0870	0,0697

Číslo měření v tabulce 8 znázorňuje dvě po sobě jdoucí měření. Naměřené hodnoty ukazují, že teplota kotoučů ovlivňuje naměřený součinitel tření. Při testování na zahřátých kotoučích lze dosáhnout nižších hodnot než na kotoučích vychlazených. Aby výsledky neovlivnila opotřebovaná aplikační plocha maziva, bylo měření s číslem 1 provedeno nejdříve pro zahřáté kotouče. Pro lepší porovnání jsou hodnoty zaneseny do grafů na obrázcích 36 a 37.

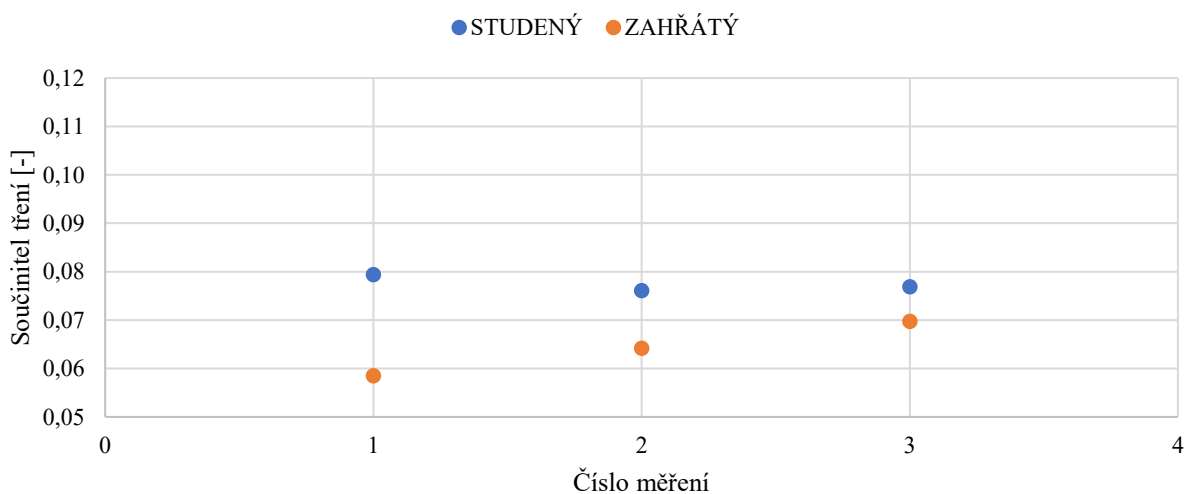
Z těchto grafů se může zdát, že je zde nějaká lineární závislost. Tento trend je však pouze náhodný, jelikož počáteční podmínky byly vždy stejné a měření s číslem 1 bylo měřeno jiný den. Jde tedy hlavně o porovnání součinitele tření pro studené a zahřáté kotouče u jednotlivých

dvojic měření. U čísla měření 3 je na obrázku 38 vidět, že součinitel tření pro zahřátý a studený kotouč je velmi podobný, ale po odejmutí maziva byl součinitel pro zahřáté kotouče opět nižší (obrázek 39). Hypotéza o vlivu teploty kotoučů na součinitel tření se tedy zdá být pravdivá, ale bylo by vhodné provést více měření stejně jako v této práci pro vliv přítlaku na hodnotu tření v kontaktu.

V článku [10] se pojednává, že s vyšší teplotou klesá pevnost matrice, což vede k menší odolnosti proti opotřebení a snazšímu přenosu tuhého maziva. Pokud je přeneseno více maziva, součinitel tření během mazání by měl být vyšší z důvodu zajíždění. V našem případě byl však naměřen při testování na zahřátých kotoučích součinitel tření nižší než na studených. Je tedy možné, že zvýšená teplota přispívá také k rychlejšímu zajetí maziva a tento efekt ve výsledku převažuje.



Obrázek 38 Porovnání součinitele tření během mazání pro studené a zahřáté kotouče



Obrázek 39 Porovnání součinitele tření po odejmutí maziva pro studené a zahřáté kotouče

Závěr

Hlavním přínosem této práce je rozšíření vědomostí ohledně podmínek testování tuhých maziv na dvoukotoučovém stroji, konkrétně se jedná o vliv zvoleného přitlaku na výsledky měření. Norma EN 15427-2-1 sice pojednává o zkoušení na dvoukotoučovém stroji, ale nedefinuje zcela jasně zkušební podmínky a postupy. Dalším přínosem je také usnadnění a zkrácení doby vyhodnocování naměřených dat na dvoukotoučovém stroji Amsler-A135 ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě Univerzity Pardubice.

Pro usnadnění a zkrácení doby vyhodnocování naměřených dat byla provedena úprava stroje. Tato úprava se skládá z uchycení lineárního senzoru na rám stroje pomocí dvou držáků. Touto úpravou byla naměřená data zdigitalizována a jejich vyhodnocení je tedy výrazně jednodušší a kratší. Při zhodnocení možností úchyty byla brána v potaz možnost zanechání měření také bez této úpravy s mechanickým zapisováním na kus papíru omotaný okolo válečku. Držáky byly vyrobeny z nerezového plechu o tloušťce 3 mm a jako čepy pro uchycení snímače fungují šrouby M5. Výkresová dokumentace držáků a celkové sestavy je v příloze této diplomové práce. Digitalizací naměřených dat na dvoukotoučovém stroji se také zabývá literatura [13].

