

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra chemie



Bakalářská práce

Analýza hydraulických olejů stavebních strojů

Vladimír Vlček

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vladimír Vlček

Inženýrství údržby

Název práce

Analýza hydraulických olejů stavebních strojů

Název anglicky

Hydraulic oil analysis of construction machinery

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je na základě analýz vyhodnotit stav opotřebení hydraulických olejů a stanovit doporučení pro provoz.

V teoretické části práce budou vymezeny základní pojmy teorie tření, opotřebení a tribotechnické diagnostiky. Následně budou v praktické části práce vyhodnoceny vzorky olejů stavebních strojů a stanoveny doporučení pro jejich následný provoz.

Výzkumná otázka: Jakým způsobem se vyvíjí koncentrace jednotlivých prvků přítomných v hydraulickém oleji v průběhu výměnného intervalu olejové náplně?

Metodika

- prostudovat základní literaturu, normy, internetové odkazy a další prameny
- provést literární rešerši v oblasti hydraulických olejů a tribotechnické diagnostiky
- provést laboratorní analýzy hydraulických olejů a zpracovat výsledky
- navrhnout doporučení pro následující provoz

Harmonogram

LS 2023 – zpracování teoretických východisek

ZS 2023 – provedení laboratorních analýz a zpracování dat

LS 2024 – odevzdání bakalářské práce

Doporučený rozsah práce

30 stran textu včetně tabulek a obrázků

Klíčová slova

hydraulický olej, tribotechnická diagnostika, částice opotřebení, optický emisní spektrometr, stavební stroj

Doporučené zdroje informací

- ALIMOVA, Z., et al. Ways to improve the performance of hydraulic oils for agricultural machinery. *Industrial Technology and Engineering*, 2020, 3.36: 17-22.
- BARON, Petr; KOČÍŠKO, Marek; PANDA, Anton. Tribotechnical diagnostics. In: *Application of Troubleshooting Tools in the Monitored Production Processes*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 95-111.
- FOX, Malcolm F. *Chemistry and technology of lubricants*. Dordrecht: Springer, 2010.
- KUBEN, J., et al. Modelling of oil tribotechnical data. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 012032.
- MANG, Theo; DRESEL, Wilfried (ed.). *Lubricants and lubrication*. John Wiley & Sons, 2007.
- TOTTEN, George E. *Handbook of hydraulic fluid technology*. CRC press, 2011.
- VACCA, Andrea; FRANZONI, Germano. *Hydraulic fluid power: fundamentals, applications, and circuit design*. John Wiley & Sons, 2021.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Vladimír Hönig, Ph.D. et Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra chemie

Elektronicky schváleno dne 8. 11. 2023

Ing. Matyáš Orsák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 12. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 16. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Analýza hydraulických olejů stavebních strojů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Vladimíru Hönigovi, Ph.D. et Ph.D. za trpělivé a odborné vedení při zpracování bakalářské práce a za řadu věcných poznámek. Velký dík patří i paní Bc. Evě Vogelové za pomoc v oblasti chemického názvosloví a korektury textu.

Analýza hydraulických olejů stavebních strojů

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou hydraulických olejů používaných ve stavebních strojích. Posuzované vzorky pocházely ze čtyř stavebních strojů, dvou kolových nakladačů, jednoho pásového rýpadla a kolového rýpadla-nakladače. Cílem bakalářské práce bylo na základě analýz vyhodnotit stav znečištění hydraulických olejů a stanovit doporučení pro provoz. Podrobně byly rozebrány výsledky obsahu otěrových kovů a ostatních kontaminantů získané pomocí optického emisního spektrometru, a také kódy čistoty vyjádřené dle normy ČSN ISO 4406 získané pomocí čítače částic. Obsahy železa a mědi významně převyšovaly hodnoty obsahu ostatních sledovaných otěrových kovů chromu a hliníku, přičemž byly sledovány i trendy vývoje obsahu křemíku a vápníku. V případě zjištěného vysokého znečištění pomocí automatického čítače částic byly diskutovány možné příčiny vysokých hodnot. Na závěr jsou v několika bodech shrnuta doporučení pro praxi a údržbu.

Klíčová slova: hydraulický olej, tribotechnická diagnostika, částice opotřebení, optický emisní spektrometr, stavební stroj

Hydraulic oil analysis of construction machinery

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of hydraulic oils used in construction machinery. The samples considered were from four construction machines, two wheel loaders, one tracked excavator and a wheeled excavator-loader. The aim of the bachelor thesis was to evaluate the state of contamination of hydraulic oils and to establish recommendations for operation based on the analyses. The results of the content of abrasion metals and other contaminants obtained by means of an optical emission spectrometer, as well as the purity codes expressed according to the ISO 4406 standard obtained by means of a particle counter were analysed in detail. The iron and copper contents were significantly higher than those of the other abrasion metals monitored, chromium and aluminium, while trends in the silicon and calcium contents were also monitored. In the case of high contamination detected by the automatic particle counter, possible reasons for the high values were discussed. Finally, recommendations for practice and maintenance are summarised in a few points.

Keywords: hydraulic oil, tribotechnical diagnostics, wear particles, optical emission spectrometer, construction machine

Obsah

1 Úvod	11
2 Cíl práce	12
3 Teoretická část	13
3.1 Tribologie.....	13
3.1.1 Teorie tření.....	13
3.1.2 Teorie opotřebení.....	15
3.1.3 Mazání.....	18
3.2 Vlastnosti maziv.....	18
3.2.1 Viskozita.....	18
3.2.2 Viskozitní index.....	20
3.2.3 Hustota.....	22
3.3 Hydraulické oleje.....	23
3.3.1 Klasifikace a značení hydraulických kapalin.....	23
3.3.2 Minerální základové oleje.....	25
3.3.3 Syntetické oleje.....	29
3.3.4 Těžkozápalné kapaliny a vodní emulze.....	30
3.3.5 Biologicky odbouratelné hydraulické kapaliny a rostlinné oleje.....	30
3.3.6 Aditivace.....	31
3.4 Hydraulické mechanismy.....	33
3.5 Znečištění hydraulických olejů.....	34
3.6 Diagnostika a sledované parametry hydraulických kapalin.....	35
3.6.1 Barva a vzhled oleje.....	37
3.6.2 Kinematická viskozita při 40 °C.....	37
3.6.3 Stanovení čísla kyselosti.....	38
3.6.4 Koncentrace otěrových kovů.....	38
3.6.5 Celková degradace oleje.....	39
3.6.6 Obsah vody.....	40
3.6.7 Pěnovost.....	41
3.6.8 Stanovení počtu částic.....	41
3.6.9 Ferografická částicová analýza.....	43
4 Metodika	47
4.1 Olej Cat HYDO.....	47
4.2 Sledované stavební stroje.....	48
4.2.1 Kolový nakladač Caterpillar 950 H.....	48
4.2.2 Pásové rýpadlo Caterpillar 323D LN.....	49
4.2.3 Kolový nakladač Caterpillar 962 H.....	50

4.2.4	Rýpadlo-nakladač Caterpillar 428 E2	51
4.3	Měřicí přístroje	52
4.3.1	Spektrometr Spectro SPECTROBLUE.....	52
4.3.2	Čítač částic Spectro LNF Q200	52
4.4	Odběr vzorku.....	53
5	Výsledky a diskuse	55
5.1	Sledování znečištění hydraulického oleje nakladače Cat 950 H.....	55
5.1.1	Obsah otěrových kovů	55
5.1.2	Obsah ostatních prvků.....	57
5.1.3	Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406	59
5.2	Sledování znečištění hydraulického oleje rýpadla Cat 323D LN.....	60
5.2.1	Otěrové kovy	60
5.2.2	Obsah ostatních prvků.....	62
5.2.3	Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406	63
5.3	Sledování znečištění hydraulického oleje nakladače Cat 962 H.....	65
5.3.1	Otěrové kovy	65
5.3.2	Obsah ostatních prvků.....	67
5.3.3	Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406	69
5.4	Sledování znečištění hydraulického oleje rýpadlo-nakladače Cat 428 E.....	70
5.4.1	Otěrové kovy	70
5.4.2	Obsah ostatních prvků.....	72
5.4.3	Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406	73
5.5	Doporučení pro praxi.....	74
6	Závěr.....	75
7	Seznam použitých zdrojů.....	77
8	Přílohy	1

1 Úvod

Znečištění hydraulických olejů zapříčiňuje více než 75 % všech poruch hydraulických mechanismů. (Salisbury 2012) Efektivním způsobem, jak takovým poruchám čelit, je sledování stavu hydraulického oleje použitím vhodných metod tribotechnické diagnostiky (TTD), díky nimž je možné hodnotit i stav strojního zařízení samotného. Prováděné analýzy poskytují aktuální informace o kondici hydraulických kapalin prostřednictvím mnohých ukazatelů, kterými mohou být změna viskozity a hustoty, pokles prvků obsažených v aditivech, nárůst čísla kyselosti, ale především stoupající množství nečistot. Tribotechnická diagnostika je prostředkem preventivní technické diagnostiky, díky níž je možno dosáhnout úspor finančních, materiálních a lidských zdrojů, které by si vyžádaly opravy v případě, že by k poruše došlo.

Poskytnutím základního teoretického přehledu z oblasti tribologie a tribotechnické diagnostiky v teoretické části této práce vzniká prostor pro uvedení praktického vyhodnocení výsledků laboratorních analýz získaných pomocí optické emisní spektrometrie a čítačů mechanických částic znečištění ze vzorků hydraulického oleje. Práce se zaměřuje na znečištění hydraulických olejů používaných ve stavebních strojích amerického výrobce Caterpillar Inc. V pravidelných intervalech přibližně pěti set motohodin byly odebírány vzorky minerálního hydraulického oleje Cat HYDO, který tvořil náplň hydraulických systémů všech zkoumaných strojů tak, jak je doporučováno jejich výrobcem.

Těžištěm praktické části je sledování křivek trendů obsahu otěrových kovů (železa, mědi, chromu a hliníku) a ostatních prvků, které jsou porovnávány s počty částic znečištění vyjádřenými pomocí kódů čistoty ČSN ISO 4406. Při interpretaci výsledků je upřena pozornost primárně na probíhající trend obsahu kontaminantu než na samotné hodnoty obsahu znečišťujících a otěrových prvků. Vzhledem k rozdílným podmínkám, v nichž nejen stavební stroje pracují, je z dlouhodobého hlediska dobré sledovat výsledky analýz strojů pracujících v podobných či stejných podmínkách a pracovním režimu, aby bylo možné určit normální, zvýšené, mezní a havarijní hodnoty míry opotřebení nebo jiného znečištění.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je na základě analýz vyhodnotit stav znečištění hydraulických olejů a stanovit doporučení pro provoz.

V teoretické části práce budou vymezeny základní pojmy teorie tření, opotřebení a tribotechnické diagnostiky.

Následně budou v praktické části vyhodnoceny vzorky olejů stavebních strojů a stanoveny doporučení pro jejich následný provoz.

3 Teoretická část

3.1 Tribologie

Tribologie je vědní obor zabývající se studiem, shromažďováním, aplikací a rozvojem informací o tzv. tribologických uzlech. Jinými slovy jde o vědu popisující chování dotýkajících se třecích ploch, u nichž lze zaznamenat pokus o vzájemný pohyb. (Helebrant et al. 2001; Torbacke et al. 2014) Definice termínu tribologie je mnoho, veskrze se jedná o obdobná znění.

Tribologie pracuje s pojmy tření, opotřebení a mazání, studiem těchto jevů poskytuje cenné informace pro další technické a přírodovědné obory, mezi které patří například:

- **Tribotechnika:** věda aplikující poznatky a tribologické zásady do konstrukce strojních zařízení.
- **Tribofyzika:** hodnotí a popisuje fyzikální hlediska vzájemného ovlivňování třecích ploch.
- **Tribochemie:** popisuje chemické interakce mezi médiem a kontaktními plochami.
- **Tribobiologie:** komplexní a multioborové studium tribologických systémů přítomných v živé přírodě. Aplikuje se na biomedicínské inženýrské obory a protetiku (umělé klouby).
- **Tribodiagnostika:** získává informace z maziva a na základě vyhodnocení výsledků věcně určuje technický stav stroje a stupeň opotřebení.

Výsledky a data získaná studiem tribologických systémů mají široký technologický a ekonomický význam. Nevhodná volba třecích materiálů, nedostatečné mazání a zanedbávání vybraných tribologických skutečností způsobuje ztráty až 30 % vyrobené energie. Naopak správné uplatňování tribologických a tribotechnických poznatků přináší vyšší spolehlivost, menší poruchovost, menší ztráty a v neposlední řadě i kladné ovlivnění ekologických aspektů hodnocení technických zařízení. (Helebrant et al. 2001)

3.1.1 Teorie tření

Tření lze popsat jako projev odporu proti relativnímu pohybu dvou těles nebo těles a látek, které proudí v kontaktu s nimi. (Bruce 2012) V dávných historických dobách v případě manipulace s těžkými břemeny, kterými byly například kamenné kvádry při stavbě

egyptských pyramid nebo britské menhiry u Stonehenge, působilo tření jistě velké potíže, jsou-li opominuty dänikenovské mimozemské teorie o jejich vzniku. Nicméně i mimozemské civilizace by se zde na planetě Zemi s účinky třecích sil musely vypořádat. Velkým skokem byl pak vynález kola, tedy výměna smykového tření za valivý odpor, který dodal dynamiku vývoji stavebních prací, umožnil snadnější zprostředkování obchodních cest a urychlil tak kulturní vývoj naší civilizace. Tření představuje překážku z pohledu energetických a materiálních ztrát. Ovšem v některých aplikacích je jevem nenahraditelným, jako je tomu u spojek, brzd, třecích převodů, pneumatik dopravních prostředků a v mnohých dalších technických aplikacích. (Bečka 1997)

Přítomnost tření lze v praxi odhalit poměrně snadno díky vnějším projevům doprovázející tuto skutečnost. Jsou to třecí síly a momenty, přeměna mechanické energie na teplo a opotřebení. Tyto projevy lze však ovlivnit vnějšími technickými zásahy, mezi něž patří dokonalejší obrobení třecích ploch, použití speciálních dokončovacích operací úpravy povrchu, ale primárně přivedením maziva. (Bruce 2012; Bečka 1997)

Za energetické ztráty a s nimi spojené potíže jsou zodpovědné dva hlavní faktory, někdy nazývané jako složky tření. Zatímco jeden z těchto faktorů působí v relativně tenkém rozhraní mezi dvěma materiály, druhý zahrnuje energetické ztráty vznikající na rozměrově mnohem výraznějších částech povrchu materiálu. Prvním zmíněným faktorem je adheze, tedy přilnavost materiálu vytvářením mikroskopických svarových spojů a druhým je deformační složka tření. (Glaeser 2012) Deformační složka tření je primárně zodpovědná za „vyhlazování“ povrchu materiálu například při záběhu některých strojních součástí. Tribotechnickou optikou lze jednotlivé druhy tření rozdělit na tři základní, kterými jsou:

- Suché tření: dochází k absolutnímu dotyku suchých povrchů součástí (koeficient tření $\mu > 0,3$).
- Smíšené tření: mezi oběma povrchy je přítomno mazivo, k dotyku dochází pouze mezi výstupky obou třecích ploch, smíšenému tření předchází tření hraniční, je tak mezistupněm mezi třením suchým a smíšeným. Snižuje tření, ale nezabraňuje kontaktu kluzných ploch ($0,1 < \mu < 0,3$).
- Kapalínové tření: oba povrchy odděluje vrstva přiváděného maziva, k otěru nedochází. ($0,01 < \mu < 0,05$). (Hromádko et al. 2011; Grebenišan et al. 2018)

3.1.2 Teorie opotřebení

V tribologickém systému je opotřebení jedním z projevů přítomnosti tření. Opotřebení lze chápat jako trvalý ubytok materiálu z povrchu vzájemně pohybujících se těles nebo při pohybu médií, která se účastní tribologických procesů. Při vzájemném kontaktu plošek či výčnělků na povrchu jednotlivých součástí dochází k plastickým a elastickým deformacím, úbytku oxidačních vrstev a vzniku mikrosvarových spojů, jejichž usmýkáváním dochází k přenosu materiálu z jedné součásti na druhou a případnému uvolňování těchto částic opotřebení do okolního média, kterým často bývá mazivo. (Glaeser 2012)

Termíny, názvosloví a definice týkající se problematiky opotřebení byly dříve popsány v normě ČSN 01 5050, která ovšem byla zrušena. Nicméně se jedná o terminologii vžitou a v české odborné literatuře hojně užívanou.

Nejen mechanické vzájemné působení těles ale i chemické a elektrické účinky doprovázejí vznik opotřebení. Dle mechanismu vzniku opotřebení a specifických znaků doprovázejících popisované jevy lze opotřebení rozdělit do několika kategorií: (Bečka 1997)

- adhezivní;
- abrazivní;
- erozivní;
- únavové;
- kavitační;
- vibrační.

Adhezivní opotřebení je způsobeno vznikem mikrosvarů mezi vzájemně se pohybujícími tělesy. Tyto spoje vznikají po narušení vrchních oxidačních a adsorpčních vrstev, kdy dochází k přímému kontaktu mezi dvěma základovými materiály v místech nerovností a výstupků za působení normálových přitlačných sil. V případě přivedení tečného napětí do takového systému dochází k porušení mikrosvaru a přenesení materiálu na povrch druhého tělesa z třecí dvojice nebo k jeho uvolnění v podobě tvrdého znečištění do okolního prostředí. Důležitým faktorem je v těchto případech přivádění maziva mezi třecí plochy, neboť podmínky pro vznik mikrosvarů se v přítomnosti maziv zhoršují. V pokročilejších stádiích adhezivního opotřebení může docházet k jevu nazývanému zadírání. (Bečka 1997)

Při **abrazivním opotřebením** dochází k rozrývání a rozřezávání měkčího povrchu tělesa hrubším a tvrdším povrchem tělesa druhého. Výstupky tvrdšího povrchu vnikají do měkčího materiálu a prakticky obrábí tento povrch. Často dochází k utržení takto vzniklých částic (třísek) a jejich uvolnění do okolního prostoru. Obdobná situace nastává, když mezi dva pohybující se povrchy vniknou tvrdé částice a působí tak jako přivedené abrazivum. V některé literatuře (Bheemappa et al. 2023) je proto abrazivní opotřebením rozděleno na *two-body abrasive wear*, neboli opotřebením dvou těles a *three-body abrasive wear*, tedy případ, kdy jsou mezi povrchy obou částí rozptýleny drobné tvrdé částice. Pro povrchy abrazivně opotřebených součástí je typické rýhování. (Bečka 1997) Charakteristickým příkladem abrazivního opotřebením jsou části zemědělských a stavebních strojů, které jsou v přímém kontaktu s půdou. Mezi tyto patří orební tělesa, lžice a zuby bagrů, pásy podvozků stavebních strojů a mnoho dalších strojních součástí.

Erozivní opotřebením je způsobeno částicemi nesenými proudem plynu či kapaliny, anebo v jistých případech samotným prouděním média. Pro povrch opotřebovaný tímto otryskáváním je typické nerovnoměrné opotřebením a zvlněním míst, kde působí erozivní opotřebením. (Bečka 1997) V hydraulických systémech dochází k erozivnímu opotřebením v přítomnosti tvrdých částic o velikostech menších než 2 μm . Tyto částice ovšem prakticky nejsou filtrovatelné. (MAC Hydraulics 2017)

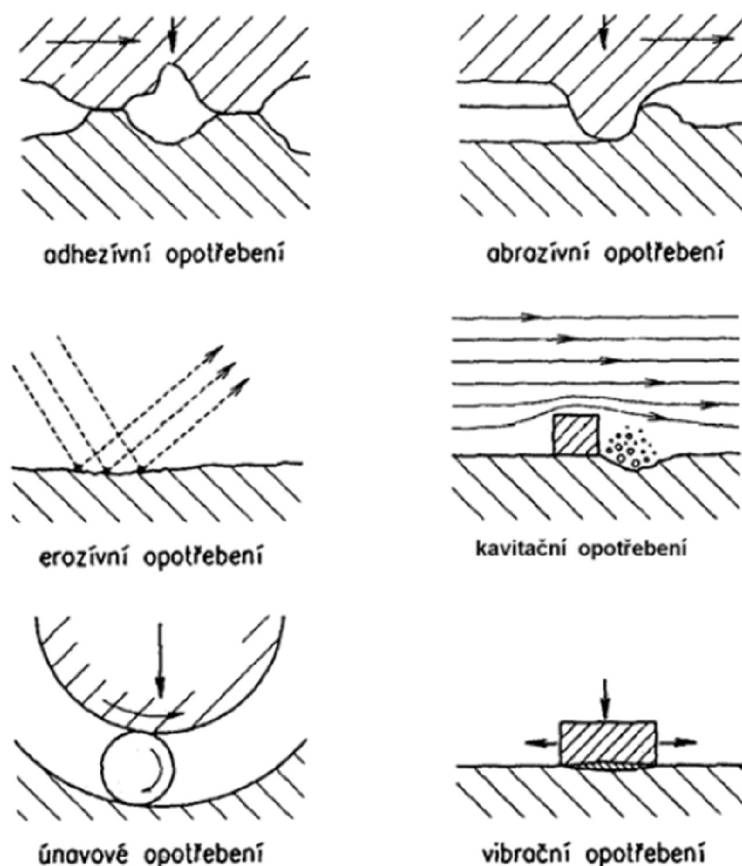
Specifickým druhem opotřebením, s nímž se setkáváme u tekutinových mechanismů, ať už jde o mechanismy hydrostatické či hydrodynamické, je **kavitační opotřebením**. Kavitací se rozumí děj, při němž v místech s tlakem nižším, než je tlak nasycených par při dané teplotě, vznikají kavitační bubliny. Hydrodynamické rázy doprovázející zánik těchto bublin způsobují oddělování částic materiálu a poškozují povrch součástí. (Bečka 1997) U hydraulických mechanismů dochází ke vzniku bublin v místech s náhlými změnami tlaků. Mezi takové patří řídicí prvky a rozvaděče, sací větve čerpadel a všechna místa, kde proud kapaliny mění náhle svůj směr a kde dochází ke změně průřezu potrubní trasy. (Noria Corporation a Ernest C. Fitch [b.r.]

