

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**



# **Motorový olej a interval jeho výměny**

**Diplomová práce**

**Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

**Autorka práce: Bc. Zuzana Wiesnerová**

**© 2022 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Zuzana Wiesnerová

Technika a technologie v dopravě a spojích  
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Motorový olej a interval jeho výměny**

Název anglicky

**Engine oil and its service interval**

---

### Cíle práce

Cílem diplomové práce je na základě literárního rozboru popsat možnosti využití tribodiagnostiky v systémech údržby a na základě tohoto popisu a realizovaných praktických zkoušek analyzovat, posoudit a případně upravit interval výměny motorového oleje ve spalovacím motoru zvolených vozidel.

### Metodika

V první části práce bude realizován literární rozbor na jehož výsledky naváže praktické část práce, která bude zahrnovat sběr vzorků oleje z vybraných vozidel, analýzu vzorků (viskozita, hustota, těžké složky atd.), vyhodnocení vzorků a případná úprava stávajících intervalů údržby.

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu (klasifikace olejů, tribodiagnostika, přehled testů)
3. Cíl práce
4. Metodika práce
5. Výsledky (odběr, analýza a vyhodnocení vzorků oleje z vozidel v nákladní dopravě)
6. Závěr

**Doporučený rozsah práce**

40-60

**Klíčová slova**

údržba, tribodiagnostika, oleje

---

**Doporučené zdroje informací**

BHUSHAN, B. Modern tribology handbook. Boca Raton: CRC Press, 2001, xxix, 765 s. ISBN 0-8493-8403-61.

Periodika, předpisy a firmení literatura

POŠTA, J. – DVOŘÁK, M. – VESELÝ, P. Degradace strojních součástí: monografie. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002, s. 67, ISBN 80-213-0967-9.

ROYLANCE, B. – HUNT, J. Wear debris analysis handbook. Oxford: Coxmoor Publishing Company, 1999. 118 s. ISBN 1901892026.

ZIEGLER, J. – HELEBRANT, F. – MARASOVÁ, D. Technická diagnostika a spolehlivost, Díl I. Tribodiagnostika. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2004, ISBN 80-7078-883-6.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/2022 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

---

Elektronicky schváleno dne 18. 11. 2020

**doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 15. 12. 2021

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Motorový olej a interval jeho výměny“ vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědoma, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 31. 3. 2022

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích a analýzách vzorků. Dále bych ráda poděkovala firmě AD Mach s.r.o. za možnost odebírání vzorků olejů z jejich vozidel. Jmenovitě pak hlavně Stanislavu Machovi ml. za pomoc při plánování a odebírání vzorků olejů. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině za podporu při studiu i při psaní této diplomové práce.

**Abstrakt:** Cílem této diplomové práce je na základě literárního rozboru popsat možnosti využití tribodiagnostiky v systémech údržby a na základě tohoto popisu a realizovaných praktických zkoušek analyzovat, posoudit a případně upravit interval výměny motorového oleje ve spalovacím motoru zvolených vozidel. V první části práce je uveden podrobný literární rozbor motorového oleje a tribodiagnostiky. V kapitole Motorový olej je popsána funkce, druhy, klasifikace, vlastnosti a znečištění olejů. V kapitole Tribodiagnostika je uveden princip, využití a rozdělení tribodiagnostických metod. Následuje kapitola Metodika práce, ve které jsou popsány odběry vzorků olejů, zkušební vozidla a statistické zpracování naměřených hodnot. Také jsou uvedeny metodiky měření jednotlivých sledovaných veličin. Kapitola Výsledky je rozdělena na výsledky měření a dílčí závěry. V Závěru je vyhodnocení, že současný interval není vhodně zvolen, proto je navržen nový interval výměny oleje.

**Klíčová slova:** motorový olej; tribodiagnostika; údržba; znečištění; viskozita; interval

## **Engine oil and its service interval**

**Abstract:** The aim of this thesis is to describe the possibilities of using tribodiagnostics in maintenance systems based on the literature analysis and to analyse, assess and possibly adjust the engine oil changing interval in the combustion engine of selected vehicles based on this description and practical tests. In the first part of the thesis is presented detailed literature analysis of engine oil and tribodiagnostics. The Engine oil chapter describes the function, types, classification, properties and contamination of oils. In the Tribodiagnostics chapter is presented the principle, application and distribution of tribodiagnostic methods. This is followed by the Methodology chapter, which describes oil sampling, test vehicles and statistical processing of measured values. The measurement methodologies for the various quantities monitored are also presented. The Results chapter is divided into measurement results and partial conclusions. In the Conclusion is evaluated that the current interval is not appropriately chosen, therefore a new oil changing interval is recommended.

**Keywords:** Engine oil; Tribodiagnostics; Maintenance; Contamination; Viscosity; Interval

## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Rozbor současného stavu .....	2
2.1. Motorový olej .....	2
2.1.1. Funkce motorového oleje ve spalovacím motoru.....	2
2.1.2. Druhy motorových olejů.....	3
2.1.3. Klasifikace motorových olejů.....	5
2.1.4. Fyzikálně-chemické vlastnosti motorových olejů .....	7
2.1.5. Znečištění motorových olejů .....	10
2.1.6. Zlepšení vlastností olejů přísadami .....	16
2.2. Tribodiagnostika .....	17
2.2.1. Princip a využití tribodiagnostiky .....	17
2.2.2. Rozdělení metod tribodiagnostiky .....	18
3. Cíl práce.....	25
4. Metodika práce .....	26
4.1. Metodika měření .....	29
4.1.1. Těkavé složky .....	29
4.1.2. Kinematická viskozita, dynamická viskozita a hustota .....	30
4.1.3. LNF.....	32
5. Výsledky .....	33
5.1. Těkavé složky .....	33
5.1.1. Výsledky měření.....	33
5.1.2. Dílčí závěr.....	35
5.2. Kinematická viskozita, dynamická viskozita a hustota .....	35
5.2.1. Výsledky měření.....	35
5.2.2. Dílčí závěr.....	43
5.3. LNF.....	44
5.3.1. Výsledky měření.....	44
5.3.2. Dílčí závěr.....	50
6. Závěr.....	52
7. Seznam použitých zdrojů.....	55
Seznam obrázků.....	58
Seznam tabulek.....	59
8. Přílohy .....	i

# 1. Úvod

Motorový olej je jednou z nejdůležitějších provozních kapalin ve vozidle. Olejová náplň v motoru zajišťuje spoustu funkcí, jako je mazání, chlazení, těsnění spalovacího prostoru, snižování hluku, omezování koroze a odvod nečistot. Aby olejová náplň bezchybně plnila tyto funkce, musí být po celou dobu provozu v dobré kondici.

V dnešní době lze k analýze olejů využívat tribodiagnostiku. Tato bezdemontážní metoda umožní odhadnout zbývající životnost oleje. Metoda se zabývá nejenom stavem mazacího oleje, ale i stavem celé soustavy, což spolu úzce souvisí. Tribodiagnostika je výhodná i z ekologického a ekonomického hlediska, protože díky ní je možné stanovit ideální čas výměny oleje. Pokud by byl olej měněn před koncem jeho životnosti, bylo by to neekonomické a zbytečné. Pokud by naopak olej byl po konci jeho životnosti nadále používán, docházelo by ke zvýšenému opotřebením vnitřních částí motoru, a to je nežádoucí.

Zvolená firma aktuálně vlastní 49 tahačů se sklápěcími návěsy. Každý tahač má zhruba 35 litrů olejové náplně. Výměny olejů jsou v současné době prováděny přibližně po devíti měsících, kdy tahač najede firmou stanovené kilometry na olejové náplni. Výměny olejů tedy tvoří velké množství nákladů firmy. Ještě větší množství nákladů by ale bylo způsobeno poruchami, které by vznikaly při používání olejů po konci jejich životnosti. Pro firmu je ekonomičtější častěji vyměnit olej než měnit celý motor, pokud by došlo k jeho poškození (například znečištěným olejem nebo olejem se špatnou viskozitou). Pokud s přibývajícím kilometry klesá viskozita oleje, dochází k suchému tření mezi funkčními plochami motoru, tedy k opotřebením jeho vnitřních částí. To může vést až k zadření motoru. Pokud naopak viskozita průběžně roste, může nastat okamžik, kdy je viskozita natolik vysoká, že dochází ke ztrátám energie, které jsou způsobeny velkým koeficientem tření. Následně vzroste i spotřeba paliva, a to je opět neekonomické. Proto je třeba, aby viskozita oleje neklesla ani nestoupla v průběhu života oleje o více než 20 %. Pokud si firma zaplatí celkem nákladné tribodiagnostické rozbory, může tím ušetřit spoustu jiných nákladů.



## **2. Rozbor současného stavu**

V této kapitole je proveden literární rozbor motorového oleje a tribodiagnostiky.

### **2.1. Motorový olej**

V podkapitole motorový olej jsou postupně popsány funkce motorového oleje, druhy olejů, klasifikace olejů, fyzikálně-chemické vlastnosti, znečištění olejů, včetně původu vzniku nečistot, a nakonec zlepšení vlastností olejů přidáním přísad.

#### **2.1.1. Funkce motorového oleje ve spalovacím motoru**

Spalovací motor by bez motorového oleje nemohl bezchybně pracovat. Motorový olej plní v motoru mnoho funkcí. Nejdůležitější funkcí je mazání, tedy snížení tření mezi funkčními plochami pohybujících se těles. Tím se snižuje opotřebení vnitřních částí motoru. Další funkcí oleje je chlazení, tedy odvod tepla z vnitřních částí motoru.

Další neméně důležité funkce motorového oleje:

- ochrana proti korozi,
- těsnění spalovacího prostoru,
- snížení hluku,
- odvod částic otěru a prachových částic (Vlk, 2006)(Canter, 2010).

V dnešní době jsou velmi sledovány detergentní a disperzní vlastnosti motorových olejů. Motorový olej má za úkol udržet motor v čistotě. Detergentní přísady v oleji nesmí připustit usazování kalů nebo karbonových nánosů v motoru. Tyto přísady proto zajišťují neustálé čištění mazaných povrchů a podporují uvolňování zachycených nečistot na povrchu. Disperzantní přísady poté zajišťují, aby tyto částičky byly neustále v pohybu a nedošlo k jejich usazení v motoru. Jedná se hlavně o saze, prachové částice a produkty tepelné a oxidační degradace oleje (Černý, 2006).

Ing. Jaroslav Černý, CSc. z Ústavu technologie ropy a petrochemie VŠCHT Praha uvádí, že životnost motoru je na prvním místě. Při výrobě motorových olejů se dbá primárně na to, aby olej zajistil co nejdéle životnost motoru a zachoval co nejdéle všechny jeho vlastnosti. Množství a vzájemné poměry přísad v oleji musí zajišťovat rovnováhu vlastností motorového oleje, tedy aby žádná vlastnost nebyla preferována na úkor jiné vlastnosti (Černý, 2006).

Chen et al. (2019) uvádí, že při používání bionafty výrazně klesá kvalita motorového oleje.

Obecně je známo, že bionafta výrazně ovlivňuje kvalitu motorových olejů. Bezpečné používání bionafty je možné pouze v kombinaci s účinnými výkonnostními aditivami. Bez těchto aditiv dochází u minerálních olejů velmi často k výraznému snížení oxidační stability, prudkému zvýšení viskozity a kyselosti a kritickému snížení detergence. Jako ideální aditivum je používán alkylarylsulfonát vápenatý, pomocí kterého se zpomalí již zmíněná degradace motorového oleje (Chen et al., 2019).

### 2.1.2. Druhy motorových olejů

Motorové oleje se podle způsobu výroby dělí na minerální, polosyntetické a syntetické.

Výroba **minerálních olejů** probíhá frakční destilací ropy. Následně po destilaci jsou do minerálního oleje dodána aditiva, aby měl olej lepší vlastnosti a lépe mazal. Dále se přidávají přísady, jako například antioxidanty, disperzanty, látky zvyšující viskozitu nebo látky zamezující pění oleje (Vlk, 2006).

**Polosyntetické oleje** jsou minerální oleje, do kterých je přimíchán syntetický olej. U velmi kvalitních polosyntetických olejů je možné nalézt až 65% podíl syntetického oleje. U těch obvyklých nesmí podíl syntetického oleje klesnout pod 20 %. Polosyntetické oleje jsou též doplňovány o aditiva pro získání lepších vlastností. Již z názvu je patrné, že polosyntetický olej je kompromis mezi minerálními a syntetickými oleji a od každého z nich přebírá jen jeho dobré vlastnosti (Vlk, 2006).

Výroba **syntetických olejů** probíhá chemickou syntézou uhlovodíků, například aromatických sloučenin, esterů organických sloučenin, polyolefinů a alkoholů. Chemická syntéza je složitý proces, při kterém se na sebe vážou uhlovodíkové molekuly. Syntetická maziva mají výhodu, že obsahují pouze složky, které jsou vhodné a nutné (Vlk, 2006).

Oproti ropným mazivům mají syntetické oleje vyšší odolnost proti vysokým teplotám, lepší mazivost, vyšší tekutost při nízkých teplotách a vyšší viskozitní index (Směja, 2020).

Jedna z největších výhod syntetického oleje oproti minerálnímu je, že není tak náročný na zdroje. Významným přínosem syntetického oleje je menší sklon ke zhoršování životního prostředí, díky menší uhlíkové stopě, kterou zanechává. Za rozsáhlou výrobou syntetických olejů stojí cíl získat oleje, které umožňují čistší spalování a jsou zdrojem obnovitelné energie. V souvislosti s celosvětovým úsilím, týkajícím se snižování emisí uhlíku lze předpokládat, že ekologičtější syntetické oleje v budoucnosti zcela nahradí konvenční minerální oleje (Alarifi, 2022).

V motorech, pracujících ve vysokých teplotách či při vysokých tlacích, ztrácí motorový olej časem své vlastnosti a kvalitu. Důvodem je jeho vystavení působení kyselých kontaminantů. Při nízké kvalitě motorového oleje se zvyšuje opotřebení, zvyšují se náklady na údržbu a snižuje se výkon motoru. Nárůst poptávky po **biomazivech** je způsoben jejich vynikajícími fyzikálně-chemickými a ekologickými vlastnostmi (netoxičnost, biologická rozložitelnost). Bylo provedeno několik studií, zaměřených na srovnání výkonu motoru a emisí, při používání čistých minerálních maziv a maziv s biosložkami. Na základě těchto studií bylo zjištěno několik závěrů. Při použití palmového oleje místo minerálních maziv u dvoutaktních motorů dojde ke snížení množství emisí (CO a HC). U čtyřdobých motorů přidavek palmového nebo kokosového oleje do minerálních olejů snižuje emise CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a zlepšuje vlastnosti paliva (Almasi et al., 2021).

### 2.1.3. Klasifikace motorových olejů

Klasifikace motorových olejů se dělí na viskozitní klasifikaci a výkonnostní klasifikaci. Jejich rozbor je uveden v této kapitole.

#### 2.1.3.1. Viskozitní klasifikace

Dělení podle viskozitní klasifikace se provádí podle předpisu SAE J300 SEP 84 (Society of Automotive Engineers) vydaného v USA. Oleje jsou rozděleny do šesti zimních tříd, které jsou značeny číslem a písmenem „W“ a dále do pěti letních tříd, které jsou značeny číslem (Vlk, 2006).

Značení podle viskozitní klasifikace je tedy rozděleno do dvou částí.

Z **první číslice** lze zjistit kinematická viskozita oleje při nízkých teplotách. Označení „W“ je z anglického Winter, tedy zima. Čím nižší je číslo před W, tím je olej tekutější a motor lépe startuje při nízkých teplotách. Motor, s dříve nejvyužívanějším olejem 10W, je startovatelný při teplotách zhruba  $-30^{\circ}\text{C}$ . V dnešní době, kdy je cílem zlepšit studené starty, se více využívají lehkoběžné oleje značené 0W nebo 5W. Jejich startovatelnost se posouvá až k teplotám kolem  $-50^{\circ}\text{C}$  (Hrdlička, 1996)(Balabin a Safieva, 2008).

Z **druhé číslice** lze zjistit viskozita při provozní teplotě oleje. Čím je číslo vyšší, tím je olej při provozní teplotě hustší a způsobuje větší odpor proti pohybu třecích ploch. Vyšší číslo znamená i vyšší viskozitu za provozních teplot, a to způsobuje větší vnitřní ztráty, tedy pokles výkonu. V určitých oblastech je ale vyšší viskozita žádoucí z důvodu dotěsnění pístní skupiny. Oleje SAE 5W-40, 10W-40 a 15W-40 mají při provozní teplotě všechny stejnou viskozitu a rozdíl je ve startovatelnosti a čerpatelnosti za nízkých teplot (Hrdlička, 1996)(Vlk, 2006).

Viskozitní klasifikace SAE J300 je uvedena v Tabulce 1.

**Tabulka 1: Viskozitní klasifikace SAE J300**

Viskozitní třída SAE	Dynamická viskozita (mPa · s) v CCS při teplotě (°C)	Dynamická viskozita (mPa · s) – mezní hodnota čerpatelnosti – při teplotě (°C)	Kinematická viskozita (mm <sup>2</sup> /s) při teplotě 100 °C		Dynamická viskozita (mPa · s) při teplotě 150 °C a smykovém napětí 10 <sup>6</sup> s <sup>-1</sup>
	max.	max.	min.	max.	min.
0W	3 250 při -30	30 000 při -35	3,8		
5W	3 500 při -25	30 000 při -30	3,8		
10W	3 500 při -20	30 000 při -25	4,1		
15W	3 500 při -15	30 000 při -20	5,6		
20W	4 500 při -10	30 000 při -15	5,6		
25W	6 000 při -5	30 000 při -10	9,3		
20			5,6	9,3	2,6
30			9,3	12,5	2,9
40			12,5	16,3	2,9/3,7
50			16,3	21,9	3,7
60			21,9	26,1	3,7

Zdroj: Vlč (2006) (upraveno)

### 2.1.3.2. Výkonnostní klasifikace

Dělení olejů podle výkonnostní klasifikace je více vypovídající než dělení podle viskozitní klasifikace. Vyhodnocují se fyzikální vlastnosti oleje, například ochrana proti korozi a oxidaci, ochrana proti otěru, proti tvorbě úsad, pění oleje, oxidační stabilita a další (Šlechta, 2015).

Jednotlivé normy klasifikace olejů:

- klasifikace API (American Petroleum Institute, USA),
- klasifikace ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobile, EU),
- klasifikace CCMP (Comité des Constructeurs d'Automobile du Marché Commun, EU),
- klasifikace MIL-L (normy americké armády),
- firemní klasifikace výrobců motorů a vozidel (VW, MB, MAN atd.),
- jiné klasifikace (např. ILSAC) (Šlechta, 2015).

V současnosti jsou využívány klasifikace API, ACEA a dále firemní klasifikace výrobců automobilů VW, MB, MAN a další (Vlk, 2006).

**Klasifikace API** je rozdělena na dvě části pro motory zážehové a vznětové. Výkonnost je udávána pomocí písmen. Pokud je olej označen prvním písmenem S, je určen pro zážehový motor. Pokud je první písmeno C, poté je určen pro motor vznětový. Druhým písmenem je vyjádřena výkonnost oleje. Písmena jsou řazena postupně podle abecedy. Čím je písmeno dále v abecedě, tím má olej lepší vlastnosti (Šlechta, 2015).

Například SA je olej určený pro zážehové motory bez nároku na výkon a ochranu. Použit ho lze pouze, pokud je to vyžadováno výrobcem. Oproti tomu například SN je též pro zážehové motory, ale již pro novější, vyrobené po roce 2011. Tento olej poskytuje vyšší ochranu pístů, při vyšších teplotách, a zaručuje vyšší ochranu turbodmychadla a motoru. Dále zaručuje vyšší kontrolu emisí a nižší spotřebu paliva. Je tedy patrné, že výkonnost oleje skutečně roste se vzdalujícím se písmenem značení od začátku abecedy (Šlechta, 2015).

**Klasifikace ACEA** dělí oleje do čtyř skupin. Pokud je olej označen písmenem A, je určen pro zážehové motory. Oleje označené písmenem B jsou určeny pro vznětové motory osobních a lehkých užitkových vozidel. E označuje oleje pro vznětové motory nákladních vozidel a C jsou oleje pro vznětové motory s částicovými filtry. Klasifikace ACEA rozděluje oleje do tříd podle přípustné zátěže a podle možnosti prodloužit interval výměny oleje (Šlechta, 2015).

