



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Pauli Riikonen

# Moottoriöljyn vaikutus raskaan ajoneu- voyhdistelmän polttoainetalouteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Ajoneuvotekniikka

Opinnäytetyö

24.5.2019

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Pauli Riikonen Moottoriöljyn vaikutus raskaan ajoneuvoyhdistelmän polttoainetalouteen 50 sivua + 1 liite 24.5.2019
Tutkinto	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	
Ohjaajat	Tutkintovastaava Heikki Parviainen Osaamisaluepäällikkö Pekka Hautala Voiteluaineliiketoiminnan johtaja, insinööri Jukka Luotonen, Oy Teboil Ab
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää moottoriöljyn vaikutusta raskaan ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen. Polttoainetaloudellisuus liittyy suoraan ajoneuvon tuottamiin CO<sub>2</sub>-päästöihin sekä polttoaineen hankintakustannusten kautta kuljetusliikkeen kannattavuuteen. Työhön liittyvässä taustatutkimuksessa perehdyttiin raskaan kaluston moottoriöljyjen nykyiseen kehitystilanteeseen sekä tulevaisuuden näkymiin sekä kitkahiöiden syntyyn moottorissa.</p> <p>Tutkimuksessa seurattiin käytännön ajo-olosuhteissa kymmenen keskenään samanlaisen raskaan ajoneuvoyhdistelmän liikennöintiä. Ajoneuvot ajoivat samaa vakioreittiä aina joko täyteen kuormattuna tai tyhjänä. Autoista viidessä käytettiin SAE 5W-30 -viskositeettiluokan öljyä. Muissa autoissa käytettiin normaaliin tapaan SAE 15W-40 -luokan öljyä. Polttoaineenkulutustieto kerättiin autoissa valmiina olevan kuljetusten tietojärjestelmän kautta.</p> <p>Havaintona oli, että juoksevammalla SAE 5W-30 -luokan öljyllä saatiin havaittava, jopa viiden prosentin luokkaa oleva, säästövaikutus tutkitussa ajoneuvojoukossa. Tuloksia käsiteltäessä havaittiin kuitenkin suhteellisen suuri varianssi testiöljyä käyttävien autojen välillä, minkä vuoksi tarkkaa polttoaineensäästöprosenttia ei pystytty luotettavasti määrittämään.</p> <p>Moottoriöljystä otettiin tutkimuksen aikana öljynäytteitä, jotka analysoitiin laboratoriossa. Näytteiden perusteella voitiin tehdä havainto, ettei juoksevamman öljyn käyttö lisää moottorin kulumista.</p> <p>Nyt tehtyjen havaintojen ja muiden aikaisempien aihepiiriä käsittelevien tutkimusten tarjoaman tiedon perusteella voidaan todeta, että alhaisemman viskositeettiluokan öljyn käyttö pienentää polttoainekulutusta ja sekä ajoneuvon hiilidioksidipäästöjä.</p>	
Avainsanat	Moottoriöljy, voiteluaine, polttoainetalous, ajoneuvoyhdistelmä, raskasliikenne