Únavové opotřebením vzniká při opakovaném a dlouhodobém namáhání povrchu součástí. Typickým znakem při tomto druhu opotřebením je vznik trhlinek, které se s opakovaným namáháním šíří a později dochází k oddělování pevných částic. V takovém případě může být problémem i přivádění maziva, neboť pak dochází ke zvyšování tlaku

uvnitř trhlinek a tím ke zvětšení jejich namáhání. Důlky a dolíčky vzniklé vypadáváním částic z povrchu daly vzniknout termínu dolíčkování, anglicky pitting. (Bečka 1997)

S **vibračním opotřebením** se setkáváme v systémech, kde spolu s normálovým zatížením působí také vibrace způsobující pružné deformace. Typickým příkladem takto často zasažených součástí jsou hřídele s nalisovanými náboji. Vibračně uvolněné částice se do jisté míry vzhledově podobají částicím vzniklým korozním poškozením. (Helebrant et al. 2001; Bečka 1997)

Všechny druhy opotřebení působí v praxi nejčastěji v kombinaci několika z nich a jeden může iniciovat vznik dalšího opotřebení. Například při překročení meze únavy dochází k uvolňování tvrdých částic z povrchu opotřebované součásti a tyto částice nadále prohlubují vliv abrazivního opotřebení. Největší dopad na vznik abrazivního opotřebení má tvrdost pevných částic. Různé druhy opotřebení jsou zobrazeny na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Základní druhy opotřebení (Helebrant et al. 2001)

3.1.3 Mazání

Mazáním využíváme specifických vlastností používaných maziv, jejichž úlohou je zabránit bezprostřednímu kontaktu vzájemně se pohybujících povrchů součástí, a tak zmenšit tření a mírnit míru opotřebení tribologického systému. Termín tribologický systém definuje norma DIN 51 320 jako soustavu dvou třecích těles, mezilátky a okolí. (Helebrant et al. 2001) Jako maziva se pak označují mezilátky, které jsou mezi třecí tělesa vpravovány záměrně. Nutno podotknout, že maziva jsou rovnocennou částí tribologického systému. Z technického pohledu splňují veškeré náležitosti k tomu, aby byla pokládána i za plnohodnotné součásti strojních celků. Dalším úkolem maziv je odvod tepla za účelem chlazení, odstraňování nečistot, dotěšňování mazaných ploch, ochrana před korozí a v případě hydraulických mechanismů slouží jako médium pro přenos sil a tlaků. (Bečka 1997)

3.2 Vlastnosti maziv

Aby maziva vykonávala svou funkci bezchybně, musí disponovat specifickými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které do jisté míry předurčují jejich následné použití. Na většinu z těchto vlastností má vliv řada faktorů, kterými jsou například teplota, tlak, působení vzdušného kyslíku, různé druhy záření, vlhkost a další. Některé klíčové funkční vlastnosti maziv jsou popsány v následujících podkapitolách. (Helebrant et al. 2001)

3.2.1 Viskozita

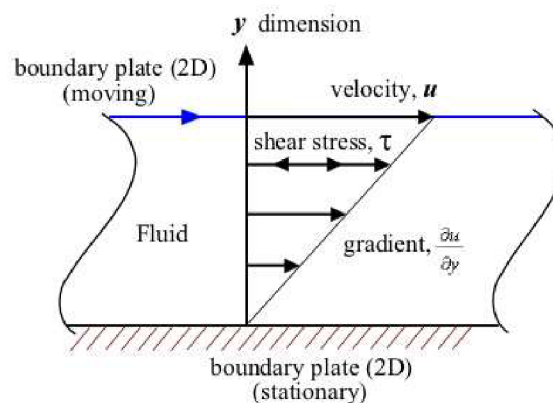
Viskozita se řadí k nejdůležitějším a také nejzmiňovanějším funkčním vlastnostem maziv a olejů. Popsat ji lze jako obecné měřítko tekutosti kapalin, odpor proti tečení nebo odpor proti silám posouvající nejmenší částice kapalin o hodnoty vzdálenosti, odborněji pak jako míru vnitřního tření, které vzniká mezi jednotlivými vrstvami proudící kapaliny. Oleje s nižší viskozitou se jeví jako tekutější s menším vnitřním odporem proti proudění. Naopak oleje s vyšší hodnotou viskozity tečou pomaleji a vykazují větší míru vnitřního tření.

Mezi jednotlivými vrstvami proudící kapaliny tedy působí třecí síly, které zapříčiňují, že vrstvy s vyšší okamžitou rychlostí zrychlují vrstvy pomalejší, ty ovšem zpomalují vrstvy rychlejší. Považujeme-li proudění kapaliny za laminární, pak z Newtonova zákona viskozity vyplývá, že smykové napětí τ [Pa] je přímo úměrné gradientu rychlosti du/dy [s^{-1}], někdy

nazývanému smykový spád D , kde du je rychlost vzájemně se pohybujících vrstev vzdálených od sebe o rozměr dy . (Helebrant et al. 2001; EKOLUBE s.r.o. a Černý [b.r.]

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} = \eta \cdot D \quad (3.1)$$

η -dynamická viskozita [Pa · s]



Obrázek 3.2 Viskozita (Deriánová et al. [b.r.]

Dynamická viskozita

Z výše uvedené rovnice vyplývá, že dynamická viskozita je vlastně koeficient vnitřního tření kapaliny. Ve znění rovnice je konstantou nezávislou na velikosti tečného napětí a rychlostním gradientu a jedná se tak o charakteristickou vlastnost daného druhu kapaliny. (e-learning.vscht.cz [b.r.] Významným faktorem ovlivňujícím dynamickou viskozitu je teplota, hodnoty viskozity klesají s rostoucí teplotou. Standardně se pro určení hodnot dynamické viskozity používají jednotky Pascal sekundy [Pa.s], mezi starší jednotky používané v evropské literatuře se řadí stupeň Englera [°E], Sayboldovy sekundy [SSU] v USA. Často užívanou jednotkou je také Poise [P]. Pro přepočítání platí rovnost: 1P = 10⁻¹ Pa.s. (Totten et al. 2011)

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (3.2)$$

Kinematická viskozita

Kinematickou viskozitu lze jednoduše popsat jako podíl dynamické viskozity ku hustotě sledované látky. Nejpoužívanějšími jednotkami jsou milimetry čtverečné za sekundu [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], v soustavě CGS (centimetr-gram-sekunda) pak Stokes a Centistokes [St, cSt]. (Totten et al. 2011) Matematický vztah pro výpočet kinematické viskozity ν [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] je uveden v rovnici (3.3), kde η [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] je dynamická viskozita a ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.3)$$

3.2.2 Viskozitní index

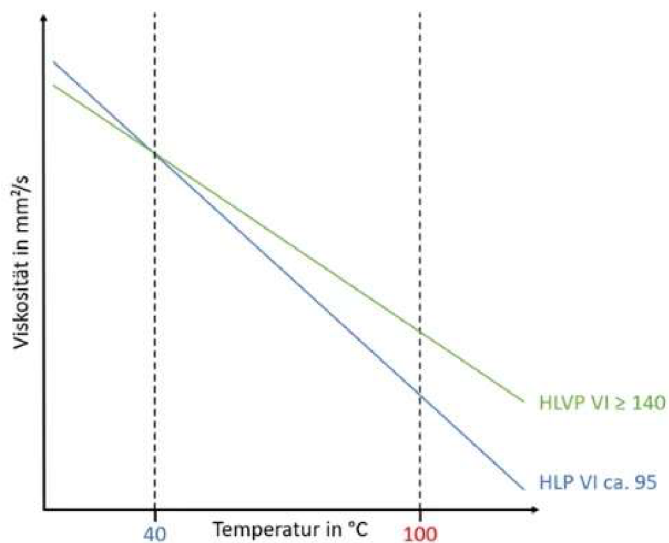
Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, existuje řada faktorů, které přímo ovlivňují některé fyzikální vlastnosti maziv. Jedním z příkladů takových vztahů je závislost viskozity na teplotě. Obecně platí, že s rostoucí teplotou viskozita klesá a naopak, ovšem u různých druhů kapalin se změny viskozity projevují odlišně. Tyto viskozitně-teplotní vlastnosti maziva popisuje viskozitní index, který je označován značkou *VI*. Jedná se o poměrné číslo popisující náchylnost maziva ke snižování viskozity se změnou teploty. (Khalafvandi et al. 2022) Klíčovou úlohu hraje viskozita při tvorbě mazacího filmu, při snížení viskozity dochází k úbytkům maziva na povrchu kluzných ploch a zvyšuje se tím míra tření a opotřebení. (Zakarian 2012) Příklady typických viskozitních indexů uvádí tabulka 3.1.

Tabulka 3.1 Porovnání viskozitních indexů (Neale 2000)

Typ oleje	Viskózní index
Minerální olej	80-120
Minerální olej hydrokrakovaný	120-140
Polyalfaolefiny	135-160
Syntetické estery	140-190
Glykol	200-220

Formulování matematického vzorce (3.4) pro výpočet viskozitního indexu přišlo na konci dvacátých let minulého století. (Totten et al. 2011) Referenční kapaliny byly rozděleny do skupin L (lower lubricating quality) a H (higher lubricating quality). Výpočet porovnává zkoumaný olej se dvěma referenčními kapalinami (Zakarian 2012), hodnota s indexem L je kinematičká viskozita oleje ze skupiny L při 40 °C s hodnotou $VI = 0$, kde kinematičká viskozita při 100 °C je shodná s viskozitou zkoumaného oleje při dané teplotě. Ve vzorci (3.4) figurující hodnota s indexem H jest kinematičká viskozita referenčního oleje ze skupiny H při 40 °C s $VI = 100$, přičemž kinematičká viskozita při 100 °C je shodná se zkoumaným olejem.

Významnou teplotou, při níž je měřena kinematičká viskozita, je 40 °C. Naměřená hodnota viskozity při této teplotě se udává jako značení ISO VG, v České republice upravováno normou ČSN 65 6601.



Obrázek 3.3 Viskozitní index (ADDINOL Lube Oil GmbH [b.r.])

$$VI = \frac{v_L - v_U}{v_L - v_H} \cdot 100 \quad (3.4)$$

3.2.3 Hustota

Hustota, někdy nazývána měrná hmotnost, vyjadřuje hmotnost objemové jednotky dané látky při určité teplotě. (Helebrant et al. 2001) Známý matematický vztah (3.5) níže, kde ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je hustota, m je hmotnost [kg] a V [m^3] značí objem.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

Relativní hustota

Relativní hustota d vyjadřuje poměr mezi hustotou měřené látky ku hustotě látky srovnávací při teplotách t_1 (teplota měřené látky) a t_2 (teplota látky porovnávací), přičemž tyto teploty mohou být stejné. (Helebrant et al. 2001) V oblasti petrochemie a tribologie je srovnávací látkou nejčastěji voda. Výpočet se provádí dle vztahu (3.6).

$$d_{t_2}^{t_1} = \frac{\rho_{1t_1}}{\rho_{2t_2}} \quad (3.6)$$

API Gravity

Hodnota API Gravity byla vyvinuta pro určování hustoty, resp. měrné hmotnosti ropy, a jejímu rozdělování na lehkou, středně těžkou a těžkou. Jednotkou je stupeň API [$^\circ$] a pro výpočet se užívá matematický vztah (3.7). (Helebrant et al. 2001)

$$\circ API = \frac{141,5}{d_{vody}^{oleje}} - 131,5 \quad (3.7)$$

3.3 Hydraulické oleje

V hydraulických systémech je jako médium sloužící pro přenos síly a tlaku užívána kapalina. Oproti systémům pneumatickým mohou hydraulické mechanismy vyvíjet větší síly, proto jsou často používané jako pohony pro tvářecí, stavební, těžební a zemědělské stroje. Velké síly a tlaky v hydraulických mechanismech jsou dosaženy díky teoretické nestlačitelnosti oleje. (Pavlok et al. 2007)

Velmi často se zde setkáváme s oleji ropného původu, které jsou nazývány jako minerální oleje. Méně časté jsou poté oleje syntetické a vodní emulze. Základové oleje jsou následně vhodně míseny a doplněny o přídavné látky, tzv. aditiva, zlepšující jejich vlastnosti. Výsledná směs základových olejů a aditiv může být považována za finální produkt, tedy hydraulický olej. (Pavlok 1999)

3.3.1 Klasifikace a značení hydraulických kapalin

Klasifikaci hydraulických olejů se rozumí jejich rozdělení dle určitých kritérií do jasně vymezených tříd. V případě klasifikace a od ní odvislého značení hydraulických kapalin často mluvíme o klasifikaci výkonové a viskozitní. Viskozita je pro maziva obecně velmi důležitou veličinou. Výkonová klasifikace zase specifikuje hydraulické kapaliny z hlediska jejich složení a použití. Klasifikace a značení hydraulických kapalin jsou vždy řízeny normou, která specifikuje kritéria pro jejich rozdělení. (Pavlok et al. 2007; EKOLUBE s.r.o. [b.r.])

Výkonová klasifikace dle ISO 6743

Výkonová klasifikace je řízena normou ISO 6743. Norma popisuje způsob značení hydraulických kapalin, příklady použití, základní složení a vlastnosti a případné poznámky k používání specifických druhů kapalin. V tabulce 3.2 jsou uvedeny způsoby značení minerálních hydraulických olejů dle ISO 6743 a uvedeno je i ekvivalentní značení dle DIN 51524. Kapaliny se sníženou hořlavostí a ekologicky odbouratelné jsou uvedeny v tabulkách v přílohách I a II.

Tabulka 3.2 Minerální (ekologicky nešetrné) oleje, Zdroj dat: (EKOLUBE s.r.o. [b.r.]

Minerální (ekologicky nešetrné) oleje dle ISO 6743/4 a DIN 51524			
ISO	DIN	Složení a vlastnosti	Použití
HH	H	Rafinovaný ropný olej bez aditiv	Starší systémy (-10 až +90 °C)
HL	HL	Rafinovaný ropný olej se zlepšenou odolností proti oxidaci a korozi	Hydrostatické pohony s požadavky na dobrou separaci vody (-10 až +90 °C)
HM	HLP	Oleje HL s aditivami snižujícími opotřebení	Hydraulické systémy se silně zatíženými součástmi (-20 až +90 °C)
HR	-	Oleje HL s přísadou pro zlepšení teplotně-viskozitních vlastností	Širší rozsah pracovních teplot než oleje HL (-30 až +120 °C)
HV	HVLP	Oleje HM s přísadou pro zlepšení teplotně-viskozitních vlastností	Hydrostatické pohony nejen stavebních strojů (-35 až +120 °C)
HG	-	Oleje HM s přísadou proti jevu „stick-slip“	Stroje kombinující hydraulický pohon a kluzné mazání (-35 až +120 °C)
-	HLDO	Oleje HM s detergenty a disperganty	Hydraulické systémy s velkým tepelným zatížením
HS		Syntetické kapaliny bez zvláštní odolnosti proti hoření	Speciální použití pro hydrostatické pohony

V následujících kapitolách budou zvlášť popsány základové oleje minerální, syntetické (do nichž jsou zahrnuty i oleje ekologicky odbouratelné a oleje rostlinného původu) a zvlášť i emulze, tedy kapaliny se sníženou hořlavostí.

3.3.2 Minerální základové oleje

Rozdělíme-li oleje na dvě základní kategorie, tedy minerální a syntetické, obě tyto skupiny vykazují z hlediska svého použití a výroby jistá specifika. Stále platí, že většinu průmyslových olejů tvoří právě minerální oleje. Poskytují řadu výhod, mezi které se řadí: dostupnost, poměrně nízká cena, dobrá mazivost, vyhovující viskozitní a viskozitně-tlakové charakteristiky. Dále pak disponují dobrými antikorozními vlastnostmi a nezpůsobují degradaci těsnění. Jedná se ovšem o kapaliny hořlavé a jako většina ropných produktů jsou v případě úniku do vody nebo půdy nebezpečné pro svoji ekotoxicitu. V případě překročení teplotních mezí se jejich viskozitně-tepelné vlastnosti zhoršují.

Ropa

Vstupní surovinou pro výrobu minerálních olejů je ropa. Jedná se o kapalnou směs tvořenou převážně uhlovodíkovými řetězci, organickými sloučeninami a minoritní část pak zastupují anorganické prvky a voda. Jednotlivé chemické složky se vyskytují ve třech základních skupenstvích, tedy pevném, kapalném a plynném. (Blažek a Rábl 2006) Podrobnosti jsou součástí přílohy III.

Složení minerálních olejů

Dle charakteru převažující skupiny uhlovodíků v minerálních olejích lze tyto rozdělit do skupin, jejichž název napovídá, která složka je v daném oleji dominantní. Jsou to základové oleje parafinové, naftenové a aromatické. **Oleje parafinové** obsahují 45 % až 60 % n-alkanů, tedy uhlovodíků s jednoduchými vazbami mezi atomy uhlíku. Cykloalkany neboli nafteny, jsou typickou skupinou obsaženou v **olejích naftenových** s obsahem mezi 65 % až 70 % těchto nasycených uhlovodíků a jsou-li aromáty obsaženy v koncentracích 20 % až 25 %, hovoříme o **olejích aromatických**. Dalšími složkami minerálních olejů jsou cyklické a heterocyklické sloučeniny dusíku, síry, kyslíku a dále amidy a aldehydy. (Totten et al. 2011)

Výroba minerálních olejů

Proces a technologie výroby minerálních základových olejů sestává z několika po sobě jdoucích operací. Přípravnou operací pro následné zpracování je proces **odsolování** ropy, tedy odstranění anorganických solí, které se v surové ropě běžně vyskytují hlavně jako sírany a chloridy sodíku, vápníku a hořčíku. Odsolení je nutno provést nejen z důvodu správného chemického složení výsledného produktu, ale také proto, aby nedocházelo k usazování solí např. na teplosměnných plochách výměníků, což by mělo za následek snížení jejich funkčnosti a proces by si vyžadoval častější odstávky s ohledem na čištění a údržbu. Soli dále podporují korozi technologického zařízení, snižují účinnost některých katalyzátorů apod. Následuje přehřev nejčastěji v trubkových pecích na teplotu ~ 350 °C. Ohřívacím médiem je nejčastěji pára. (Blažek a Rábl 2006)

Následuje proces nazývaný **atmosférická destilace**. Strojní technologické zařízení pro destilaci se nazývá destilační kolona a v případě atmosférické destilace je uvnitř kolony tlak blízký atmosférickému tlaku p_{amb} . Zde se ropa rozděluje na frakce, odtud je také znám výraz frakční destilace. Na jednotlivých patrech kolony dochází ke kondenzaci plynných fází na kapalnou. Z nejnižších pater jsou odebírány meziprodukty s největší molekulovou hmotností a s nejdelšími řetězci uhlovodíků. Z vyšších pater vystupují postupně topné oleje, naftové frakce, petrolej, benziny a z hlavy kolony pak ropný plyn C_1 až C_4 . V ropném průmyslu jsou často kolony konstruovány s tzv. refluxem, tedy zpětným tokem, což umožňuje dokonalejší rozdělení dílčích frakcí. Pro výrobu olejů je ovšem důležitý mazut, tedy nejtěžší meziprodukt atmosférické destilace, jež vystupuje z paty destilační kolony. (Blažek a Rábl 2006; Totten et al. 2011)

Dalším výrobním krokem je **vakuová destilace** mazutu. Hodnoty absolutních tlaků v destilačních kolonách se v tomto případě pohybují od 1 do 10 kPa a teplota páry vstupující do kolony činí přibližně 450 °C. Snížení tlaku je dosaženo pomocí parních ejektorů, které pracují jako vývěvy. Z části vakuové destilace vystupují lehké, střední a těžké olejové frakce. Z reziduí po vakuové destilaci lze získat vysoce viskózní základový olej pomocí tzv. **odasfaltování** destilačního zbytku, protože tyto vysokovroucí složky by nebyly odděleny ani vakuovou destilací. Rozpouštění olejové části rezidua je realizováno za pomoci zkapalněných lehkých uhlovodíků, nejčastěji propanu, nebo jiných těkavých látek, a zbytkem je živice asphalt (bitumen). (Totten et al. 2011)