#### **2.1.4. Fyzikálně-chemické vlastnosti motorových olejů**

Na degradaci motorového oleje mají vliv například tyto fyzikálně-chemické vlastnosti.

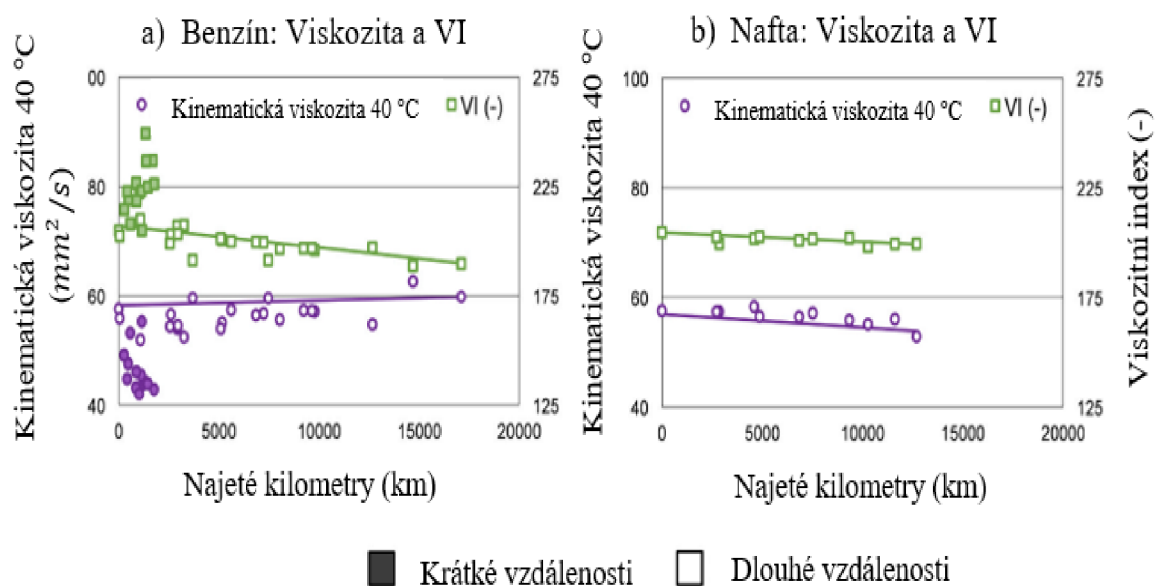
- **Změna viskozity** – U motorového oleje dochází k velkým změnám viskozity. Nárůst viskozity bývá způsoben termickou a oxidační degradací oleje. Naopak pokles viskozity může být způsoben pronikáním paliva do oleje.
- **Kyselost** – Nové motorové oleje jsou jen mírně kyselé. Degradací oleje vznikají další kyselé látky (například spalováním paliva nebo oxidační degradací oleje).

- **Oxidační stabilita** – Následkem oxidačního namáhání oleje dochází k jeho postupné oxidaci. Takto degradovaný olej již nemá své původní vlastnosti a nemusí tak plně chránit motor před korozi. Dojde také ke snížení viskozity. Proti oxidaci může být olej chráněn tzv. antioxidanty.
- **Mechanické nečistoty v oleji** – Mezi tyto nečistoty patří například saze a prach. Detergentní přísady v oleji nesmí připustit usazování úsad nebo karbonových nánosů v motoru, proto neustále čistí mazaný povrch a uvolňují zachycené nečistoty na povrchu. Disperzantní přísady poté zajišťují, aby tyto částičky byly neustále v pohybu a nedošlo k jejich usazení v motoru (Vlk, 2006) (Hošek, nedatováno) (Černý et al., 2007).

Agocs et al. (2021) provedli posouzení vzorků olejů benzinových a naftových motorů pozorovaných při provozních zkouškách osobních automobilů. Vyhodnocovali degradaci konvenčních olejů s přibývajícím ujetým kilometrem. V této kapitole jsou uvedeny jejich poznatky týkající se kinematické viskozity, viskozitního indexu, oxidace, nitrace a sulfatace.

Obrázek 1 ukazuje rozdíly kinematických viskozit a viskozitních indexů v závislosti na počtu najetých kilometrů u benzinových a naftových vozidel. Kinematická viskozita u vozidel provozovaných na dlouhých trasách, je relativně neovlivněná. U benzinových vozidel dochází k mírnému zvýšení, na rozdíl od naftových vozidel, u kterých nastává nepatrné snížení kinematické viskozity. V tomto množství najetých kilometrů jsou změny nepatrné, avšak při prodloužených intervalech výměny oleje u naftových motorů (30 000 km) již mohou být značně nebezpečné pro funkční plochy motoru. Hrozí zadření motoru (Agocs et al., 2021).

Viskozitní index u benzinových vozidel, provozovaných na dlouhých trasách, s přibývajícím kilometrem výrazně klesá. Může to být způsobeno degradací přísad, zlepšujících viskozitní index. U benzinových vozidel, provozovaných na krátkých trasách, dochází k výrazným odchylkám u kinematické viskozity i u viskozitního indexu. Viskozitní index výrazně vzroste a kinematická viskozita oproti tomu výrazně poklesne, což může být způsobeno pronikáním paliva do oleje (Agocs et al., 2021).

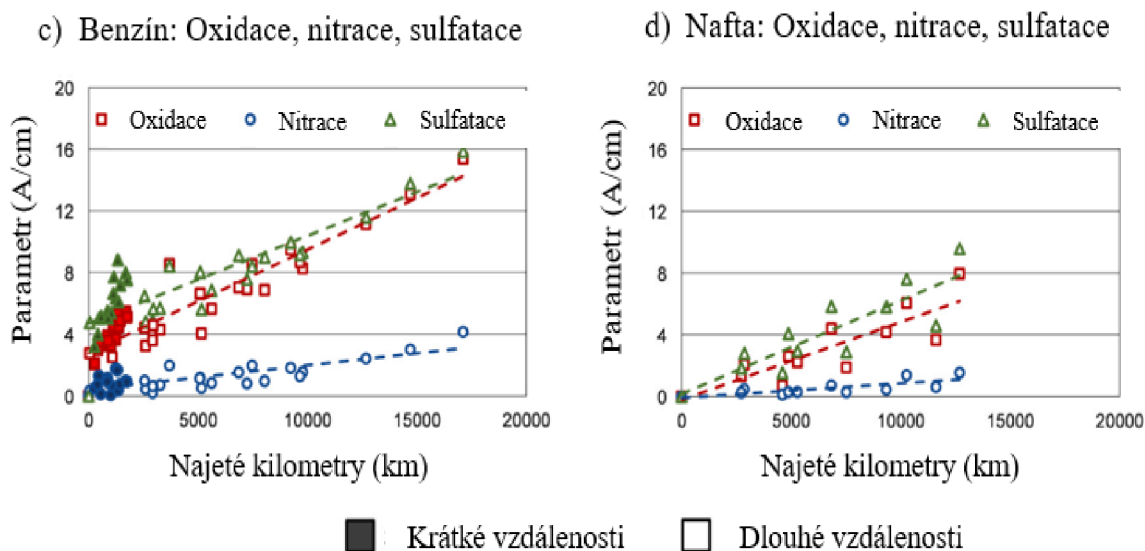


**Obrázek 1:** Kinematická viskozita a viskozitní index (VI) v závislosti na počtu ujetých kilometrů, a) benzínová vozidla, b) naftová vozidla

Zdroj: Agocs et al. (2021) (upraveno)

Obrázek 2 znázorňuje průběhy oxidace, nitrace a sulfatace u benzínových a naftových vozidel v závislosti na najetých kilometrech. Všechny parametry se průběžně zvyšují, což způsobuje termooxidační namáhání motorových olejů. U olejů v naftových vozidlech dochází k pomalejší nitraci. Oleje v benzínových vozidlech vykazují zvýšenou oxidaci a sulfataci. U benzínových vozidel, provozovaných na krátkých trasách, má oxidace výrazně zrychlenou tendenci. Je patrné, že různé motorizace (benzín, nafta), stejně jako různé profily využití (krátké vzdálenosti, dlouhé vzdálenosti) mají významný vliv na degradaci motorového oleje a vedou k výrazně odlišnému stavu oleje po podobném počtu ujetých kilometrů (Agocs et al., 2021).





**Obrázek 2:** Oxidace, nitrace a sulfatace, jako funkce v závislosti na počtu ujetých kilometrů, c) benzínová vozidla, d) naftová vozidla

Zdroj: Agocs et al. (2021) (upraveno)

### 2.1.5. Znečištění motorových olejů

Znečištěné motorové oleje je možné v rámci celosvětového šetření energetických zdrojů recyklovat. Význam recyklace v souvislosti s omezenými zdroji fosilních paliv roste a představuje způsob ochrany životního prostředí. Při zpracování použitých motorových olejů se používají různé alkoholy. Použité oleje bývají znečištěny kontaminanty a nečistotami, které vznikly nežádoucími oxidačními procesy (sedimenty, vodou, kovovými částicemi, degradovanými přísadami). Při regeneraci motorového oleje musí být docíleno odstranění těchto kontaminantů. Metod recyklace existuje několik, například kyselé ošetření k odstranění pryží a tuků, sedimentace, dekantace, bělení, neutralizace a filtrace (Stan et al., 2018).

K úpravě kyselinami se používají různé kyseliny (sírová, octová, dusičná, fosforečná, mravenčí). Bělení se provádí pomocí průmyslové bělicí zeminy (betonit). K neutralizaci je možné použít hydratované vápno. Na konci všech postupů úpravy olejů musí dojít k sedimentaci/dekantaci a filtraci. Následně je získán regenerovaný olej. Při regeneraci motorových olejů kyselinami dojde ke zlepšení hodnot bodu tuhnutí, viskozity a TAN. Kyselina sírová má velmi dobrý účinek na viskozitu a měrnou hmotnost motorového oleje 5W40. Barvu regenerovaného oleje dokážou mírně zlepšit kyseliny mravenčí, octová a fosforečná (Stan et al., 2018).

### 2.1.5.1. Voda

Může se stát, že se do oleje dostane voda, resp. nemrznoucí kapalina. Část vody je olej schopen pohltit a přebytečná voda se ve formě kapiček usazuje na dně olejové vany. Promícháváním oleje v motoru nedochází k usazování kapiček na dně vany, ale vytvoří se emulze. Olej se poté zbarví do světlejší hnědé barvy. Při provozní teplotě motoru není styk oleje s vodou nikterak závažný. Vysokými teplotami dochází k odpaření kapiček vody. Velkým problémem jsou studené starty v zimním období, kdy motoru trvá delší dobu, než se dostane na provozní teplotu. Voda, vzniklá spalováním paliva, se při startu v zimním období projevuje bílým kouřem nebo kapkami vody z výfuku (Černý, 2008c).

Na jeden litr spáleného paliva v motoru vznikne přibližně jeden litr vody. Většina této vody odchází, jako pára, výfukem do ovzduší. Část horké vodní páry se spaliny dostává v klikové skříni do kontaktu s motorovým olejem. Pokud je motor i olej zahřátý na provozní teplotu, voda se odpaří nuceným odvětráváním klikové skříně. Pokud je motor studený, nebude docházet k odpařování vody. V klikové skříni není dostatečná teplota na přeměnu vody ve vodní páru. Poté bude docházet k hromadění kapiček vody v motorovém oleji a promícháváním ke vzniku emulze oleje s vodou. Emulze se usazuje na víčku, viz Obrázek 3. Této emulze se dá téměř bez problému zbavit, pokud motor bude pracovat alespoň hodinu při provozní teplotě. Poté dojde k odpaření vody, která ale zanechá nepatrné stopy. Přítomnost vody může změnit aditivaci oleje a snižuje jeho kvalitu, tedy i zkracuje jeho životnost (Černý, 2008c).



**Obrázek 3:** Usazená emulze vzniklá nemrznoucí kapalinou v oleji

Zdroj: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Voda-a-glykol-v-oleji/>

### **2.1.5.2. Glykol**

V nemrznoucích kapalinách se glykol vyskytuje jako etylenglykol či propylenglykol. Při průniku nemrznoucí směsi do oleje, například při závadě na hlavě válců, reagují glykoly a aditiva s olejem. To může způsobit nevratné změny v motorovém oleji a olej pak již nemusí správně plnit svoji funkci. Degradace může nastat i při průniku velmi malého množství chladicí kapaliny do oleje, avšak při rostoucím množství chladicí kapaliny v oleji se zvyšuje rychlost degradace oleje. Degradace se projevuje zčernáním oleje, ztrátou tekutosti a v oleji se objevují nerozpustné úsady. Motor s tímto olejem lze kvůli jeho hustotě jen velmi těžko nastartovat. Pokud je i přes to olej nadále provozován dojde k jeho ztuhnutí, přičemž přestane plnit svoji funkci a následně dochází k zadření motoru (Černý, 2008c).

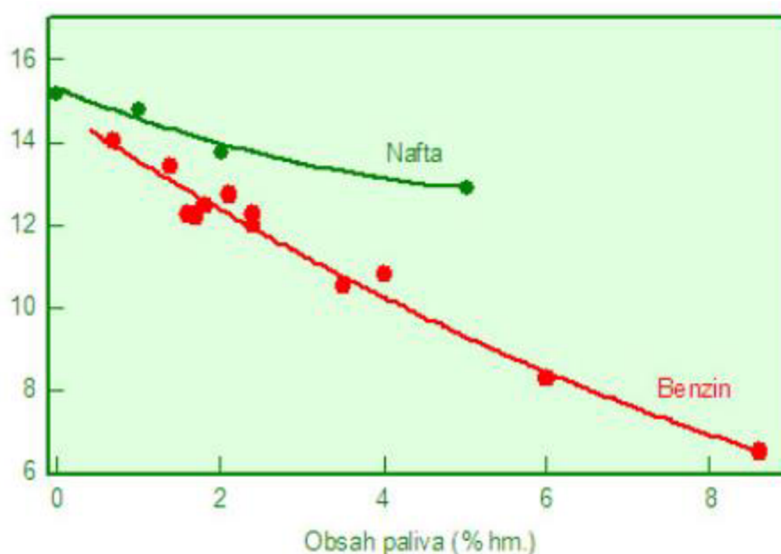
V případě zjištění glykolu v oleji je před dalším provozováním motoru nutné nejprve odstranit netěsnosti, aby již dále nepronikala další chladicí kapalina do oleje. Následně je nutné odstranit z celého systému glykol, tedy komplet mechanicky vyčistit všechny části systému. Pokud by byla provedena jen výměna oleje za nový, spolehlivě by určitá část glykolu v systému zůstala a zničila by novou olejovou náplň (Černý, 2008c).

### **2.1.5.3. Palivo**

Palivo, v podobě benzínu nebo nafty, je v oleji přítomné vždy. Do oleje proniká například se spaliny z prostoru válce kolem pístních kroužků do klikové skříně. Důvodem bývá netěsnost pístních kroužků. Dalším důvodem může být závada na motoru. S nespáleným benzínem ve výfukovém traktu si poradí katalyzátor, případně u vznětového motoru se nafta odpaří. Pokud se nespálené palivo dostane s výfukovými plyny do klikové skříně, poté záleží na teplotě oleje a teplotě prostoru klikové skříně. Při provozní teplotě se dostane do klikové skříně jen minimální množství paliva, oproti tomu u studených motorů se do oleje dostane zhruba 1–2 % paliva. Většina výrobců udává maximální možnou hodnotu 4 % paliva v oleji. Větší množství paliva v oleji již může značit závadu motoru, což může být například závada vstřikování paliva (Černý, 2008b).

Výskyt paliva v oleji způsobuje snižování viskozity oleje. S nižší viskozitou roste úspora paliva, což se využívá u tzv. lehkoběžných olejů. Pokud je ale viskozita příliš nízká, nedochází k důkladnému mazání v motoru a výsledkem je poté zvyšující se opotřebení motoru. Čím je více paliva v oleji, tím více klesá viskozita, tedy tím vyšší je opotřebení. Vliv paliva na viskozitu oleje je patrný z Obrázku 4. Na obrázku je možné pozorovat, že benzín má, oproti naftě, velký vliv na viskozitu oleje. U zážehových motorů je hranice nebezpečí 5–7 % benzínu v oleji (Černý, 2008b).

Ve vozidlech s naftovými motory je nutná pravidelná regenerace filtru pevných částic, který se nachází ve výfukovém systému, aby se zabránilo jeho ucpaní. Regenerace je hlavní příčinou ředění motorového oleje naftou. Pro zkoumání účinku provozních podmínek motoru na obsah paliva v oleji je vyžadován přesný a rychlý in-line měřicí systém. Tento systém je založen na principu rezonančního snímače a stanovuje obsah motorové nafty v oleji pomocí měření viskozity oleje (Niedermayer et al., 2016).



**Obrázek 4:** Vliv obsahu paliva na viskozitu oleje

Zdroj: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Palivo-v-oleji/>

#### **2.1.5.4. Vzduch**

Vzduch se v oleji nachází ve formě rozpuštěného vzduchu, pěny a bublin. I v novém oleji je obsažen rozpuštěný vzduch. V případě dalšího provzdušňování vznikne směs plná bublin, která způsobí značné problémy. Provzdušnění může nastat nevhodnou konstrukcí motoru a nádrže, přísáváním netěsnostmi nebo rotací mazaných elementů. V místě průchodu vzduchové bubliny mazaným místem dojde ke ztrátě mazacího filmu. Pokud se v oleji vyskytuje velké množství vzduchu, nastane změna stlačitelnosti a tepelných vlastností oleje (Černý, 2007b).

#### **2.1.5.5. Nečistoty a saze**

Mechanické nečistoty, jako je například prach, ořez nebo saze, se usazují v oleji. Způsobují zvýšení opotřebování třecích povrchů, tvoří se kaly a úsady a následně může dojít k ucpání olejového filtru a omezení dodávky oleje. Mechanické nečistoty v motorovém oleji mají několik zdrojů. Prvním a nejčastějším zdrojem je motorem nasávaný vzduch, se kterým se do motoru nasávají i prachové částice. Pokud jde o velké a střední prachové částice, o ty se postará vzduchový filtr, který je zachytí a nepustí do spalovacího prostoru. Malé prachové částice se do spalovacího prostoru dostanou a proniknou až do oleje. Jedná se o tvrdé abrazivní částice s velikostí až několik milimetrů. Dalším zdrojem nečistot je palivo. V palivu se nacházející prachové částice a různá vlákna z filtrů se hromadí v palivovém filtru vozidla a mohou způsobit jeho ucpání. Následně nedochází k filtrování znečištěného paliva a prachové nečistoty se dostanou až do oleje. Další nečistoty, které je možné v oleji najít, jsou otěrové kovy, vznikající třením dvou kovových povrchů. Více o otěrových kovech je v kapitole 2.1.5.6. Samotný motorový olej tvoří oxidací a termickým namáháním karbonové povlaky, úsady a kaly (Černý, 2007).

Součástí mechanických nečistot jsou i saze, které nemají původ z okolního prostředí, ale vznikají při spalování nafty ve spalovacím prostoru. Saze jsou součástí výfukových plynů a cílem je snížit jejich množství. Vznikají nedokonalým spalováním nafty a jejich vznik je nepřímo spojen s tvorbou oxidů dusíku. Pokud se tedy podaří snížit oxidy dusíku, vzroste tím vznik sazí a naopak. Cílem tedy je zajistit nízké emise oxidů dusíku i sazí. Rozměr sazí je zhruba setina mikrometru, ale dokáží se i shlukovat. Poté jejich velikost může dosáhnout

několika setin až jednu desetinu mikrometru. Již od výměny nového oleje se v něm začnou saze hromadit. To způsobí zčernání oleje. Pokud je koncentrace sazí příliš velká, nastane růst viskozity oleje, shlukování sazí a ucpávání olejového filtru. Mezní hodnota se udává zhruba 3 hmotnostní procenta. Velké množství sazí v oleji zvyšuje opotřebení motoru. Při čerpání oleje dochází k abrazivnímu opotřebení vlivem nárazů částic sazí do kovových povrchů motoru (Černý, 2007).