Po úpravě stroje byla provedena řada měření vlivu velikosti přitlaku maziva na výsledný součinitel tření. Zkoušena byla dvě různá maziva s označením M1 a M2. Rozsah zkoušených přitlaků byl zvolen od 0,5 kg do 5 kg. Při hmotnosti přitlaku 0,5 kg nebylo dosaženo mazacího efektu, a proto byla tato měření vynechána z vyhodnocení. Hlavní sledované veličiny jsou ustálený součinitel tření během mazání, po odejmutí maziva a doba návratu na hodnotu suchého tření. Pro ustálený součinitel tření během mazání bylo zjištěno, že při vyšším přitlaku není dosaženo nižšího součinitele tření. V literatuře [10], kde bylo navíc měřeno množství maziva, je toto vysvětleno tak, že s vyšším přitlakem je dodáváno více maziva, a to se nestíhá zajíždět. Lamely maziva se tak nestíhají uspořádat tak, aby dosáhly požadovaného efektu. Výsledky se shodují s výsledky této práce. Součinitel tření se v případě dostatečného množství maziva se po odejmutí maziva ustálí na nižší hodnotě než během mazání. To je způsobeno zajištěním maziva naneseného na kotoučích a uspořádáním lamel. Ustálený součinitel tření po odejmutí maziva není ovlivněn velikostí přitlaku. Velikostí přitlaku je však ovlivněna doba návratu na hodnotu suchého tření. Jak je výše zmíněno, s vyšším zatížením je na kotouče nanášeno více maziva, které na kotoučích vydrží déle a tím prodlouží dobu návratu na hodnotu suchého tření. Celkově lze zhodnotit závislost velikosti přitlaku tak, že s vyšším zatížením je sice dosaženo během mazání vyšších hodnot součinitele tření, ale prodlouží se doba působení maziva po jeho odejmutí. Během měření byla provedena při hmotnosti přitlaku 4 kg také měření s aktivním čištěním po celou dobu testu. Součinitel tření během mazání byl v těchto měřeních nižší než u měření bez čištění při stejné hodnotě přitlaku. Tento jev je nejspíš způsoben odstraňováním přebytečného maziva z povrchu kotoučů. Doba návratu byla v těchto případech značně kratší.

Tabulka 9 Výsledky vlivu přítlaku na součinitel tření a retentivitu

Výsledky	Vliv zvýšeného přítlaku	
	Součinitel tření	Retentivita
Během mazání	S vyšším přítlakem součinitel tření během mazání roste	XX
Po odejmutí maziva	Součinitel tření dosahuje pro každé zatížení podobných hodnot	S vyšším přítlakem se přenáší více maziva a čas návratu na hodnotu suchého tření se prodlouží

V této práci je také zmínka ohledně vlivu teploty kotoučů na součinitel tření, jelikož norma nepředepisuje žádné chlazení. Výsledky měření ukazují, že při měření na zahřátých kotoučích je součinitel tření nižší než na vychlazených kotoučích na teplotu okolí. Dle literatury [10] má teplota vliv na pevnost matrice maziva a tím na množství přeneseného maziva. Další literaturou, která se zabývá teplotou v kontaktu kotoučů je například [14]. Výstupem dalších experimentů by mohlo být navázání na vliv teploty na součinitel tření.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 15427-1-1 (280555). Železniční aplikace – Řízení tření mezi kolem a kolejnicí. Část 1-1, Mazací zařízení a nanášení – Mazání okolků = Railway applications - Wheel/Rail friction management. Part 1-1, Equipment and Application – Flange Lubricants. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023. Dostupné z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [2] FLEXI-TRADE.CZ. Stacionární kolejnicové mazníky – obecně [online]. [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: https://www.flexi-trade.cz/wp-content/uploads/2021/03/IMG_20190918_102445.jpg
- [3] TRIBOTEC.CZ. Mazání okolků pro lokomotivy OK-02 [online]. [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: <https://kolejovatechnika.tribotec.cz/wp-content/uploads/2021/04/Novy%CC%81-projekt6-768x403.jpg>
- [4] SKLENÁR-TRIBOTECHNIKA.CZ. Tuhá maziva pro bok okolku [online]. [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: <https://www.sklenar-tribotechnika.cz/userfiles/product/prd-60-7.jpg>
- [5] ČSN EN 15427-2-1 (280555). Železniční aplikace – Řízení tření mezi kolem a kolejnicí. Část 2-1, Vlastnosti a charakteristiky – Maziva okolku = Railway charakteristiky – Maziva/Rail friction management. Part 2-1, Properties and Characteristics - Flange Lubricants. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022. Dostupné z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [6] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E., et al. Full-scale testing of low adhesion effects with small amounts of water in the wheel/rail interface. *Tribology International*. 2020, roč. 141, s. 105907. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105907>.
- [7] ZIREK, A., VOLTR, P. a LATA, M. Validation of an anti-slip control method based on the angular acceleration of a wheel on a roller rig. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F*. 2019, roč. 234, č. 9, s. 1029-1040. DOI 10.1177/0954409719881085.
- [8] VOLTR, P. a LATA, M. Transient wheel–rail adhesion characteristics under the cleaning effect of sliding. *Vehicle System Dynamics*. 2014, roč. 53, č. 5, s. 605-618. DOI 10.1080/00423114.2014.961488.
- [9] BÍLEK, A. Hodnocení tuhých maziv pro kontakt kolo-kolejnice s využitím kladkového stavu. Online, diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2024-09-10T06:39:42Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84128>. [cit. 2025-03-25].