Olejové frakce vystupující z kolony prochází dále řadou procesů, které vedou ke zlepšení jejich fyzikálních a následných provozních vlastností. Souhrn těchto úkonů nazýváme **rafinace**, což přeneseně znamená zušlechťování či zlepšování, a stupeň rafinace určuje kvalitu a použití výsledného produktu. Jednou z možností takových rafinačních operací je **extrakce selektivními rozpouštědly**, která napomáhá ke zvýšení viskozitního indexu a zajistí větší oxidační stabilitu oleje. Spočívá v odstranění aromatických a jiných nežádoucích sloučenin, kterými jsou např. naftenické látky. Nejpoužívanějšími rozpouštědly jsou fenol a furfural. V praxi je možno použít i další organická rozpouštědla, z nichž je ovšem právě furfural používán nejhojněji. (Hsu a Robinson 2017)

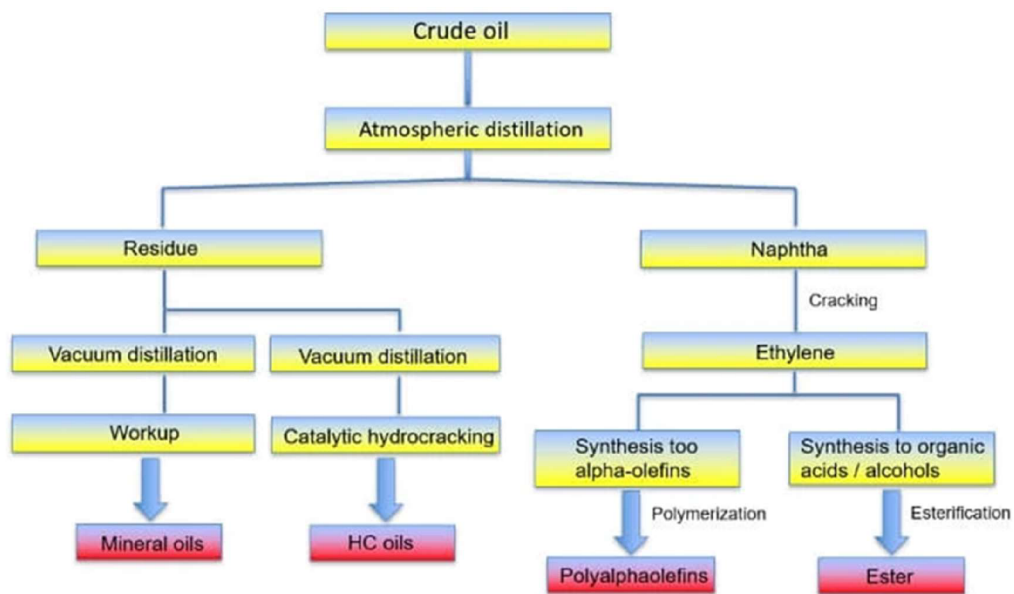
Se zvyšující se cenou rozpouštědel a rozvíjející se technologií rafinování je dnes pro zlepšení vlastností olejů užíváno procesu **hydrokrakování**. Proces hydrokrakování zvyšuje obsah alkanových řetězců a redukuje procento aromátů a cykloalkanů (naftenů). Spočívá v zahřátí směsi základového oleje a vodíku na přibližně 370 °C při tlaku až 20 MPa za přítomnosti nejrůznějších katalyzátorů. Procesem hydrokrakování dochází též k odstranění sirmých a dusíkatých funkčních skupin a má pozitivní vliv na antioxidační odolnost olejů, tepelnou odolnost, viskozitní vlastnosti a konečně i biologickou odbouratelnost. (Hsu a Robinson 2017)

Proces **odparafinování (dewaxing)** odstraňuje ze základového oleje parafiny, které způsobují nežádoucí zvyšování viskozity za nízkých teplot a tím zvyšují kapalinné tření v olejových náplních. Tradiční technologie odparafinování spoléhá na užití rozpouštědel methylethylketonu (butanon) a toluenu, která se míchají do základového oleje, následuje chlazení, odfiltrování parafinického obsahu ze zchlazené směsi a na konec odstranění rozpouštědel z odparafinovaného základového oleje. (Blažek a Rábl 2006; Totten et al. 2011)

Ke konečnému odstranění polárních sloučenin z oleje je ve většině rafinérských závodů používán **hydrofinishing (hydrorafinování)** a je finální částí celého procesu výroby kvalitních základových olejů. Vede ke zlepšení oxidačních vlastností, brání tmavnutí oleje a tvorbě kalů, laků a úsad v olejových náplních. (Lee et al. 2017). Jednoduché schéma využití ropných produktů je zobrazeno na obrázku 3.4.

Na základě chemického složení, původu a stupně chemické úpravy oleje byla Americkým ústavem pro ropu API (American Petroleum Institute) na začátku devadesátých

let 20. století vytvořena klasifikace skupin základových olejů. Skupin je celkem pět, přičemž první tři jsou určeny pro oleje minerální, zbylé dvě pak zahrnují oleje syntetické. Označují se zpravidla římskými písmeny I až V. Údaje definující každou skupinu jsou: procentuální obsah síry, obsah nasycených uhlovodíků a viskozitní index VI. Předtím, než jsou oleje obohaceny o aditiva, je možno zařadit každý základový olej do jedné nebo více skupin dle klasifikace API.



Obrázek 3.4 Využití ropných produktů (ADDINOL Lube Oil GmbH [b.r.])

Základní skupiny základových olejů dle API zobrazuje tabulka 3.3.

Tabulka 3.3 Skupiny základových olejů dle API, Zdroj dat: (Bruce 2012)

Kategorie	Obsah síry (% hm.)		Nasycené uhlovodíky (% hm.)	Viskozitní index	Zpracování
Skupina I	>0,03	a/nebo	<90	80-120	rozpouštědlové rafinování
Skupina II	≤0,03	a	>90	80-120	hydrokakování
Skupina III	<0,03	a	>90	>120	hydrokakování
Skupina IV			Všechny polyalfaolefíny (PAO)		
Skupina V			Různé		

3.3.3 Syntetické oleje

I přes stoupající kvalitu a zlepšování jakosti minerálních olejů díky pokročilé rafinaci a následné aditivaci nacházejí v některých případech uplatnění tzv. syntetické oleje, tedy kapaliny, jejichž vstupní surovinou není přímo ropa, nýbrž jiná chemická surovina, která ovšem může mít a zpravidla má ropný původ. Přednosti syntetických olejů spočívají v lepší oxidační stabilitě, teplotně výkonnostních parametrech a velmi obecně i v lepší biologické odbouratelnosti a menší hořlavosti, což může být v některých případech velmi důležitý faktor. Obecně je nehořlavost v odborné literatuře často zmiňována jako výhoda syntetických kapalin. Nevýhodou bývá vyšší cena a u jistých druhů syntetických olejů byla zjištěna nesnášenlivost s těsnícími materiály. V některých případech je výhodné zkombinovat vlastnosti minerálních a syntetických olejů namícháním ideální směsi, je-li to možné, pak hovoříme o polosyntetických olejích. (Torbacke et al. 2014b; Totten et al. 2011)

Chemické složení je u každého druhu syntetického oleje specifické a nelze nikterak zobecňovat. Mezi syntetickými oleji najdeme kapaliny na bázi polyalkenů (polyolefinů), alkyldaromátů, polyalfaolefinů (PAO), esterů, polyglykolů, polysiloxanů a množství dalších druhů. (Lee et al. 2017; Totten et al. 2011)

Estery polyolů

Hořlavost minerálních olejů způsobila v historii používání hydraulických systémů řadu materiálních škod, bohužel v mnoha případech se požáry neobešly bez ztrát na lidských životech. (Totten et al. 2011) Poptávka po bezpečnějších nehořlavých materiálech vedla k vývoji kapalin založených na esterech polyolů. Krom nehořlavosti disponují rovněž výbornou antioxidační vlastností.

Estery polyolů se vyrábějí prostřednictvím tzv. esterifikace, tedy chemické reakce mezi kyselinou a alkoholem. Mluvíme-li o esterech polyolů, alkoholy vstupující do esterifikačních reakcí mají více než dvě hydroxylové skupiny. Příkladem může být výroba esterů z organických mastných kyselin, jež jsou běžnou složkou rostlinných olejů (řepkový olej) nebo tuků a glycerolu (alkohol propan-1,2,3-triol). (Totten et al. 2011).

Polyalfaolefiny

Polyalfaolefiny (PAO) jsou kapaliny, v jejichž řetězcích se vyskytují pouze atomy uhlíku a vodíku, a dle délky řetězce, stupně rozvětvení a umístění jednotlivých větví můžeme

definovat jejich vlastnosti jako viskozita, viskozitní index a podobné chemicko-fyzikální a výkonnostní vlastnosti. Patří mezi nejdéle používané syntetické uhlovodíkové oleje na trhu a stále si pro své klíčové vlastnosti získávají širokou škálu uplatnění včetně aplikací v hydraulických systémech. (Totten et al. 2011) Nutno podotknout, že podobně jako v jiných případech technického pokroku byl bouřlivý vývoj syntetických olejů zaznamenán během válečných konfliktů od začátku 20. století. Mezi přednosti polyalfaolefinů patří: široká oblast pracovních teplot, snášenlivost s minerálními oleji a konstrukčními materiály, nízká náchylnost k tvorbě úsad atd.

Ačkoli se PAO řadí mezi syntetické oleje, zdrojem pro jejich syntézu jsou parafíny ropného původu, nebo složky pocházející z petrochemického průmyslu. Dobré vysoké i nízkoteplotní vlastnosti vyplývají z velmi pokročilé technologie jejich výroby. (Torbacke et al. 2014)

3.3.4 Těžkozápalmé kapaliny a vodní emulze

Těžkozápalmé (nesprávně též nehořlavé) kapaliny jsou používány v případě, že hydraulický mechanismus pracuje v blízkosti ohně, žhavého kovu či v místech se zvýšeným nebezpečím výbuchu. Taková místa nalezneme v dolech, v hutním a slévárenském průmyslu a v různých specifických pracovních prostředích.

Hořlavost lze ovlivnit vhodným mícháním oleje (minerálního či syntetického) s vodou, tedy vytvořením emulze. Rozdělujeme emulze typu olej ve vodě (HFA), voda v oleji (HFB), vodní roztoky polymerů (HFC) a konečně bezvodé roztoky (HFD), kterými jsou kupříkladu estery kyseliny fosforečné. (Pavlok 1999)

3.3.5 Biologicky odbouratelné hydraulické kapaliny a rostlinné oleje

O škodlivých účincích olejů a kapalin ropného původu na životní prostředí není sporu a tento problém je již řadu let předmětem mnohých diskusí. Velké množství evropských vědeckých studií z minulých let považuje úniky hydraulických kapalin za jeden z hlavních zdrojů znečištění podzemních vod. (Totten et al. 2011) Zvláště v případě těžby dřeva v lesích dochází k častým únikům provozních kapalin z hydraulického aparátu, což má za následek nežádoucí kontakt hydraulických kapalin se životním prostředím. Například Švédsko na základě ekologických požadavků zavedlo normu SS 155434, která stanovuje přísně

podmínky na biologickou odbouratelnost hydraulických kapalin. Kapaliny, které nesplňují kritéria stanovená normou nesmějí být prodávány na švédském trhu. (Paeglis et al. 2009)

Biologickou rozložitelnost lze chápat jako schopnost chemické látky rozložit se za jistý časový úsek a za přítomnosti specifických mikroorganismů na vodu a oxid uhličitý, což jsou v tomto případě finální produkty rozkladu. Stanovení a měření biologické rozložitelnosti upravuje norma ISO 9439, případně pak lze použít normu OECD 301 B jako validní náhradu předešlého mezinárodního standardu. Podstata zkoušky spočívá v měření množství CO₂ vyprodukovaného mikroorganismy (inokulum), přičemž výsledek je udáván nejčastěji v procentech rozloženého množství vzorku. (Paul Farless 2022)

Oleje spadající do skupiny biologicky odbouratelných kapalin mohou mít rostlinou bázi, či syntetickou. Proto jsou také v této práci zařazeny pod syntetické kapaliny. Kapaliny na rostlinné bázi (HETG) mají svůj původ v řepkovém oleji. Mají dobré mazací vlastnosti, vysoký VI, ovšem odolnost proti oxidaci je velmi snižena. Nedoporučují se tedy používat nad teploty 70 °C. Další nevýhodou je hořlavost a poměrně vysoká pořizovací cena. (Torbacke et al. 2014; Pavlok 1999)

Polyglykoly (HEPG) vykazují krom 90% biologické odbouratelnosti také výbornou odolnost proti hoření, jsou-li součástí vodních emulzí. Velmi vysoké hodnoty VI (Sharif et al. 2023) a termooxidační stabilita patří k dalším kladným vlastnostem. Svě uplatnění nachází typicky v lesnictví a zemědělství.

Třetí skupinou ekologicky odbouratelných kapalin jsou kapaliny syntetických esterů (HEES). Vykazují vynikající antioxidační odolnost a velmi dobré nízkoteplotní vlastnosti. Jejich životnost je velmi závislá na teplotě, podobně jako u rostlinných olejů po překročení 70 °C životnost prudce klesá. Vývoj aditiv však tento trend mění. Biologická odbouratelnost se pohybuje okolo 95 %. K biologicky odbouratelným kapalinám řadíme i polyalfaolefiny nerozpustné ve vodě. (Pavlok 1999)

3.3.6 Aditivace

Aditiva jsou chemické látky, které se přidávají do maziv pro ovlivnění jejich parametrů a vlastností. V zásadě mohou plnit tři funkce:

- zlepšují stávající vlastnosti oleje,
- potlačují nežádoucí vlastnosti oleje,
- dodávají nové vlastnosti oleji.

Aditiva rozdělujeme na polární (povrchově aktivní) a nepolární (povrchově neaktivní). Zatímco polární aditiva tvoří díky polaritě svých molekul tenké filmy na površích, tak nepolární aditiva jsou volně rozptýlena v celém objemu olejové náplně.

Je třeba upozornit, že aditiva se zúčastňují chemických dějů v olejích a jsou tak v průběhu času spotřebovávána. Hydraulické oleje běžně obsahují objemově 2 až 10 % aditiv. Mezi nejpoužívanější aditiva hydraulických kapalin se počítají přísady proti stárnutí (antioxidanty), inhibitory koroze, protipěnovací přísady, aditiva zlepšující viskozitně-teplotní vlastnosti apod.

Přísady proti stárnutí

Stárnutí neboli oxidace oleje je jev, při němž dochází k chemickým změnám struktury maziv vlivem působení vzdušného kyslíku, čímž jsou ohrožovány výkonové parametry oleje. Vedlejším projevem probíhající oxidace je vznik kalů a laků, které mohou vést ke vzniku úsad. Aditiva jsou obětována v zájmu zpomalení probíhající oxidace tak, že vstupují do oxidačních dějů a zpomalují je již v iniciační fázi, při vzniku chemických radikálů. Typickými látkami sloužícími jako antioxidanty jsou: dithiofosforečnany zinečnaté (ZDDP), fenolické antioxidanty a aromatické aminy. (Pudelski 2022)

Inhibitory koroze

Inhibitory koroze jsou polární sloučeniny, které ulpívají na kovových površích součástí a tím brání kontaktu s vodou či kyslíkem. Kyslík a voda jsou pro většinu kovů původci oxidace, která vede v rozvoj koroze. Řadí se k nim například různé mastné kyseliny a ZDDP. (Pudelski 2022)

Deaktivátory kovů

Tato skupina aditiv působí proti kovovým částicím rozptýleným v olejové náplni. Funkce spočívá v jejich obalení polárními molekulami aditiva, čímž zabrání jejich kontaktu s vlastním mazivem. Kovy v olejích slouží jako katalyzátory škodlivých degradačních

procesů stárnutí oleje. Jsou to organické komplexy obsahující dusík a síru, aminy a sulfidy. (Pudelski 2022)

Protipěnovostní přísady

Vytváření pěny a bublin udržuje v oleji kyslík, čímž napomáhá zrychlování oxidace. Přítomnost pěny také zvyšuje stlačitelnost oleje čímž snižuje účinnost hydraulického aparátu. Funkce spočívá ve snižování povrchového napětí kapalin vedoucí ke zborcení bublin. Nejčastěji se jedná o organické sloučeniny a polymery obsahující křemík a organické kopolymery. (Pudelski 2022)

Aditiva zlepšující teplotně-viskozitní vlastnosti

Jedná se o specifické organické polymery a kopolymery sloužící k tlumení snížení viskozity s rostoucí teplotou. Zajímavý je princip funkce. Při standardních teplotách jsou tyto organické polymery stočeny do kompaktního útvaru. V případě nárůstu teploty se prodlužují a nabývají na objemu, čímž tvoří jakousi kompozitní výztuž bránící v rychlém tečení. (Wright 2008)

Detergenty

Brání v usazování nečistot na površích součástí a rozpouští případné usazeniny. Mazivo tak lépe přilne k mazaným plochám a vytváří souvislý mazací film. (Cupal 2017) Chemickými reakcemi neutralizují prekurzory vzniku úsad. Jedná se o fosfáty, sulfonáty, organokovové sloučeniny barya, hořčíku a vápníku. (Pudelski 2022)

Disperzanty

Brání usazování nečistot. Částice znečištění obalí molekuly aditiva a udržují je ve vznosu v olejové náplni. Usazování způsobuje ucpávání filtrů. Rozptýlením je zabráněno koncentraci nečistot a usazování. Typickými zástupci jsou polyisobuteny. (Pudelski 2022)

3.4 Hydraulické mechanismy

S hydraulickými mechanismy se je možno setkat v celé řadě aplikací průmyslových a dopravních v podobě statických mechanismů nebo mobilních systémů. I přes skutečnost, že přenos sil probíhá na relativně krátké vzdálenosti, poskytují vysoký stupeň ovladatelnosti, říditelnosti a flexibility. Hydraulické mechanismy plní svou úlohu ve stavebních strojích,

hutním průmyslu, strojním obrábění a lesnické technice. I v oblasti automatizace a robotizace nacházejí tekutinové mechanismy své uplatnění a díky svým vlastnostem budou jistě předmětem zavádění do průmyslu 4.0. (Whitby 2022; Rudoi et al. 2020)

Sestávají z velkého množství komponent. Hydraulická čerpadla, mnohdy nazývána jako hydrogenerátory, přeměňují mechanickou energii na tlakovou potenciální energii kapalin a mohou mít různou konstrukci (čerpadla zubová, axiální pístová, lamelová). Pro distribuci kapaliny a přenos tlaku do celého systému je přítomna sestava trubek a hadic s různou světlostí a konečně hydraulické motory (aktuátory), které konají vlastní pracovní úkony mechanismu, například pohybují lžící nakladače. (Whitby 2022) Typickou podobou hydromotorů jsou hydraulické válce s písty vykonávající přímočarý pohyb, ale výjimkou nejsou ani hydromotory rotační. Rychlosti, tlaky, síly a proudění jsou regulovány řídicími prvky tzv. hydraulickými rozvaděči, a jejich ovládání lze realizovat ručně, mechanicky, elektronicky, pneumaticky i hydraulicky. (Pavlok et al. 2007)

Dalšími součástmi hydraulických obvodů jsou zpětné a pojišťovací ventily, měřicí zařízení pro monitorování tlaku a teploty, kompenzátory, technologie pro filtrování oleje a chladiče s různými chladicími médii. (Whitby 2022; Pavlok et al. 2007)

3.5 Znečištění hydraulických olejů

Znečištění olejů způsobuje okolo 75 % všech poruch hydraulických systémů. (Salisbury 2012) Vzhledem k masovému využívání tekutinových mechanismů ve všech odvětvích průmyslu způsobují takové poruchy nemalé ekonomické ztráty spojené s pozastavením činnosti strojů a dávají vzniknout nákladům na opravy a jejich odstranění. Dále zvyšují rychlost opotřebování jednotlivých komponent. Průměrné roční škody vzniklé opotřebením na strojích jsou ekvivalentní k těm, které by vznikly zničením asi 20 % veškerého strojního zařízení. (Grebenuşan et al. 2018)

Celkové znečištění lze rozdělit na tři kategorie: plynné, kapalné a tuhé (částice měkké a tvrdé). Do plyných nejčastěji řadíme vzduch způsobující tvorbu bublin, a tak i vznik „suchých“ kontaktů mezi povrchy součástí a rozvoj kavitačního opotřebením. Jako kapalná kontaminace přichází v úvahu v první řadě voda, snižující mazací schopnost oleje a způsobující korozi, a dále kontaminace minerálního oleje syntetickou kapalinou na bázi glykolu a opačně. Chemické interakce takových látek produkují tzv. bílé mýdlo. Negativním

dopadem přítomnosti bílého mýdla v hydraulickém systému je ucpávání filtračního zařízení. (Salisbury 2012) Na opotřebení strojních součástí mají největší vliv tuhé mechanické částice.