#### **2.1.5.6. Otěrové kovy**

Dalšími nečistotami, které je možné v oleji najít, jsou částice kovů, vzniklé otěrem. Vznikají i v případě kvalitního mazání, a to třením dvou kovových povrchů. Běžné částice otěru, vyskytující se v oleji, mají velikost pár desetin až několik mikrometrů. Jejich velikost může dosáhnout až velikosti tloušťky mazacího filmu a jejich výskyt předpovídá zvýšení opotřebení jednotlivých částí systému. Velikost částic otěru se zvětšuje na desítky mikrometrů, v případě zvýšeného tření a až na stovky mikrometrů, pokud nastane havarijní opotřebení. Částice nad 10 mikrometrů jsou schopny zachytit olejové filtry (Černý, 2007).

Třecí plochy, nacházející se v motoru, nebývají hladké. Nerovnosti povrchu jsou v normálním stavu odděleny vrstvou oleje. Viskozita oleje je přímo úměrná velikosti vrstvy mazacího filmu. Tedy čím má olej větší viskozitu, tím je vrstva mazacího filmu silnější. Povrchy pak nejsou v přímém kontaktu. Při zapůsobení přitlačné síly dojde k vytlačení vrstvy oleje a kontaktu povrchů. To způsobí tzv. mezní tření a při dalším pohybu třecích ploch nastává otěr částic kovů, které se uvolňují do oleje. Průběžným sledováním množství částic otěru v oleji lze předejít havarijnímu stavu motoru a jeho následné poruše (Černý, 2008a).

Jednotlivé díly motoru jsou vyrobeny ze specifických materiálů, tedy pokud jsou v oleji nalezeny částice určitého kovu, lze s určitou přesností odhadnout, ve které části motoru se porucha nachází. Železo je hlavním konstrukčním kovem, proto je jeho koncentrace téměř vždy nejvyšší. Přítomnost mědi vykazuje závadu ložisek či ventilové skupiny. Zdroj hliníku je možné hledat v pístech, válečkových ložiskách nebo některých pouzdrech. Přítomnost olova může značit závadu valivých ložisek nebo u starých zážehových motorů prozrazuje kontaminaci oleje benzínem. Dále je možné v oleji najít částice chromu, niklu, cínu, stříbra i křemíku. Křemík, jako součást prachu, se do oleje dostává ve velkém množství při snížené účinnosti vzduchového

filtru, který je následně nutné vyměnit za nový. Na Obrázku 5 je patrná otěrová částice, vznikající při zadírání motoru (Černý, 2008a).



**Obrázek 5:** *Otěrová částice vzniklá při zadírání motoru*

*Zdroj: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Oterove-kovy>*

### **2.1.6. Zlepšení vlastností olejů přísadami**

Beheshti et al. (2020) uvádí, že zlepšení tribologických vlastností olejů je možné s použitím hybridních maziv s koloidními přísadami.

Koloidní částice a iontové kapaliny lze využít jako aditiva pro zvýšení výkonu maziv. V tomto výzkumu byly zkoumány hybridní systémy obsahující koloidní suspenze částic oxidu křemičitého v motorovém oleji. Koloidní přísady při pokojové teplotě snížily kluzné tření mezi ocelovou kuličkou a deskou. Při 100 °C koloidní přísady v oleji výrazně ovlivnily opotřebení a mazání. V tomto výzkumu byly prováděny vysokoteplotní třecí testy motorového oleje 10W30, které z důvodu velkého hluku a otěru již nemohly dále pokračovat. Po přidání koloidních částic hlučnost i tření téměř vymizely. Ze snímků, pořízených v průběhu testů, autoři zjistili, že při použití koloidních přísad při vysoké teplotě není povrch tak drsný, jako bez použití těchto přísad. Z výsledků tohoto výzkumu je patrné, že oleje s koloidními přísadami mají lepší mazací vlastnosti, a proto je vhodné tyto přísady využívat (Beheshti et al., 2020).

Akbiyik et al. (2022) provedli studii vlivu přísady boru do motorového oleje na výkon, výfukové plyny a emise motoru.

Studie byla realizována na zážehovém motoru. U motoru byly nejprve změřeny emise a výkon po 50 hodinách provozu bez jakýchkoli přísad v oleji. Následně byla měření zopakována po přidání boru do motorového oleje a po dalších 50 hodinách provozu. Výsledek experimentu dokázal, že použití motorového oleje s přídavkem boru způsobuje průměrné snížení spotřeby paliva o 2,4–8 % oproti použití motorového oleje bez přísad. Dále byly zkoumány změny vylučovaných emisí a výsledkem bylo zjištění, že přídavek boru do oleje nezpůsobí významnou změnu  $C_2$ , CO,  $CO_2$ , HC. Oproti tomu došlo k významnému poklesu emisí  $NO_x$ , až o 11,4–12,9 %. Hlavním zjištěním experimentu bylo, že při přidání boru do motorového oleje dojde k relativnímu zlepšení výkonu motoru a emisí (Akbiyik et al., 2022).

## **2.2. Tribodiagnostika**

Tribodiagnostika je metoda technické diagnostiky, která nevyžaduje demontáž stroje, lze ji tedy nazvat bezdemontážní metodou (Helebrant et al., 2000).

Nejčastěji využívaným postupem sledování stavu oleje je odebrání vzorku a vyhodnocení jeho parametrů mimo stroj. V současné době se vyvíjí technologie, které využívají zkoušky „in situ“, což znamená sledování stavu oleje „on-line“ přímo v motoru. Prozatím jsou tyto zkoušky omezeny na sledování pouze určitých parametrů stavu oleje, mohou tedy být aktuálně využity jako pomocné, při přípravě běžných tribodiagnostických zkoušek. Monitorování stavu oleje prostřednictvím jeho analýzy může zvýšit životnost motoru, snížit poruchovost a omezit náklady na servis a opravy (Chhabra a Singh, 2021).

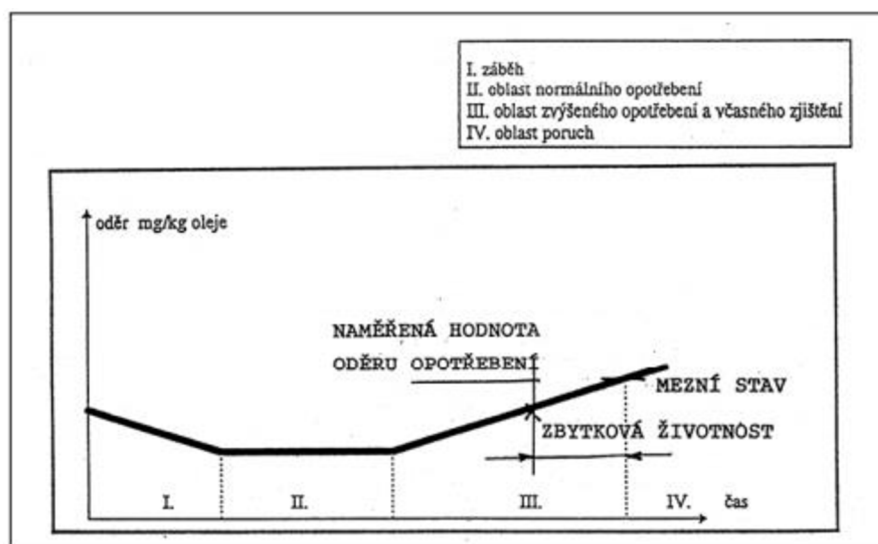
### **2.2.1. Princip a využití tribodiagnostiky**

Tribodiagnostikou lze zjistit stav systému, pomocí analýzy jeho maziva. Při práci systému dochází s jeho postupným opotřebováním k uvolňování částic otěru. Tyto kovové částice následně cirkulují mazací soustavou spolu s olejem a se zvyšujícím se opotřebením se zvyšuje i jejich koncentrace. Tímto způsobem je možné včas odhalit příznaky vznikající poruchy a případně i najít místo vzniku dané poruchy (Helebrant et al., 2000).



Tribodiagnostika spočívá ve sledování aktuálního stavu maziva, tedy narůstající koncentraci částic otěru v mazivu. Částice se v mazivu nachází ve formě suspenze. Obecný průběh poškození vlivem opotřebení je uveden na Obrázku 6. Je zde závislost počtu a velikosti otěrových částic na čase. Tímto sledováním je možné odhadovat životnost maziva, která se snižuje, obsahuje-li mazivo produkty tepelně-oxidačních procesů a vnější nečistoty. Provádí se vyhodnocováním parametrů, jako jsou například viskozita, kyselost, bod vzplanutí, obsah nečistot a další. Při velmi vysoké koncentraci nečistot v oleji může docházet ke značnějšímu opotřebení mazaných částí, ale také k poruchám funkce mazací soustavy (Helebrant et al., 2000).

Tribodiagnostikou je možné sledovat jak stav opotřebení daného stroje, tak i postupnou degradaci samotného maziva, u kterého lze stanovit optimální interval výměny nebo vyměňovat až po dosažení mezního stavu (Helebrant et al., 2000).



**Obrázek 6:** Obecný průběh poškození vlivem opotřebení

Zdroj: Helebrant et al. (2000)

### 2.2.2. Rozdělení metod tribodiagnostiky

Tribodiagnostika se dělí do dvou základních skupin, podle toho, co je sledováno (Helebrant et al., 2000).

Při sledování stavu opotřebení strojních zařízení jsou používány metody pro stanovení koncentrace otěrových kovů, jako například atomová spektrofotometrie, atomová emisní nebo absorpční spektrofotometrie, polarografie a voltametrie a další. Dále zde jsou využívány metody pro hodnocení morfologie a distribučního rozdělení částic kovů, například částicová analýza s feroskopickým nebo ferodenzimetrickým vyhodnocením (Helebrant et al., 2000).

Při sledování degradace samotného maziva se vyhodnocují fyzikálně chemické parametry daného maziva. Sledování probíhá následujícími testy: kinematičká viskozita, bod vzplanutí, obsah vody, celková alkalita a kyselost, Conradsonův karbonizační zbytek, kapková zkouška, celkové znečištění nebo mechanické nečistoty (Helebrant et al., 2000).

Je možné se také setkat se zjednodušeným rozdělením na jednoduché zkoušky pro provozní kontrolu maziv, standardní zkoušky pro přesné stanovení kvality maziv a speciální metody pro celkovou diagnostiku maziv a strojního zařízení. Fyzikálně chemické parametry a jejich změny poskytují informaci o aktuálním stavu mazacího oleje i o možnosti jeho dalšího provozování v určitém systému. Vždy se vychází z parametrů čistého oleje nalitého do systému. Následně se sleduje jeho degradace v reálném čase (Helebrant et al., 2000).

#### **2.2.2.1. Kinematičká viskozita**

Viskozita je důležitou charakteristikou olejů a během životnosti oleje může být stálá, roste nebo i klesá. Viskozita je jedním z hlavních parametrů při výběru oleje (Helebrant et al., 2000).

V případě zvýšení viskozity v průběhu života oleje je to nejspíše způsobeno přítomností oxidačních produktů a karbonu v oleji. Jejich obsah je důležitý, avšak nesmí přestoupit 4–5 %, jinak se olej poté více blíží emulzi, obzvláště v přítomnosti určitého množství vody. Snižování viskozity je způsobováno nejvíce zředěním oleje palivem. Další možností, proč dochází ke snižování, je například mechanické a chemické rozrušení při použití „V.I.F. aditiv“, které způsobuje rozstříhání makromolekul. Při teplotě oleje 100 °C by neměla viskozita klesnout pod 6,5–7 mm<sup>2</sup>/s (Hönig, 2013).

Pokud je hodnota viskozity příliš nízká, nastane mezní až suché tření, což způsobuje nadměrné opotřebení nebo dokonce zadření třecích ploch. Při příliš vysoké hodnotě viskozity dochází ke ztrátám energie kvůli velkému koeficientu tření. V případě, že jde o bezporuchový provoz, kinematická viskozita se zvyšuje z důvodu zahušťování oleje nečistotami. V opačném případě kinematická viskozita klesá, například proniknutím paliva do mazací soustavy. Pokud nastane náhlá změna viskozity, téměř vždy to souvisí s mechanickou závadou (Helebrant et al., 2000).

Měření viskozity se provádí různými druhy viskozimetrů. Jako příklad lze uvést viskozimetry typu Ubbelohde, Cannon-Fenske, Pinkevič a další. Díky těmto kapilárním viskozimetrům se pak již jednoduše dopočítá viskozita vynásobením konstanty viskozimetru a aritmetickým průměrem doby průtoku viskozimetru. Tato měření jsou časově náročná. Existují i jednoduché metody ke zjištění hodnot, rozhodujících o další použitelnosti oleje. Jsou to například výtokové pohárky, které měří dobu výtoku. Výsledek přibližně určuje možnost dalšího použití oleje v provozu. Viskozita by se během provozu neměla změnit víc než o  $\pm 20\%$  (Helebrant et al., 2000).

#### 2.2.2.2. Bod vzplanutí

Při zahřívání oleje z něj přechází do ovzduší páry a vzniká směs, která přiblížením plaménku vzplane a následně zhasne. Je třeba zjistit nejnižší teplotu, při které tento stav nastane. To je princip bodu vzplanutí, který je důležitým jakostním i bezpečnostním ukazatelem maziv. Bodem vzplanutí se dá určit obsah hořlavých látek v oleji. Určit se dá dvěma metodami – podle Clevelandla a podle Marcusona. U motorových olejů bývá v rozmezí 190 °C až 235 °C. Aby byl okamžik vzplanutí dostatečně patrný, je třeba zkoušku provádět na dostatečně tmavém místě. U motorových olejů se dá stanovit množství paliva v oleji pomocí poklesu bodu vzplanutí (Helebrant et al., 2000).

Zkouška je prováděna dvěma způsoby. Prvním je zkouška **bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku**. Probíhá tak, že se vzorek bez míchání zahřívá a po určitém intervalu se na 2 sekundy zavádí do kelímku plamének, hlídá se také teplota, při které vzorek vzplane. Podle přepokládaného bodu vzplanutí se buď kelímek vkládá do již vyhřáté lázně, nebo se vkládá do lázně ochlazené a ta se následně zahřívá (Helebrant et al., 2000).

**Bod vzplanutí a hoření v otevřeném kelímku** je rovněž založen na ohřívání vzorku, ale tentokrát v otevřeném kelímku. Při přiblížení plaménku musí páry nad vzorkem vzplát a hořet nejméně 5 sekund bez přerušení. Mezní hodnota bodu vzplanutí pro nutnou výměnu motorového oleje se pohybuje v rozmezí 170–200 °C, což je přibližně o 20–25 °C méně, než je bod vzplanutí u nového oleje (Helebrant et al., 2000).

### 2.2.2.3. Obsah vody

Přítomnost vody v oleji je nežádoucí, a to hned z několika důvodů. Voda způsobuje a podporuje korozi součástí, vypadávání aditivů, pění oleje, tvorbu emulze, zvyšování viskozity a spoustu dalších problémů. Voda v oleji znehodnocuje jeho kvalitu, avšak stopovému množství kondenzující vody se nedá vyhnout. Mezní přípustná hodnota je maximálně 0,2 % hmotnostního obsahu vody. Hodnocení obsahu vody v oleji probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem se přítomnost vody zjišťuje některou z jednoduchých metod, například prskací zkouškou. Po potvrzení výskytu vody se pokračuje kvantitativním stanovením, například Fischerovou titrační metodou (Helebrant et al., 2000).

**Vizuální zkouška** spočívá v posouzení správně odebraného a dokonale protřepaného vzorku. Je-li ve vzorku voda, olej se zakalí. Tato metoda je čistě subjektivní, proto vyžaduje určité zkušenosti a je pouze orientační (Helebrant et al., 2000).

**Prskací zkouška** spočívá v kápnutí malého množství oleje (2–3 kapky) na vyhřátou plochu (cca 180 °C). Olej se rozptyluje do šířky, a pokud neobsahuje žádnou vlhkost, není možné na jeho povrchu nalézt bublinky. Od obsahu vody 0,02 % je již možné pozorovat vznik bublinek na povrchu skvrny. Tato metoda neumožňuje přesnou kvantifikaci (Helebrant et al., 2000).

**Coulometrická metoda** (K. Fischera) je založena na principu reakce jódu s vodou v titrační nádobce. Jeden mol jódu reaguje s jedním molem vody. Po zreagování veškeré vody v oleji je indikována koncentrace nadbytečného jódu v nádobce (Helebrant et al., 2000).

**Destilační zkouška** umožňuje kvantitativní stanovení vody s menší citlivostí než předchozí metoda. Destilace je prováděna například xylenem (Helebrant et al., 2000).

#### 2.2.2.4. Číslo alkality a kyselosti

Postupná degradace olejů způsobuje vznik organických kyselin. Stopy kyselin v oleji způsobují chemické opotřebení. Jejich přítomnost v oleji je tedy nežádoucí. Přítomnost kyselin v oleji způsobuje zvýšení korozivzdornosti oleje a špatnou funkci oleje, jako důsledek nesprávné viskozity. U průmyslových olejů se dá jejich stárnutí popsat právě jen číslem kyselosti, avšak u nich dochází rychleji ke znečištění než ke stárnutí. U olejů je číslo kyselosti vyjádřeno v mg KOH/g. Přesnost obou čísel je maximálně  $\pm 10\%$  stanovené hodnoty (Helebrant et al., 2000).

**Číslo celkové alkality** (TBN) vyjadřuje obsah všech zásaditých látek v oleji, tedy schopnost neutralizace kyselých zplodin. Stanovuje se titrační metodou. Číslo celkové alkality u čistého oleje udává velikost alkalické rezervy a u použitého oleje udává stupeň vyčerpání této rezervy. Tím je možné odhadnout zbývající životnost maziva. Limitem pro výměnu olejové náplně je klesnutí TBN na 50 % hodnoty čistého oleje. Další podmínkou je předpoklad, že během provozu nesmí klesnout hodnota TBN pod hodnotu TAN. Poté by došlo ke korozím materiálů, které jsou použity v motoru (Helebrant et al., 2000).

**Číslo celkové kyselosti** (TAN) vyjadřuje nárůst látek kyselého charakteru, které způsobují korozi materiálu, zejména ložiskových materiálů. Tyto látky vznikají termooxidačními reakcemi oleje. Stanovení TAN je možné pomocí přibližné metody, která určuje, zda číslo kyselosti oleje překročilo nebo nepřekročilo předem zvolenou hodnotu. Metoda spočívá ve smíchání stejného objemu oleje a zkušební vzorku (hydroxid alkalického kovu) a důkladném protřepání. Po 15 minutách se vzorek rozdělí na dvě části a podle barvy horní vrstvy je možné určit přibližnou hodnotu TAN. Pokud je barva zelená, je číslo přibližně rovné předem dané hodnotě. Při zbarvení do modra je číslo nižší než daná mez a při zbarvení do žluta číslo danou mez přesáhlo. Tato metoda se dá nazvat rychlometodou a je spolehlivá a přesná (Helebrant et al., 2000).

Číslo celkové kyselosti (TAN) se během dlouhé doby provozu zvyšuje v důsledku oxidace motorového oleje. Toto zvyšování způsobuje ztrátu mazání při náročnějších provozních podmínkách. Přidáním nano přísad se docílí zvýšení kvality mazacího oleje a olej pak může účinně fungovat i při náročnějších provozních podmínkách, aniž by ztratil své mazací schopnosti (Bagal et al., 2022).

#### **2.2.2.5. Conradsonův karbonizační zbytek (CCT)**

CCT představuje náchylnost k tvorbě uhlíkatých zbytků při vysokých teplotách a jeho vysoké hodnoty ukazují zvýšenou tvorbu úsad. To může způsobit zanášení pístních kroužků a další problémy. Hodnota CCT je vyjadřována v hmotnostních procentech s přesností  $\pm 10\%$ . Vzhledem k velké časové náročnosti této metody je jednou z možností využití automatických přístrojů, které vyhodnocují více vzorků současně. Pro výpočet CCT je nutné vydělit hmotnost zbytku po karbonizaci navážkou oleje a celé to vynásobit 100. Výsledek poté vyjde v hmotnostních procentech (Helebrant et al., 2000).