- [10] REY, T., et al. Experimental study of the tribological performance of a solid lubricant stick with MoS₂ for wheel-rail contact. *Wear*. 2025, s. 205941. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205941>.
- [11] VOLTR, P. a LIBEROVÁ, S. Faktory ovlivňující hodnocení výkonnosti tuhých maziv pro kontakt kolo-kolejnice. In: XXV. konference s mezinárodní účastí: Současné problémy v kolejových vozidlech. Česká Třebová, 15.–17. září 2021.
- [12] VAZIRISERESHK, M. R., MARTINI, A., STRUBBE, D. A. a BAYKARA, M. Z. Solid Lubrication with MoS₂: A Review. *Lubricants*. 2019, roč. 7, č. 57. DOI 10.3390/lubricants7070057.
- [13] ZDRAVECKÁ, E., ONDÁČ, M. a TKÁČOVÁ, J. The wear tribometer and digitalization of tribological tests data. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2013, roč. 61, č. 2, s. 321-326. Dostupné z: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol61_2/6149.pdf
- [14] GALLARDO-HERNANDEZ, E. A., LEWIS, R. a DWYER-JOYCE, R. S. Temperature in a twin-disc wheel/rail contact simulation. *Tribology International*. 2006, roč. 39, č. 12, s. 1653-1663. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.01.028>.

Seznam příloh

Příloha A: Průběhy měření

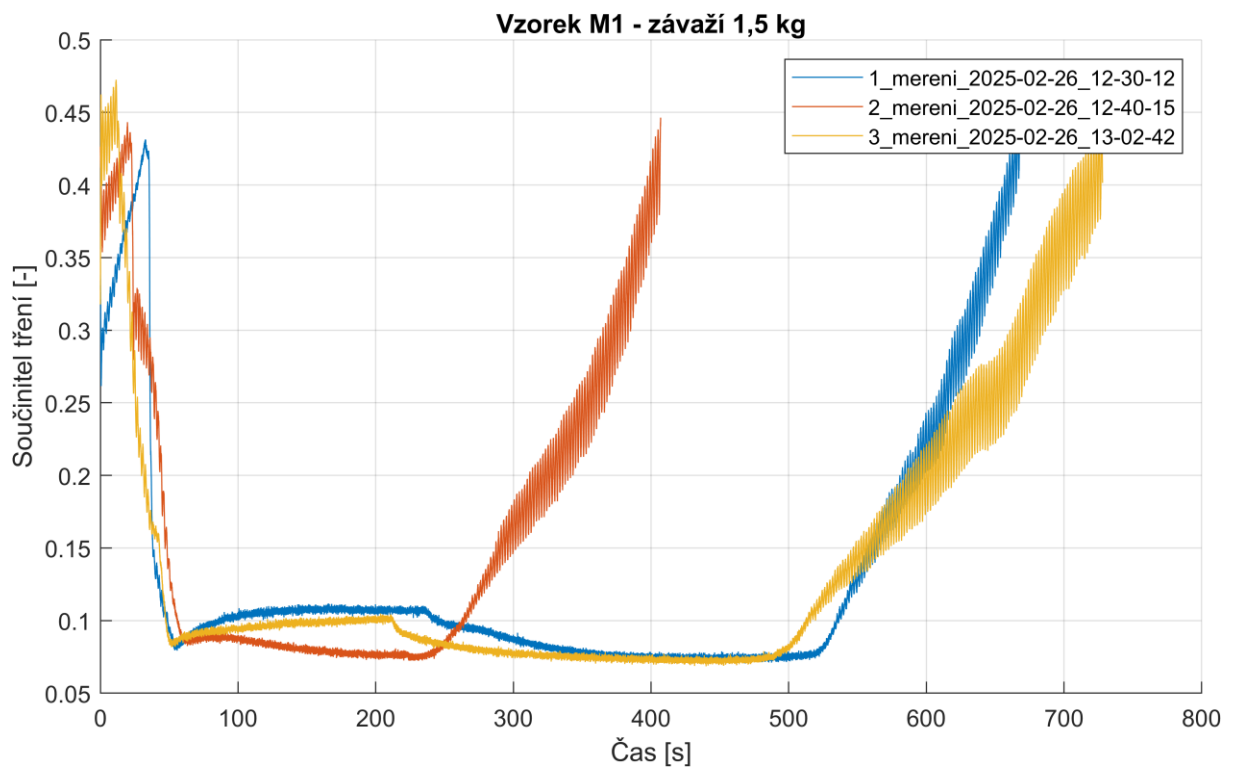
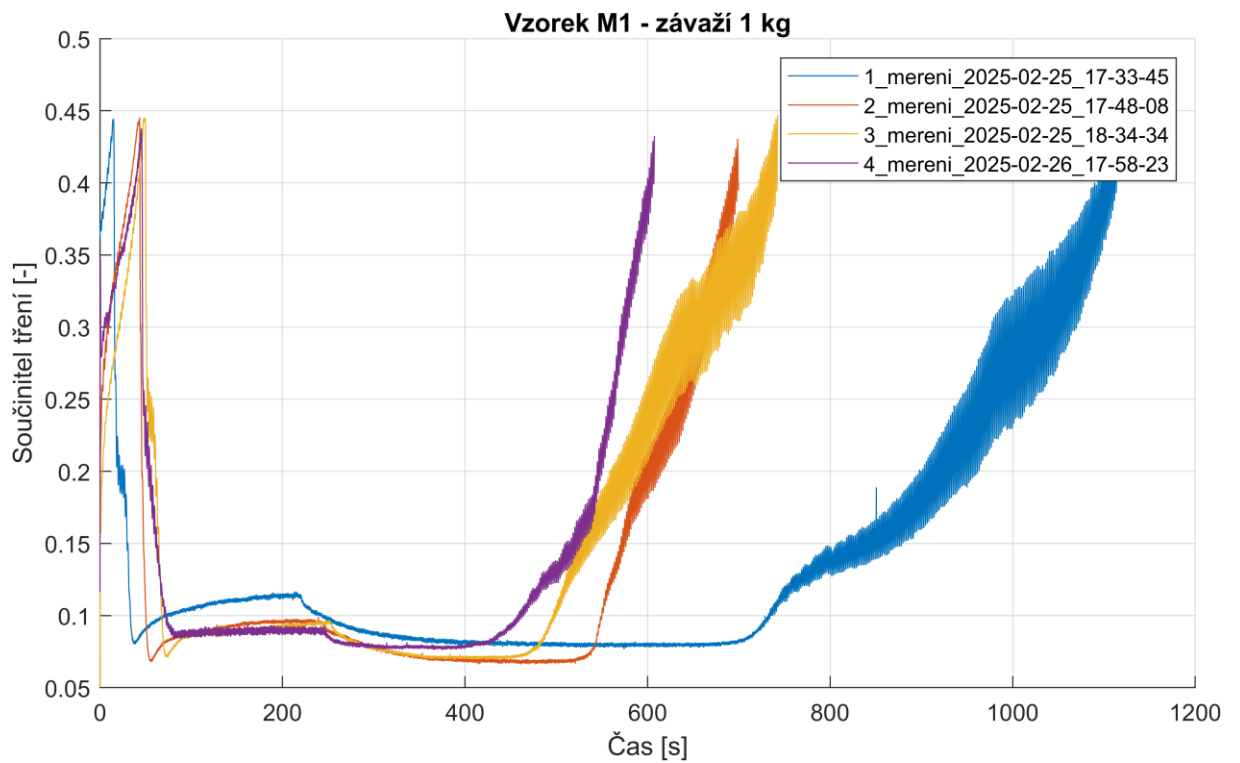
Příloha B: Výkresová dokumentace (Tabulka B)