Author Title Number of Pages Date	Pauli Riikonen Impact of Engine Oil on Fuel Economy in Heavy Trucks 50 pages + 1 appendix 24 May 2019
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Master's Degree Programme in Automotive Engineering
Professional Major	
Instructors	Heikki Parviainen, Senior Lecturer Pekka Hautala, Head of Department Jukka Luotonen, Head of Lubricants Division, Oy Teboil Ab
<p>The objective of this Master's thesis was to examine the impact of the engine oil on fuel economy in heavy vehicle combination in real life driving conditions.</p> <p>Based on previous knowledge, there are many studies proving benefits of low viscosity oil in terms of fuel consumption. Before field trials topic- related literature was studied. One aim was to evaluate the possibilities to improve profitability of the transportation company. Also potential to CO<sub>2</sub>-emission reduction was calculated.</p> <p>In this study the objective was to compare two engine oils with different characteristics. Observed fleet contained 10 similar truck-trailer combinations with maximum total gross weight of 76 tons. These vehicles were driving the same constant route in northern Finland and the vehicles were always either fully loaded or unloaded. Observation was conducted during July-September to avoid the effect of slippery roads.</p> <p>Oil to be tested was SAE 5W-30 and filled in 5 trucks and 5 continued using SAE 15W-40 oil. The data was collected remotely through fleet management system. During the observation period each of the trucks made over 70 individual trips both loaded and unloaded and the average was calculated.</p> <p>The test results indicated that vehicles using 5W-30 had in average 5.3 percent lower fuel consumption. However, the variance between individual vehicles in the test group was relatively high which weakens the reliability of the results. Statistical analyses of the data were also made, and with significance level of 0.95 reduction in fuel consumption was 0.1–5.3 %. Oil samples indicated that use on lower viscosity oil did not cause increased wear.</p> <p>In conclusion, based on the observations in this and previous studies fuel savings of 1–4 % or even 5 % in some cases are feasible when SAE 15W-40 oil is replaced with SAE 5W-30. On an yearly basis, even small improvement in fuel economy provides significant savings in fuel expenses and lowers CO<sub>2</sub> -emissions.</p>	
Keywords	Engine oil, lubricant, fuel economy, heavy vehicle, heavy truck

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yleistä raskaan kaluston moottoriöljyistä	2
2.1	Moottoriöljyjen luokitusjärjestelmiä	2
2.1.1	SAE-viskositeettiluokitus	3
2.1.2	API	4
2.1.3	ACEA	5
2.2	Pakokaasupäästöjä alentavien järjestelmien vaikutus moottoriöljyyn	6
2.2.1	Moottoriöljyn kulkeutuminen pakojärjestelmään	7
2.2.2	Moottoriöljyjen SAPS-rajat	8
2.2.3	SAPS-yhdisteiden määrään vaikuttavat tekijät	9
2.2.4	Katalyysaattoreiden tehoa heikentäviä tekijöitä	10
2.3	Muita päästöjenalentamistavoitteiden vaikutuksia moottoriöljyyn	11
2.3.1	Vaatimukset termiselle vakaudelle	11
2.3.2	Pakokaasujen takaisinkierätyksen likakuormitus	12
2.3.3	Viskositeetin pysyvyys	13
3	Kitkahäviöt moottorissa	13
3.1	Kitkahäviöiden muodostuminen ja jakautuminen	14
3.2	Kitkatilanteet mäntä-sylinteri kontaktissa	18
3.3	Kitkatilanteet kampikoneistossa	20
3.4	Kitkatilanteet venttiilikoneistossa	21
4	Moottoriöljyn vaikutus hyötysuhteeseen	21
4.1	Kuumaviskositeetti	22
4.2	Kitkanmuokkaajalisäaineet	23
5	Muita tutkimuksia	24
5.1	VTT:n tutkimukset	24
5.2	Lisäainevalmistajien tutkimuksia	25
5.3	5W-30-öljyn kenttätutkimus CNG-busseissa	25
5.4	Öljytesti yksisylinterisessä dieselmoottorissa	26
6	Tutkimusasetelma	27

6.1	Tutkitut öljyt	27
6.2	Ajoneuvot	28
6.3	Tutkimusaika ja -paikka	30
6.4	Öljynvaihdot	31
7	Tulokset	32
7.1	Tulosten käsittely	32
7.2	Ajoneuvokohtaiset kulutukset	32
7.3	Tilastollinen analyysi	36
7.4	Tutkimuksen virhelähteet	38
7.4.1	Tutkitut ajosuoritteet	38
7.4.2	Kuormatilojen erot	39
7.4.3	Renkaat ja akselistot	41
7.5	Öljynäytteiden analysointi	43
7.6	Polttoaineenkulutuksen merkitys kuljetustalouden kannalta	43
8	Yhteenveto	46
	Lähteet	48
	Liitteet	
	Liite 1. Studentin t-testit luottamustasoilla 0,9; 0,95 ja 0,99	

## Lyhenteet

HTHS	High Temperature High Shear, kertoo öljyn viskositeetin korkeassa lämpötilassa (150 °C) ja leikkaavassa kuormituksessa.
mPa·s	Millipascalisekunti, SI-järjestelmän mukainen dynaamisen viskositeetin yksikkö. Senttipoiisi (cP) on suuruudeltaan sama CGS-järjestelmän yksikkö.
mm <sup>2</sup> /s	Neliömilliä sekunnissa, SI-järjestelmän mukainen kinemaattisen viskositeetin yksikkö. Senttistoki (cSt) on suuruudeltaan sama CGS-järjestelmän yksikkö
SAPS	Sulphated Ash, Phosphorus, Sulfur, eli sulfaattituhka, fosfori ja rikki. SAPS-yhdisteet voivat olla suurina määrinä haitallisia pakokaasun jälkikäsittelylaitteille.