Odhalování přítomnosti mechanických nečistot v odebraných vzorcích oleje jakožto ukazatelů přítomnosti rozličných druhů opotřebení a poškození strojních součástí sledovaného systému je jednou z nejdůležitějších částí provádění tribotechnické diagnostiky nejen hydraulických olejů. S přibývajícemi motohodinami provozního času sledovaného stroje se mění vlastnosti a složení provozních kapalin. Olejové náplně hydraulických mechanismů nejsou během svého používání spotřebovávány, eventuelně v menším měřítku vlivem netěsností. Úbytkům v podobě úniků se pochopitelně předchází kvalitním utěsněním hydraulického mechanismu. V intervalu mezi výměnou oleje či jiné náplně se tedy znečištění kumulativně navyšuje. (Fitch a Noria Corporation 2013)

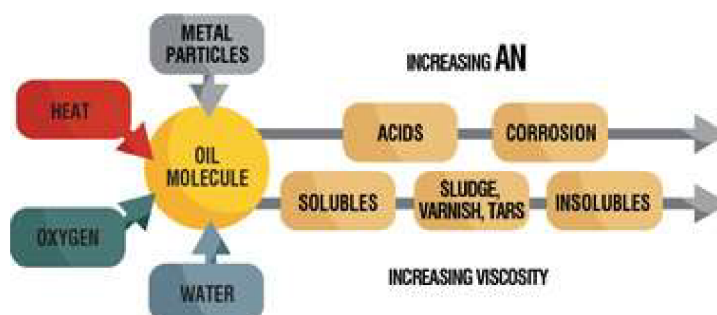
3.6 Diagnostika a sledované parametry hydraulických kapalin

Sledování stavu hydraulických kapalin, vhodně zvolené metody tribotechnické diagnostiky a vhodná interpretace výsledků přináší mnohé výrazné ekonomické a energetické úspory. Hydraulické kapaliny vykonávají během provozu několik souběžných funkcí, které mají rozličné nároky na charakter vlastností a použitelnosti hydraulické kapaliny. Zvláště v posledních letech nelze opomenout biologickou odbouratelnost a nízkou, ideálně žádnou, toxicitu. V následující tabulce 3.4 jsou shrnuty některé funkce, které by měla plnit hydraulická kapalina, doplněny o fyzikální, chemické a jiné specifické vlastnosti.

Tabulka 3.4 Požadavky na hydraulické kapaliny, Zdroj dat: (Doddannavar et al. 2005)

Funkce	Požadovaná vlastnost
Přenos síly a řídicí funkce	Nízká stlačitelnost, nízká pěnovost
Zajištění mazání	Vhodná viskozita, vysoký VI, oxidační a tepelná stabilita, čistota, protikorozní působení
Přenos tepla	Tepelná vodivost a kapacita
Těsnění	Vhodná viskozita a smyková odolnost
Speciální funkce	Nehořlavost
Dopad na životní prostředí	Biodegradabilita, nízká nebo žádná toxicita

Některé z vlastností uvedené v tabulce 3.4 spolu souvisí a jsou na sobě v různé míře závislé. Kupříkladu zvyšování počtu částic opotřebení má za následek další rozvoj abrazivního a erozivního opotřebení a částice uvolňované do hydraulického oleje zrychlují průběh oxidace provozní kapaliny. Produkty oxidace, mezi něž řadíme kaly, úsady a laky, zvyšují viskozitu oleje a díky své kyselosti iniciují korozi. Vzduch přítomný v oleji způsobuje pěnovost a zároveň obsahuje kyslík, tedy majoritní prvek zúčastňující se oxidačních procesů.



Obrázek 3.5 Faktory ovlivňující degradaci oleje (Weeks a Noria Corporation 2016)

Tribotechnická diagnostika zkoumá stav třecích uzlů ze vzorků odebraného oleje. Díky tomu, že se jedná zpravidla o metody nevyžadující demontáž některého ze strojních celků, můžeme odběr a vyhodnocení vzorků provádět v průběhu výroby či pracovní činnosti stroje. Laboratorní zkoumání, testy a analýzy určují obsah cizorodých látek v mazivu, úbytek některých aditivních prvků (Zn) a celkově hodnotí stav oleje z pohledu kvalitativního a kvantitativního. (Hnilicová a Kučera 2013)

Pokud se tribotechnické analýzy zaměří správným směrem, je možné velmi efektivně předcházet selhání či dokonce zničení strojního hydraulického zařízení. Mezi ukazatele, které je záhodno sledovat se řadí:

- barva a vzhled oleje,
- kinematická viskozita při 40 °C,
- číslo kyselosti,
- koncentrace otěrových kovů,
- celková degradace oleje,
- obsah vody,
- pěnivost,
- počty částic mechanického znečištění,
- ferografická částicová analýza.

3.6.1 Barva a vzhled oleje

Optická kontrola vzorku ihned po odebrání či během odběru je prvním stupněm diagnostiky hydraulického oleje. Tmavnutí oleje způsobuje postupující oxidace, znečištění částicemi či zvýšené tepelné namáhání. Změna barvy by však neměla být okamžitým důvodem k výměně olejové náplně. Vhodnější je zvolit cestu zamyšlení nad tím, kde a proč dochází k procesům, jež takové změny způsobují a podrobit olej hlubšímu přezkoumání. (Weeks a Noria Corporation 2016; Hnilicová a Kučera 2013)

3.6.2 Kinematická viskozita při 40 °C

Hodnota kinematické viskozity při 40 °C se řadí k základním tribodiagnostickým ukazatelům a slouží zároveň jako základní parametr pro rozdělení maziv dle ISO VG. Umožňuje zhodnotit, zda je v hydraulickém mechanismu olej vhodné viskozitní třídy a nedošlo-li k doplnění olejového média jiným druhem maziva s jinou viskozitní třídou. Změna viskozity může být způsobena kontaminací vodou, nárůst viskozity předznamenává probíhající termooxidační procesy v olejové náplni a přítomnost nečistot. V těchto případech je na místě provést zjištění čísla kyselosti, čímž lze oxidaci potvrdit. Měření kinematické viskozity se provádí pomocí viskozimetrů, které mohou být různého provedení. K nejjednodušším patří měření pomocí skleněného Ubbelohdeho viskozimetru (Hnilicová a Kučera 2013), ale ke standardnímu vybavení tribodiagnostických laboratoří patří automatické viskozimetry nabízené v širokých výrobních řadách mnohých výrobců. Měření kinematické viskozity je upravováno normou ČSN EN ISO 3104 „Ropné výrobky-

Průhledné a neprůhledné kapaliny-Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity“.

3.6.3 Stanovení čísla kyselosti

Výsledkem používání hydraulických olejů po delší dobu bývá zvýšení koncentrace kyselých chemických látek. Vznik látek s kyselou povahou má primárně na svědomí oxidace řetězců uhlovodíků, ačkoli existuje řada aditiv a přirozených součástí maziv, které jsou také kyselé.

Množství kyselých látek udává TAN (Total acid number), neboli číslo kyselosti. To je zjišťováno prostřednictvím titrace. Do vzorku oleje je pomocí titrační byrety přikapáván KOH (hydroxid draselný), tedy velmi silná zásada. Skupina OH^- z hydroxidu reaguje s H^+ ionty z kyselých produktů oxidace. Dochází k neutralizaci za vzniku vody. Bod ekvivalence, tedy bod, kdy jsou všechny kyselé složky zneutralizovány hydroxidem draselným, je rozpoznán díky přidávanému barevnému indikátoru. TAN se měří buď u použitých olejů, čímž stanovíme množství kyselých oxidačních produktů, nebo se provádí jako součást zkoušek nových olejů, přičemž je pak v průběhu používání možnost porovnávání odchylek jednotlivých hodnot od referenčního množství kyselých látek v novém oleji. (Hnilicová a Kučera 2013; Torbacke et al. 2014)

3.6.4 Koncentrace otěrových kovů

Opotřebovávání strojních součástí, tedy jejich poškozování s úbytkem materiálu a trvalou změnou povrchu součástí, se promítá do koncentrace počtu částic konstrukčních materiálů v hydraulickém oleji. Mezi sledované konstrukční prvky řadíme železo (Fe), měď (Cu), hliník (Al) a olovo (Pb). Nejen samotné množství, ale i dynamika, s níž se mění koncentrace otěrových kovů v oleji, poskytuje cenné informace z pohledu zhodnocování opotřebení třecích uzlů a kombinací s dalšími diagnostickými postupy lze vytrasovat problematická místa v hydraulickém systému. Ze vzorku oleje lze zhodnotit vývoj intenzity opotřebení porovnáním s předchozími hodnotami a pomocí statistických metod tak stanovit jistou predikci vývoje opotřebení strojního zařízení, je-li k dispozici adekvátní počet měření. (Kuben et al. 2019; Vähäoja et al. 2005)

Nejfrekventovaněji prováděné analýzy, sloužící k určení koncentrace otěrových kovů, jsou různé druhy spektrometrických měření. K základním typům náleží atomová absorpční spektrometrie (AAS), optická emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (OES-

ICP), rentgenová fluorescenční spektrometrie (XRF), atomová emisní spektrometrie plamenová (F-AES) a hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS). (Kuben et al. 2019; Hnilicová a Kučera 2013)

3.6.5 Celková degradace oleje

Ačkoli nebývá hydraulický olej tak výrazně namáhán jako oleje motorové a turbínové, i v případě hydraulických kapalin mohou v průběhu provozu nastat situace a stavy, které výrazně ovlivňují jeho životnost. (Hnilicová a Kučera 2013) Opět je třeba připomenout, že optika, s níž je pohlíženo na stav hydraulického oleje, je velmi komplexní a jednotlivé druhy degradace nelze hodnotit separátně.

Na hydraulické oleje působí během používání mnoho vnějších vlivů, které způsobují změny chemického složení a tím zásadně ovlivňují jeho funkční vlastnosti. Podle intenzity působení těchto faktorů a odolnosti oleje se odvíjí i úsilí, které je nutno vynaložit ke tlumení těchto degradačních procesů, čímž lze zvyšovat životnost hydraulických systémů. (Václav Štěpina a Václav Veselý 1992)

Oxidace olejů

Oxidace patří vedle mechanického znečištění pevnými částicemi k hlavním původcům degradace hydraulických kapalin, ale i maziv obecně. Odolnost vůči oxidaci vyjadřuje tzv. oxidační stabilita, která je jednou z klíčových vlastností olejů ovlivňujících jejich životnost. (Hnilicová a Kučera 2013)

Rychlost chemických reakcí probíhajících v základovém oleji nejvíce ovlivňuje teplota, přímé světlo, přítomnost katalyzátorů (primárně otěrových kovů), vody a expozice vzdušnému kyslíku. Předcházet nadměrné oxidaci lze volbou vhodného oleje, opřídavných látek (aditiv) a v neposlední řadě je třeba dbát na vhodné zacházení s olejem, od technologie uskladnění, až po samotné zařazení do provozu. Procesy způsobené oxidací oleje nazýváme stárnutí oleje. (Torbacke et al. 2014)

Reakční rychlost oxidace je přímo závislá na teplotě. Tuto skutečnost popisuje tzv. Arrheniova rovnice. Praktickým faktem, vyplývajícím z jejího znění je, že se rychlost reakce zvyšuje dvojnásobně s každým nárůstem teploty o 10 °C. Markantně se tento jev projevuje

již při překročení teploty 60 °C a nad touto teplotou dochází ke snížení životnosti s každými 5 °C na polovinu. (Torbacke et al. 2014b) Uvedenými zdroji vysokých teplot jsou:

- Místa s extrémními teplotami: především nefunkční řídicí prvky s velkými a náhlými tlakovými spády, nevhodně navržené vyhřívání nádrží.
- Microdieseling: proces, při němž dochází k implozi vzduchových bublin při pohybu z míst s nižším tlakem. Adiabatickou kompresi doprovází generování tepla a zvýšení místní teploty až na 1 000 °C.
- Jiskrové výboje: tření mezi jednotlivými vrstvami kapaliny a stěnami hydraulického aparátu vede ke vzniku rozdílných elektrostatických nábojů. Rozdíl se vyrovnává prostřednictvím výbojů a takto vzniklé jiskry mají teploty okolo 10 000 °C.

Takto extrémní místní nárůsty teplot způsobují vedle urychlování tvorby oxidačních úsad také vznik sazí. (Whitby 2022; Phillips a Staniewski 2016)

K posouzení pokročilosti oxidace lze použít zjištění čísla kyselosti. Pro odhalení a kvantifikování obsahu oxidačních produktů, kterými jsou ketony, aldehydy, karboxylové kyseliny a jiné organické sloučeniny, se používají metody FTIR infračervené spektroskopie. (Václav Štěpina a Václav Veselý 1992; Hnilicová a Kučera 2013)

Úbytek aditiv

Aditiva plní rozličné funkce. Zlepšují vlastnosti a zvyšují životnost hydraulických kapalin. Pro tyto přísady jsou typické některé chemické prvky v nich obsažené, jejichž obsah ve vzorcích hydraulického oleje lze sledovat pomocí spektrometrických metod, obdobně jako u koncentrace otěrových kovů. (Hnilicová a Kučera 2013) Nejčastěji sledovanými aditivačními prvky jsou zinek (Zn), fosfor (P), hořčík (Mg), vápník (Ca) a mangan (Mn).

3.6.6 Obsah vody

Přítomnost vody v hydraulickém oleji se řadí mezi velmi nebezpečný degradační jev a zjištění jejího obsahu v oleji patří k základním údajům popisujícím kvalitu oleje. (Hnilicová a Kučera 2013)

Měření lze realizovat vícero způsoby. Nejjednodušším testem je zkouška s horkou deskou, někdy nazývána jako „prskací zkouška“. Spočívá v nanesení vzorku oleje na horkou

kovovou desku (výhřev může být zajištěn elektricky, plamenem atd.) a hodnocení intenzity prskání, hustoty a velikosti bublin.

K přesnějšímu určení se užívá infračervená FTIR spektrometrie a nejpřesnější metodou je Karl Fisherova titrace, díky níž je možno odhalit i koncentrace vody v tisícinách procenta. (Hnilicová a Kučera 2013)

3.6.7 Pěnivost

Pro hydraulické mechanismy je nezbytné, aby byl olej co nejméně stlačitelný, neboť se stoupající stlačitelností klesá účinnost přenosu energie. Stlačitelnost zvyšuje obsah vzduchu v oleji. Díky kyslíku, který je součástí vzduchu, se také jedná o nečistotu, která urychluje procesy stárnutí. (Ren et al. 2023) Náchylnost k pohlcování a schopnost odlučování vzduchu testují zkoušky pěnivosti.

Zkouška spočívá v profukování vzorku oleje vzduchem o konstantním průtoku po dobu 5 min při teplotě 24 °C. Následuje desetiminutové usazování, na jehož konci se měří objem vzniklé pěny. Poté se zkouší druhý vzorek, ovšem profukování je vykonáváno při 93,5 °C. Po vymizení pěny se opakuje měření při 24 °C. Tento postup upravuje norma ČSN ISO 6247.

3.6.8 Stanovení počtu částic

Rozdělíme-li znečištění na částice tvrdé (prach, částice opotřebení, rez) a měkké (kaly, laky, úsady, produkty oxidace a termooxidace), pak z pohledu opotřebení jsou hlavními ukazateli stavu právě částice tvrdé. Jsou také hlavními prekurzory následného rozvoje dalšího opotřebení různých typů. (Hnilicová a Kučera 2013; Phillips a Staniewski 2016; Bečka 1997)

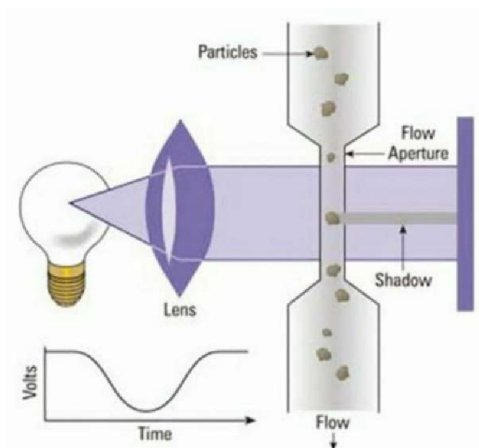
Gravimetrická metoda využívá filtru s různou pórovitostí (0,8 až 45 μm). Na filtru se zachytí částice prachu, opotřebení a zároveň i větší polymerované produkty oxidace. Výsledek je uváděn v mg/kg. Dle zkušenosti technického diagnostika lze využít i vzhled filtru po provedení zkoušky. Jedná se pak ovšem o subjektivní hodnocení. Tento test neudává ucelené informace o morfologii, velikosti a distribuci částic v olejovém vzorku. (Soukup [b.r.]

K přesnějšímu určení počtu částic ve vzorku oleje slouží kódy čistoty, přičemž částice rozdělují dle jejich velikosti do velikostních tříd. Mezinárodních standardů, kterými jsou jednotlivá měření a hodnocení výsledků upravována, je více a patří k nim ISO 4406, ISO 4407, NAS 1638 a SAE AS 4059.

Stanovení kódu čistoty dle ISO 4406 se opírá o údaje získané z 1 ml oleje. Hodnotí se počet částic o velikostech větších než 4 μm , > 6 μm a > 14 μm , přičemž se zjištěné hodnoty zapisují ve formě číselného kódu (čísla) na základě tabulek a znění příslušné normy. Formát interpretace výsledku sestává ze tří čísel oddělených lomítkem ve vzoru X/Y/Z např. 21/18/15. K počítání se používají automatické čítače částic pracující na principu snížení intenzity světla a detekce světelného rozptylu. K zamezení vnikání nečistot při plnění systému novým olejem je doporučováno olej přefiltrovat přes minimálně 3 až 5 μm filtry. (Bureš a Němec 2012)

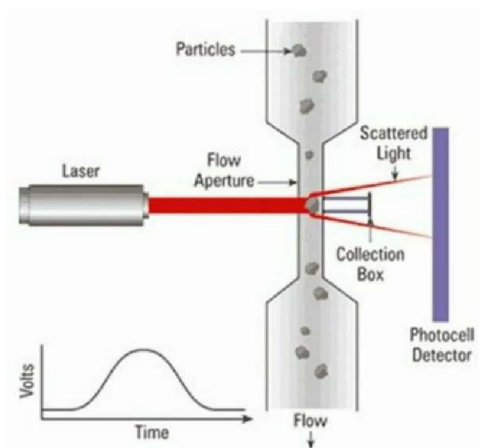
Mikroskopickou metodu počítání upravuje norma ISO 4407. Zkoumaný olej je přefiltrován přes membránový filtr o pórovitosti 8 μm , následně je pozorován pod optickým mikroskopem, přičemž je sledována velikost částic. Počítají se částice o velikosti větší než 5 μm a > 15 μm . Číselné kódy konkrétních intervalů četností a velikostních tříd jsou tytéž jako u normy ISO 4406. Výhodou této analýzy je, že eliminuje vliv znečištění vodou a vzduchem. Nevýhodou je pracnost metody a zhoršené podmínky pozorování v případě tmavších olejů. (Bureš a Němec 2012) Vzhledem k minimálnímu pozorovanému rozměru, tedy 4 μm v případě ISO 4406 a 5 μm v případě ISO 4407, vyvstává další nevýhoda. Ani jedna totiž nekalkuluje s menšími částicemi a vzhledem ke stále se zmenšujícím se vřetům v hydraulických mechanismech, jsou i menší částice původcem dalšího opotřebení. (Phillips a Staniewski 2016)

Metoda NAS 1638 (National Aerospace Standards) je původně americkou normou odhalující kód čistoty oleje. Částice se rozdělují do kategorií 2–5 μm , 5–15 μm , 15–25 μm , 25–50 μm , 50–100 μm a >100 μm . O způsobu zápisu výsledků pojednává příslušná norma. (Bureš a Němec 2012; Hnilicová a Kučera 2013)



Obrázek 3.6 Detekce snížení intenzity světla (Bureš a Němec 2012)

Na obrázcích 3.6 a 3.7 jsou zobrazeny metody snímání počtu částic. Obrázek 3.6 znázorňuje metodu snížení intenzity světla a obrázek 3.7 metodu světelného rozptylu.

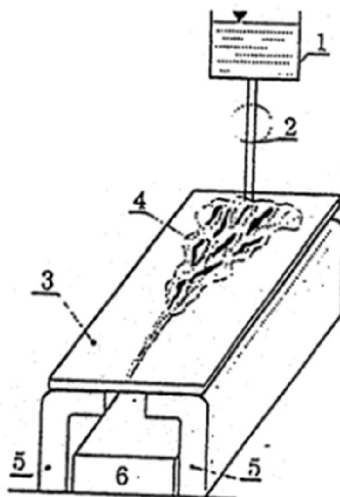


Obrázek 3.7 Detekce rozptylu světla (Bureš a Němec 2012)

3.6.9 Ferografická částicová analýza

Pro přesnější určení průběhu opotřebenění nemusí být pouhý počet, případně koncentrace otěrových kovů, dostatečně vypovídající údaj, ale je třeba určit i velikost, tvar, případně i barvu částic. Ke zjišťování těchto dat slouží ferografická částicová analýza vyvinutá v 60. letech 20. století v USA.

Metoda spočívá v separaci feromagnetických a paramagnetických nečistot na skleněné destičce či v precipitační trubici (kapiláře), která je umístěna v magnetickém poli.