#### **2.2.2.6. Kapková zkouška**

Kapkovou zkouškou lze zjistit stupeň znečištění oleje. Tato metoda je pouze orientační, ale je rychlá a jednoduchá. Pro rozhodnutí o výměně či dalším používání oleje by měl následovat podrobnější laboratorní rozbor. Po nanesení kapky oleje na filtrační papír se sleduje tmavost, rozsah a struktura kapky, ze které zjistíme kvalitu daného oleje. Touto metodou jsme schopni zjistit velikost znečištění oleje a přítomnost vody (Helebrant et al., 2000).

Po nanesení kapky oleje na filtrační papír se sleduje její tmavost a rozsah vsáknutí. Skvrna na papíře by se měla skládat ze čtyř soustředěných kruhových zón. Ve středu kapky (centrální zóna) se vyskytují největší částice, a pokud je neprůsvitná, značí to znečištění maziva karbonovými látkami a ostatními nerozpustnými nečistotami. Druhým prstencem od středu kapky je tenčí okrajová zóna, která před úplným vsáknutím udává rozlohu kapky. V této zóně se ještě v malém množství objevují velké karbonové částice. Třetí zónu tvoří malé karbonové částice ( $0,5\ \mu\text{m}$ ) a její zmizení upozorňuje na možnost tvorby karbonových úsad v motoru. Poslední okrajová zóna je průsvitná a neobsahuje nečistoty. Zabarvena je do žluta, což může být i z důvodu přítomnosti oxidačně narušených frakcí paliva (Helebrant et al., 2000).

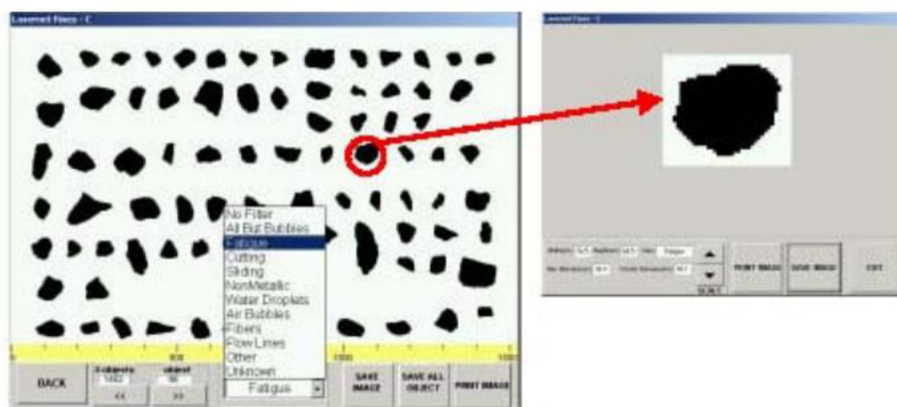
V praxi většinou nejsou patrné všechny uvedené zóny, proto je potřeba hodně zkušeností při vyhodnocování této metody. Sleduje se tedy tmavost skvrn, která jasně vypovídá o znečištění vzorku oleje. Čím je skvrna tmavší, tím je olej více znečištěn a patrně se blíží konec jeho životnosti. Dále se sleduje přítomnost vody, která se projeví jako světlá skvrna tmavě ostře ohraničená (Helebrant et al., 2000).

### 2.2.2.7. Částicová analýza LNF

Laserový analyzátor částic LaserNet Fines využívá principu neuronových sítí. Tento stolní přístroj vyhodnocuje vzorky mazacích olejů ze strojních zařízení a sleduje především částice otěru, které vznikají opotřebením vnitřních částí stroje. Výstupem analýzy je přehled částic, nacházejících se v testovaném vzorku maziva, včetně přehledu předchozích výsledků téhož stroje, ze kterého testované mazivo pochází. Dále je dostupný údaj o množství částic rozdělených podle velikosti (Machalík, 2011).

Pro analýzu se ze zařízení odebere vzorek oleje, který LNF čerpá do tzv. měřicí cely, osvětlované impulsní laserovou diodou. Pomocí zvětšovací videokamery jsou získány snímky, ze kterých jsou patrné otěrové částice. Částice analyzuje program, pracující na principu neuronové sítě. Přehled částic, nalezených ve vzorku, zobrazí program, viz Obrázek 7 (Machalík, 2011).

Hlavní nevýhodou LNF analýzy je vysoká kupní cena analyzátoru. Maximální velikost částic, které je analyzátor schopen vyhodnotit, je 100  $\mu\text{m}$ . Větší částice neprojdou filtrem, z důvodu ochrany měřicí kyvety před případným ucpaním. Analyzátor tedy dokáže zobrazit částice o rozměrech 20–100  $\mu\text{m}$  (Machalík, 2011).



**Obrázek 7:** Přehled jednotlivých částic (větších než 20  $\mu\text{m}$ )

Zdroj: Machalík (2011)

### 3. Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je na základě literárního rozboru popsat možnosti využití tribodiagnostiky v systémech údržby a na základě tohoto popisu a realizovaných praktických zkoušek analyzovat, posoudit a případně upravit interval výměny motorového oleje ve spalovacím motoru zvolených vozidel.

Tato diplomová práce má dále tyto dílčí cíle:

- stanovení množství těkavých složek ve vzorcích olejů,
- naměření a zpracování hodnot kinematických viskozit, dynamických viskozit a hustot jednotlivých vzorků olejů,
- stanovení množství nečistot pomocí analýzy vzorků přístrojem LNF,
- ověření a úprava intervalu výměny motorového oleje.



## 4. Metodika práce

Praktická část této práce se zabývá měřením a vyhodnocováním vzorků odebraných olejů. Testovaný olej je 5W30 značky Texaco, odebíraný podle určitého intervalu nájezdu kilometrů tahače až do výměny olejové náplně za novou. Interval výměny olejové náplně má firma, vlastníci tahače, nastavený na 50 000 km. Používaný olej má doporučený interval 90 000 km, ale tento interval je možné dodržovat pouze u tahačů, které jezdí s menším množstvím nákladu a jezdí dlouhé trasy po dálnicích. Sklápěcí tahače dotčené firmy musí z důvodu velkých zatížení jezdit pomaleji, tedy na menší rychlostní stupeň s většími otáčkami a také mají značné prostoje s nastartovanými motory na nakládce a vykládce. Z těchto důvodů mají téměř dvakrát více motohodin než tahače s plachtovými návěsy, provozované na dálnicích, a proto je firmou zvolen zhruba poloviční interval výměny oleje.

Vzorky byly odebírány na najetých 10 000 km, 20 000 km, 30 000 km, 35 000 km, 40 000 km, 45 000 km a poslední vzorek byl odebrán těsně před výměnou olejové náplně za novou, tedy kolem 50 000 km. Podrobný přehled odběrů je uveden v Tabulce 2. Celkový objem olejové náplně těchto tahačů je 35 litrů. Odebírané množství bylo 150 ml a všechny odběry proběhly za totožných podmínek do předem připravených, čistých a označených skleniček (Obrázek 8). Celkem bylo odebráno 8 vzorků z každého tahače. Odběry probíhaly po dobu devíti měsíců, dokud tahače nenajely stanovený počet kilometrů. V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření a vyhodnocení vzorků olejů. U olejů byla zkoumána kinematická viskozita, dynamická viskozita, hustota, podíl těkavých složek v oleji a nečistoty v oleji pomocí přístroje LNF.

Zkušebními vozidly byly tři tahače Mercedes-Benz Actros MP4 s rokem výroby 2017 (Obrázek 9). Jedná se o tahače sklopných návěsů se vznětovými motory o zdvihovém objemu 10,7 l a výkonu 335 kW při 1 600 ot/min. Motor s označením OM 470 má 6 válců a maximální točivý moment 1 800 Nm. Celkový nájezd na počátku měření byl u prvního tahače 375 582 km, u druhého 321 500 km a u třetího 248 351 km.

Snahou bylo tahače udržet v konstantním stavu po celou dobu odebírání vzorků olejů. I přes to došlo k několika servisním zásahům, které však přímo neovlivňovaly zkoumanou olejovou náplň. Jedno z vozidel stálo poměrně dlouhý čas v dílně kvůli opravě převodovky, u dalšího došlo k poruše diferenciálu a třetí musel na opravu nabourané kabiny. Dvě z vozidel vystačily s původním množstvím olejové náplně až do výměny za novou, jedno vozidlo však

muselo dolévat motorový olej, a to dvakrát po třech litrech oleje. Je tedy možné u něj předpokládat nějaký problém v pístní soustavě, například zapečené pístní kroužky, způsobující tyto úniky oleje.



**Obrázek 8:** Odebrané vzorky motorového oleje

Zdroj: Autorka

**Tabulka 2:** Přehled najetých kilometrů, ve kterých byly odebírány vzorky olejů

Odběr číslo	Vozidlo 1		Vozidlo 2		Vozidlo 3	
	Kilometry najeté na oleji [km]	Stav tachometru [km]	Kilometry najeté na oleji [km]	Stav tachometru [km]	Kilometry najeté na oleji [km]	Stav tachometru [km]
1	0	375 582	0	321 500	0	248 351
2	11 044	386 626	10 009	331 509	10 020	258 371
3	19 857	395 439	20 525	342 025	19 453	267 804
4	29 971	405 551	30 014	351 514	29 832	278 183
5	34 620	410 202	35 392	356 892	35 059	283 410
6	40 321	415 903	40 182	361 682	40 068	288 419
7	44 960	420 542	44 999	366 499	45 375	293 726
8	50 491	426 073	49 782	371 828	48 860	297 211

Zdroj: Autorka



**Obrázek 9:** Zkušební tahač Mercedes-Benz Actros MP4 (2017)

Zdroj: <https://www.admach.cz/fotogalerie/>

Statistické zpracování dat v této práci spočívá ve stanovení průměrných hodnot podle vztahu číslo 1:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (1)$$

kde:  $\bar{X}$  je průměrná hodnota,

$X_1$  až  $X_n$  jsou jednotlivé hodnoty 1 až  $n$ ,

$n$  je počet hodnot.

Dále je stanoven rozptyl hodnot podle vztahu 2:

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (2)$$

a ze vztahu 2 i směrodatná odchylka ve vztahu 3:

$$S = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

kde:  $S^2$  je rozptyl hodnot,

$S$  je směrodatná odchylka,

$\bar{X}$  je průměrná hodnota,

$X_1$  až  $X_n$  jsou jednotlivé hodnoty 1 až  $n$  a  $n$  je počet hodnot (Veselá, 2017).

## 4.1. Metodika měření

V této kapitole jsou uvedeny metodiky měření jednotlivých sledovaných veličin. Nejprve je popsána metodika měření těkavých složek, následuje popis měření kinematické viskozity, dynamické viskozity a hustoty. Poslední je popis měření pomocí přístroje LNF.

### 4.1.1. Těkavé složky

Měření podílu těkavých složek probíhá vložením vzorku do přístroje The Fuel Sniffer (Obrázek 10), který nasaje vzduch ze skleničky se vzorkem a vyhodnotí podíl těkavých složek v procentech (Obrázek 11).



**Obrázek 10:** *The Fuel Sniffer*

Zdroj: <https://www.azomining.com/equipment-details.aspx?EquipID=1083>



**Obrázek 11:** *Výsledek měření přístroje The Fuel Sniffer*

Zdroj: *Autorka*

#### **4.1.2. Kinematická viskozita, dynamická viskozita a hustota**

K měření kinematické viskozity, dynamické viskozity a hustoty byl využíván viskozimetr podle Stabingera SVM 3000 (Obrázek 12). Tento viskozimetr je rotační a je založen na principu Couette, kde vnější trubice rotuje rychle a vnitřní měřicí plováček pomaleji. K měření tímto viskozimetrem je potřeba minimální objem vzorku, a to jen zhruba 2,5–3 ml. Přístroj má velmi dobré rozlišení 50 pico-Nm a je tvořen celou, kterou prochází trubice. Při měření je tato trubice naplněna vzorkem oleje a ve vzorku plave měřicí rotor. Z důvodu malého

objemu vzorku jsou umožněny rychlé změny teplot, které zajišťuje Peltierův článek. Z rychlosti rotoru je vypočítána dynamická viskozita. K vypočtení kinematické viskozity je třeba znát hustotu kapaliny, kterou přístroj dokáže změřit zabudovanou hustotní celou. Tato cela pracuje na principu oscilující U-trubice. V průběhu měření jsou naplněny obě cely přístroje a měření probíhá současně (Šlechta, 2015).



**Obrázek 12:** Viskozimetr SVM 3000

*Zdroj: Šlechta (2015)*

Než dojde k samotnému měření viskozimetrem, musí být vzorek oleje důkladně promísen, aby nezůstaly na dně vzorku usazeniny. Následně je vzorek nabrán do injekční stříkačky o objemu 5 ml a je velmi opatrně vtlačen do otvoru viskozimetru. Musí být zaplavena celá měřící cela viskozimetru. Poté se nastaví teplota, na kterou se vzorek oleje ohřeje či ochladí a spustí se měření. Pokud se teplota oleje nemění, výsledek měření je znám téměř okamžitě. Výsledkem měření viskozimetru je zobrazení hodnot kinematické viskozity, dynamické viskozity a hustoty na displeji přístroje. Po ukončení měření je nutné olej z cely vyfouknout injekční stříkačkou, propláchnout technickým benzinem a nakonec přístroj vysušit stlačeným vzduchem (Šlechta, 2015).

### 4.1.3. LNF

Měření množství nečistot ve vzorcích olejů bylo prováděno pomocí přístroje LaserNet Fines (Obrázek 13), což je laserový analyzátor, který pracuje na principu neuronových sítí. Přístroj vyhodnocuje vzorky olejů, především pak částice otěru v nich. Výsledkem analýzy je přehled částic, které přístroj ve vzorku našel. V programu přístroje jsou uchovávány i údaje z předchozích měření téhož stroje. Nalezené částice jsou rozděleny podle velikostí a je uvedeno jejich množství (Machalík, 2011).

Měření zahajuje LNF načerpáním zkoumaného vzorku do měřicí cely přístroje. Cella je osvětlována laserovou diodou a pomocí zvětšovací videokamery se získají snímky, na kterých jsou vyobrazeny částice otěru. Program umožní zobrazit přehled částic, jejich počet, velikosti i původ vzniku. Analyzátor vyhodnotí částice od 20 do 100  $\mu\text{m}$ , větší se zachytí ve filtru, aby nedošlo k ucpání kyvety (Machalík, 2011).

Vzhledem k horší kondici celého systému LNF v laboratoři bylo nutné provést naředění vzorků oleje technickým benzínem. Vzorky zkoumaného oleje byly moc tmavé, takže je laser nedokázal prosvítit a najít nečistoty. Vzorky byly ředěny v poměru 1:9. Tedy 10 ml zkoumaného oleje a 90 ml technického benzínu. S tímto poměrem je nutné počítat při vyhodnocování naměřených množství nečistot. Následně bylo provedeno velmi důkladné promísení takto naředěného vzorku. Po ukončení měření je nutné přístroj vyčistit čerpáním čistého technického benzínu, aby měřicí cely při uchovávání byla čistá.



**Obrázek 13:** Přístroj LaserNet Fines pro měření nečistot v oleji

Zdroj: <https://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analysis>

## 5. Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé naměřené hodnoty, které jsou následně zpracovány do grafů. Poté jsou na základě grafů formulovány dílčí závěry.

### 5.1. Těkavé složky

Naměřené hodnoty těkavých složek jsou zaneseny do tabulky a následně statisticky zpracovány včetně směrodatných odchylek. Dále je vytvořen graf a formulován dílčí závěr.

#### 5.1.1. Výsledky měření

Naměřené hodnoty těkavých složek ve vzorcích olejů jsou uvedeny v Tabulce 3.

**Tabulka 3:** *Naměřené hodnoty podílu těkavých složek [%]*

Odběr číslo	Vozidlo 1			Vozidlo 2			Vozidlo 3		
	1	1,6	1,3	1,1	1,6	1,3	1,1	1,6	1,3
2	0,6	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2
3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2
4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2
5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,6	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1

Zdroj: Autorka

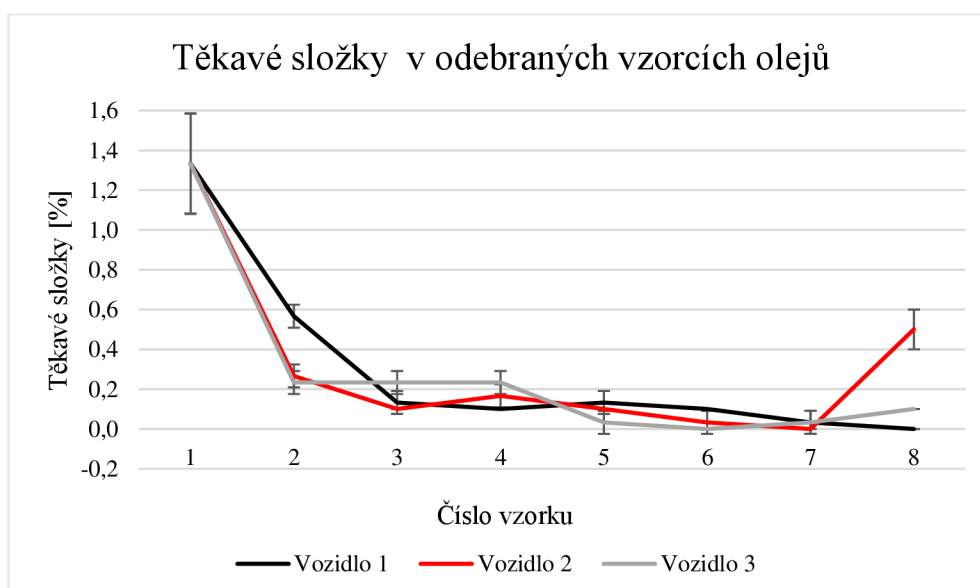


Vypočítané hodnoty průměrných hodnot těkavých složek a směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tabulce 4. Následně je z vypočítaných hodnot vytvořen graf, který je na Obrázku 14.

**Tabulka 4:** Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky těkavých složek

Odběr číslo	Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3
1	1,333 ± 0,252	1,333 ± 0,252	1,333 ± 0,252
2	0,567 ± 0,058	0,267 ± 0,058	0,233 ± 0,058
3	0,133 ± 0,058	0,100 ± 0,000	0,233 ± 0,058
4	0,100 ± 0,000	0,167 ± 0,058	0,233 ± 0,058
5	0,133 ± 0,058	0,100 ± 0,000	0,033 ± 0,058
6	0,100 ± 0,000	0,033 ± 0,058	0,000 ± 0,000
7	0,033 ± 0,058	0,000 ± 0,000	0,033 ± 0,058
8	0,000 ± 0,000	0,500 ± 0,100	0,100 ± 0,000

Zdroj: Autorka



**Obrázek 14:** Těkavé složky v odebraných vzorcích olejů

Zdroj: Autorka

### **5.1.2. Dílčí závěr**

Z grafu na Obrázku 12 je patrné, že u tahačů nedochází k průniku nafty do oleje. Hodnoty těkavých složek v oleji jsou minimální až na jeden případ u Vozidla 2. Toto vozidlo mělo problémy již při průběhu odběrů, docházelo u něho ke ztrátám oleje a dvakrát musel dolít 3 litry oleje. Je tedy zřejmé, že má vozidlo nějaký problém v pístní soustavě, pravděpodobně opotřebení pístních kroužků. Což by také vysvětlovalo poslední hodnotu měření, kdy se objevilo významně větší množství těkavých složek ve vzorku. To mohlo být způsobeno právě průnikem nafty do oleje. Pokles těkavých složek při měření prvních vzorků vykazuje, že motor bez problému spálí těkavé složky, které jsou v oleji obsaženy již z výroby, nebo je olej získá špatným skladováním.

## **5.2. Kinematická viskozita, dynamická viskozita a hustota**

V této kapitole jsou zpracovány výsledky jednotlivých měření viskozit a hustot. Hodnoty jsou statisticky zpracovány, poté jsou z hodnot vytvořeny grafy a následně je formulován dílčí závěr.

### **5.2.1. Výsledky měření**

Naměřené hodnoty kinematických viskozit, dynamických viskozit a hustot jednotlivých vzorků olejů jsou uvedeny v Příloze 1. Měření proběhlo při teplotách vzorku 15 °C, 40 °C a 100 °C.

Vypočítané hodnoty průměrných hodnot a směrodatných odchylek jsou uvedeny v tabulkách v jednotlivých podkapitolách.