## 1 Johdanto

Työn tutkimusongelmana oli selvittää moottoriöljyn vaikutus raskaan ajoneuvon polttoainetalouteen käytännön ajo-olosuhteissa. Työssä selvitetään myös polttoaineen kulutuksen taloudellista merkitystä.

Keskeisenä tutkimuskysymyksenä oli selvittää, onko polttoaineenkulutusta alentavan mutta hankintahinnaltaan kalliimman moottoriöljyn käyttö mielekästä kuljetustoiminnan kokonaiskustannusten kannalta. Polttoainetalouden parantuminen vähentäisi tässä tapauksessa suoraan myös liikenteen aiheuttamaa ympäristökuormitusta.

Maailmanlaajuisella tasolla noin 33 prosenttia raskaissa ajoneuvoissa käytetyn polttoaineen energiasisällöstä kuluu kitkahäviöiden voittamiseen. Jos tästä suljetaan pois jarrutuksiin hukkaantuva energia, osuus on 26 prosenttia. Uuden teknologian hyödyntäminen kitkahäviöiden minimoimiseksi voisi vähentää näitä häviöitä lyhyellä 4–8 vuoden aikavälillä 14 prosenttia ja pidemmällä 8–12 vuoden aikavälillä 37 prosenttia. Lyhyen aikavälin potentiaali tarkoittaisi 200 miljoonan tonnin vähennystä maailmanlaajuisissa hiilidioksidipäästöissä. Pitkällä aikavälillä hiilidioksidipäästöjen vähenemä voisi olla 530 000 tonnia. [Holmberg 2014.]

Voiteluaineiden myynnin näkökulmasta tutkimus antaa perusteita, joiden avulla voidaan ohjata asiakkaita tarkoituksenmukaisiin voiteluainevalintoihin.

Muuhun tutkimustietoon perustuen on tiedossa, että moottoriöljyvalinnalla voidaan vaikuttaa moottoriin sisäisiin häviöihin, jolloin moottorin hyötysuhteessa ja edelleen polttoaineen kulutuksessakin tapahtuu muutosta.

Raskaassa ammattiliikenteessä polttoainekustannukset edustavat erittäin merkittävää osaa liikennöinnin kokonaiskustannuksista. Jo prosentin alenema polttoainekulutuksessa on tavoittelemisen arvoinen.

Tutkimuksessa seurattiin raskaita ajoneuvoyhdistelmiä, jotka liikennöivät Sodankylässä sijaitsevan Kevitsan kaivoksen ja Kemin sataman välisellä ajoreitillä, jonka pituus yhteen suuntaan on noin 300 kilometriä. Kaikki ajoneuvot ovat Volvo-merkkisiä, ja ne on

otettu käyttöön lähes samanaikaisesti helmi-maaliskuun 2017 aikana. Ajoneuvot ajavat Kevitsasta Kemiin aina täydessä lastissa ja palaavat tyhjänä.

## 2 Yleistä raskaan kaluston moottoriöljyistä

Moottoriöljyn tärkein tehtävä on pitää moottorin liikkuvat pinnat erillään ja minimoida kitkasta aiheutuvat häviöt sekä moottorin kuluminen. Lisäksi sen tulee sietää hyvin kuumuutta ja kestää hapettumista, jota korkeat lämpötilat pyrkivät vauhdittamaan.