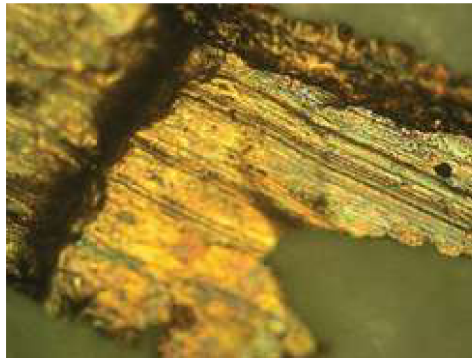
Obrázek 3.8 Ferografie (Helebrant et al. 2001)

Obrázek 3.8 popisuje schéma ferografu. Z nádoby (1) se vzorkem zředěného oleje vytéká skrz dávkovací zařízení (2) na čistou skleněnou či plastovou destičku – ferografickou podložku (3), pod níž jsou usazeny pólové nástavce (5) silného magnetu (6). Ferografická stopa (4) obsahuje na začátku největší částice větší než 15 μm . Velikost postupně klesá a na konci podložky jsou nejmenší submikronické částice. Po vymytí rozpouštědlem, zbavení zbytků oleje a vysušení je výsledná stopa nazývána ferogramem. (Helebrant et al. 2001)

Morfologie částic

Vyhodnocení ferogramu probíhá mikroskopicky za dichromatického osvětlení. Morfologie částic, tedy jejich tvar a velikost, je závislá na druhu opotřebení, kterým dané částice vznikaly. Rozlišujeme je na:

- **Částice adhezivního opotřebení:** tvoří je šupinky vločkovitého tvaru. Jejich šířka a délka se zpravidla příliš neliší (5 až 15 μm). Tloušťka adhezivních částic adhezivního opotřebení je velmi malá ($0,25 \div 0,75 \mu\text{m}$). Na obrázku 3.9 je mikroskopický snímek částice adhezivního opotřebení. (Fitch a Noria Corporation 2013)



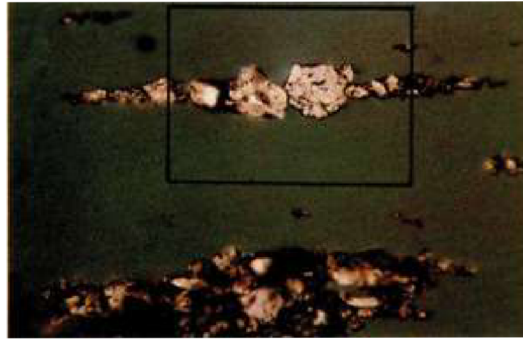
Obrázek 3.9 Částice adhezivního opotřebení (Fitch a Noria Corporation 2013)

- **Částice abrazivního opotřebení:** jsou typické svojí délkou oproti velmi malé tloušťce. Délka částic mnohdy převyšuje vyšší desítky až stovky μm . (Helebrant et al. 2001) Tvarem vzdáleně připomínají dlouhé třísky strojního obrábění nebo tvoří dlouhé stužkovité útvary (Obrázek 4.7). (Fitch a Noria Corporation 2013)



Obrázek 3.10 Částice abrazivního opotřebení (Fitch a Noria Corporation 2013)

- **Částice únavového opotřebení:** délka, šířka i hloubka mají přibližně stejný rozměr. Povrch takto vzniklých částic je hrubý s mnohými nerovnostmi a rýhováním. (Helebrant et al. 2001) Mikroskopický snímek částice únavového opotřebení zobrazuje obrázek 3.11.



Obrázek 3.11 Částice únavového opotřebení (Fitch a Noria Corporation 2013)

4 Metodika

U čtyř stavebních strojů Caterpillar byly odebrány vzorky hydraulického oleje a následovalo jejich vyhodnocování. Posuzovanými stroji byly dva kolové nakladače CAT 950 H a CAT 962 H, jedno pásové rypadlo CAT 323L DN a jeden rypadlo-nakladač CAT 428 E. Odběry vzorků byly prováděny dle postupu doporučeného výrobcem v pravidelných intervalech zhruba po každých pěti stech odpracovaných motohodinách. U každého stavebního stroje byly pozorovány stejné parametry, a to obsah otěrových kovů pomocí atomového emisního spektrometru a kódy čistoty, které byly získávány pomocí čítače částic.

Následující kapitola obsahuje popis stavebních strojů, u kterých byla prováděna měření, seznámení s pozorovaným olejem, postupem při odběru vzorku a určující podmínky, při nichž má být vzorek hydraulického oleje odebrán. Popsány jsou také použité měřicí metody, jimž byly vzorky podrobeny, výsledky měření včetně grafů a tabulek a konečně pak diskuse nad jednotlivými kazuistikami.

4.1 Olej Cat HYDO

Hydraulický olej Cat HYDO je olejem na čistě minerálním základu a tvořil náplň hydraulických systémů ve všech strojích, které byly předmětem zkoumání. Jedná se o produkt Caterpillar, jehož použití v hydraulických mechanismech je doporučováno výrobcem. Olej je aditivován ZDDP (min. 900 ppm) pro snížení opotřebení, emulgátory pro lepší rozptýlení kapiček vody v případě kontaminace, čímž je zabráněno usazování vody na dně olejového zásobníku či v jiných částech hydraulického obvodu, antioxidanty, protipěnovými přísadami, detergenty a disperzanty. Interval výměny oleje je výrobcem doporučen na 4000 motohodin. Technické parametry oleje jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 Parametry sledovaného oleje (caterpillar.com [b.r.]

Olej	Cat HYDO
Viskozitní třída SAE	10W
Viskozitní třída ISO VG	VG 32
Viskozitní index	114
Bod vzplanutí (Flash Point)	204 °C
Bod tuhnutí (Pour point)	-27 °C

4.2 Sledované stavební stroje

Následující kapitola poskytuje základní informace o sledovaných stavebních strojích.

4.2.1 Kolový nakladač Caterpillar 950 H

Kolové nakladače nachází uplatnění při manipulaci s těžkými břemeny a náklady při stavebních pracích, těžbě dřeva, demolicích, v zemědělství při silážování apod. Hydraulické rameno kolového nakladače může být opatřeno lžící či lopatou, vidlicemi pro přenášení objemných břemen nebo jiným druhem příslušenství. Nakladač Cat 950 H (Obrázek 4.1) má hmotnost 18,5 t. Byl vyráběn mezi lety 2006–2011 a je produktem amerického výrobce Caterpillar Inc., který patří mezi přední světové strojírenské podniky s širokým portfoliem výrobků, v České republice zastoupen společností Zeppelin CZ s.r.o.



Obrázek 4.1 Kolový nakladač Cat 950 H (caterpillar.com [b.r.])

Motor

Model:	Cat C7 ACERT
Konfigurace:	řadový šestiválec
Zdvihový objem:	7,2 l
Max. výkon:	145 kW (ISO 9249)
Točivý moment:	907 N·m (při 1400 ot/min)

Hydraulika

Průtok čerpadla:	270 l/min
Typ čerpadla:	pístové
Pracovní tlak:	max. 29,3 MPa

4.2.2 Pásové rýpadlo Caterpillar 323D LN

Pásové rýpadlo Cat 323 (Obrázek 4.2) je primárně určeno k těžbě a nakládání zeminy při provádění zemních stavebních prací. Své uplatnění nachází i v lomech při těžbě kamene. K dalším úkonům, které je možné provádět s pásovými rýpadly patří svahování terénu, jeřábování a dokončování zemních prací. Vedle klasické lopaty lze hydraulické rýpadlo opatřit drapáky, kladivy nebo hydraulickými nůžkami, přičemž veškeré toto vybavení nabízí Caterpillar v širokých výrobních řadách a mnohých provedeních. Model 323D LN s hmotností 23,5 t byl vyráběn v letech 2007–2014.



Obrázek 4.2 Pásové rýpadlo Cat 323D LN (Zeppelin CZ s.r.o. [b.r.]

Motor

Model:	Cat C7.1
Konfigurace:	řadový šestiválec
Zdvihový objem:	7 l
Max. výkon:	110 kW
Točivý moment:	1268 N·m (při 1400 ot/min)

Hydraulika

Průtok čerpadla:	429 l/min
Typ čerpadla:	zubové
Pracovní tlak:	max. 35 MPa

4.2.3 Kolový nakladač Caterpillar 962 H

Podobně jako nakladače Cat 950 patří i tento model 962 H (Obrázek 4.3) do skupiny středních kolových nakladačů (kategorie medium) o hmotnosti 19,7 t. Robustní a tuhá konstrukce těchto nakladačů poskytuje dostatečnou odolnost při práci v náročném terénu. Stroj je vybaven moderním monitorovacím systémem Caterpillar (CMS), který automaticky snižuje výkon motoru hrozí-li nebezpečí přetížení. K moderním prvkům strojů Caterpillar patří také systém „load sensing“, který monitoruje zatížení hydraulického aparátu v závislosti na hmotnosti nákladu a z motoru odebírá pouze takový výkon, který je pro výkon práce potřebný. Tento systém vede dlouhodobě k úsporám pohonných hmot stavebních strojů.



Obrázek 4.3 Kolový nakladač Cat 962 H (caterpillar.com [b.r.])

Motor

Model:	C7 ACERT
Konfigurace:	řadový šestiválec
Zdvihový objem:	7,2 l
Max. výkon:	156 kW
Točivý moment:	907 N·m (při 1400 ot/min)

Hydraulika

Průtok čerpadla:	270 l/min
Typ čerpadla:	axiální pístové
Pracovní tlak:	max. 29,3 MPa

4.2.4 Rýpadlo-nakladač Caterpillar 428 E2

Rýpadlo-nakladač Cat 428E2 (Obrázek 4.4) s hmotností 9 t je velmi univerzální stavební stroj, který je běžně používán ve všech případech a druzích stavebních a výkopových prací menších i větších rozměrů. Strojník ovládá dva hydraulicky ovládané systémy: lopatu nakladače a rýpadlo. Rýpadlo-nakladače je možné použít k hloubení výkopů, kanálů či k rýhování pro pokládání potrubí a kanálů nebo k přemísťování větších objemů zeminy, písku, kameniva a jiného stavebního materiálu.



Obrázek 4.4 Rýpadlo-nakladač Cat 428 E (Lectura GmbH [b.r.])

Motor

Model:	C 4.4
Konfigurace:	řadový čtyřválec
Zdvihový objem:	4,4 l
Max. výkon:	70 kW
Točivý moment:	418 N·m (při 1400 ot/min)

Hydraulika

Průtok čerpadla:	125 l/min
Typ čerpadla:	axiální pístové
Pracovní tlak:	max 22,7 MPa

4.3 Měřicí přístroje

V této kapitole jsou stručně popsány měřicí přístroje používané k hodnocení vzorků hydraulických olejů.

4.3.1 Spektrometr Spectro SPECTROBLUE

Spektrometr SPECTROBLUE s indukčně vázaným plazmatem (Obrázek 4.5) je kompaktní analytický přístroj vyrobený německou společností Spectro Analytical Instruments GmbH, která se zaměřuje na výrobu laboratorních měřicích přístrojů. Pomocí tohoto přístroje lze měřit množství prvků obsažených ve vzorku. (antest.com [b.r.]

Peristaltické čerpadlo dopravuje vzorek do zmlžovače. Zmlžený vzorek je unášen proudem argonu do hořáku s indukčně vázanou plazmou o velmi vysoké teplotě (běžně 6000-10000 K), kde díky vysokým teplotám zanikají chemické vazby, přítomny jsou jen samotné atomy prvků. Dochází k excitacím a deexcitacím (návrat z vyšší energetické hladiny zpět na nižší), což je doprovázeno emisí světla o charakteristické vlnové délce. Emitované a dispergované světlo slouží jako zdroj informací o množství jednotlivých prvků obsažených ve vzorku.



Obrázek 4.5 SPECTROBLUE ICP-OES (antest.com [b.r.]

4.3.2 Čítač částic Spectro LNF Q200

Jedná se o laserový čítač částic umožňující měření kódů čistoty podle norem ISO, NAS a NAVAIR. Měří částice o velikosti od 4 μm do více jak 100 μm , přičemž saturační limit

tohoto čítače je 5 000 000 částic/ml s chybou méně než 2 %. (spectro.cz [b.r.]) Čítač je zobrazen na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Čítač částic Spectro LNF Q200 (spectro.cz [b.r.])

4.4 Odběr vzorku

Odběry vzorků jsou prováděny dle doporučeného postupu uvedeného výrobcem stavebních strojů, tedy Caterpillar. Odběr vzorků lze provádět pomocí dvou metod, a to pomocí rychlospojky nebo pumpičky. Odběr pomocí pumpičky je určen pro netlakové mazací systémy, proto nebude uveden. Odběr rychlospojkou se provádí na odběrových místech pomocí mosazné odběrové sondy (Brass Probe) a hadičky. Provádíme-li odběr z více olejových systémů najednou (motor, převodovka, hydraulika), je potřeba začínat s odběrem u čistějších systémů, tedy například u systému hydraulického. Použitou hadičku vyměníme u každého měření za novou z důvodu možné kontaminace.

- Před odběrem necháme stroj pracovat přibližně 20 minut, aby olej dosáhl provozní teploty a byla zaručena homogenizace vzorku z pohledu monitorování znečištění.
- Nasadíme mosaznou sondu na rychlospojku. Prvních 100 ml vzorku odpuštíme do nádoby na odpadní olej. Jedná se o odpuštění sloužící k pročištění odběrového kohoutu a tento vzorek řádně zlikvidujeme.

- Nyní přistoupíme k samotnému odběru vzorku. Vzorkovnici o objemu 100 ml napustíme cca do tří čtvrtin jejího objemu. Dbáme, abychom během odběru nekontaminovali vzorek prachem nebo jinými nečistotami, které by ovlivnily měření.
- Po odběru uzavřeme odběrový kohout a uzavřeme vzorkovnici čistým víčkem.

5 Výsledky a diskuse

Obsah otěrových kovů

Pravidelné měření obsahu otěrových kovů poskytuje informace o probíhající opotřebení jednotlivých strojních součástí v hydraulickém systému. Malé koncentrace kovových prvků mohou být naměřeny i v nových čistých olejích, neboť některé z nich se mohou vyskytovat jako součást aditiv, nicméně zvýšené obsahy a náhlé výkyvy těchto hodnot jsou známkou probíhajícího opotřebení. Opotřebení se nelze vyhnout v žádném technickém případě. Účinky probíhajícího opotřebení lze pouze mírnit.

V této práci je pozornost upřena na obsahy čtyř konstrukčních kovových materiálů, kterými jsou železo (Fe), měď (Cu), hliník (Al) a chrom (Cr). Počet odpracovaných motohodin se u jednotlivých sledovaných stavebních strojů liší mnohdy v řádech tisíců motohodin. Jsou tedy sledovány stroje v rozdílných fázích svého životního cyklu.

Obsah ostatních prvků

Vedle otěrových částic konstrukčních kovů se v hydraulickém oleji mohou nacházet i jiné kovové, polokovové i nekovové prvky, které se do systému dostávají různou cestou. Jsou to prvky obsažené v aditivech, kterými jsou především zinek (Zn), dále fosfor (P), hořčík (Mg), mangan (Mn) a do jisté míry vápník (Ca). Dalším prvkem je křemík (Si), jehož nárůst značí kontaminaci oleje prachem a zeminou, resp. pískem, jehož primární součástí je křemen SiO_2 . Dle druhu půdy a pracovního prostředí se ovšem mohou do systému vnášet i sloučeniny obsahující vápník nebo hliník. V této práci byly sledovány křivky vývoje obsahu křemíku a vápníku.

5.1 Sledování znečištění hydraulického oleje nakladače Cat 950 H

V následující kapitole jsou uvedeny a oddiskutovány výsledky analýz hydraulického oleje nakladače Cat 950 H.

5.1.1 Obsah otěrových kovů

Vzorky hydraulického oleje z kolového nakladače Cat 650 H byly zkoumány v rozmezí od 7003 do 11492 motohodin provozu stroje. Bylo provedeno celkem 10 měření a vyhodnocení výsledků laboratorních analýz. Při pohledu do tabulky 5.1 je zřejmé, že

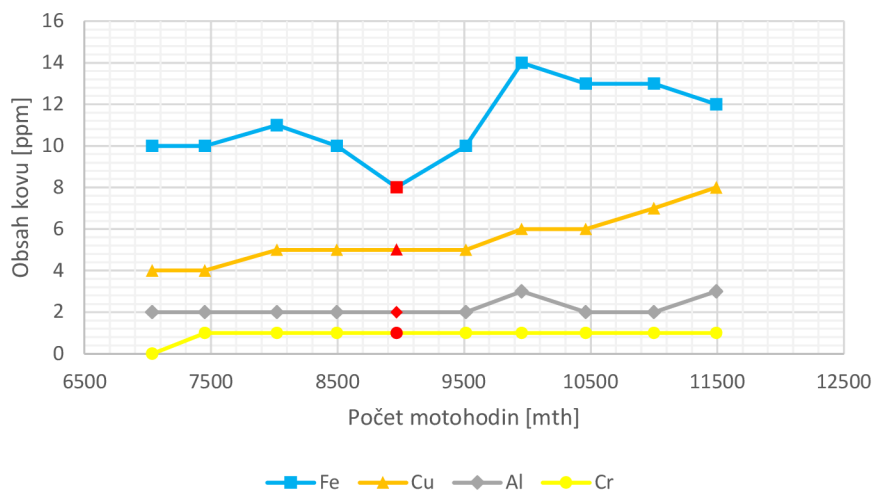
nejvyšší hodnoty byly naměřeny v případě sledování obsahu železa. Tento fakt může být potvrzen skutečností, že nejpoužívanějším konstrukčním materiálem pro výrobu hydraulických zařízení je ocel. Nejvyšší hodnota, tedy 14 ppm železa, byla naměřena při dosažení 9956 odpracovaných motohodin. Naopak nejnižší koncentrace železa 8 ppm byla zjištěna před dosažením 9000 motohodin. Ve sledovaném období se obsah železa pohyboval v intervalu mezi 8 a 14 ppm.

U ostatních konstrukčních kovů jsou zřejmé nižší hodnoty jejich obsahu, zjištěného pomocí atomové emisní spektrometrie. Jedná se o konstrukční kovy, které se v hydraulických mechanismech nevyskytují tak frekventovaně jako železo. V případě mědi bylo zjištěno maximum při 8 ppm, u hliníku pouhé 3 ppm a výsledky měření obsahu chromu jsou veskrze zanedbatelné. Výsledky měření obsahu konstrukčních kovů jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Obsahy otěrových kovů – Cat 950 H

Kolový nakladač CAT 950 H – otěrové kovy				
Počet motohodin:	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Al [ppm]	Cr [ppm]
7036	10	4	2	0
7452	10	4	2	1
8021	11	5	2	1
8495	10	5	2	1
8967	8	5	2	1
9515	10	5	2	1
9956	14	6	3	1
10 461	13	6	2	1
11000	13	7	2	1
11492	12	8	3	1

Vývoj obsahu ve vztahu k motohodinám prezentuje přiložený graf 5.1. Červeně zvýrazněné body v grafu označují čas, kdy byla provedena výměna olejové náplně.



Graf 5.1 Obsah otěrových kovů – Cat 950 H

5.1.2 Obsah ostatních prvků

Jako zdroj kontaminace hydraulického oleje křemíkem bývá nejčastěji uváděn prach a písek obsažený v zemině. Zdrojem křemíku samotného je především oxid křemičitý (SiO_2), který ve formě prachu proniká netěsnostmi do hydraulického aparátu a díky své tvrdosti působí jako silné abrazivum. Pro potvrzení kontaminace pocházející ze zeminy doporučují někteří autoři (Spurlock a Heston 2008) sledovat křivky vývoje obsahu křemíku s křivkou vývoje obsahu hliníku, přičemž v tomto případě není na hliník pohlíženo jako na konstrukční otěrový prvek, nýbrž jako na přirozenou součást zemin. Anorganickými sloučeninami hliníku vyskytujícími se v zeminách jsou oxidy (Al_2O_3 – korund) a hydroxidy ($\text{Al}(\text{OH})_3$ – gibbsit). Především korund se též řadí mezi významné abrazivní látky. (Šrámek et al. 2011) Vzhledem ke skutečnosti, že sledovanými systémy jsou stavební stroje, je v této kapitole diskutován i vývoj obsahu vápníku. Ten je obsažen především v cementovém prachu a uhličitanu vápenatém (CaCO_3), které mohou kontaminovat hydraulický olej. Vápník je též obsažen ve vápenných mýdlech, která plní funkci zahušťovadel v řadě plastických maziv, kterými může být olejová náplň také kontaminována.