#### **5.2.1.1. Kinematická viskozita v**

V Tabulkách 5, 6 a 7 jsou uvedeny statisticky zpracované hodnoty kinematických viskozit vzorků olejů pro jednotlivá vozidla v jednotkách  $mm^2/s$ . V grafech na Obrázcích 15,

16 a 17 jsou vyobrazeny průběhy kinematických viskozit jednotlivých vozidel při teplotách 15 °C, 40 °C a 100 °C.

Červeně označené buňky tabulek vyznačují, kdy došlo ke zvýšení kinematické viskozity o 20 %. Kritická hodnota pro všechny tři vozidla je  $13,62 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

**Tabulka 5:** *Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky KV [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] pro vozidlo 1*

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	$235,50 \pm 0,28$	$66,07 \pm 0,01$	$11,35 \pm 0,03$
2	$286,63 \pm 2,54$	$79,78 \pm 0,15$	$12,73 \pm 0,07$
3	$300,78 \pm 1,37$	$83,75 \pm 0,01$	$13,08 \pm 0,04$
4	$317,23 \pm 2,00$	$87,76 \pm 0,02$	$13,60 \pm 0,02$
5	$321,54 \pm 0,40$	$87,79 \pm 0,21$	$13,90 \pm 0,04$
6	$335,10 \pm 1,01$	$93,11 \pm 0,01$	$14,28 \pm 0,02$
7	$342,45 \pm 3,53$	$94,15 \pm 0,22$	$14,76 \pm 0,04$
8	$357,86 \pm 1,42$	$99,13 \pm 0,10$	$15,04 \pm 0,03$

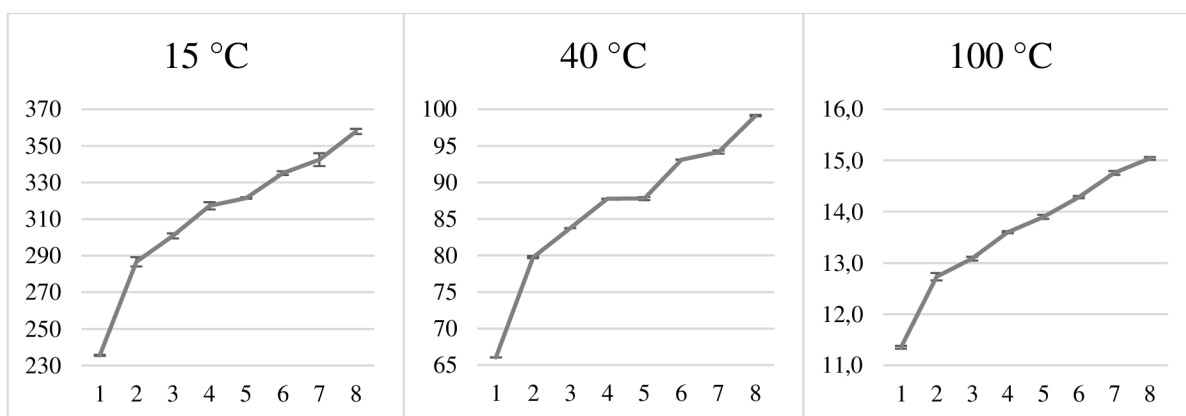
**Tabulka 6:** *Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky KV [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] pro vozidlo 2*

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	$235,50 \pm 0,28$	$66,07 \pm 0,01$	$11,35 \pm 0,03$
2	$291,87 \pm 3,68$	$81,09 \pm 0,19$	$12,94 \pm 0,01$
3	$299,62 \pm 1,36$	$82,68 \pm 0,01$	$12,73 \pm 0,02$
4	$304,85 \pm 2,13$	$84,06 \pm 0,02$	$12,94 \pm 0,02$
5	$308,98 \pm 0,45$	$83,72 \pm 0,13$	$13,13 \pm 0,03$
6	$316,24 \pm 1,40$	$86,87 \pm 0,01$	$13,31 \pm 0,03$
7	$316,17 \pm 0,15$	$85,69 \pm 0,22$	$13,41 \pm 0,03$
8	$319,27 \pm 1,44$	$87,73 \pm 0,09$	$13,31 \pm 0,03$

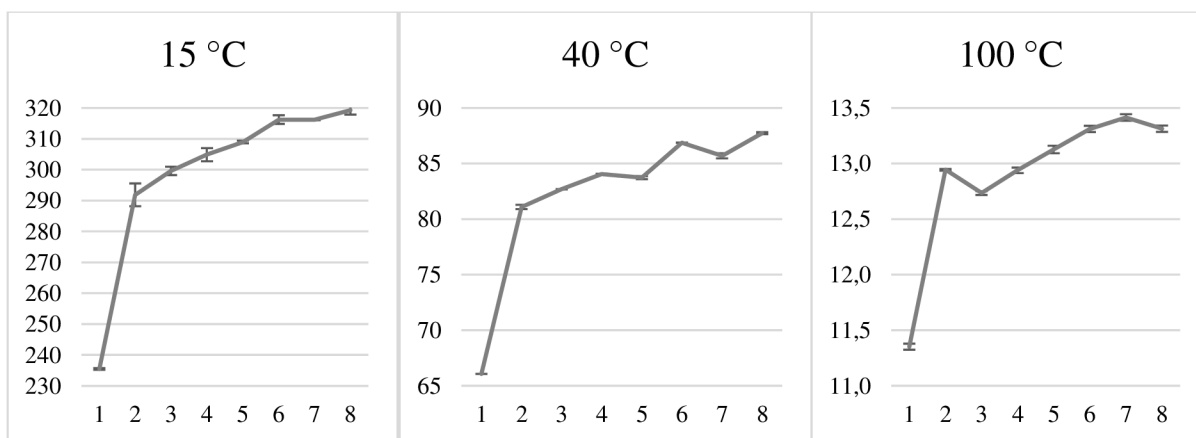
**Tabulka 7:** Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky KV [mm<sup>2</sup>/s] pro vozidlo 3

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	235,50 ± 0,23	66,07 ± 0,01	11,35 ± 0,03
2	289,79 ± 3,90	80,03 ± 0,21	12,64 ± 0,03
3	291,54 ± 0,50	82,80 ± 0,03	12,76 ± 0,02
4	301,97 ± 1,80	83,38 ± 0,21	13,10 ± 0,02
5	318,23 ± 1,68	87,48 ± 0,01	13,38 ± 0,03
6	318,57 ± 1,32	86,90 ± 0,20	13,57 ± 0,03
7	323,75 ± 1,89	89,10 ± 0,06	13,63 ± 0,03
8	328,64 ± 2,07	90,28 ± 0,04	13,78 ± 0,02

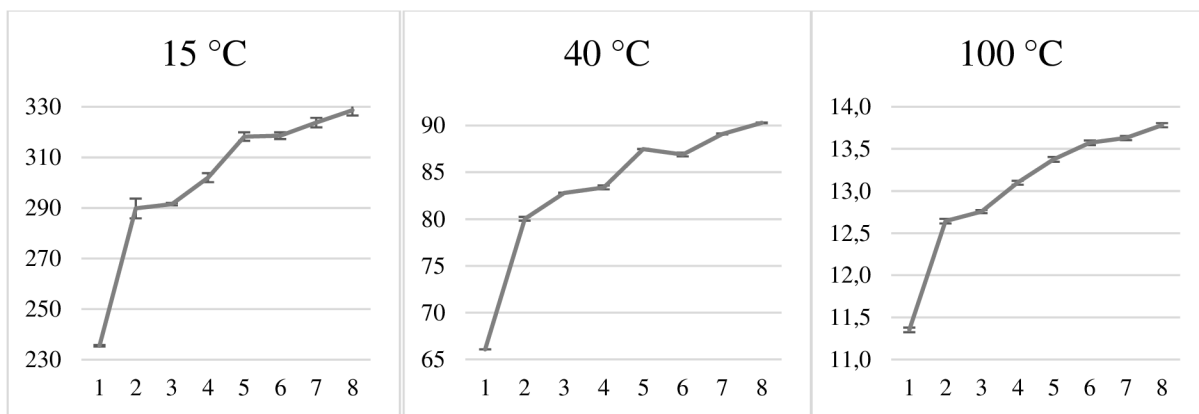
Zdroj: Autorka



**Obrázek 15:** Průběh kinematické viskozity v mm<sup>2</sup>/s při daných teplotách pro vozidlo 1



**Obrázek 16:** Průběh kinematické viskozity v mm<sup>2</sup>/s při daných teplotách pro vozidlo 2



**Obrázek 17:** Průběh kinematické viskozity v  $\text{mm}^2/\text{s}$  při daných teplotách pro vozidlo 3

Zdroj: Autorka

### 5.2.1.2. Dynamická viskozita $\eta$

V Tabulkách 8, 9 a 10 jsou uvedeny statisticky zpracované hodnoty dynamických viskozit vzorků olejů pro jednotlivá vozidla v jednotkách  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ . V grafech na Obrázcích 18, 19 a 20 jsou vyobrazeny průběhy dynamických viskozit jednotlivých vozidel při zkoumaných teplotách.

**Tabulka 8:** Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky DV [ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ] pro vozidlo 1

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	200,88 ± 0,23	55,40 ± 0,03	9,08 ± 0,02
2	246,67 ± 2,18	67,40 ± 0,09	10,27 ± 0,07
3	259,29 ± 1,40	71,01 ± 0,04	10,59 ± 0,02
4	274,67 ± 1,70	74,71 ± 0,06	11,06 ± 0,01
5	278,82 ± 0,42	74,77 ± 0,14	11,31 ± 0,04
6	291,39 ± 0,88	79,59 ± 0,05	11,66 ± 0,01
7	298,38 ± 3,21	80,62 ± 0,14	12,07 ± 0,03
8	312,35 ± 1,09	85,09 ± 0,01	12,33 ± 0,01

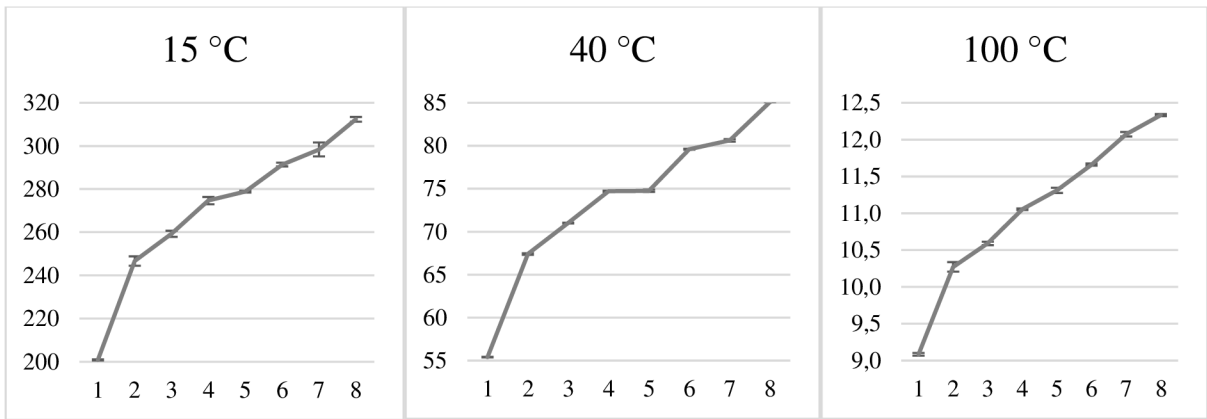
**Tabulka 9:** Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky DV [mPa · s] pro vozidlo 2

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	200,88 ± 0,23	55,40 ± 0,03	9,08 ± 0,02
2	250,42 ± 3,34	68,38 ± 0,13	10,44 ± 0,01
3	257,50 ± 1,17	69,81 ± 0,01	10,27 ± 0,01
4	262,13 ± 1,75	71,07 ± 0,03	10,44 ± 0,01
5	266,02 ± 0,37	70,77 ± 0,07	10,60 ± 0,03
6	272,54 ± 1,11	73,60 ± 0,05	10,77 ± 0,02
7	272,51 ± 0,11	72,52 ± 0,14	10,84 ± 0,02
8	275,42 ± 1,24	74,39 ± 0,02	10,78 ± 0,02

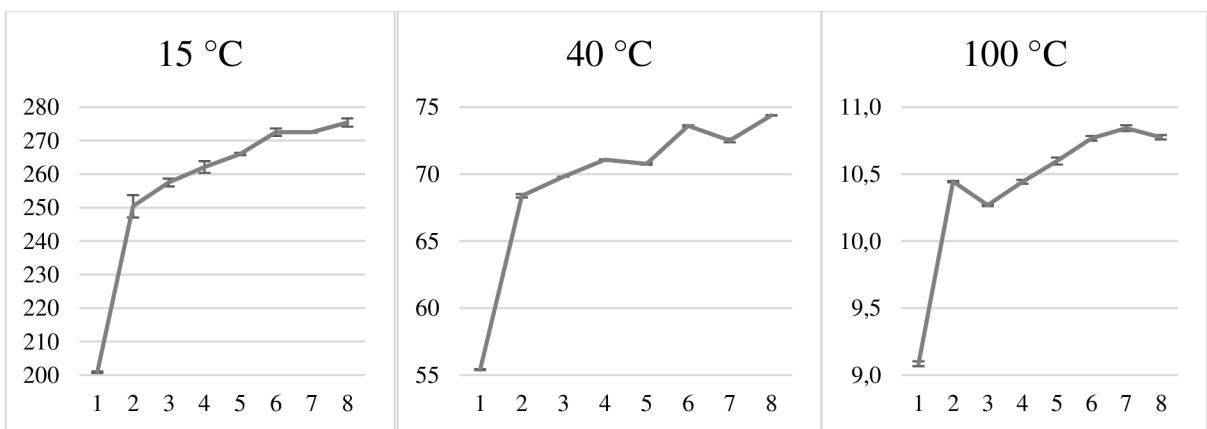
**Tabulka 10:** Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky DV [mPa · s] pro vozidlo 3

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	200,88 ± 0,23	55,40 ± 0,03	9,08 ± 0,02
2	248,54 ± 3,54	67,43 ± 0,13	10,18 ± 0,01
3	250,35 ± 0,62	69,95 ± 0,03	10,28 ± 0,01
4	259,72 ± 1,68	70,47 ± 0,13	10,58 ± 0,03
5	274,25 ± 1,33	74,13 ± 0,05	10,82 ± 0,02
6	274,61 ± 1,21	73,58 ± 0,13	10,98 ± 0,02
7	279,35 ± 1,51	75,59 ± 0,00	11,04 ± 0,01
8	283,82 ± 1,77	76,67 ± 0,02	11,18 ± 0,01

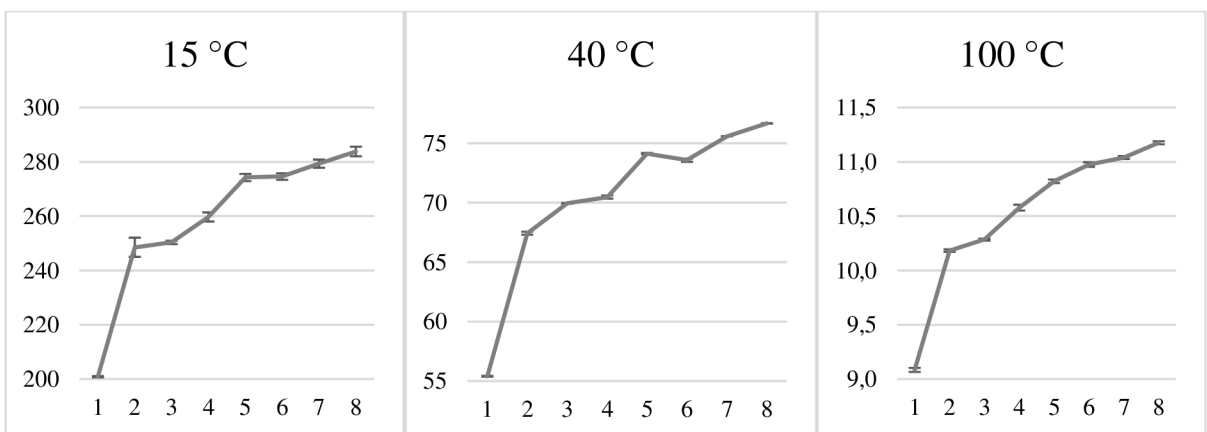
Zdroj: Autorka



**Obrázek 18:** Průběh dynamické viskozity v  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  při daných teplotách pro vozidlo 1



**Obrázek 19:** Průběh dynamické viskozity v  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  při daných teplotách pro vozidlo 2



**Obrázek 20:** Průběh dynamické viskozity v  $\text{mPa} \cdot \text{s}$  při daných teplotách pro vozidlo 3

Zdroj: Autorka

### 5.2.1.3. Hustota $\rho$

V Tabulkách 11, 12 a 13 jsou uvedeny statisticky zpracované hodnoty hustot vzorků olejů pro jednotlivá vozidla v jednotkách  $kg/m^3$ . V grafech na Obrázcích 21, 22 a 23 jsou vyobrazeny průběhy hustot jednotlivých vozidel při zkoumaných teplotách.

**Tabulka 11:** *Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky hustot [ $kg/m^3$ ] pro vozidlo 1*

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	853,0 ± 0,00	838,6 ± 0,42	800,4 ± 0,35
2	860,6 ± 0,00	844,8 ± 0,42	807,0 ± 0,50
3	862,1 ± 0,71	847,9 ± 0,57	809,6 ± 0,50
4	865,9 ± 0,07	851,3 ± 0,57	812,9 ± 0,42
5	867,2 ± 0,21	851,7 ± 0,50	814,0 ± 0,28
6	869,6 ± 0,00	854,9 ± 0,64	816,1 ± 0,00
7	871,3 ± 0,42	856,3 ± 0,50	818,1 ± 0,14
8	872,8 ± 0,42	858,4 ± 0,71	819,9 ± 0,57

**Tabulka 12:** *Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky hustot [ $kg/m^3$ ] pro vozidlo 2*

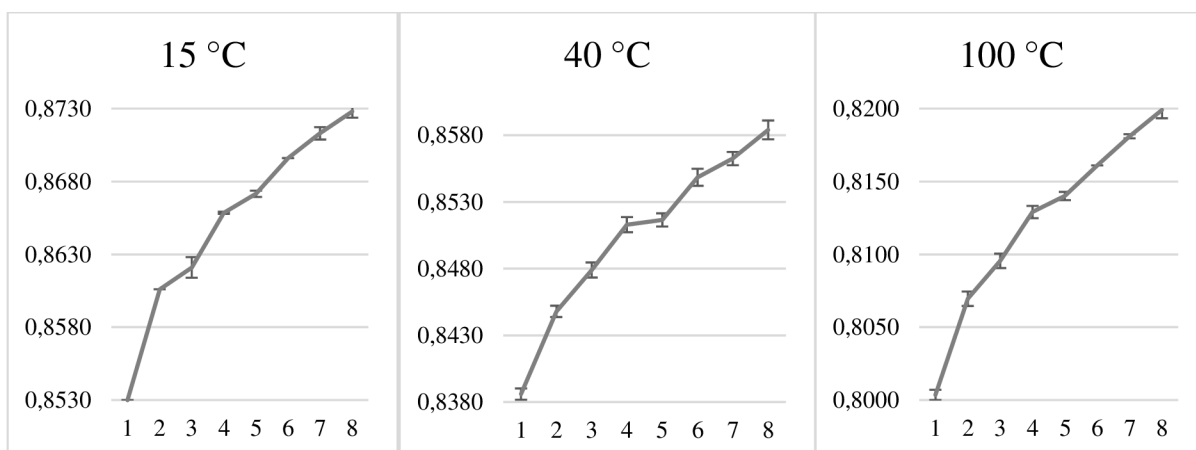
Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	853,0 ± 0,00	838,6 ± 0,42	800,4 ± 0,35
2	858,0 ± 0,64	843,4 ± 0,50	806,9 ± 0,85
3	859,4 ± 0,00	844,4 ± 0,21	806,4 ± 0,57
4	859,9 ± 0,28	845,6 ± 0,64	807,2 ± 0,42
5	861,0 ± 0,07	845,4 ± 0,50	807,3 ± 0,24
6	861,8 ± 0,28	847,2 ± 0,57	808,9 ± 0,42
7	862,0 ± 0,07	846,3 ± 0,57	808,4 ± 0,14
8	862,6 ± 0,00	847,9 ± 0,71	809,4 ± 0,42