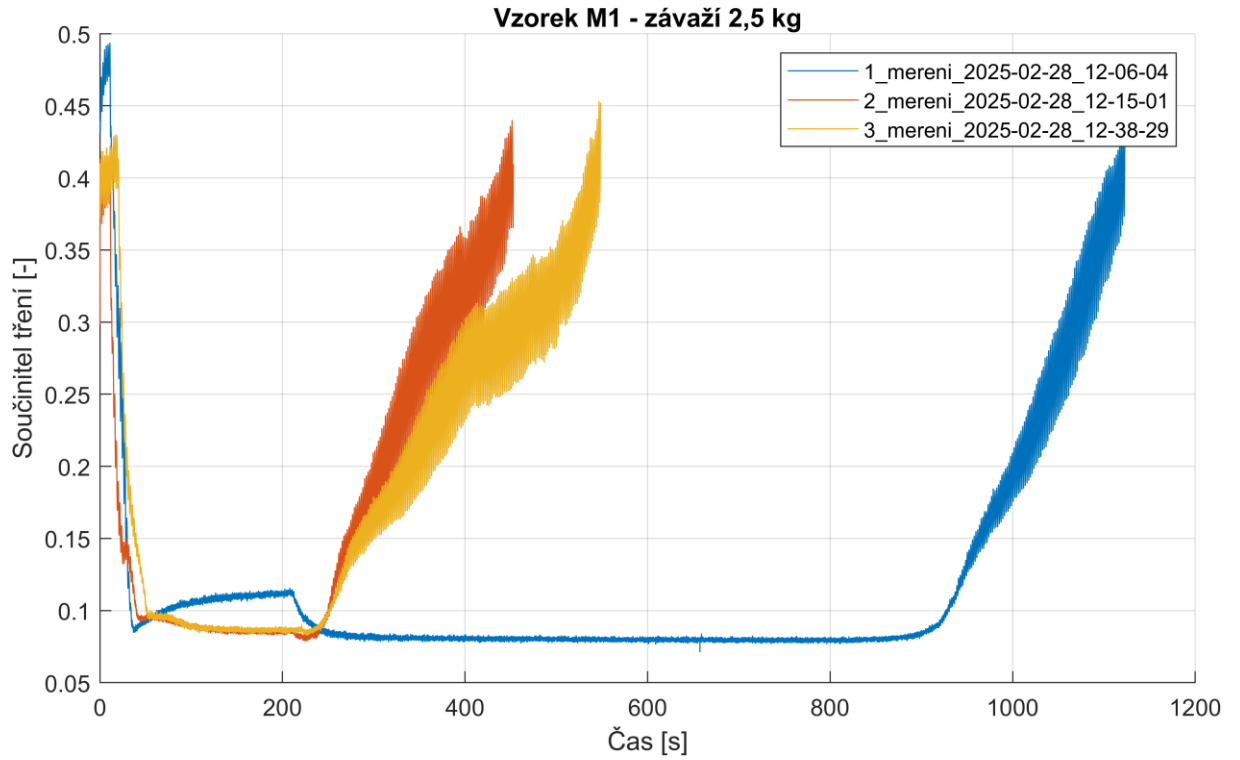
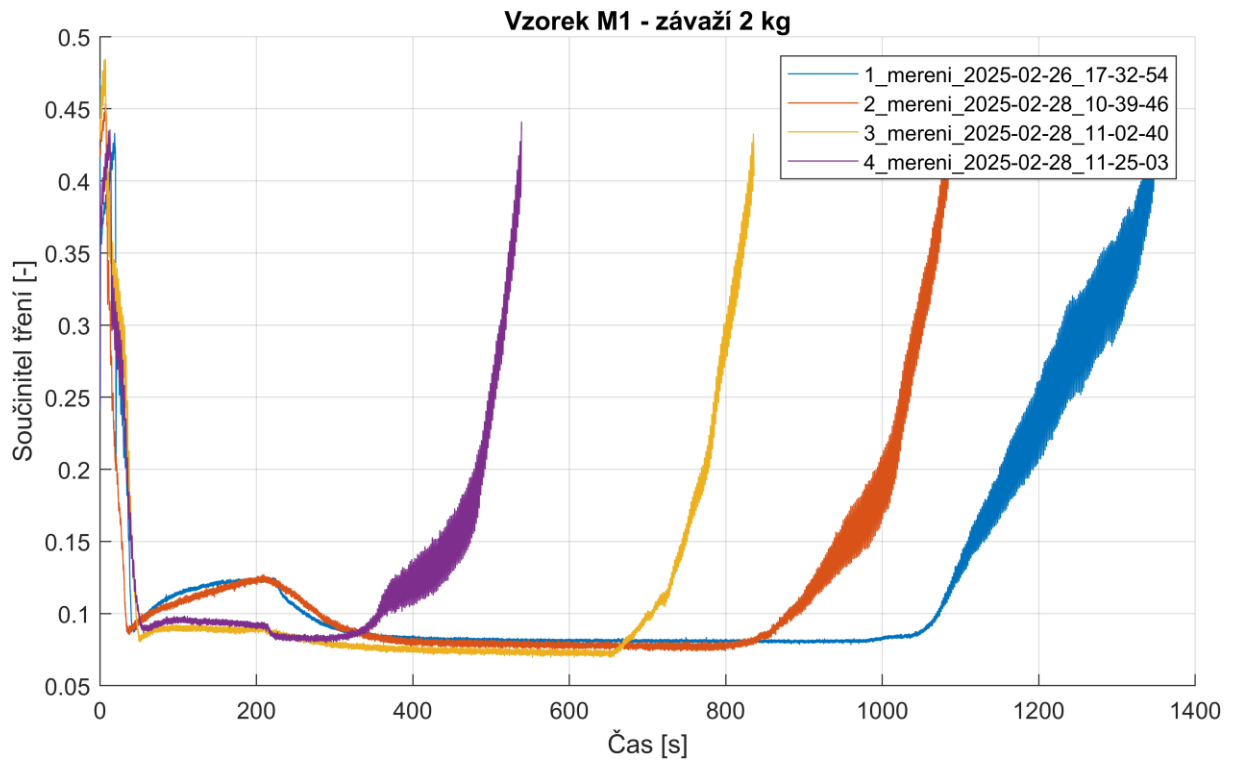
Tabulka B Seznam výkresové dokumentace