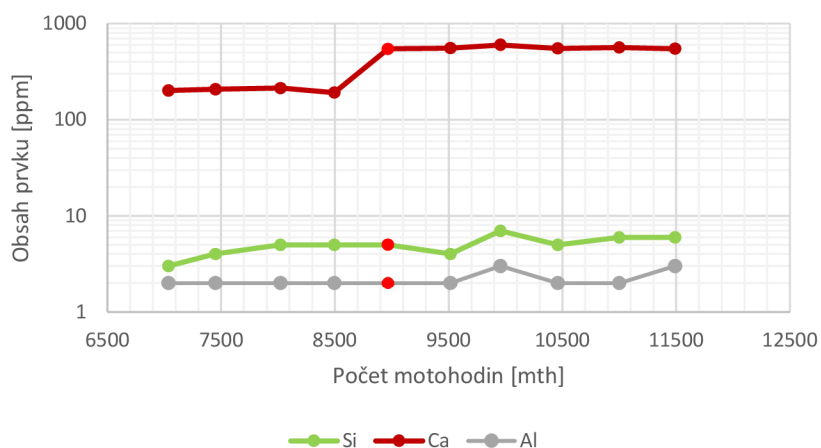
Na grafu 5.2 je patrný pozvolný nárůst obsahu křemíku během prvních třech měření ze 3 na 5 ppm. Během této doby zůstává obsah hliníku a vápníku téměř stejný. Větší změny jsou patrné ve druhé polovině měřících intervalů. Pro potvrzení průniku kontaminantů

pocházejících ze zeminy je upřena pozornost na výkyv křivek obsahů prvků v rozmezí mezi 9500 a 10500 motohodinami. (Spurlock a Heston 2008) Zde je patrné vzájemné sledování křivek obsahu křemíku a hliníku. Při pohledu na křivku vývoje obsahu vápníku je též výkyv také pozorovatelný, ovšem v menším měřítku.

Tabulka 5.2 Obsah ostatních prvků – Cat 950 H

Kolový nakladač Cat 950 H – Si, Ca, Al			
Počet motohodin	Si [ppm]	Ca [ppm]	Al [ppm]
7036	3	202	2
7452	4	208	2
8021	5	213	2
8495	5	192	2
8967	5	545	2
9515	4	559	2
9956	7	600	3
10 461	5	554	2
11000	6	566	2
11492	6	550	3

Zmíněný výkyv je v tabulce 5.2 vyznačen tučně. Z důvodu velkých rozdílů hodnot obsahu jednotlivých prvků je graf 5.2 opatřen svislou osou s logaritmickou stupnicí



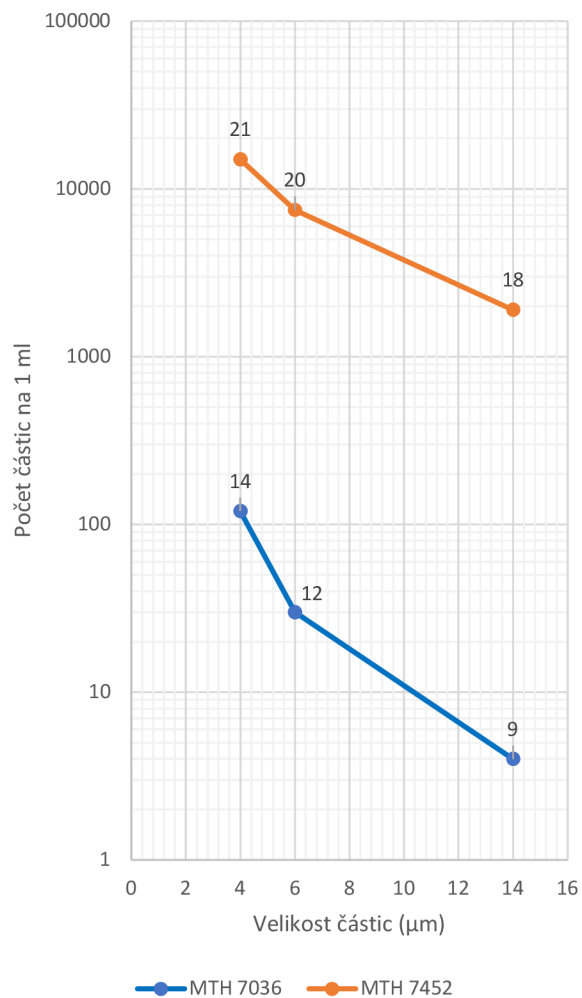
Graf 5.2 Obsah ostatních prvků – Cat 950 H

Tabulka 5.2 znázorňuje vývoj výše zmíněných prvků, tedy křemíku, vápníku a hliníku. Skokový nárůst obsahu vápníku z necelých 200 ppm na 545 ppm při 8967 motohodinách lze částečně připisovat výměně oleje, která je v grafu 5.2 opět vyznačena červeným bodem. Při výměně oleje může dojít k vnější kontaminaci prachem různého chemického složení, dále pak může obsah vápníku ovlivnit i obsah aditiv v novém oleji. Olejová náplň může být vystavena nečistotám i při přepravě nebo skladování.

5.1.3 Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406

Zatímco množství otěrových kovů zjištěné pomocí atomové spektrometrie zdaleka nedosahuje hodnot, jež by naznačovaly vážnější stav znečištění či opotřebení, tak v případě zjištěných kódů čistoty je tomu v některých případech právě naopak. Rozpětí výsledků měření kódů čistoty dle ČSN ISO 4406 je velké. Nejnižší naměřenou hodnotou je 14/12/9 a tento stav byl naměřen při 7036 motohodinách. Při dalším měření, tedy při 7452 motohodinách, výsledky kódu čistoty rapidně stouply na hodnotu 21/20/18, nicméně při pohledu do tabulek 5.1 a 5.2 zobrazujících výsledky ze spektrometrického měření se takovýto náhlý výkyv kódu čistoty nepromítl do obsahu otěrových kovů ani obsahu ostatních kontaminantů.

Důvody pro tak velké difference v kódech čistoty a obsazích otěrových kovů mohou být různé. Prvním může být detekční schopnost spektrometru ve vztahu k velikosti částic znečištění. Jako maximální detekovatelná velikost částic pomocí ICP-OES je uváděno 10 μm . (Anderson 1998) Nedetekuje tedy všechny částice otěrových kovů, ovšem čítače částic je pochopitelně započítávají do výsledků. Za zvýšené kódy čistoty mohou být zodpovědné i produkty oxidace. Některé kaly vytváří na površích systému s vyšší teplotou tvrdé laky, které se postupně uvolňují do olejové náplně. Měkké znečištění tak formuje tvrdé částice ovlivňující výsledky kódu čistoty. (Phillips a Staniewski 2016). Naměřené výsledky se pohybují v intervalu mezi horní a spodní křivkou zobrazenou na grafu 5.3. Tento graf je modifikací grafického zobrazení výsledků měření kódu čistoty dle ČSN ISO 4406.



Graf 5.3 Rozpětí kódů čistoty – Cat 950 H

5.2 Sledování znečištění hydraulického oleje rýpadla Cat 323D LN

V následující kapitole jsou uvedeny a oddiskutovány výsledky analýz hydraulického oleje rýpadla Cat 323D LN.

5.2.1 Otěrové kovy

Hodnoty obsahů otěrových kovů u pásového rýpadla Cat 323D LN poukazují na rozdílný režim opotřebení, než tomu je u prvního sledovaného stroje, tedy kolového nakladače Cat 950H. Zvláště signifikantní jsou rozdíly u obsahu železa a mědi, přičemž maximální hodnota obsahu železa činí 91 ppm a v případě mědi je maximální hodnota přibližně třetinová, 29

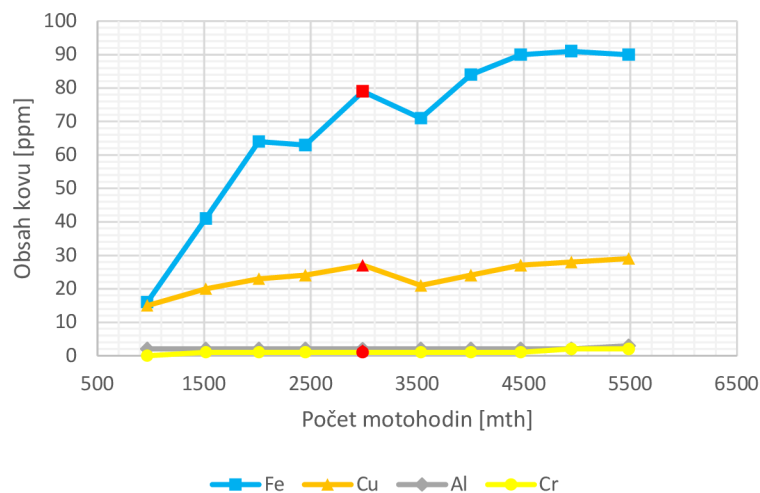
ppm. Vývoj trendů křivek obsahu je pozorován od 966 do 5482 motohodin a jsou zaneseny v tabulce 5.3, graficky pak v grafu 5.4.

Je-li pozornost upřena na křivky obsahu železa a mědi, pak počáteční hodnoty při prvním měření nabývají podobných hodnot, obsah železa je 16 ppm a obsah mědi činí 15 ppm. Zatímco při druhém měření obsah železa strmě stoupá na více než dvojnásobek první získané hodnoty, trend vývoje obsahu mědi stoupá mírnějším tempem. Plošší nárůst hodnot obsahu mědi je pozorovatelný v celém průběhu měření, může tak představovat mírnější průběh opotřebovávání vybraných měděných komponent, jež jsou zdrojem tohoto znečištění. Po výměně oleje při 2990 motohodinách je u obou dosud zmíněných kovů patrný propad hodnot v místě vyznačeném červeným bodem, nicméně po tomto výkyvu pokračuje stoupající trend dál. Při posledních třech měřeních je u obsahu železa patrné výrazné zploštění křivky mapující vývoj jeho obsahu u sledovaného stroje 323D LN.

Tabulka 5.3 Obsah otěrových kovů – Cat 323D LN

Pásové rypadlo Cat 323D LN – otěrové kovy				
Počet motohodin	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Al [ppm]	Cr [ppm]
966	16	15	2	0
1517	41	20	2	1
2014	64	23	2	1
2449	63	24	2	1
2990	79	27	2	1
3533	71	21	2	1
4003	84	24	2	1
4470	90	27	2	1
4944	91	28	2	2
5482	90	29	3	2

Dosud nediskutovanými kovy jsou hliník a chrom. Hodnoty jejich obsahu jsou velmi nízké, řádově se pohybují v nízkých jednotkách ppm a rozdíly obsahu jsou patrné z grafu 5.4. Z tohoto lze usuzovat, že nedochází k výraznému opotřebovávání komponent zhotovených z těchto konstrukčních kovů.



Graf 5.4 Obsah otěrových kovů – Cat 323D LN

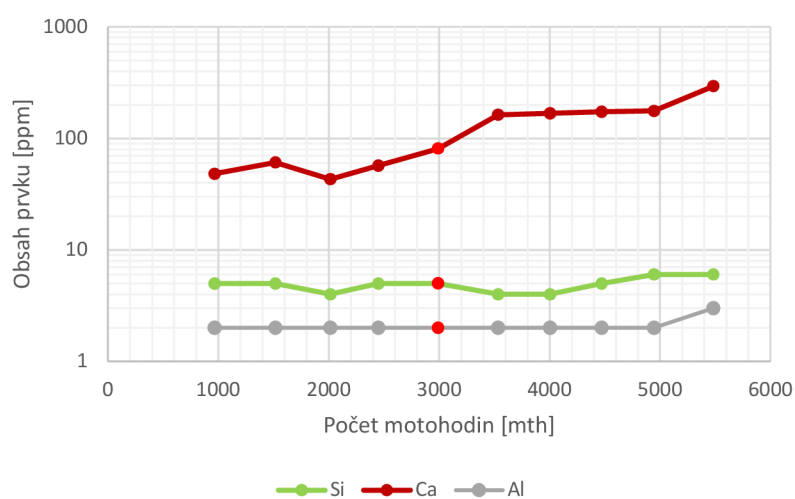
5.2.2 Obsah ostatních prvků

Při pozorování obsahu křemíku a vápníku byl opět sledován trend vývoje obsahu hliníku, pro případné potvrzení kontaminace hlinou či prachem pocházejícím ze zeminy. Vápník vykazuje nejvyšší hodnoty obsahu, krom mírného propadu po druhém měření prakticky po celou dobu sledování roste, jak je patrné na grafu 5.5 při pozorování tmavě červené křivky. Obsah křemíku zobrazuje světle zelená křivka na grafu 5.5 a během jejího průběhu s narůstajícím počtem motohodin nedochází k výrazným výkyvům trendu. Až na poslední měření je také konstantní obsah hliníku a není možné potvrdit kontaminaci půdním prachem, neboť se křivky nikterak nesledují ani nekopírují. (Spurlock a Heston 2008)

Tabulka 5.4 Obsah ostatních prvků – Cat 323D LN

Pásové rýpadlo Cat 323D LN - Si, Ca, Al			
Počet motohodin	Si [ppm]	Ca [ppm]	Al [ppm]
966	5	48	2
1517	5	61	2
2014	4	43	2
2449	5	57	2
2990	5	81	2
3533	4	163	2
4003	4	168	2
4470	5	173	2
4944	6	176	2
5482	6	294	3

Obsahy prvků během měření jsou zobrazeny v tabulce 5.4 a graficky jsou vyjádřeny v grafu 5.5.



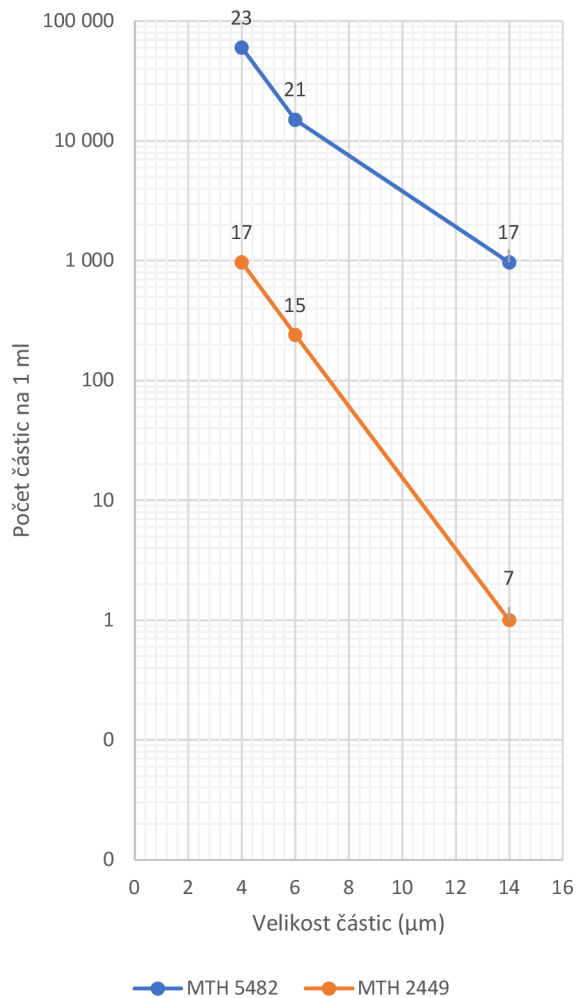
Graf 5.5 Obsah ostatních prvků – Cat 323D LN

5.2.3 Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406

Průměrné hodnoty kódů čistoty jsou až na drobné odchylky stejné jako u předešlého stroje, ovšem v případě hodnocení kódů čistoty u pásového rýpadla bylo zaznamenáno prudké navýšení při posledním měření, tedy po 5482. motohodině, a to na hodnotu 23/21/17,

což je hodnota z dlouhodobého hlediska velmi nebezpečná. Takové hodnoty značí vysoký stupeň znečištění oleje. Například pro systémy s tlaky cca 20 MPa jsou doporučovanými hodnotami kódů čistoty dle ČSN ISO 4406 pro řídicí servoventily 17/14/11, pro axiální pístová čerpadla 21/18/15 a pro lamelová čerpadla 20/17/14, přičemž při každém zvýšení pracovních tlaků o přibližně 5 MPa by měla být třída filtrace navýšena o jednu třídu čistoty. (Bureš a Němec 2012)

Při pohledu na grafické vyjádření v grafu 5.6 je patrné, že pro některé druhy komponent hydraulických systémů je čistota oleje zcel nedostačující. Odborná literatura (Bureš a Němec 2012) upozorňuje na velké rozptyly výsledků způsobené „falešnými“ částicemi, kterými bývají nejčastěji drobné bublinky vzduchu nebo vysokomolekulární polymery, které jsou součástí některých aditiv. Pro potvrzení či vyvrácení by bylo vhodné použít pro měření čistoty metodu absolutní filtrace a automatické mikroskopické počítání částic a zhodnocení jejich distribuce tak, jak ji popisuje norma ISO 4407. Minimální hodnota kódu čistoty je 17/15/7 a byla naměřena při 2449 motohodinách. Graf 5.6 prezentuje grafické vyjádření kódů čistoty prostřednictvím minima a maxima naměřených hodnot.



Graf 5.6 Rozpětí kódů čistoty – Cat 323D LN

5.3 Sledování znečištění hydraulického oleje nakladače Cat 962 H

V následující kapitole jsou uvedeny a oddiskutovány výsledky analýz hydraulického oleje nakladače Cat 962 H.

5.3.1 Otěrové kovy

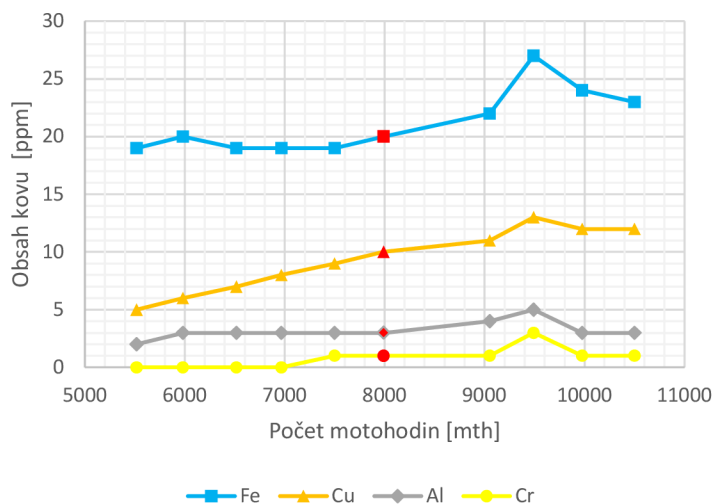
Pozorovaným strojem je kolový nakladač Cat 962 H, na němž bylo prováděno měření vlastností hydraulického oleje v rozmezí od 5517 a 10502 motohodin. Sledovanými otěrovými kovy jsou železo, měď, hliník a chrom. Trendy vývoje otěrových kovů jsou zobrazeny v grafu 5.7, který je grafickým vyjádřením naměřených dat z tabulky 5.5. Při

sledování jednotlivých křivek je dobře patrné, že zvláště po výměně olejové náplně při 7989 motohodinách (červený bod v grafu) se křivky vývoje jednotlivých kovů sledují a vykazují podobné znaky. Tak například při odpracování 9492 motohodin dosahují všechny hodnoty otěrových kovů svého maxima ve sledovaném intervalu. Tento jev je dobře pozorovatelný na grafu 5.7.

Tabulka 5.5 Obsah otěrových kovů – Cat 962 H

Kolový nakladač Cat 962 H - otěrové kovy				
Motohodiny:	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Al [ppm]	Cr [ppm]
5517	19	5	2	0
5980	20	6	3	0
6517	19	7	3	0
6966	19	8	3	0
7500	19	9	3	1
7989	20	10	3	1
9051	22	11	4	1
9 492	27	13	5	3
9977	24	12	3	1
10502	23	12	3	1

Obecně nejvyšších obsahů dosahuje opět železo (Fe) s maximální hodnotou 27 ppm. Podobně jako u prvního nakladače CAT 950 H jsou hodnoty obsahu mědi v průměru poloviční. Nejvyšší naměřený obsah mědi (Cu) činí 13 ppm. Průměrný obsah hliníku (Al) je o něco vyšší než u předešlých sledovaných strojů a chrom (Cr) se svým obsahem naměřeným pomocí ICP-OES na znečištění oleje podílí nejméně. Maximální hodnotou jsou naměřené 3 ppm chromu, přičemž při prvních čtyřech měřeních byly zjištěny nulové hodnoty obsahu chromu ve vzorku oleje. Nízké hodnoty obsahu hliníku a chromu jsou pozorovatelné u všech sledovaných hydraulických systémů.