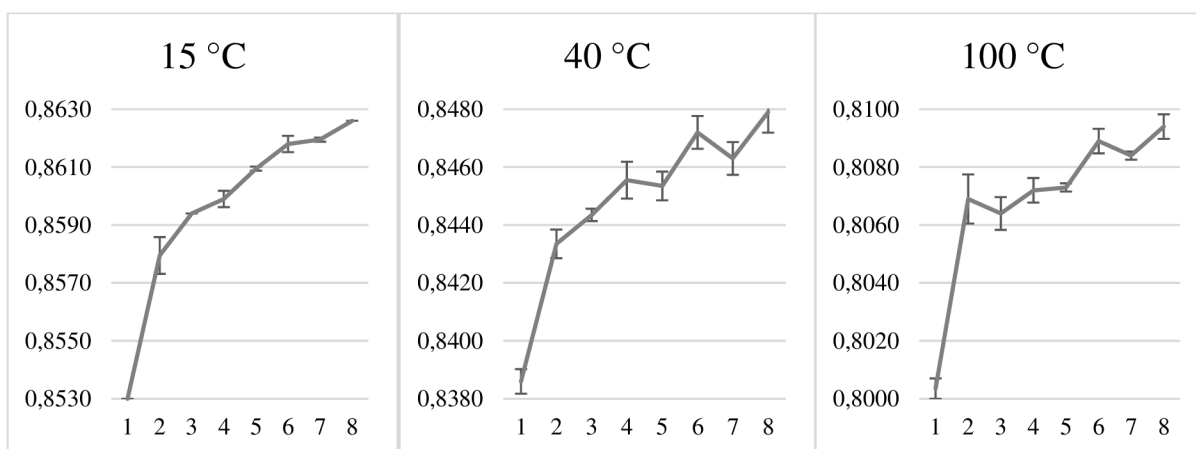
**Tabulka 13:** Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky hustot [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] pro vozidlo 3

Odběr číslo	15 °C	40 °C	100 °C
1	853,0 ± 0,00	838,6 ± 0,42	800,4 ± 0,35
2	857,7 ± 0,64	842,6 ± 0,57	805,5 ± 0,85
3	858,7 ± 0,71	844,8 ± 0,57	806,2 ± 0,42
4	860,1 ± 0,50	845,2 ± 0,57	807,7 ± 0,57
5	861,8 ± 0,42	847,3 ± 0,71	809,0 ± 0,57
6	862,0 ± 0,28	846,7 ± 0,42	808,7 ± 0,07
7	862,9 ± 0,35	848,4 ± 0,64	810,1 ± 0,50
8	863,6 ± 0,00	849,2 ± 0,57	811,0 ± 0,50

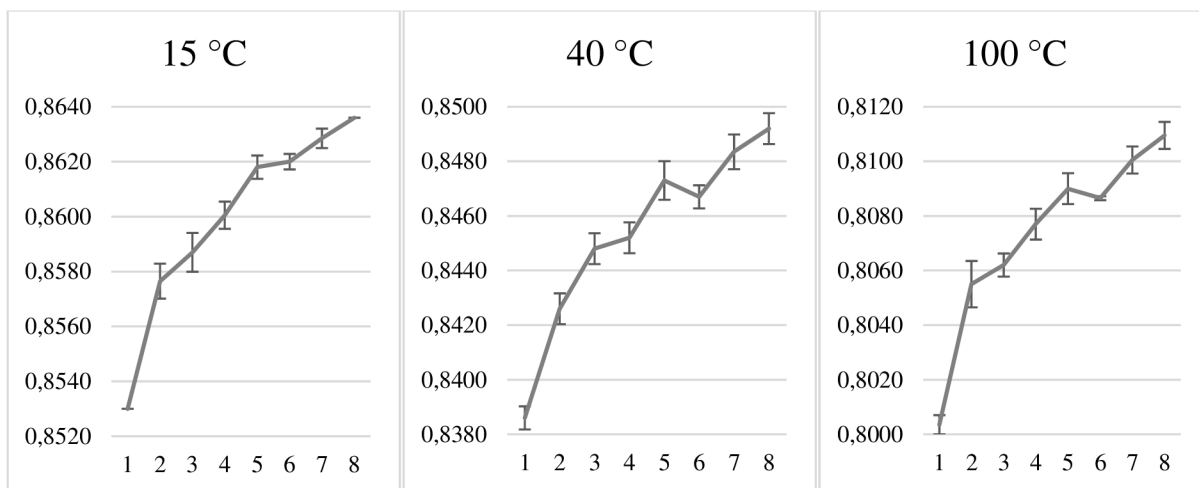
Zdroj: Autorka



**Obrázek 21:** Průběh hustoty v  $\text{g}/\text{cm}^3$  při daných teplotách pro vozidlo 1



**Obrázek 22:** Průběh hustoty v  $\text{g}/\text{cm}^3$  při daných teplotách pro vozidlo 2



**Obrázek 23:** Průběh hustoty v  $g/cm^3$  při daných teplotách pro vozidlo 3

Zdroj: Autorka

### 5.2.2. Dílčí závěr

Z grafů, vypracovaných na základě naměřených hodnot, je patrné, že kinematická viskozita, dynamická viskozita a hustota s přibývajícím kilometry, až na drobné odchylky, vzrůstá. Hustota oleje vzrůstá s narůstajícím počtem nečistot různého původu, například částicemi opotřebení, prachovými částicemi či sazemi.

Postupný růst viskozit může být způsoben oxidační degradací oleje nebo přibývajícím množstvím sazí v oleji, které způsobují zvětšování abrazivního opotřebení uvnitř motoru. Pokud by docházelo k poklesu viskozit, patrně by to mohlo být způsobeno velkým množstvím paliva v oleji.

Ve zkoumaných případech dochází k drobným poklesům viskozit pouze u Vozidla 2. Řidič tohoto vozidla byl však donucen technickým stavem vozidla dvakrát dolít olej, tím olejovou náplň zředil, a proto dochází k nežádoucím výchylkám v měření. U Vozidel 1 a 3 probíhalo měření při konstantní olejové náplni a z Obrázků 15, 17, 18 a 20 je patrné, že s narůstajícím kilometry dochází k pozvolnému nárůstu viskozit.

Hönig (2013) uvádí, že by kinematická viskozita neměla po celou dobu života oleje klesnout pod  $6,5-7 mm^2/s$  při teplotě oleje  $100\text{ °C}$ . Z Tabulek 5, 6 a 7 je patrné, že toto všechny zkoumané vzorky olejů splňují.

Helebrant et al. (2000) uvádějí, že by se kinematičká viskozita oleje během provozu neměla změnit o více než  $\pm 20\%$ . V tomto případě je vyhodnocováno, kdy nastane více než 20% zvýšení viskozity zkoumaných olejů. V případě Vozidla 1 došlo k tomuto kritickému zvýšení mezi čtvrtým a pátým odběrem, proto by pro toto vozidlo byla ideální výměna maximálně při 30 000 km najetých na oleji. Vozidlo 2 této kritické hodnoty zvýšení viskozity nedosáhlo, z důvodu nutného dolití oleje, tedy zředění olejové náplně. Proto ho nelze hodnotit. Vozidlo 3 dosáhlo kritické hodnoty mezi šestým a sedmým odběrem. Výsledný maximální interval pro toto vozidlo by tedy odpovídal 40 000 km.

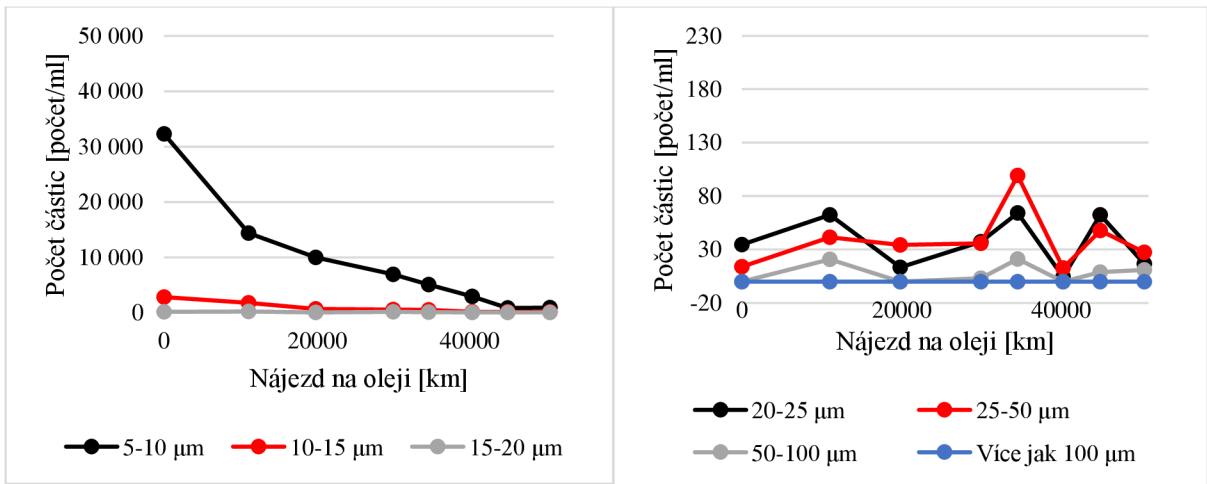
### **5.3. LNF**

V této kapitole jsou zpracovány hodnoty nalezených nečistot ve vzorcích olejů přístrojem LNF. Hodnoty jsou zpracovány do grafů a následně je formulován dílčí závěr.

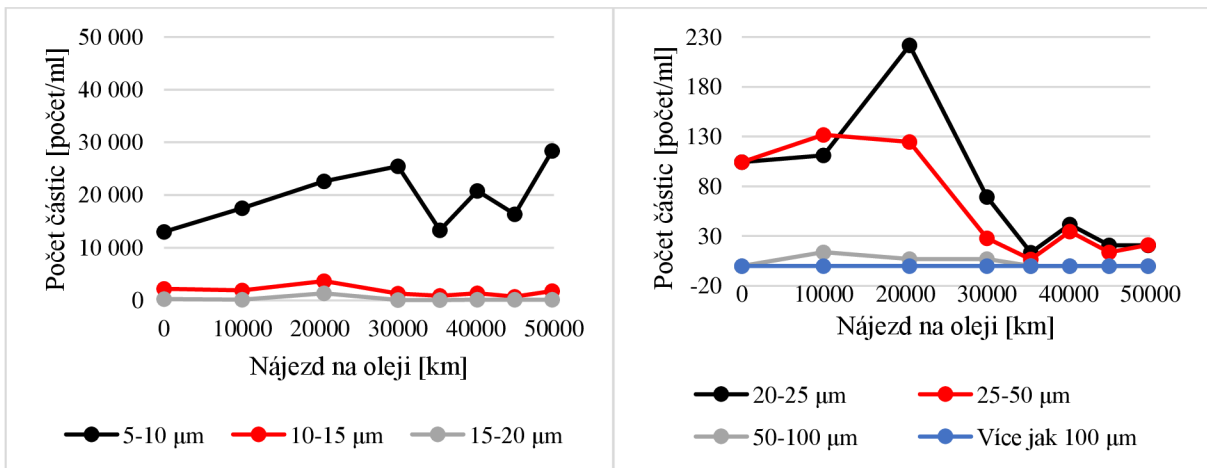
#### **5.3.1. Výsledky měření**

Množství nalezených nečistot, včetně jejich typu, bylo exportováno z programu LNF do MS Excel. Hodnoty byly statisticky zpracovány, přepočítány poměrem ředění a následně byly zpracovány grafy, taktéž v MS Excel.

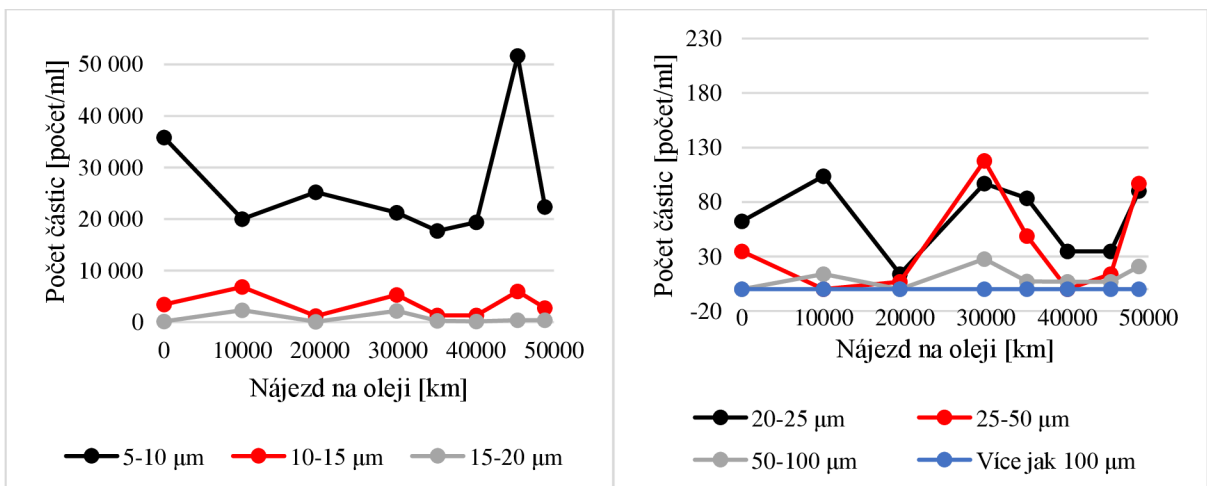
Celkový počet částic, které program analyzoval ve vzorcích je rozdělen na dva grafy, z důvodu přehlednosti a značně rozdílného počtu jednotlivých velikostí nečistot. V grafech na Obrázcích 24, 25 a 26 jsou uvedeny celkové počty nečistot nalezených ve vzorcích olejů zkušebních vozidel, které jsou rozděleny podle velikostí. V grafech na Obrázcích 27, 28 a 29 jsou vyobrazeny celkové počty nečistot, které program LNF našel ve vzorcích olejů, tedy součet všech velikostí nečistot.



**Obrázek 24:** Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejí z vozidla 1

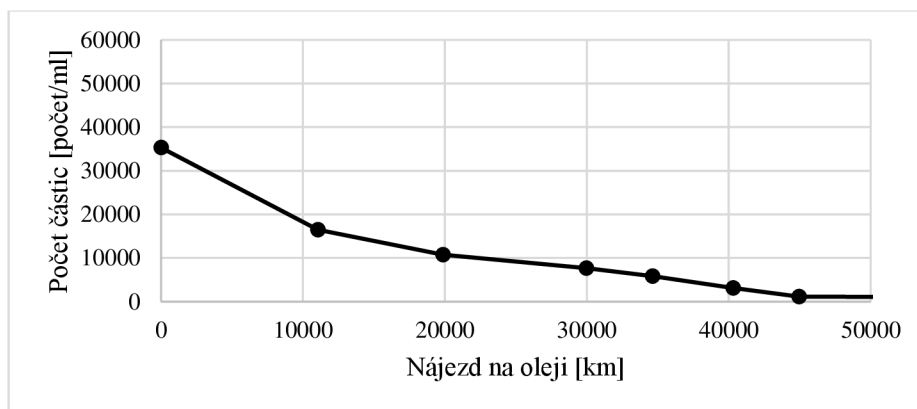


**Obrázek 25:** Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejí z vozidla 2

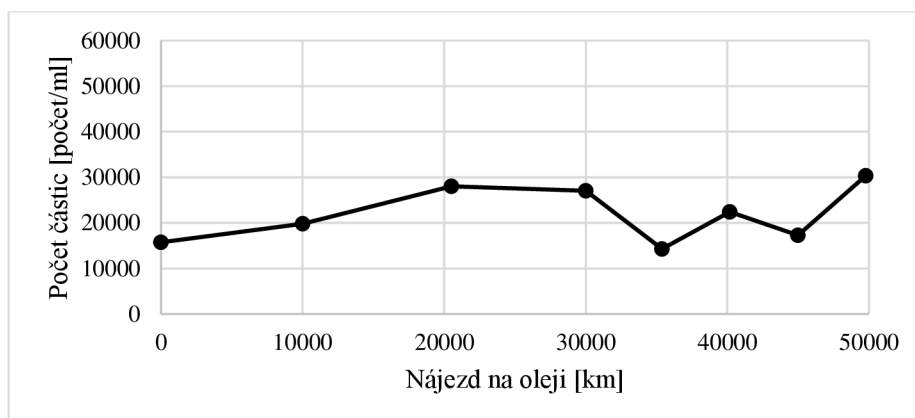


**Obrázek 26:** Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejí z vozidla 3

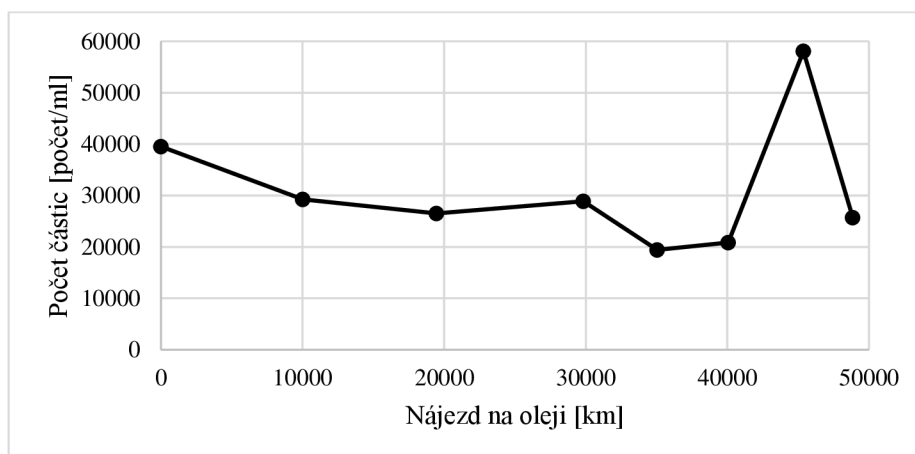
Zdroj: Autorka



**Obrázek 27:** Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1 (součet všech velikostí částic)



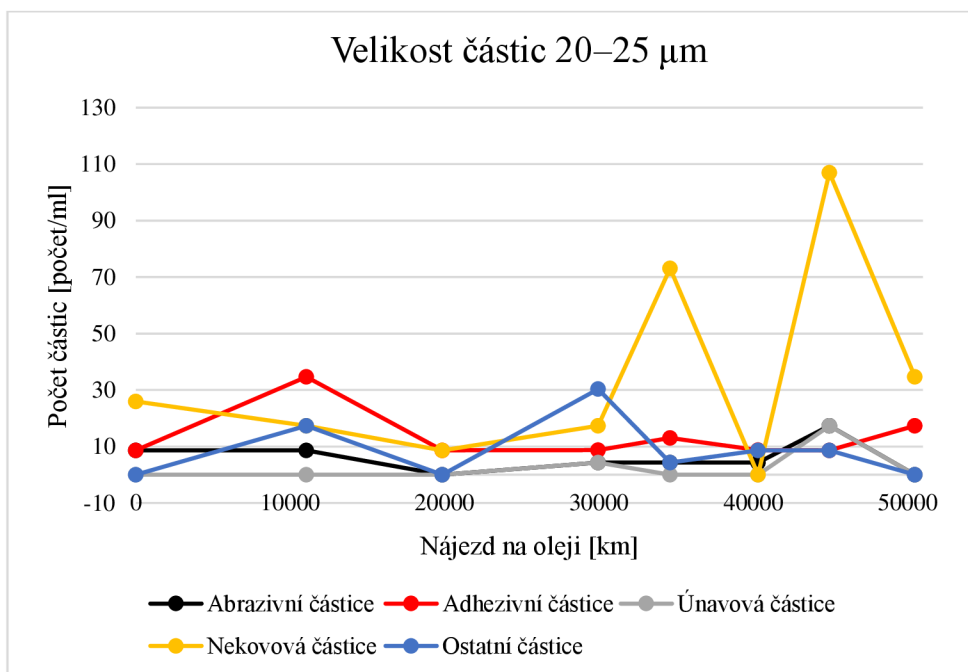
**Obrázek 28:** Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2 (součet všech velikostí částic)