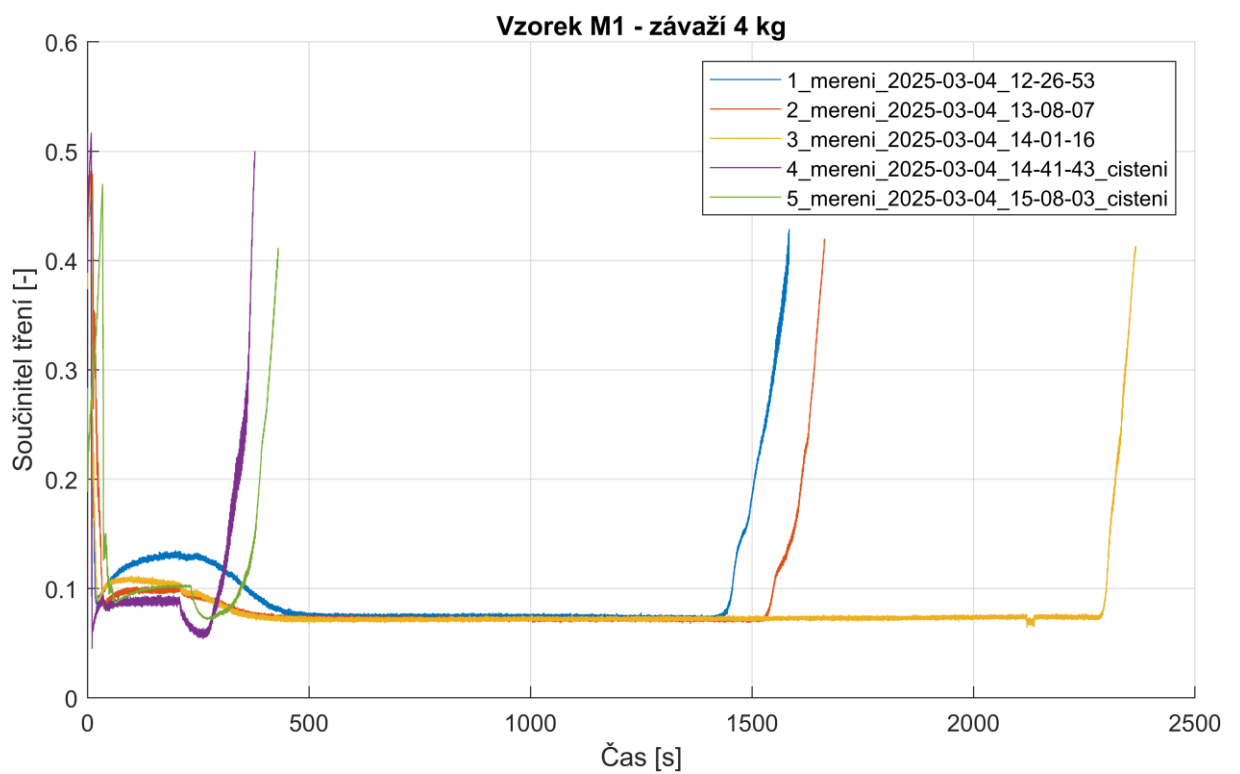
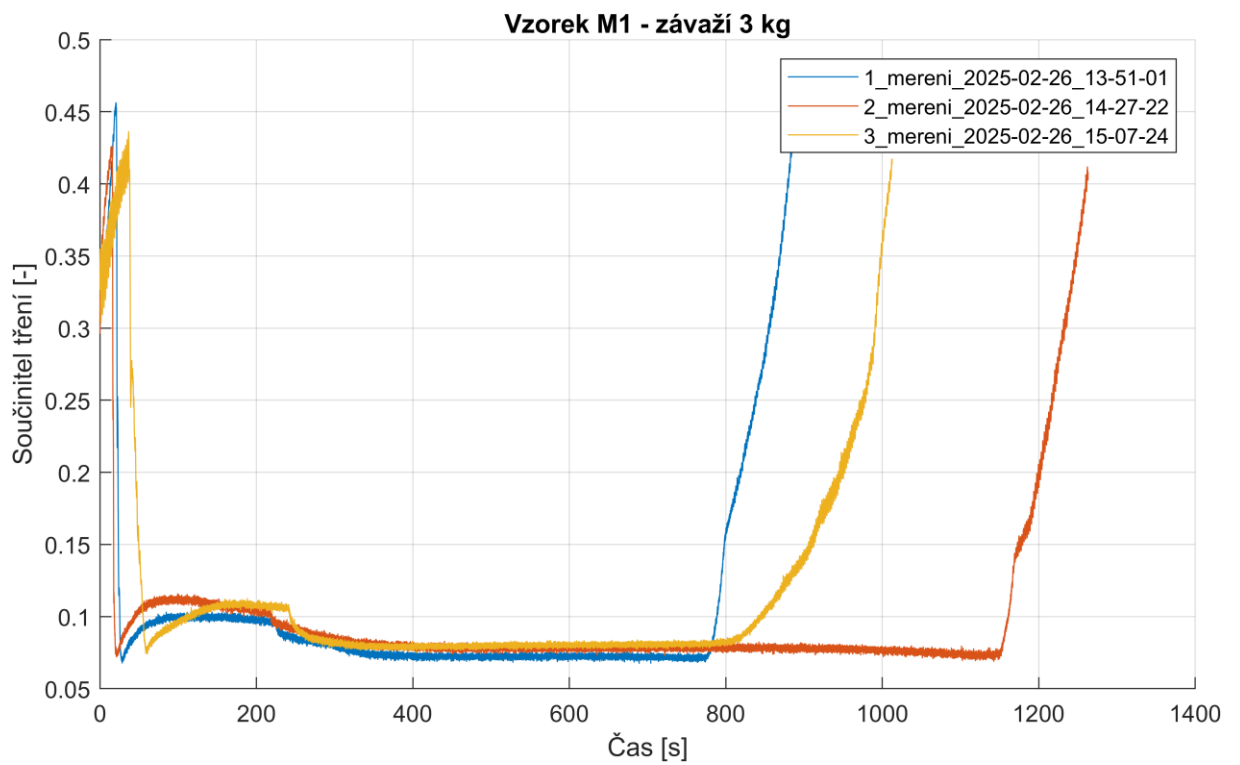
Označení výkresu	Název výkresu
00-00	Sestava uchycení
00-01	Držák malý
00-02	Držák velký