Graf 5.7 Obsah otěrových kovů – Cat 962 H

5.3.2 Obsah ostatních prvků

Obsah ostatních sledovaných prvků byl opět hodnocen na základě společných znaků, které křivky trendů v průběhu měření vykazují. I v případě kolového nakladače Cat 962 H jsou na křivkách trendu patrné společné znaky, jež mohou poukazovat na společný zdroj tohoto znečištění. V tomto případě je zřejmý nárůst obsahu hliníku a křemíku mezi prvním a druhým měřením a následně společný pokles při 9492 motohodinách. Toto občasné vzájemné sledování křivek může být vodítkem pro odhalení kontaminace půdním prachem. Nejvyšších hodnot u sledovaných prvků dosahuje opět vápník s maximálním obsahem 676 ppm, který byl naměřen při 7500 motohodinách. (Spurlock a Heston 2008)

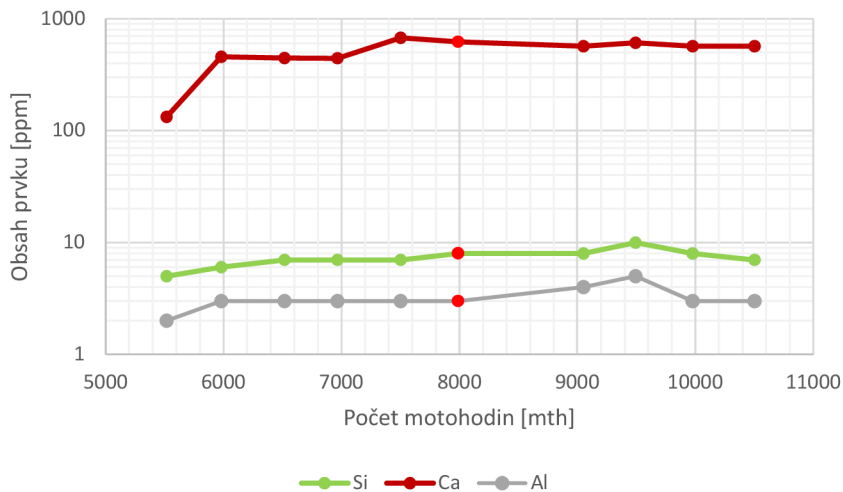
Důvodem markantních rozdílů obsahů hliníku a křemíku vůči obsahu vápníku může být rozdílná tvrdost sloučenin měřených prvků. Zatímco křemen či korund, což jsou v půdě a písku vyskytující se sloučeniny křemíku a hliníku, patří mezi velmi tvrdé minerály, tak vápence (uhličitan vápenatý) je naopak poměrně měkkou sedimentární horninou. Ani ostatní sloučeniny vápníku nedosahují tak velkých tvrdostí jako minerály obsahující hliník a křemík. Z hodnot absolutních tvrdostí těchto sloučenin lze dedukovat, že mechanická odolnost křemene a korundu je daleko větší než v případě mechanické odolnosti vápence. Částice vápence se tak budou působením mechanického namáhání snadněji rozpadat na mnohem menší částice, které budou pomocí spektrometrické analýzy snadno měřitelné. Naopak díky své tvrdosti částice korundu a křemene snadněji odolávají mechanickému

namáhání, čímž vzniká prostor pro nepřesné měření ICP-OES způsobené nadměrnou velikostí částic (více než 10 μm). (Anderson 1998)

Tabulka 5.6 Obsah ostatních prvků – Cat 962 H

Kolový nakladač CAT 962 H - Si, Ca, Al			
Motohodiny:	Si [ppm]	Ca [ppm]	Al [ppm]
5517	5	133	2
5980	6	456	3
6517	7	445	3
6966	7	443	3
7500	7	676	3
7989	8	621	3
9051	8	567	4
9 492	10	607	5
9977	8	567	3
10502	7	567	3

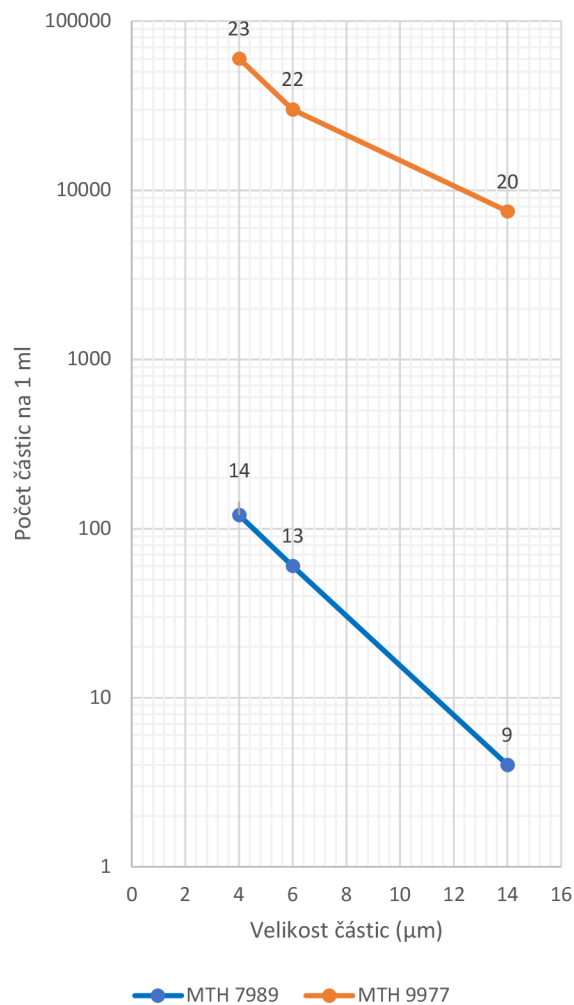
Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 5.6, přičemž grafické zobrazení jejich vývoje poskytuje graf 5.8.



Graf 5.8 Obsah ostatních prvků – Cat 962 H

5.3.3 Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406

Kódy čistoty se při jednotlivých měřeních často skokově mění. První naměřená hodnota značí vysoký stupeň znečištění, vyjádřeno dle ČSN ISO 4406 hodnotou 22/20/17. Při druhém měření byl zjištěn pokles množství znečišťujících částic na hodnotu 18/17/14, nicméně následně, v pořadí třetí, měření ukázalo jednu z velmi vysokých hodnot, kdy interpretace výsledků dle příslušné normy udává výsledek 23/22/19. Podobně vysoké hodnoty byly zaznamenány ještě ve dvou případech. Při dosažení 9051 motohodin byl naměřen výsledek stejný jako při třetím měření a při 9977 odpracovaných motohodinách dosáhlo znečištění ve sledovaném časovém intervalu maxima s hodnotou 23/22/20. Naopak výsledek s minimální potvrzenou mírou znečištění byl 14/13/9 a nastal při 7989. motohodině. Důvodem pro takto vysoká čísla mohou být faktory diskutované již v předchozích kapitolách, dále mohlo ke znečištění dojít při samotném odběru vzorku, který mohl být kontaminován např. vlákny textilií či izolačního materiálu nebo zanedbání výplachu a přípravy vzorkovnice. Důvodem k rozdílu míry znečištění naměřené pomocí ICP-OES a čítačem částic může být i neúplná homogenizace vzorku, ze kterého byly jednotlivé analýzy prováděny. Minimální a maximální naměřené hodnoty jsou vyneseny v grafu 5.9.



Graf 5.9 Rozpětí kódů čistoty – Cat 962 H

5.4 Sledování znečištění hydraulického oleje rýpadlo-nakladače Cat 428 E

V následující kapitole jsou uvedeny a oddiskutovány výsledky analýz hydraulického oleje rýpadla-nakladače Cat 428 E.

5.4.1 Otěrové kovy

Ze všech sledovaných stavebních strojů byly u tohoto rýpadla-nakladače Cat 428 E zjištěny nejnižší hodnoty obsahu otěrových kovů. Je nutno podotknout, že u tohoto stroje je k dispozici nejmenší počet jednotlivých měření.

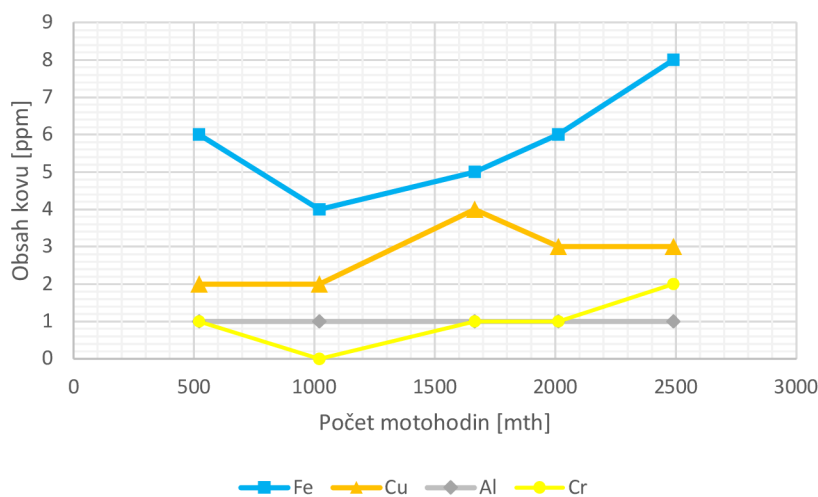
První naměřená hodnota obsahu železa je 6 ppm. Při druhém měření je patrný drobný pokles na 4 ppm obsahu železa a následně již hodnoty jen rostou do maxima 8 ppm, které bylo naměřeno při 2489 motohodinách.

Vývoj obsahu mědi je spolu s dalšími otěrovými kovy zobrazen na grafu 5.10, který prezentuje data z tabulky 5.7. Trend vývoje obsahu mědi začíná na hodnotě 2 ppm. Tato hodnota se opakuje při druhém měření a následně při dosažení 1665 motohodin je obsah dvojnásobný, tedy 4 ppm.

Tabulka 5.7 Obsah otěrových kovů – Cat 428 E

Rýpadlo-nakladač Cat 428E - otěrové kovy				
Motohodiny:	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Al [ppm]	Cr [ppm]
521	6	2	1	1
1020	4	2	1	0
1665	5	4	1	1
2012	6	3	1	1
2489	8	3	1	2

Nárůst obsahu otěrových kovů železa, mědi a chromu je mezi druhým a třetím měřením patrný u všech tří vyjmenovaných kovů. Obsah hliníku je po celou dobu pozorování neměnný.



Graf 5.10 Obsah otěrových kovů – Cat 428 E

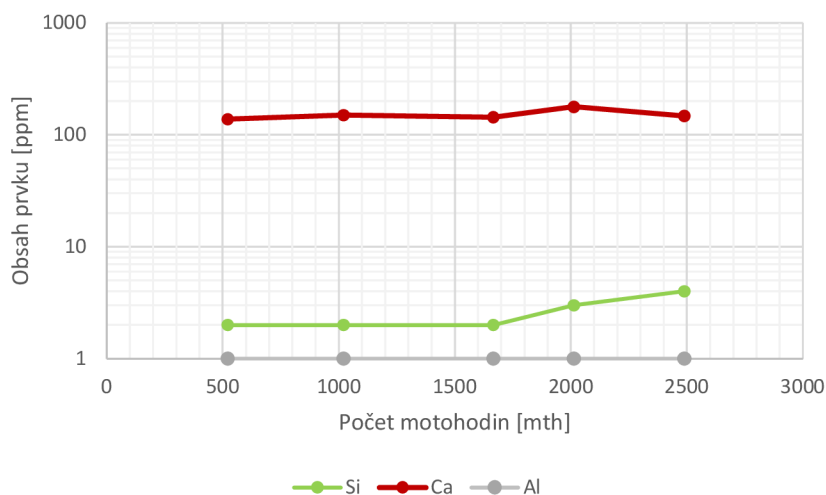
5.4.2 Obsah ostatních prvků

Jsou-li diskutovány vývoje trendu křemíku a vápníku, tak ani zde nejsou patrné nikterak zvýšené hodnoty v porovnání s předešlými stavebními stroji. Krom nízkých hodnot v tomto případě nelze pozorovat společné výkyvy či jiné společné znaky na křivkách trendů, které by potvrzovaly znečištění kontaminanty pocházejícími ze zeminy. Maximální hodnoty obsahu jsou 4 ppm křemíku, 178 ppm vápníku a obsah hliníku byl po celou dobu na hodnotě 1 ppm, jak bylo komentováno v předchozí kapitole.

Tabulka 5.8 Obsah ostatních prvků – Cat 428 E

Rýpadlo-nakladač Cat 428E - Si, Ca, Al			
Motohodiny:	Si [ppm]	Ca [ppm]	Al [ppm]
521	2	138	1
1020	2	150	1
1665	2	144	1
2012	3	178	1
2489	4	147	1

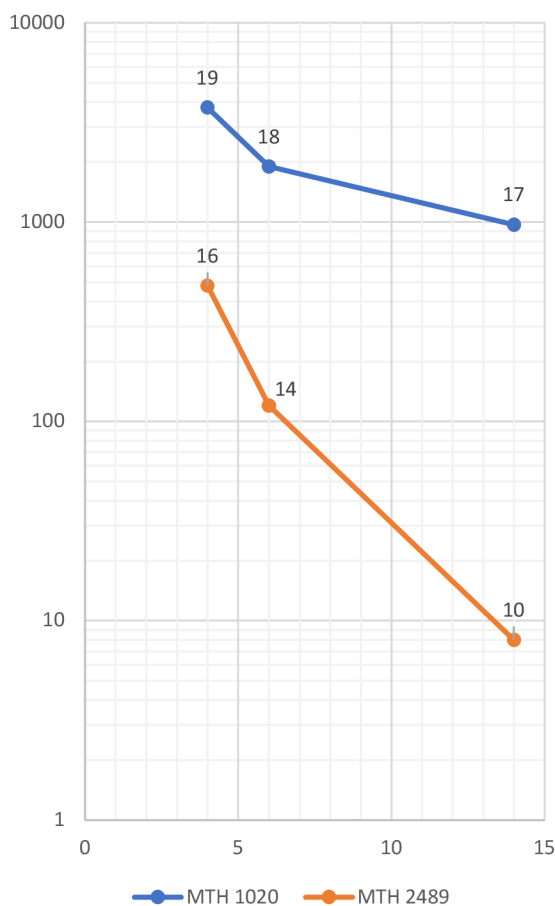
Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 5.8 a grafu 5.11.



Graf 5.11 Obsah ostatních prvků – Cat 428 E

5.4.3 Kódy čistoty vyjádřené dle ČSN ISO 4406

Kódy čistoty, stejně jako obsah prvků znečištění, nevykazovaly tak vysoké hodnoty, které byly naměřeny u strojů diskutovaných dříve. Maximální hodnotou, která byla naměřena při druhém odběru po 1020 motohodinách, je kód ve znění 19/18/17 dle ČSN ISO 4406. Nejnižší kód čistoty byl zaznamenán při 2498. motohodině. Výsledky měření, tedy grafické vyjádření kódu čistoty dle ČSN ISO 4406, jsou vyjádřeny na grafu 5.12. Na vodorovné ose jsou hodnoty velikosti částic a na svislé logaritmické stupnici je uveden počet částic v 1 ml vzorku.



Graf 5.12 Rozpětí kódů čistoty – Cat 428 E

5.5 Doporučení pro praxi

Na základě získaných dat je částečně možné formulovat doporučení pro praktický provoz stavebních strojů a doporučit doplňující metody tribotechnické diagnostiky pro komplexnější zhodnocení výsledků. Níže jsou uvedeny některé kroky, které by měly vést ke snížení znečištění hydraulických olejů stavebních strojů a eliminovat tak náklady spojené s řešením případných poruch.

- Z důvodu zjištěných vysokých kódů čistoty se doporučuje důsledně provádět filtraci nového oleje při výměně.
- Dbát na čistotu nového hydraulického oleje a měřit kódy čistoty. Doporučená hodnota kódu čistoty pro nové oleje je 20/18/15 (Caterpillar Inc. 2016), vyjádřeno dle ČSN ISO 4406.
- Zvážit montáž tzv. UHE (Ultra High Efficiency) filtrů s pórovitostí 4 až 10 μm pro účinnější zachytávání částic.
- Prováděné analýzy doplnit o měření čísla kyselosti (TAN) pro potvrzení či vyloučení probíhající oxidace oleje spolu se sledováním změny kinematické viskozity. Provádění FTIR spektrometrie pro potvrzení přítomnosti oxidačních produktů může být problematické z důvodu interference s některými aditivami. (Robinson 2007)
- Pro přesné určení zdroje vysokých kódů čistoty se doporučuje mikroskopické zkoumání hydraulických olejů.
- Dlouhodobým sběrem dat vytvořit vývoj trendů obsahu otěrových kovů a dalších kontaminantů a následně stanovit normální, zvýšené, mezní a kritické hodnoty obsahu typické pro danou skupinu stavebních strojů.

6 Závěr

V této práci jsou rozebrány a diskutovány výsledky laboratorních analýz, kterým byly podrobeny vzorky hydraulického oleje ze stavebních strojů Caterpillar. Sledovaným hydraulickým olejem byl produkt s označením Cat HYDO na minerálním základu s viskozitní třídou ISO VG 32.

Vzorky byly odebírány ze čtyř stavebních strojů, dvou kolových nakladačů Cat 950 H a Cat 962 H, pásového rýpadla Cat 323D LN a kolového rýpadla-nakladače Cat 428 E. Počty odpracovaných motohodin se u jednotlivých strojů liší a jsou tak sledovány v různých fázích svého životního cyklu. Interval odebírání vzorků byl u všech stavebních strojů stanoven na přibližně 500 motohodin.

Sledovány byly primárně obsahy otěrových kovů železa, mědi, chromu a hliníku. Pro možné potvrzení kontaminace půdním prachem byly diskutovány také výsledky obsahu křemíku, který je v půdě přítomen v podobě písku. Dále byl sledován obsah vápníku, který je součástí vybraných aditiv, nicméně může být i kontaminantem. Obsahy otěrových kovů i ostatních kontaminantů byly získány pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

Druhým hodnoceným ukazatelem degradace oleje byly počty částic znečištění měřené pomocí automatického čítače částic a vyjádřené jako kódy čistoty dle ČSN ISO 4406.

Obsahy otěrových kovů se u jednotlivých strojů lišily. Nejvyšší obsahy otěrových kovů zastupovalo u všech strojů železo, prvek s druhými nejvyššími obsahy byla měď, a naopak velmi malých hodnot nabývaly obsahy hliníku a chromu. Nejvyšší obsahy železa lze snadno vysvětlit díky faktu, že se jedná o hlavní konstrukční prvek. Obsah mědi pochází z kluzných vedení, vodících pístních kroužků a výměníků tepla. Nejvyšší obsahy železa a mědi byly naměřeny u pásového rýpadla Cat 323D LN, konkrétně pak 91 ppm železa a 29 ppm mědi.

Pro potvrzení kontaminace půdním prachem byly sestaveny grafy zobrazující průběh obsahů křemíku, hliníku a vápníků. U dvou kolových nakladačů Cat 950 H a Cat 962 H se vyskytly společné znaky vývoje a výkyvů křivek, což může být důkazem znečištění půdním prachem. Naopak u zbylých dvou strojů není vzájemné sledování křivek trendů příliš patrné.

Velmi zajímavé bylo sledování kódů čistoty, které mnohdy nabývaly velmi vysokých hodnot, což nekorespondovalo s vývojem obsahů ošetrových kovů, ani s křivkami ostatních znečišťujících prvků. Důvody pro vysoké kódy čistoty mohou být různé. Prvním může být ovlivnění čítače bublinkami vzduchu, které se do vzorku mohly dostat během odběru spolu s dalšími nečistotami. Dalším možným vysvětlením může být přítomnost částic vzniklých z produktů oxidace olejů, neboť kaly a úsady vzniklé oxidačními procesy mohou vytvářet i tvrdé laky. Shlukováním těchto drobných částic vznikají větší, které mohou ovlivnit výsledný kód čistoty. (Phillips a Staniewski 2016) Probíhající oxidaci lze potvrdit např. pomocí FTIR infračervené spektrometrie, ovšem v případě přítomnosti některých druhů aditiv dochází k interferencím. (Robinson 2007) Vhodnějším postupem pro odhalení oxidace by bylo zvolit titraci pro učení čísla kyselosti (TAN).