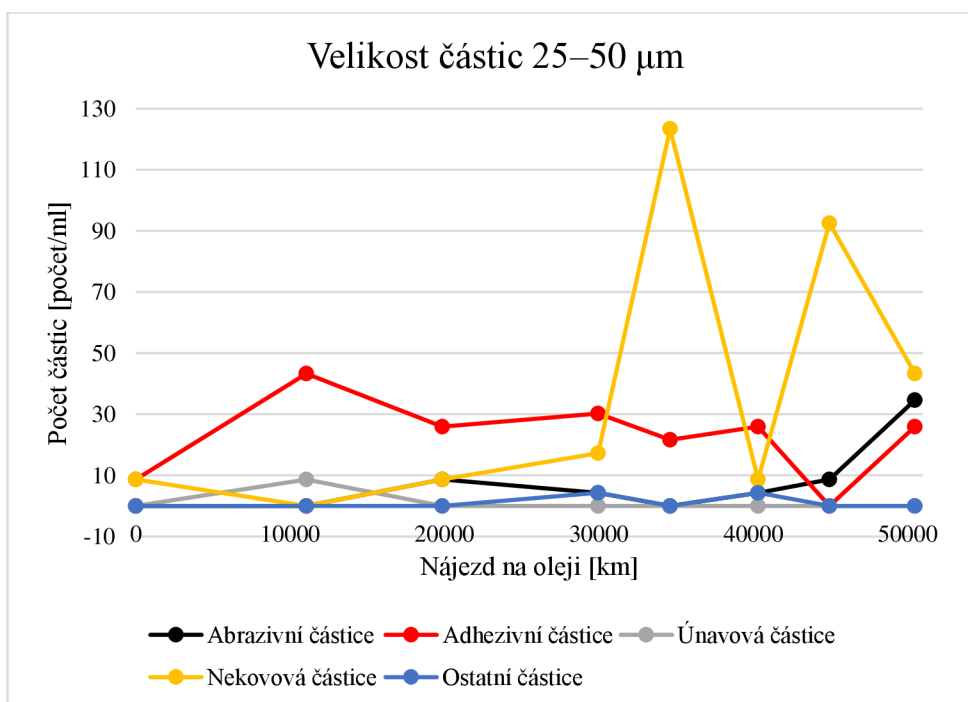
**Obrázek 29:** Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3 (součet všech velikostí částic)

Zdroj: Autorka

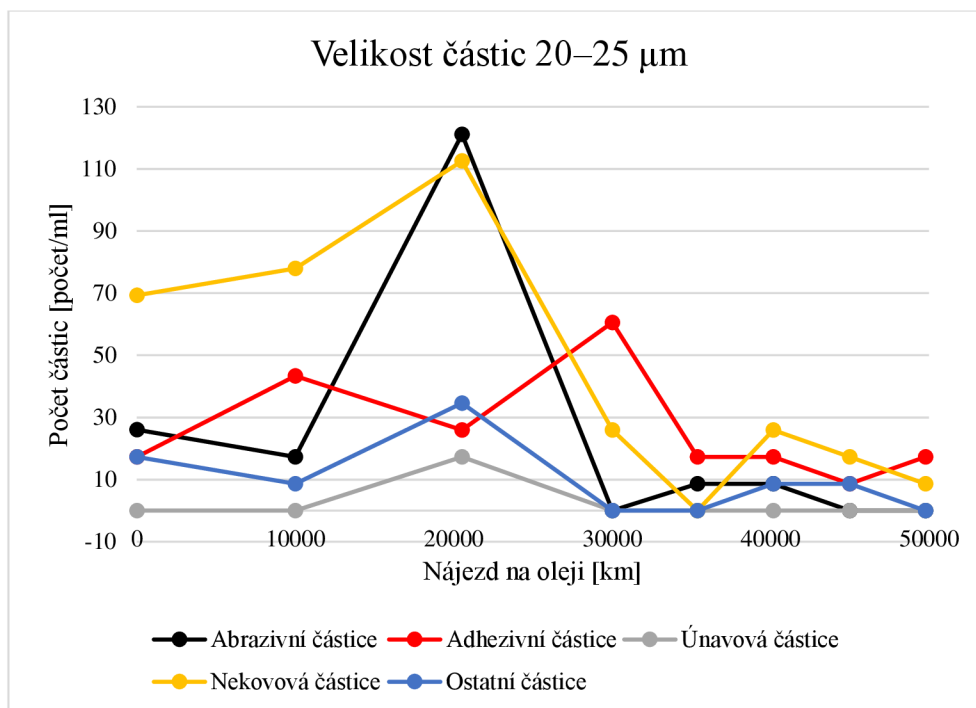
Dále byla provedena analýza nalezených částic o velikostech 20–25  $\mu\text{m}$  a 25–50  $\mu\text{m}$ . V grafech na Obrázcích 30, 31, 32, 33, 34 a 35 jsou vyobrazeny počty částic výše uvedených velikostí, rozdělené podle původu jejich vzniku.



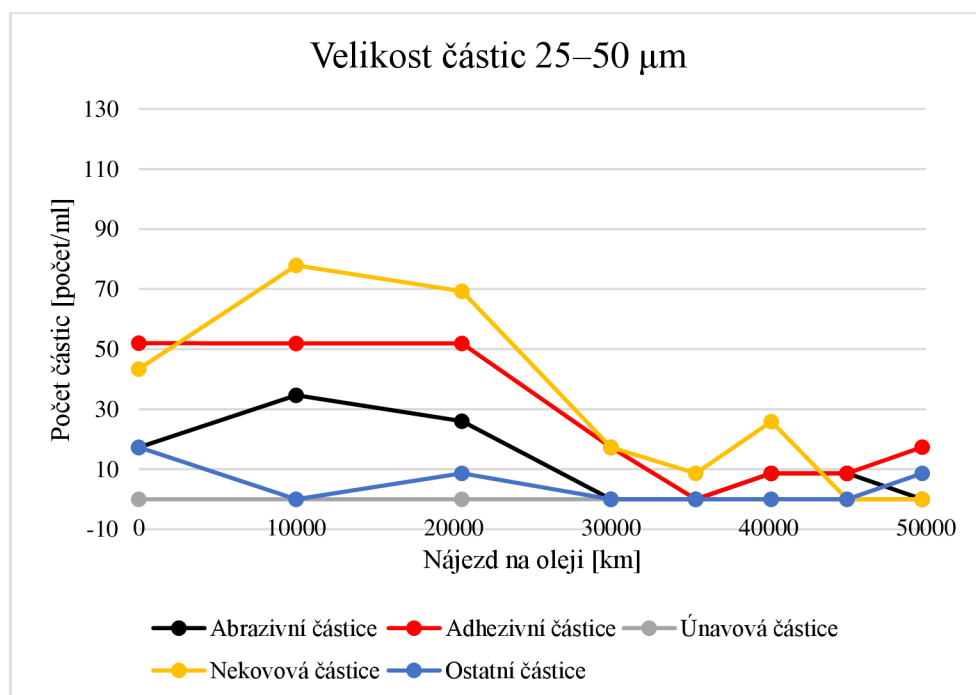
**Obrázek 30:** Typy částic o velikostech 20–25  $\mu\text{m}$  nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1



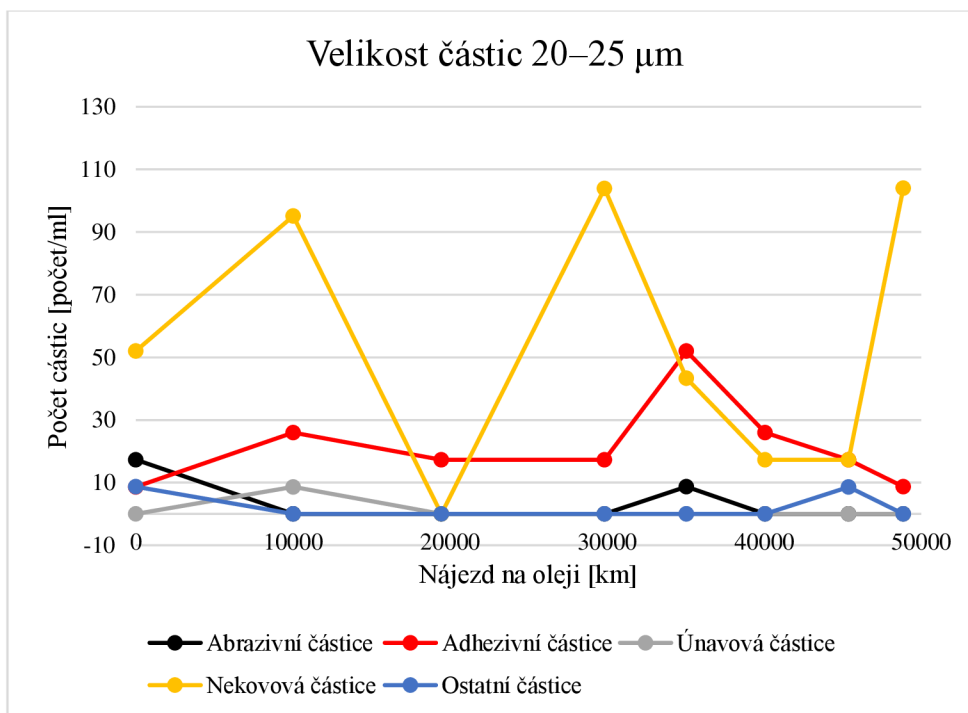
**Obrázek 31:** Typy částic o velikostech 25–50  $\mu\text{m}$  nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1



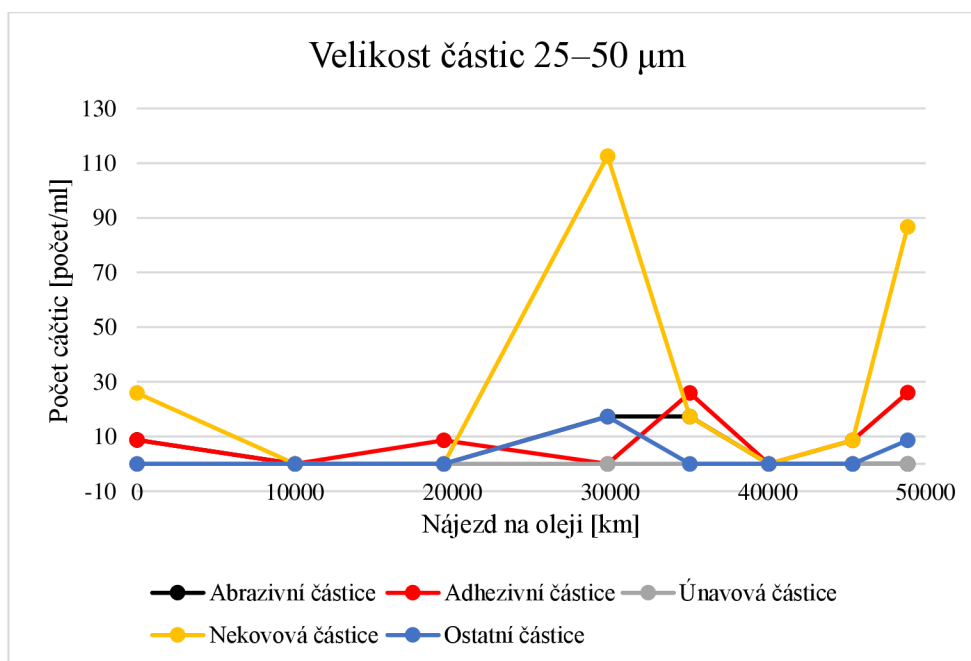
**Obrázek 32:** Typy částic o velikostech 20–25 μm nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2



**Obrázek 33:** Typy částic o velikostech 25–50 μm nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2



**Obrázek 34:** *Typy částic o velikostech 20–25 μm nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3*



**Obrázek 35:** *Typy částic o velikostech 25–50 μm nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3*

Zdroj: Autorka



### 5.3.2. Dílčí závěr

Z Obrázků 24, 25 a 26 v kapitole 5.3.1 je patrné, že množství nečistot je vcelku proměnlivé. Určité množství nečistot se nachází v oleji již z výroby nebo jsou získány špatným skladováním olejů. Tyto nečistoty jsou nejčastěji toho nejmenšího rozměru, které LNF dokáže prokázat, tedy 5–10  $\mu\text{m}$ . První vzorky oleje byly analyzovány ještě před nalitím oleje do systému, tedy olej neprošel přes žádný filtr. Následující vzorky již prošly filtrem a u Vozidel 1 a 3 je patrný značný pokles těchto částic. U Vozidla 2 je patrný pokles téměř všech velikostí částic kolem 35 000 km a 45 000 km. Je to nejspíše způsobeno nuceným dolitím oleje, tedy zředěním olejové náplně novým olejem. U všech tří sad vzorků je patrné, že oleje neobsahovaly žádné částice nad 100  $\mu\text{m}$ , protože přístroj LNF tyto částice v případě výskytu musí vyfiltrovat, aby se nezanesla měřicí kyveta.

Z Obrázků 27, 28 a 29 je možné posoudit průběhy celkového množství nečistot ve vzorcích olejů. U Vozidla 1 je viditelný průběžný pokles nečistot s přibývajícím kilometry. Nejspíše jsou nečistoty postupně zachytávány filtrem. U Vozidla 2 dochází k postupnému nárůstu nečistot a následně jsou v grafu patrné dva poklesy nečistot, způsobené zředěním oleje. U Vozidla 3 je patrný extrémní nárůst nečistot při dosažení 45 000 km. Následně dochází k poklesu, který může být opět způsoben pohlcením částic filtrem.

V grafech na Obrázcích 30 a 31 jsou vyobrazeny počty částic, rozdělené podle jejich původu, pro Vozidlo 1. Z těchto grafů je patrné, že po 30 000 km výrazně vzrostl počet nekovových částic v olejové náplni u obou analyzovaných rozměrů. Dále po 40 000 km došlo k nárůstu částic (20–25  $\mu\text{m}$ ), vzniklých únavovým opotřebením, které se doposud ve vzorcích téměř vůbec nenacházely. Od 45 000 km také došlo k nárůstu částic (25–50  $\mu\text{m}$ ), vznikajících abrazivním opotřebením některé z vnitřních částí motoru.

V grafech na Obrázcích 32 a 33 jsou vyobrazeny počty částic, rozdělené podle jejich původu, pro Vozidlo 2. Z těchto grafů je patrné, že nový olej byl do systému nejspíše aplikován bez dostatečného propláchnutí systému po předchozí olejové náplni. Důkazem jsou částice, vyskytující se v oleji již od prvních vzorků, postupně klesající, což může způsobovat jejich pohlcení filtrem. U částic o velikosti 20–25  $\mu\text{m}$  je kolem 20 000 km patrný značný nárůst abrazivních částic, které následně opět klesly, což může být způsobeno zachycením těchto částic olejovým filtrem nebo zředěním oleje, při dolití nového. Ve stejném rozměru částic došlo také k nárůstu únavových částic, které následně taktéž poklesly, což mohlo být opět způsobeno

zředěním oleje, již zmíněným dolitím. Celkově zředění oleje způsobilo, že předpokládaný nárůst částic v oleji se neprokázal.

V grafech na Obrázcích 34 a 35 jsou vyobrazeny počty částic, rozdělené podle jejich původu, pro Vozidlo 3. Z těchto grafů je patrné, že u částic o velikosti 20–25  $\mu\text{m}$  velmi kolísají hodnoty množství nekovových částic. Kolem 35 000 km došlo k nárůstu adhezivních částic, které následně nejspíše zachytil olejový filtr a opět došlo k jejich poklesu. U částic o velikosti 25–50  $\mu\text{m}$  došlo při 30 000 km k razantnímu nárůstu nekovových částic, oproti tomu ostatní částice mají množství po celou dobu téměř konstantní pouze s drobnými výchyly. Únavové částice se zde vůbec neobjevují.

## 6. Závěr

V této kapitole jsou shrnuty dílčí závěry uváděné u výsledků měření a je zde navržen nový optimální interval výměny oleje na základě analýzy vzorků odebraných olejů.

Jako první byly vzorky olejů vyhodnocovány s ohledem na množství těkavých složek. Z výsledků bylo patrné, že množství těkavých složek bylo minimální, tedy je pravděpodobné, že u zkoumaných vozidel nedochází k průniku nafty do olejové náplně. Jednou výjimkou bylo měření posledního vzorku z Vozidla 2, u kterého došlo k výraznému zvýšení množství těkavých složek. Toto zvýšení bylo nejspíše způsobeno právě průnikem nafty do olejové náplně. Vozidlo 2 vykazovalo po celou dobu měření problémy v pístní soustavě, které se projevovaly ztrátami oleje. Bylo tedy nevyhnutelné u něj dvakrát dolít motorový olej, čímž se olejová náplň zředila a výsledky dalších měření mohou být zkreslené. Na Obrázku 14 je patrné, že při měření prvních vzorků došlo k výraznému poklesu množství těkavých složek. To značí, že motor bez problému spálí těkavé složky, které jsou v oleji obsaženy již z výroby, nebo je olej získá špatným skladováním.

Dalšími zkoumanými parametry vzorků olejů byly kinematická viskozita, dynamická viskozita a hustota. Tyto parametry byly naměřeny při teplotách 15 °C, 40 °C a 100 °C. Při provozu motoru dochází vždy ke změnám viskozit a hustoty. Postupný růst viskozit může způsobovat oxidační degradace oleje nebo zvyšující se množství sazí v oleji. Naopak pokles viskozit bývá způsoben velkým množstvím paliva v oleji. Hustota oleje se zvyšuje s narůstajícím počtem nečistot, což můžou být částice opotřebení, prachové částice či saze.

Z obrázků v kapitolách 5.2.1.1., 5.2.1.2. a 5.2.1.3. je patrné, že kinematická viskozita, dynamická viskozita i hustota s přibývajícím kilometrem, až na drobné odchylky, po celou dobu používání oleje narůstala. K poklesům viskozit došlo pouze u Vozidla 2. K těmto nežádoucím výchytkám došlo z důvodu nuceného dolití oleje, tedy zředěním olejové náplně. U Vozidel 1 a 3 se podařilo udržet konstantní olejovou náplň a z Obrázků 15, 17, 18 a 20 je patrné, že s přibývajícím kilometrem dochází k pozvolnému nárůstu viskozit.

Podle Höniga (2013) by kinematická viskozita motorového oleje neměla po celou dobu života oleje klesnout pod 6,5–7  $mm^2/s$  při teplotě oleje 100 °C. Z Tabulek 5, 6 a 7 je patrné, že toto všechny zkoumané vzorky olejů splňují.

Helebrant et al. (2000) uvádějí, že by se kinematická viskozita oleje ve vznětovém motoru během provozu neměla změnit o více než  $\pm 20\%$ . V tomto případě bylo vyhodnoceno,

kdy nastane více než 20% zvýšení viskozity oleje. U Vozidla 1 došlo k tomuto kritickému zvýšení mezi čtvrtým a pátým odběrem, proto by pro toto vozidlo byla ideální výměna oleje maximálně při 30 000 km najetých na olejové náplni. Vozidlo 2 této kritické hodnoty zvýšení viskozity nedosáhlo, protože u něj došlo, k již zmíněnému, naředění olejové náplně. Nelze ho tedy hodnotit. Vozidlo 3 dosáhlo kritické hodnoty mezi šestým a sedmým odběrem. Výsledný maximální interval výměny oleje u tohoto vozidla tedy odpovídá 40 000 km.

Posledním zjišťovaným parametrem jsou částice nečistot, vyhodnocované přístrojem LNF. Z Obrázků 24, 25 a 26 je patrné, že množství nečistot v jednotlivých vzorcích je celkem proměnlivé. Může to být způsobeno postupným zachycováním částic olejovými filtry. Tyto filtry viditelně pohltnou i značné množství malých částic (5–10  $\mu\text{m}$ ), které se nachází v motorovém oleji již z výroby. Patrné je to na poklesu těchto částic u druhých vzorků zkoumaných vozidel.

U Obrázků 27, 28 a 29 je možné pozorovat průběhy celkového množství nečistot ve vzorcích. Vozidlo 1 vykazuje průběžný pokles nečistot s přibývajícím kilometry. U Vozidla 2 částice nečistot pozvolna narůstají a následně jsou patrné dva poklesy množství nečistot, způsobené zředěním oleje. Průběh u Vozidla 3 je postupně klesající a při dosažení 45 000 km se projevil extrémní nárůst nečistot, který následně hned poklesl. Může to být způsobeno buď chybou měření nebo částice nečistot pohltil filtr.