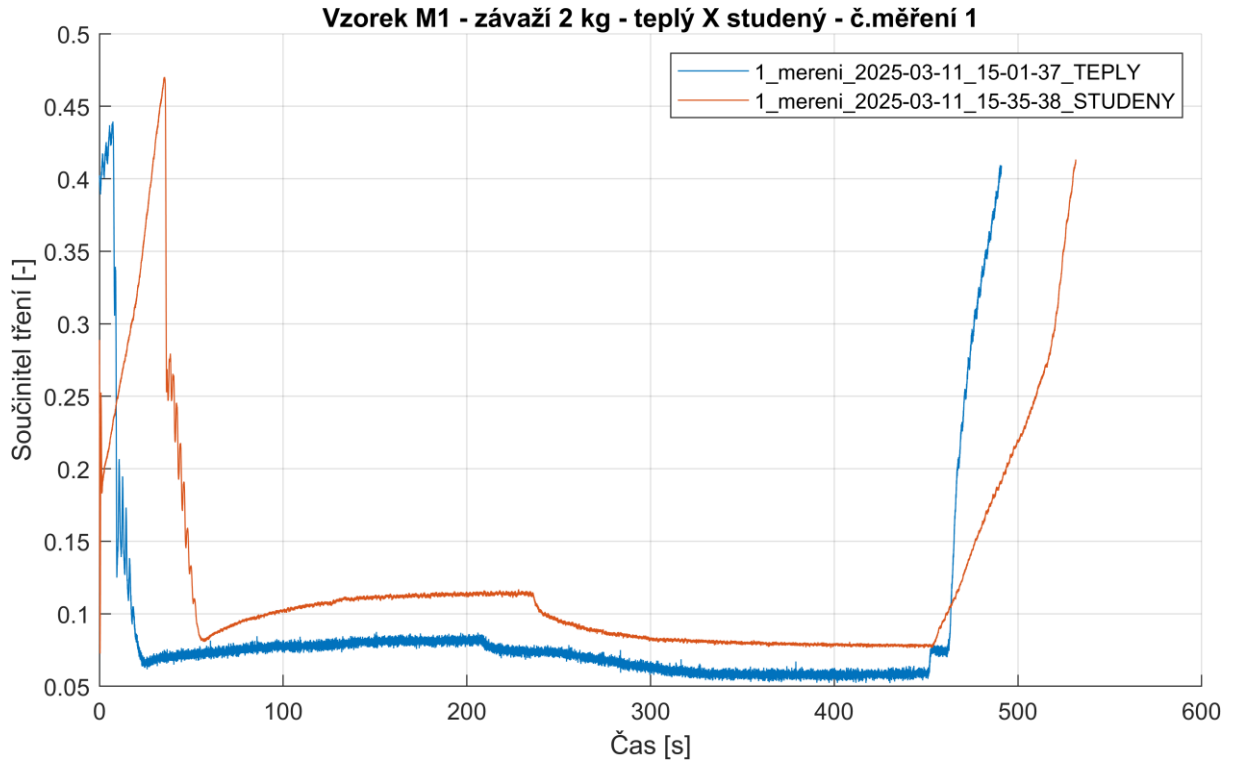
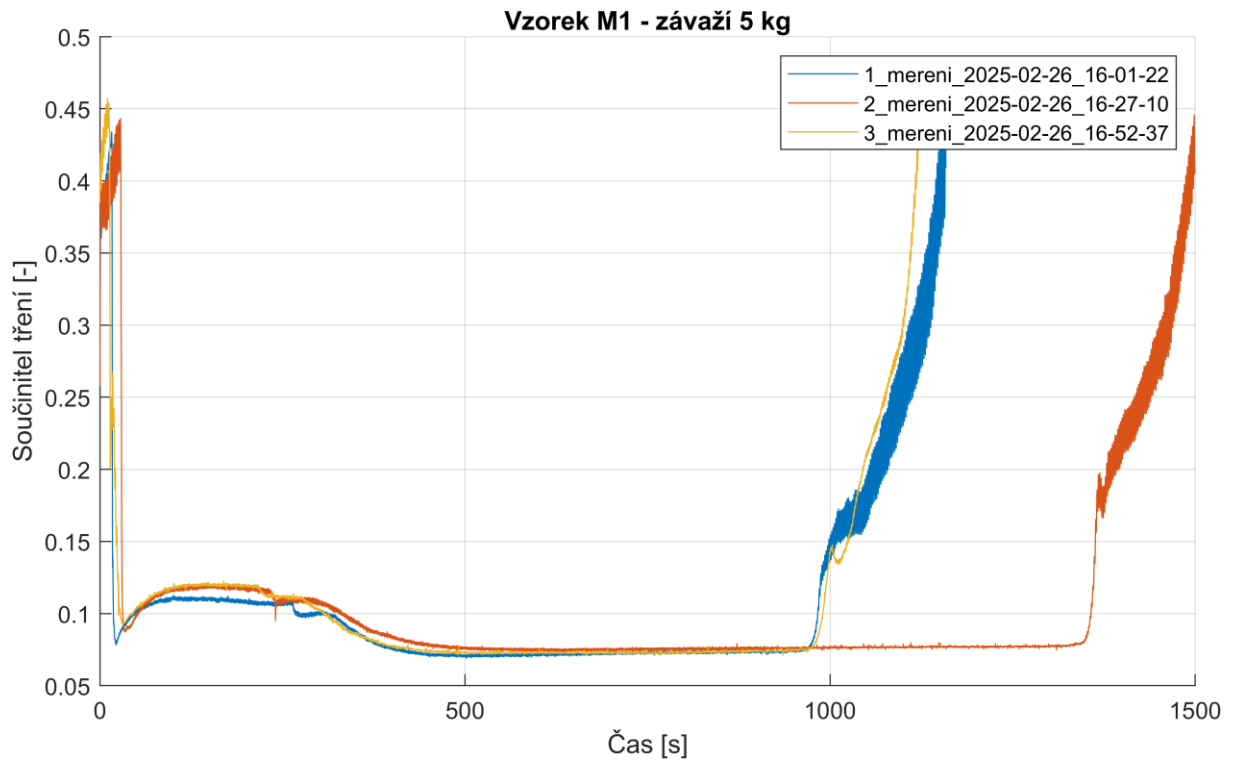
Příloha A – Průběhy měření