7 Seznam použitých zdrojů

- 1) ADDINOL LUBE OIL GMBH, [b.r.]. *What is HC synthetic oil?* [online] [vid. 2024a-03-26]. Dostupné z: <https://addinol.de/en/service-en/expert-tip/hc-synthetic-oil/>
- 2) ADDINOL LUBE OIL GMBH, [b.r.]. *What is viscosity?* [online] [vid. 2024b-02-05]. Dostupné z: <https://addinol.de/en/service-en/expert-tip/viscosity/>
- 3) ANDERSON, Daniel, 1998. Spectroscopy for Large Particle Measurement. *Practicing Oil Analysis* [online]. [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/104/spectroscopy-particle>
- 4) ANTEST.COM, [b.r.]. *Spektometr SPECTROBLUE* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://antest.com/spectro-spectroblue>
- 5) BEČKA, Jan, 1997. *TRIBOLOGIE*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01621-8.
- 6) BHEEMAPPA, Suresha, Hemanth GURUMURTHY, Vishal V BADAMI a Prasanna R HEGDE, 2023. 13 - Tribological behavior of polymeric systems in lubricated surfaces or conditions. In: Soney C GEORGE, Jozef T HAPONIUK, Sabu THOMAS, Rakesh REGHUNATH a Sarath P. S., ed. *Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites* [online]. B.m.: Elsevier, s. 357–399. ISBN 978-0-323-90748-4. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00005-4>
- 7) BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL, 2006. *Základy zpracování a využití ropy*. Praha: VŠCHT. ISBN 80-7080-619-2.
- 8) BRUCE, Robert W, 2012. *Handbook of Lubrication and Tribology, Volume II: Theory and Design, Second Edition* [online]. Baton Rouge, UNITED STATES: Taylor & Francis Group. ISBN 9781420069099. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=945462>
- 9) BUREŠ, Pavel a Pavel NĚMEC, 2012. Měření čistoty hydraulických kapalin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [vid. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-cistoty-hydraulickych-kapalin>
- 10) CATERPILLAR INC., 2016. *Caterpillar Machine Fluids Recommendations*. červenec 2016.
- 11) CATERPILLAR.COM, [b.r.]. *Kolový nakladač Cat 962* [online] [vid. 2024a-02-25]. Dostupné z: https://www.cat.com/en_MX/products/new/equipment/wheel-loaders/medium-wheel-loaders/119280.html
- 12) CATERPILLAR.COM, [b.r.]. *Nakladač Cat 950 H* [online]. [vid. 2024b-02-25]. Dostupné z: https://www.cat.com/de_DE/products/new/equipment/wheel-loaders/medium-wheel-loaders/119180.html
- 13) CUPAL, Tomáš, 2017. *Stanovení degradace hydraulického oleje*. Brno. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
- 14) DERIÁNOVÁ, K, J FIEDLER a J KAUFMAN, [b.r.]. *Nenewtonovské kapaliny* [online]. [vid. 2024-03-21]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2009-2010/Zima09/proc/nenewt.pdf>
- 15) DODDANAVAR, Ravi, Andries BARNARD a Jayaraman GANESH, 2005. *Practical Hydraulic Systems: Operation and Troubleshooting for Engineers and Technicians* [online]. San Diego, UNITED KINGDOM: Elsevier Science & Technology. ISBN 9780080455488. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=234940>

- 16) EKOLUBE S.R.O., [b.r.]. Výkonová klasifikace průmyslových maziv [online]. [vid. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/poradna/vykonova-klasifikace-prumyslovych-maziv>
- 17) EKOLUBE S.R.O. a Jaroslav ČERNÝ, [b.r.]. VLASTNOSTI MOTOROVÝCH OLEJŮ - VISKOZITA. *AutoEXPERT* [online]. [vid. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/poradna/vlastnosti-motorovych-oleju-viskozita>
- 18) E-LEARNING.VSCHT.CZ, [b.r.]. *Newtonovská tekutina* [online] [vid. 2024-01-16]. Dostupné z: https://e-learning.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/newtonska_tekutina.html
- 19) FITCH, Bennett a NORIA CORPORATION, 2013. *Anatomy of Wear Debris. Machinery Lubrication* [online]. [vid. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29537/wear-debris-anatomy>
- 20) GLAESER, William A, 2012. *Characterization of Tribological Materials, Second Edition* [online]. New York, UNITED STATES: Momentum Press. ISBN 9781606502594. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=954628>
- 21) GLASBY, Geoffrey P., 2006. Abiogenic Origin of Hydrocarbons: An Historical Overview. *Resource Geology* [online]. **56**(1), 83–96. ISSN 1344-1698. Dostupné z: [doi:10.1111/j.1751-3928.2006.tb00271.x](https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2006.tb00271.x)
- 22) GREBENIŞAN, Gavril, Nazzal SALEM a Sanda BOGDAN, 2018. *The lubricants' parameters monitoring and data collecting* [online]. 2018. Les Ulis: EDP Sciences. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1051/mateconf/201818403008](https://doi.org/10.1051/mateconf/201818403008)
- 23) HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ, 2001. *Technická diagnostika a spolehlivost, I. Tribodiagnostika*. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. ISBN 80-7078-883-6.
- 24) HNILICOVÁ, Michaela a Marián KUČERA, 2013. Tribotechnická diagnostika hydraulických olejov v laboratorných a prevádzkových podmienkach. *ACTA FACULTATIS TECHNICAЕ: Acta facultatis technicae: vedecký časopis Fakulty environmentálnej a výrobnjej techniky*. 65–76. ISSN 1336- 4472.
- 25) HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER, 2011. *Spalovací motory, Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada Publishing, a. s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- 26) HSU, Chang Samuel a Paul R ROBINSON, 2017. *Springer Handbook of Petroleum Technology* [online]. Cham, SWITZERLAND: Springer International Publishing AG. ISBN 9783319493473. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=5215325>
- 27) KHALAFVANDI, Seyed Ali, Muhammad Ali PAZOKIAN a Ehsan FATHOLLAHI, 2022. The Investigation of Viscometric Properties of the Most Reputable Types of Viscosity Index Improvers in Different Lubricant Base Oils: API Groups I, II, and III. *Lubricants* [online]. **10**(1). ISSN 2075-4442. Dostupné z: [doi:10.3390/lubricants10010006](https://doi.org/10.3390/lubricants10010006)
- 28) KUBEN, J, P RAČKOVÁ, O ŠIMON a M ZAJAC, 2019. Modelling of oil tribotechnical data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. **710**, 012032. ISSN 1757-899X. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/710/1/012032](https://doi.org/10.1088/1757-899X/710/1/012032)
- 29) LECTURA GMBH, [b.r.]. *Rypadlonakladač Cat 428 E2* [online] [vid. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.lectura-specs.com/en/model/construction-machinery/backhoe-loaders-caterpillar/428e-4x4-1030820>

- 30) LEE, Stephen K, John M ROSENBAUM, Yalin HAO a Guan-Dao LEI, 2017. Premium Lubricant Base Stocks by Hydroprocessing. In: Chang Samuel HSU a Paul R ROBINSON, ed. *Springer Handbook of Petroleum Technology* [online]. Cham: Springer International Publishing, s. 1015–1042. ISBN 978-3-319-49347-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-49347-3_34
- 31) MAC HYDRAULICS, 2017. *Hydraulic Component Wear Down – 6 Ways It Happens* [online] [vid. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://mac-hyd.com/blog/hydraulic-component-wear/>
- 32) NEALE, Michael J, 2000. *Lubrication and Reliability Handbook* [online]. San Diego, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology. ISBN 9780080523149. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=298350>
- 33) NORIA CORPORATION a ERNEST C. FITCH, [b.r.]. Cavitation Explained and Illustrated. *Machinery Lubrication* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/380/cavitation-wear-hydraulic>
- 34) PAEGLIS, Tālis, Pāvēls KARABEŠKO, Inese MIERIŅA, Rasma SERŽANE, Maija STRĒLE, Velta TUPUREINA a Māra JURE, 2009. Compositions of hydraulic fluids based on rapeseed oil and its derivatives. In: *8th international scientific conference: Engineering for Rural Development*. s. 28–29.
- 35) PAUL FARLESS, 2022. How Does Oil Biodegradability Work? *Machinery Lubrication* [online]. [vid. 2023-11-21]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/32139/how-does-oil-biodegradability-work?>
- 36) PAVLOK, Bohuslav, 1999. *Hydraulické prvky a systémy. Díl 1, Kapaliny v hydraulických mechanismech hydrostatické převodníky*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita. ISBN 80-7078-620-5.
- 37) PAVLOK, Bohuslav, Lumír HRUŽÍK a Miroslav BOVA, 2007. *HYDRAULICKÁ ZAŘÍZENÍ STROJŮ, učební text* [online]. [vid. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/414/hydraulicka-zarizeni-stroju.pdf>
- 38) PHILLIPS, W. D. a J. W. G. STANIEWSKI, 2016. The origin, measurement and control of fine particles in non-aqueous hydraulic fluids and their effect on fluid and system performance. *Lubrication Science* [online]. **28**(1), 43–64. ISSN 0954-0075. Dostupné z: doi:10.1002/ls.1300
- 39) PUDELSKI, K, John, 2022. *What Additive Components Are in Your Hydraulic Fluid?* [online] [vid. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://360.lubrizol.com/2022/What-Additive-Components-Are-in-Your-Hydraulic-Fluid>
- 40) REN, Chenfei, Xingxing ZHANG, Ming JIA, Chenming MA, Jiaxin LI, Miaomiao SHI a Yunyin NIU, 2023. Antifoaming Agent for Lubricating Oil: Preparation, Mechanism and Application. *Molecules* [online]. **28**(7). ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules28073152
- 41) ROBINSON, Neil, 2007. Monitoring Oil Degradation With Infrared Spectroscopy. *Practicing Oil Analysis* [online]. [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1109/oil-degradation-spectroscopy>
- 42) RUDOI, Radu, Marian BLEJAN, Alexandru HRISTEA a Bogdan TUDOR, 2020. Contributions to the modernization of fluid power field by integration of intelligent equipment [online]. ISSN 2719-3306. Dostupné z: doi:10.32056
- 43) SALISBURY, Jeremy, 2012. Řízení minimalizace znečištění hydraulických systémů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [vid. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rizeni-minimalizace-znecistenihydraulickych-systemu>

- 44) SHARIF, Mohd Zaki, Wan Hamzah AZMI, Mohd Fairusham GHAZALI, Nurul Nadia Mohd ZAWAWI a Hafiz Muhammad ALI, 2023. Viscosity and Friction Reduction of Double-End-Capped Polyalkylene Glycol Nanolubricants for Eco-Friendly Refrigerant. *Lubricants* [online]. **11**(3). ISSN 2075-4442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants11030129
- 45) SOUKUP, Milan, [b.r.]. Hydraulické oleje [online]. [vid. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.rostlinnyolej.cz/12-filtrace-motorov%C3%A9ho-a-hydraulick%C3%A9ho-oleje/46-hydraulick%C3%A9ho-oleje>
- 46) SPECTRO.CZ, [b.r.]. Čítač částic Spectro LNF Q200 [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.spectro.cz/analyzator-spectro-lasernet-rady-200/>
- 47) SPURLOCK, Matt a Stacy HESTON, 2008. Evaluating the Source of Silicon in Oil. *Practicing Oil Analysis* [online]. [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1356/silicon-oil-source>
- 48) ŠRÁMEK, Vít., Luboš BORŮVKA, Ondřej DRÁBEK, Věra FADRHOŇSOVÁ, Radek NOVOTNÝ, Václav TEJNECKÝ a Lucie VORTELOVÁ, 2011. *Metody analýz forem hliníku v lesních půdách, půdním roztoku a kořenech dřevin: certifikovaná metodika*. B.m.: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. ISBN 9788074170546.
- 49) TORBACKE, Marika, Asa Kassman RUDOLPHI a Elisabet KASSFELDT, 2014a. *Lubricants: Introduction to Properties and Performance* [online]. Newark, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated. ISBN 9781118799703. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=1642417>
- 50) TOTTEN, George E, Victor J DE NEGRI a Victor J De NEGRI, 2011. *Handbook of Hydraulic Fluid Technology* [online]. Baton Rouge, UNITED STATES: Taylor & Francis Group. ISBN 9781420085273. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=919005>
- 51) U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, [b.r.]. *Drilling Into the Basics of Crude Oil* [online]. [vid. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/energysaver/drilling-basics-crude-oil>
- 52) VÁCLAV ŠTĚPINA a VÁCLAV VESELÝ, 1992. *Lubricants and special fluids*. B.m.: Elsevier. ISBN 0-444-98674-X.
- 53) VÄHÄOJA, Pekka, Ilkka VÄLIMÄKI, Katri HEINO, Paavo PERÄMÄKI a Toivo KUOKKANEN, 2005. Determination of Wear Metals in Lubrication Oils: A Comparison Study of ICP-OES and FAAS. *Analytical Sciences* [online]. **21**(11), 1365–1369. ISSN 1348-2246. Dostupné z: doi:10.2116/analsci.21.1365
- 54) WEEKS, Jack a NORIA CORPORATION, 2016. Why Hydraulic Oil Changes Color. *Machinery Lubrication* [online]. [vid. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/30495/hydraulic-oil-color>
- 55) WHITBY, R David, 2022. *Lubricant Analysis and Condition Monitoring* [online]. Milton, UNITED KINGDOM: Taylor & Francis Group. ISBN 9781000520262. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=6810034>
- 56) WRIGHT, Jeremy, 2008. A Simple Explanation of Viscosity Index Improvers. *Machinery Lubrication* [online]. [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1327/viscosity-index-improvers>
- 57) ZAKARIAN, Jack, 2012. The Limitations of the Viscosity Index and Proposals for Other Methods to Rate Viscosity-Temperature Behavior of Lubricating Oils.

International Journal of Fuels and Lubricants [online]. 5(3), 1123–1131. Dostupné z: doi:10.2307/26272834

58) ZEPPELIN CZ S.R.O., [b.r.]. *Pásové rýpadlo 323* [online] [vid. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.zepelin.cz/online-katalog/stavebni-stroje-caterpillar/rypadla/pasova-rypadla/rypadla-1-1-az-40-tun/cat-323?cHash=450851095db65c002ddeade6f7d2d6b4>

Seznam obrázků

Obrázek 3.1 Základní druhy opotřebení (Helebrant et al. 2001)	17
Obrázek 3.2 Viskozita (Deriánová et al. [b.r.])	19
Obrázek 3.3 Viskozitní index (ADDINOL Lube Oil GmbH [b.r.])	21
Obrázek 3.4 Využití ropných produktů (ADDINOL Lube Oil GmbH [b.r.])	28
Obrázek 3.5 Faktory ovlivňující degradaci oleje (Weeks a Noria Corporation 2016)	36
Obrázek 3.6 Detekce snížení intenzity světla (Bureš a Němec 2012)	43
Obrázek 3.7 Detekce rozptylu světla (Bureš a Němec 2012)	43
Obrázek 3.8 Ferografie (Helebrant et al. 2001)	44
Obrázek 3.9 Částice adhezivního opotřebení (Fitch a Noria Corporation 2013)	45
Obrázek 3.10 Částice abrazivního opotřebení (Fitch a Noria Corporation 2013)	45
Obrázek 3.11 Částice únavového opotřebení (Fitch a Noria Corporation 2013)	46
Obrázek 4.1 Kolový nakladač Cat 950 H (caterpillar.com [b.r.])	48
Obrázek 4.2 Pásové rýpadlo Cat 323D LN (Zeppelin CZ s.r.o. [b.r.])	49
Obrázek 4.3 Kolový nakladač Cat 962 H (caterpillar.com [b.r.])	50
Obrázek 4.4 Rýpadlo-nakladač Cat 428 E (Lectura GmbH [b.r.])	51
Obrázek 4.5 SPECTROBLUE ICP-OES (antest.com [b.r.])	52
Obrázek 4.6 Čítač částic Spectro LNF Q200 (spectro.cz [b.r.])	53

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Porovnání viskozitních indexů	20
Tabulka 3.2 Minerální (ekologicky nešetrné) oleje, Zdroj dat: (EKOLUBE s.r.o. [b.r.]) ...	24
Tabulka 3.3 Skupiny základových olejů dle API, Zdroj dat: (Bruce 2012)	28
Tabulka 3.4 Požadavky na hydraulické kapaliny, Zdroj dat: (Doddannavar et al. 2005)....	36
Tabulka 4.1 Parametry sledovaného oleje	47
Tabulka 5.1 Obsahy otěrových kovů – Cat 950 H.....	56
Tabulka 5.2 Obsah ostatních prvků – Cat 950 H.....	58
Tabulka 5.3 Obsah otěrových kovů – Cat 323D LN	61
Tabulka 5.4 Obsah ostatních prvků – Cat 323D LN.....	63
Tabulka 5.5 Obsah otěrových kovů – Cat 962 H.....	66
Tabulka 5.6 Obsah ostatních prvků – Cat 962 H.....	68
Tabulka 5.7 Obsah otěrových kovů – Cat 428 E	71
Tabulka 5.8 Obsah ostatních prvků – Cat 428 E	72

Seznam grafů

Graf 5.1 Obsah otěrových kovů – Cat 950 H.....	57
Graf 5.2 Obsah ostatních prvků – Cat 950 H.....	58
Graf 5.3 Rozpětí kódů čistoty – Cat 950 H.....	60
Graf 5.4 Obsah otěrových kovů – Cat 323D LN.....	62
Graf 5.5 Obsah ostatních prvků – Cat 323D LN.....	63
Graf 5.6 Rozpětí kódů čistoty – Cat 323D LN.....	65
Graf 5.7 Obsah otěrových kovů – Cat 962 H.....	67
Graf 5.8 Obsah ostatních prvků – Cat 962 H.....	68
Graf 5.9 Rozpětí kódů čistoty – Cat 962 H.....	70
Graf 5.10 Obsah otěrových kovů – Cat 428 E.....	71
Graf 5.11 Obsah ostatních prvků – Cat 428 E.....	72
Graf 5.12 Rozpětí kódů čistoty – Cat 428 E.....	73

Seznam použitých zkratek

API	American Petroleum Institute
ČSN	Česká technická norma
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EN	Evropská norma
FTIR	Fourier transform infrared (spectroscopy)
ICP-OES	Inductively coupled plasma optical emission spectrometry
ISO	International Organization for Standardization
NAS	National Aerospace Standard
p_{amb}	Atmosférický tlak
PAO	Polyalfaolefiny
SAE	Society of Automotive Engineers
SS	Swedish standard
TTD	Tribotechnická diagnostika
ZDDP	Dithiofosforečnan zinečnatý

8 Přílohy

Příloha I: Kapaliny se sníženou hořlavostí.....	2
Příloha II: Kapaliny biologicky odbouratelné	3
Příloha III: Ropa.....	4
Příloha IV: Přehled souvisejících norem	5

Příloha I: Kapaliny se sníženou hořlavostí

Tabulka I Kapaliny se sníženou hořlavostí, Zdroj dat: (EKOLUBE s.r.o. [b.r.]

Kapaliny se sníženou hořlavostí dle ISO 6743/4 a DIN 51524			
ISO	DIN	Složení a vlastnosti	Použití
HFAE	HFAE	Emulze olej ve vodě s podílem vody >80 %	Pohony s tlaky cca 300 bar určené pro důlní použití
HFAS	HFAS	Syntetické vodné roztoky bez ropných složek s podílem vody >80 %	Hydrostatické pohony s tlaky cca 160 bar (+5 až +55 °C)
HFB	HFB	Emulze voda v oleji s podílem oleje cca 60 %	Těžební průmysl
HFC	HFC	Vodné roztoky polymerů s podílem vody >35 %	Hydrostatické průmyslové a důlní pohony
HFDR	HFDR	Bezvodé syntetické kapaliny na bázi fosforečných esterů	Mazání a regulace turbín, hydrostatické mechanismy
HFDS	HFDS	Bezvodé syntetické kapaliny na bázi chlorovaných uhlovodíků	Aplikace s vysokým požadavkem na odolnost proti hoření
HFDT	HFDT	Směsi kapalin HFDR a HFDS	Aplikace s vysokým požadavkem na odolnost proti hoření
HFDU	HFDU	Jiné syntetické kapaliny (např. diestery)	Průmyslové hydrostatické pohony (-35 až +90 °C)

Příloha II: Kapaliny biologicky odbouratelné

Tabulka II Rostlinné a syntetické oleje biologicky odbouratelné, Zdroj dat: (EKOLUBE s.r.o. [b.r.])

Rostlinné a syntetické oleje ekologicky šetrné/biologicky odbouratelné dle ISO 6743/4 a DIN 51502			
ISO	DIN	Složení a vlastnosti	Použití
HEPG	HEPG	Polyalkylenglykoly rozpustné ve vodě	Hydrostatické pohony, zámky vodní hydrauliky (-30 až +90 °C)
HETG	HETG	Hydraulické oleje na rostlinné bázi	Mobilní hydraulické systémy, hydrostatické pohony (-20 až +70 °C)
HEES	HEES	Hydraulické oleje na bázi esterů	Mobilní hydraulické systémy, hydrostatické pohony (-30 až +90 °C)
HEPR	HEPR	Polyalfaolefiny nerozpustné ve vodě	Průmyslové, mobilní hydrostatické pohony (-35 až +80 °C)

Příloha III: Ropa

Vznik ropy popisují mnohé domnělé scénáře, které se často vzájemně vylučují. Nicméně rámcově vymezují dvě hlavní teorie, a to teorii organickou a anorganickou. Organická teorie pracuje s myšlenkou, že ropa vznikla z těl odumřelých rostlin a živočichů, jež byla akumulována na dně moří a vodních ploch. Pod nánosy písku a jiných hornin na ně působily vysoké tlaky a teploty a daly tak vzniknout ropě. Druhou a méně pravděpodobnou teorií je anorganická geneze, tedy že směs uhlovodíku vznikla z anorganických látek, především karbidů, za působení vodní páry. Organické látky mohou za jistých podmínek vznikat i z látek anorganických, ovšem procento anorganické ropy je oproti ropě organické téměř zanedbatelné. (U.S. Department of Energy [b.r.]; Glasby 2006)

Ropa je kapalina, jejíž hustota se pohybuje v poměrně širokém rozpětí, a to od cca 0,61 g/cm³ do 1,05 g/cm³. Ropu lze rozdělovat podle místa, kde byla vytěžena z vrtů na například severomořskou (Brent), americkou (WTI), z Perského zálivu (Dubai), africkou (Nigerian light) a další druhy. Dále podle hustoty rozeznáváme ropy lehké, středně těžké a těžké. Konečně pak s ohledem na obsah síry na ropy kyselé (sour, obsah S 0,5 až 4 %) a sladké (sweet, obsah S do 0,5 %). (Blažek a Rábl 2006)

Příloha IV: Přehled souvisejících norem

ČSN EN ISO 9439: Jakost vod - Hodnocení úplné aerobní biologické rozložitelnosti organických látek ve vodním prostředí - Metoda stanovení uvolněného oxidu uhličitého.

ČSN EN ISO 3104: Ropné výrobky-Průhledné a neprůhledné kapaliny-Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity.

ČSN EN ISO 6743-4: Maziva, průmyslové oleje a příbuzné výrobky (třída L) - Klasifikace - Část 4: Skupina H (Hydraulické systémy).

ČSN ISO 4406: Hydraulické kapaliny - Kapaliny - Metoda kódování úrovně znečištění pevnými částicemi.

ISO 4407: Hydraulic fluid power - Fluid contamination - Determination of particulate contamination by the counting method using an optical microscope.

NAS 1638: International particle count standard.

SAE AS 4059: Aerospace-cleanliness classification for hydraulic fluids.