Na Obrázcích 30–35 jsou vyobrazeny počty částic ve vzorcích, rozdělené podle jejich původu. Obrázky 30 a 31 jsou vypracovány pro Vozidlo 1. Po 30 000 km došlo k výraznému nárůstu počtu nekovových částic v olejové náplni u obou analyzovaných rozměrů. Poté po 40 000 km vzrostl počet částic, vzniklých únavovým opotřebením, které doposud ve vzorcích nebyly nalezeny. Od 45 000 km začaly v oleji narůstat i částice vzniklé abrazivním opotřebením vnitřních částí motoru. Obrázky 32 a 33 jsou věnovány výsledkům Vozidla 2. Zde je patrné, že nový olej byl aplikován do systému, který nejspíše nebyl dostatečně propláchnutý po předchozí olejové náplni. Důkazem jsou částice vyskytující se v oleji již od počátku jeho provozování. Výsledky tohoto vozidla není třeba vyhodnocovat, protože došlo k jejich zkreslení při dolití nového oleje do olejové náplně. Obrázky 34 a 35 vyobrazují počty částic, rozdělené podle jejich původu, pro Vozidlo 3. Zde dochází k velkému kolísání množství nekovových částic. Kolem 35 000 km výrazně narostly adhezivní částice, které následně zase poklesly. Množství ostatních částic je po celou dobu používání oleje téměř konstantní, pouze s drobnými výchyly. Únavové částice se zde vůbec neobjevují.

Hlavním cílem této práce bylo zjistit, zda je současný interval výměny motorového oleje optimální. Podle provedených analýz odebraných vzorků olejů bylo zjištěno, že tento interval je nevyhovující. Podle měření viskozity motorových olejů by byl ideální interval výměny oleje u jednoho vozidla 30 000 km a u druhého vozidla 40 000 km. Při posuzování množství částic nečistot v oleji, rozdělených podle jejich původu, je patrné, že k razantním nárůstům nečistot dochází kolem 30 000 km najetých na oleji. U Vozidla 1 došlo po 30 000 km k výraznému nárůstu nekovových částic, dále vzrostl i počet částic vzniklých únavovým opotřebením a abrazivním opotřebením. U Vozidla 3 došlo opět při 30 000 km k výraznému nárůstu nekovových částic, následováno značným nárůstem adhezivních částic a drobným nárůstem abrazivních částic. Na základě těchto zjištění je doporučen nový vhodný interval výměny oleje 30 000 km najetých na jedné olejové náplni, následovaný výměnou motorového oleje, olejových filtrů a důkladným propláchnutím systému před aplikací nového motorového oleje.

## 7. Seznam použitých zdrojů

AGOCS, A., A. NAGY, Z. TABAKOV, J. PERGER, J. ROHDE-BRANDENBURGER, M. SCHANDL, Ch. BESSER a N. DÖRR, 2021. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International* [online]. **161**(May). ISSN 0301679X. Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X21002279>

AKBIYIK, T., N. KAHRAMAN a T. TANER, 2022. Investigation of the effect of boron additive to lubricating oil on engine performance, exhaust, and emissions. *Fuel* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, **312**(July 2021), 122931. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S0016236121027927>

ALARIFI, I. M., 2022. *Synthetic Engineering Materials and Nanotechnology* [online]. B.m.: Elsevier Inc. ISBN 978-0-12-824001-4. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/C2020-0-01204-1](https://doi.org/10.1016/C2020-0-01204-1)

ALMASI, S., B. GHOBADIAN, G. NAJAFI a M. SOUFI, 2021. A review on bio-lubricant production from non-edible oil-bearing biomass resources in Iran: Recent progress and perspectives. *Journal of Cleaner Production* [online]. **290**. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S0959652621000500>

BAGAL, D. K., A. BARUA, S. JEET, D. ACHARJYA, A. K. PATTANAIK a S. N. PANDA, 2022. Tribological investigation of quality of the industrial speed reducer synthetic lube oil used in material handling industry. *Materials Today: Proceedings* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, **50**, 1918–1922. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S2214785321061514>

BALABIN, R. M. a R. Z. SAFIEVA, 2008. Motor oil classification by base stock and viscosity based on near infrared (NIR) spectroscopy data. *Fuel* [online]. **87**(12), 2745–2752. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S0016236108000756>

BEHESHTI, A., Y. HUANG, K. OHNO, I. BLAKEY a J. STOKES, 2020. Improving tribological properties of oil-based lubricants using hybrid colloidal additives. *Tribology International* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, **144**(December 2019), 106130. Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X19306449>

CANTER, N., 2010. Inorganic nanolubricant additive. *Tribology and Lubrication Technology*. s. 12-13.

ČERNÝ, J., 2006. *Vlastnosti motorových olejů - Základní funkce olejů* [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Zakladni-funkce-oleju>

ČERNÝ, J., 2007a. *Vlastnosti motorových olejů - Nečistoty a saze v motorovém oleji* [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Necistoty-a-saze-v-motorovem-oleji>

ČERNÝ, J., 2007b. *Vlastnosti motorových olejů - Oxidační stabilita, nitrace oleje* [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Oxidacni-stabilita--nitrace-oleje>

ČERNÝ, J., 2008a. *Vlastnosti motorových olejů - Otěrové kovy* [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Oterove-kovy>

ČERNÝ, J., 2008b. *Vlastnosti motorových olejů - Palivo v oleji* [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Palivo-v-oleji/>

ČERNÝ, J., 2008c. *Vlastnosti motorových olejů - Voda a glykol v oleji* [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Voda-a-glykol-v-oleji/>

ČERNÝ, J., L. BUČKO a I. VÁCLAVÍČKOVÁ, 2007. Mazivostní a protioděrové vlastnosti motorových olejů [online]. Dostupné z: <https://adoc.pub/mazivostni-a-protiod-rove-vlastnosti-motorovych-olej.html>

CHEN, B., J. WANG, T. HE, F. JIE a B. CHEN, 2019. Impact of biodiesel on engine oil quality: Role of methyl oleate and performance of sulfonate detergent additive. *Fuel* [online]. B.m.: Elsevier, **244**(January), 454–460. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S0016236119302480>

CHHABRA, A. a K. SINGH, 2021. Engine oil dialysis of heavy-duty engine oil 5W50. *Materials Today: Proceedings* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 1–5. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S2214785321078810>

HELEBRANT, F., J. ZIEGLER a D. MARASOVÁ, 2000. *Technická diagnostika a spolehlivost I*.

- HÖNIG, V., 2013. *Cvičení z paliv a maziv*. ISBN 978-80-213-2384-1.
- HOŠEK, F., nedatováno. *Mazací soustava PSM*. Brno: Univerzita obrany v Brně, fakulta vojenských technologií.
- HRDLIČKA, Z., 1996. *Automobilové kapaliny*. Praha: Grada Publishing. ISBN 80-7169-332-4.
- MACHALÍK, S., 2011. *Obrazová analýza v tribotechnické diagnostice, disertační práce*. B.m. Vysoké učení technické v Brně.
- NIEDERMAYER, A. O., T. VOGLHUBER-BRUNNMAIER, M. HEINISCH, F. FEICHTINGER a B. JAKOBY, 2016. Monitoring of the Dilution of Motor Oil with Diesel Using an Advanced Resonant Sensor System. *Procedia Engineering* [online]. B.m.: Elsevier B.V., **168**, 15–18. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S1877705816334257>
- ŠLECHTA, M., 2015. *Znečištění motorových olejů a jejich vliv na viskozitu*. B.m. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- SMĚJA, R., 2020. *Analýza vlivu aditiv na provozní parametry spalovacích motorů, diplomová práce*. B.m. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- STAN, C., C. ANDREESCU a M. TOMA, 2018. Some aspects of the regeneration of used motor oil. *Procedia Manufacturing* [online]. B.m.: Elsevier B.V., **22**, 709–713. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S2351978918303986>
- VESELÁ, K., 2017. *Využití tribodiagnostiky k vyjádření vlivu biopaliv na olejovou náplň spalovacího motoru, disertační práce*. B.m. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- VLK, F., 2006. *Paliva a maziva motorových vozidel*. B.m.: Prof. Ing. František Vlk, DrSc. ISBN 80-239-6461-5.



## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> Kinematická viskozita a viskozitní index (VI) v závislosti na počtu ujetých kilometrů, a) benzínová vozidla, b) naftová vozidla .....	9
<b>Obrázek 2:</b> Oxidace, nitrace a sulfatace, jako funkce v závislosti na počtu ujetých kilometrů, c) benzínová vozidla, d) naftová vozidla .....	10
<b>Obrázek 3:</b> Usazená emulze vzniklá nemrznoucí kapalinou v oleji .....	11
<b>Obrázek 4:</b> Vliv obsahu paliva na viskozitu oleje .....	13
<b>Obrázek 5:</b> Otěrová částice vzniklá při zadírání motoru.....	16
<b>Obrázek 6:</b> Obecný průběh poškození vlivem opotřebení .....	18
<b>Obrázek 7:</b> Přehled jednotlivých částic (větších než 20 $\mu\text{m}$ ).....	24
<b>Obrázek 8:</b> Odebrané vzorky motorového oleje .....	27
<b>Obrázek 9:</b> Zkušební tahač Mercedes-Benz Actros MP4 (2017).....	28
<b>Obrázek 10:</b> The Fuel Sniffer.....	30
<b>Obrázek 11:</b> Výsledek měření přístroje The Fuel Sniffer .....	30
<b>Obrázek 12:</b> Viskozimetr SVM 3000 .....	31
<b>Obrázek 13:</b> Přístroj LaserNet Fines pro měření nečistot v oleji.....	32
<b>Obrázek 14:</b> Těkavé složky v odebraných vzorcích olejů .....	34
<b>Obrázek 15:</b> Průběh kinematické viskozity v $\text{mm}^2/\text{s}$ při daných teplotách pro vozidlo 1....	37
<b>Obrázek 16:</b> Průběh kinematické viskozity v $\text{mm}^2/\text{s}$ při daných teplotách pro vozidlo 2....	37
<b>Obrázek 17:</b> Průběh kinematické viskozity v $\text{mm}^2/\text{s}$ při daných teplotách pro vozidlo 3....	38
<b>Obrázek 18:</b> Průběh dynamické viskozity v $\text{mPa} \cdot \text{s}$ při daných teplotách pro vozidlo 1.....	40
<b>Obrázek 19:</b> Průběh dynamické viskozity v $\text{mPa} \cdot \text{s}$ při daných teplotách pro vozidlo 2.....	40
<b>Obrázek 20:</b> Průběh dynamické viskozity v $\text{mPa} \cdot \text{s}$ při daných teplotách pro vozidlo 3.....	40
<b>Obrázek 21:</b> Průběh hustoty v $\text{g}/\text{cm}^3$ při daných teplotách pro vozidlo 1 .....	42
<b>Obrázek 22:</b> Průběh hustoty v $\text{g}/\text{cm}^3$ při daných teplotách pro vozidlo 2 .....	42
<b>Obrázek 23:</b> Průběh hustoty v $\text{g}/\text{cm}^3$ při daných teplotách pro vozidlo 3 .....	43
<b>Obrázek 24:</b> Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1.....	45
<b>Obrázek 25:</b> Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2.....	45
<b>Obrázek 26:</b> Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3.....	45
<b>Obrázek 27:</b> Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1 (součet všech velikostí částic).....	46
<b>Obrázek 28:</b> Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2 (součet všech velikostí částic).....	46
<b>Obrázek 29:</b> Celkový počet částic nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3 (součet všech velikostí částic).....	46
<b>Obrázek 30:</b> Typy částic o velikostech 20–25 $\mu\text{m}$ nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1	47
<b>Obrázek 31:</b> Typy částic o velikostech 25–50 $\mu\text{m}$ nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 1	47
<b>Obrázek 32:</b> Typy částic o velikostech 20–25 $\mu\text{m}$ nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2	48
<b>Obrázek 33:</b> Typy částic o velikostech 25–50 $\mu\text{m}$ nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 2	48
<b>Obrázek 34:</b> Typy částic o velikostech 20–25 $\mu\text{m}$ nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3	49
<b>Obrázek 35:</b> Typy částic o velikostech 25–50 $\mu\text{m}$ nalezených ve vzorcích olejů z vozidla 3	49

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> Viskozitní klasifikace SAE J300 .....	6
<b>Tabulka 2:</b> Přehled najetých kilometrů, ve kterých byly odebírány vzorky olejů .....	27
<b>Tabulka 3:</b> Naměřené hodnoty podílu těkavých složek [%] .....	33
<b>Tabulka 4:</b> Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky těkavých složek .....	34
<b>Tabulka 5:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky KV [ $mm^2/s$ ] pro vozidlo 1 .....	36
<b>Tabulka 6:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky KV [ $mm^2/s$ ] pro vozidlo 2 .....	36
<b>Tabulka 7:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky KV [ $mm^2/s$ ] pro vozidlo 3 .....	37
<b>Tabulka 8:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky DV [ $mPa \cdot s$ ] pro vozidlo 1 .....	38
<b>Tabulka 9:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky DV [ $mPa \cdot s$ ] pro vozidlo 2 .....	39
<b>Tabulka 10:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky DV [ $mPa \cdot s$ ] pro vozidlo 3 .....	39
<b>Tabulka 11:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky hustot [ $kg/m^3$ ] pro vozidlo 1 .....	41
<b>Tabulka 12:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky hustot [ $kg/m^3$ ] pro vozidlo 2 .....	41
<b>Tabulka 13:</b> Vypočítané průměrné hodnoty a směrodatné odchylky hustot [ $kg/m^3$ ] pro vozidlo 3 .....	42

## 8. Přílohy

### Příloha 1: Tabulky naměřených hodnot kinematických viskozit, dynamických viskozit a hustot jednotlivých vzorků olejů pro vozidla 1, 2 a 3

#### Vozidlo 1

Číslo vzorku	Měřená veličina	15 °C		40 °C		100 °C	
1	$\eta$	200,72	201,04	55,381	55,428	9,0977	9,0718
	$\nu$	235,30	235,69	66,062	66,069	11,371	11,332
	$\rho$	0,8530	0,8530	0,8383	0,8389	0,8001	0,8006
2	$\eta$	245,13	248,21	67,330	67,460	10,318	10,226
	$\nu$	284,83	288,42	79,669	79,885	12,781	12,679
	$\rho$	0,8606	0,8606	0,8451	0,8445	0,8073	0,8066
3	$\eta$	258,30	260,28	70,978	71,036	10,607	10,574
	$\nu$	299,81	301,75	83,754	83,737	13,108	13,056
	$\rho$	0,8616	0,8626	0,8475	0,8483	0,8092	0,8099
4	$\eta$	273,47	275,87	74,667	74,755	11,062	11,048
	$\nu$	315,81	318,64	87,749	87,772	13,613	13,585
	$\rho$	0,8659	0,8658	0,8509	0,8517	0,8126	0,8132
5	$\eta$	279,11	278,52	74,670	74,862	11,336	11,286
	$\nu$	321,82	321,25	87,639	87,935	13,928	13,870
	$\rho$	0,8673	0,8670	0,8520	0,8513	0,8142	0,8138
6	$\eta$	290,77	292,01	79,557	79,630	11,671	11,650
	$\nu$	334,38	335,81	93,116	93,106	14,301	14,268
	$\rho$	0,8696	0,8696	0,8544	0,8553	0,8161	0,8161
7	$\eta$	296,11	300,65	80,516	80,717	12,094	12,051
	$\nu$	339,95	344,94	93,998	94,302	14,783	14,730
	$\rho$	0,8710	0,8716	0,8566	0,8559	0,8180	0,8182
8	$\eta$	311,58	313,12	85,099	85,087	12,343	12,322
	$\nu$	356,85	358,86	99,200	99,063	15,060	15,021
	$\rho$	0,8731	0,8725	0,8579	0,8589	0,8195	0,8203

$\eta$  [mPa · s],  $\nu$  [mm<sup>2</sup>/s],  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]

## Vozidlo 2

Číslo vzorku	Měřená veličina	15 °C		40 °C		100 °C	
1	$\eta$	200,72	201,04	55,381	55,428	9,0977	9,0718
	$\nu$	235,30	235,69	66,062	66,069	11,371	11,332
	$\rho$	0,8530	0,8530	0,8383	0,8389	0,8001	0,8006
2	$\eta$	248,05	252,78	68,295	68,473	10,441	10,448
	$\nu$	289,26	294,47	80,949	81,223	12,949	12,938
	$\rho$	0,8575	0,8584	0,8437	0,8430	0,8063	0,8075
3	$\eta$	256,67	258,33	69,810	69,818	10,273	10,263
	$\nu$	298,65	300,58	82,691	82,677	12,746	12,722
	$\rho$	0,8594	0,8594	0,8442	0,8445	0,8060	0,8068
4	$\eta$	260,89	263,37	71,049	71,096	10,453	10,433
	$\nu$	303,34	306,35	84,069	84,041	12,956	12,921
	$\rho$	0,8601	0,8597	0,8451	0,8460	0,8069	0,8075
5	$\eta$	266,28	265,76	70,823	70,721	10,616	10,579
	$\nu$	309,30	308,66	83,813	83,628	13,150	13,102
	$\rho$	0,8609	0,8610	0,8450	0,8457	0,8072	0,8074
6	$\eta$	271,75	273,32	73,561	73,638	10,780	10,755
	$\nu$	315,25	317,23	86,867	86,881	13,331	13,291
	$\rho$	0,8620	0,8616	0,8468	0,8476	0,8086	0,8092
7	$\eta$	272,58	272,43	72,415	72,618	10,859	10,828
	$\nu$	316,27	316,06	85,528	85,846	13,435	13,393
	$\rho$	0,8619	0,8620	0,8467	0,8459	0,8083	0,8085
8	$\eta$	274,54	276,29	74,401	74,377	10,787	10,764
	$\nu$	318,25	320,28	87,796	87,665	13,333	13,293
	$\rho$	0,8626	0,8626	0,8474	0,8484	0,8091	0,8097

$\eta$  [mPa · s],  $\nu$  [mm<sup>2</sup>/s],  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]

### Vozidlo 3

Číslo vzorku	Měřená veličina	15 °C		40 °C		100 °C	
1	$\eta$	200,72	201,04	55,381	55,428	9,0977	9,0718
	$\nu$	235,30	235,69	66,062	66,069	11,371	11,332
	$\rho$	0,8530	0,8530	0,8383	0,8389	0,8001	0,8006
2	$\eta$	246,03	251,04	67,343	67,523	10,191	10,175
	$\nu$	287,03	292,55	79,885	80,178	12,662	12,623
	$\rho$	0,8572	0,8581	0,8430	0,8422	0,8049	0,8061
3	$\eta$	249,91	250,79	69,928	69,967	10,291	10,278
	$\nu$	291,19	291,89	82,817	82,780	12,769	12,743
	$\rho$	0,8582	0,8592	0,8444	0,8452	0,8059	0,8065
4	$\eta$	258,53	260,90	70,378	70,564	10,598	10,560
	$\nu$	300,70	303,24	83,232	83,527	13,114	13,081
	$\rho$	0,8597	0,8604	0,8456	0,8448	0,8081	0,8073
5	$\eta$	273,31	275,19	74,090	74,162	10,833	10,810
	$\nu$	317,04	319,42	87,490	87,478	13,396	13,356
	$\rho$	0,8621	0,8615	0,8468	0,8478	0,8086	0,8094
6	$\eta$	275,46	273,75	73,481	73,670	10,990	10,961
	$\nu$	319,50	317,63	86,758	87,043	13,592	13,553
	$\rho$	0,8622	0,8618	0,8470	0,8464	0,8086	0,8087
7	$\eta$	278,28	280,41	75,584	75,590	11,050	11,031
	$\nu$	322,41	325,08	89,139	89,054	13,647	13,611
	$\rho$	0,8631	0,8626	0,8479	0,8488	0,8097	0,8104
8	$\eta$	282,56	285,07	76,655	76,685	11,186	11,166
	$\nu$	327,17	330,10	90,311	90,257	13,799	13,764
	$\rho$	0,8636	0,8636	0,8488	0,8496	0,8106	0,8113

$\eta$  [mPa · s],  $\nu$  [mm<sup>2</sup>/s],  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]