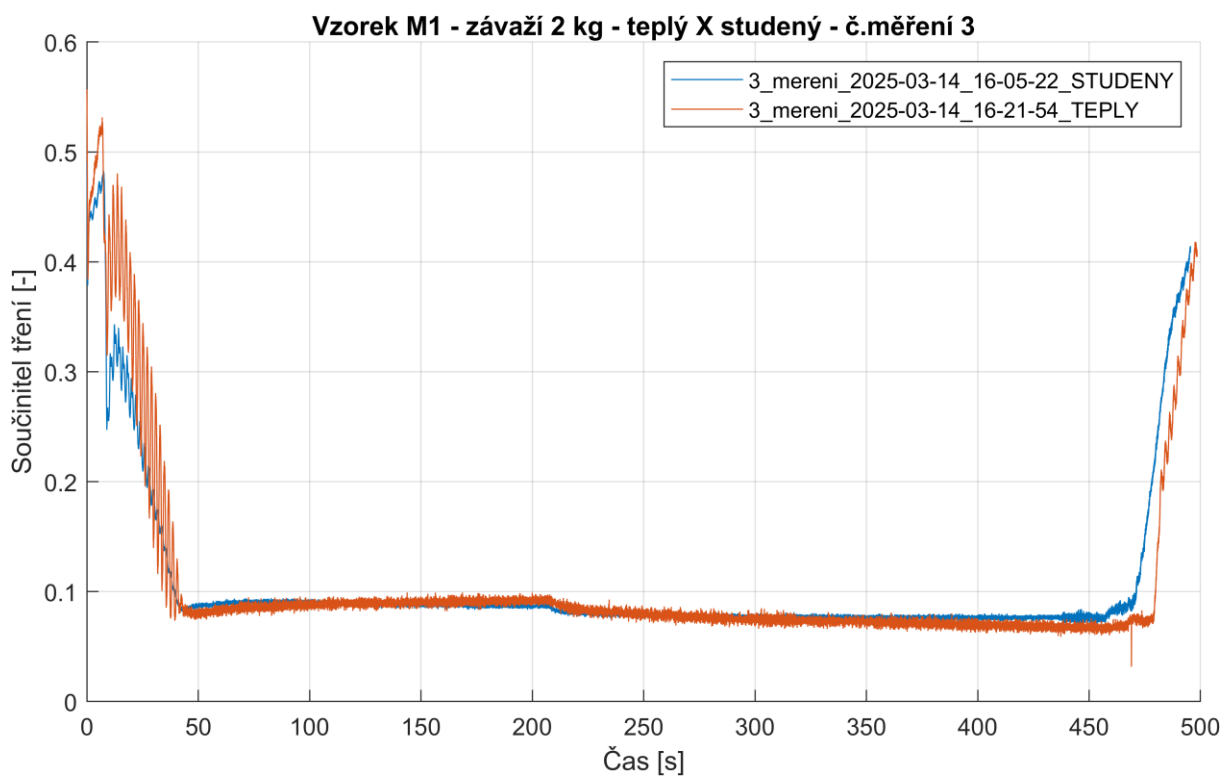
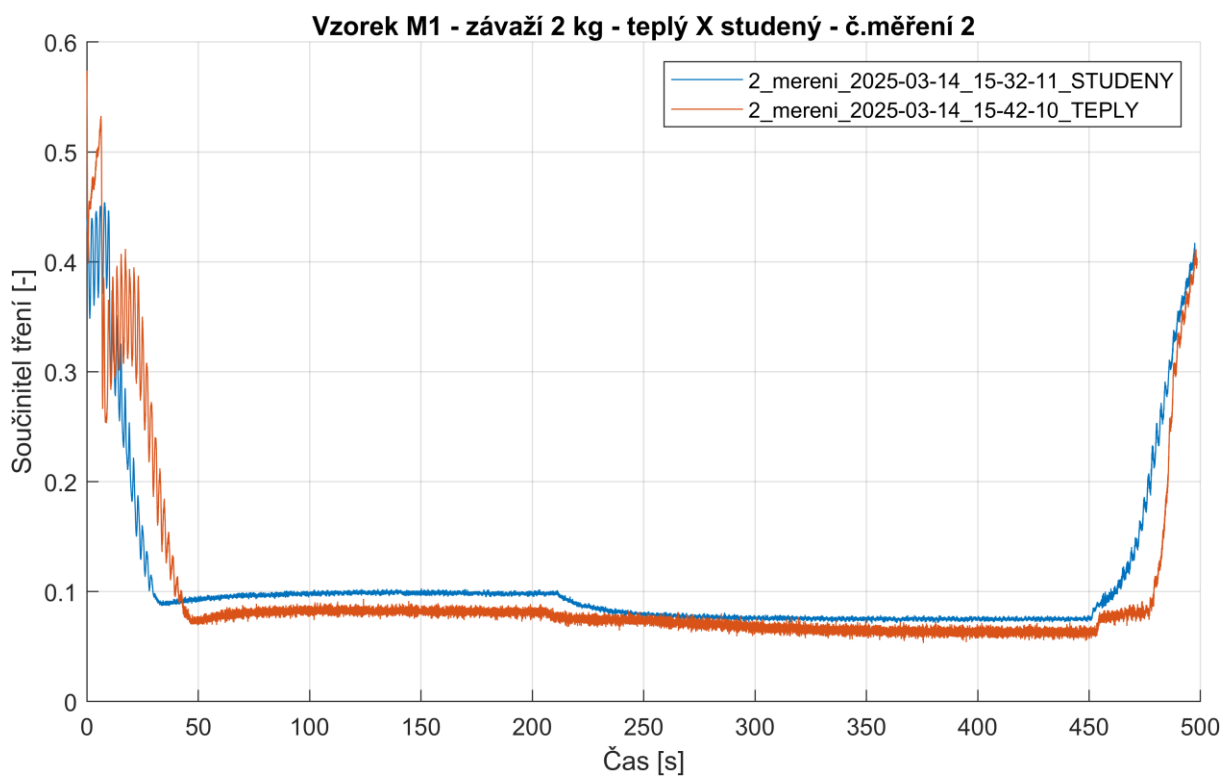
Vzorek M1











Vzorek M2