Raskaassa kalustossa moottoriöljylle asetettavat vaatimukset painottuvat hieman eritaivalla kuin kevyemmissä ajoneuvoissa. Dieselmoottorin palamisprosessi synnyttää suhteellisen runsaasti palojäämiä, jotka öljyn on kyettävä käsittämään. Lisäksi öljynvaihdevälit halutaan pitää usein pitkinä. Raskaan kaluston öljyissä painotetaan tyypillisesti tehokkaita puhtaana pitäviä ominaisuuksia. Tätä varten moottoriöljyissä käytetään likaa irrottavia (detergentit) ja hajauttavia (dispersantit) lisäaineita. [Kassfeldt ym. 2014: 110.]

Voiteluteknisten ominaisuuksien lisäksi öljyyn kohdistuu runsaasti muita vaatimuksia, jotka johtuvat halusta parantaa moottorin polttoainetaloudellisuutta tai pienentää pako-kaasupäästöjä.

Tällä hetkellä ajoneuvoteollisuuden tuotekehityksen merkittävänä painopisteenä on CO<sub>2</sub>-päästöjen ja siten myös polttoaineen kulutuksen alentaminen. Polttoainetalouden parantamiseksi myös moottorin sisäisiä kitkahäviöitä halutaan vähentää. Siksi päähuomio on tällä hetkellä kiinnitetty energiatehokkuuteen eli jokaisesta polttoainelitrasta halutaan saada entistä enemmän tehoa irti.

### 2.1 Moottoriöljyjen luokitusjärjestelmiä

Moottorivalmistajat asettavat yleensä minivaatimukset moottorissa käytettävän öljyn ominaisuuksille. Tunnetuin moottoriöljyjen ominaisuuksia kuvaavaa luokitusjärjestelmä on SAE J300 -viskositeettiluokitus, joka ottaa kantaa ainoastaan öljyn juoksevuusominaisuuksiin, ei muuhun suorituskykyyn. Tätä järjestelmää yllä pitää Yhdysvalloissa päämajaa pitävä SAE International (Society of Automotive Engineers). Viskositeetin lisäksi moottoriöljylle asetetaan myös useita muita vaatimuksia esimerkiksi suojaus- ja



puhtaanapito-ominaisuuksien suhteen. Usein moottorivalmistajien vaatimuksissa viitataan ACEA:n (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) tai API:n (American Petroleum Institute) suorituskykyluokkiin. Yhä useammin moottorivalmistajilla on omia luokitusjärjestelmiä, jotka usein pohjautuvat jompaankumpaan edellä mainituista luokitusjärjestelmistä, mutta sisältävät joitain lisävaatimuksia.

### 2.1.1 SAE-viskositeettiluokitus

SAE J 300 -standardi sisältää kaksi luokitusasteikkoa. W-luokat kuvaavat öljyn juoksevuusominaisuuksia kylmässä ja ilman oheiskirjainta olevat luokat kuvaavat kuumaominaisuuksia. Taulukossa 1 on esitetty kunkin luokan raja-arvot.

Kylmäominaisuuksien vertailun perustana on kolme arviointikohdetta: CCS-viskositeetti, pumpattavuuden rajalämpötila sekä viskositeetti 100 °C:n lämpötilassa. 0W-luokassa vaatimukset juoksevuudelle ovat tiukimmat ja vastaavasti 25W-luokan vaatimukset vähintään vaativat.

CCS-viskositeetti mitataan laitteella, joka simuloi öljyn käyttäytymistä kylmäkäynnistystilanteessa (Cold Cranking Simulator). Kullekin luokalle on dynaamisen viskositeetin maksimiarvo kyseisen luokan mittauslämpötilassa.

Pumpattavuuden rajalämpötila mitataan MRV-mittalaitteella (Mini Rotary Viscometer). Yleisesti pumpattavuuden rajalämpötilaa pidetään alimpana turvallisena kylmäkäynnistyslämpötilana, jossa kyseisen luokan öljyä käyttävän moottorin voi käynnistää ilman vauriovaaraa. Käytännössä alimpaan kylmäkäynnistyslämpötilaan vaikuttaa huomattavasti esimerkiksi öljypumpun sekä imuputken ja -siivilän rakenne sekä mahdolliset epäpuhtaudet.

Moottoriöljyn kuumaviskositeettiluokka määrittyy SAE-järjestelmässä kahdella eri mitaustavalla, jotka määrittävät öljyn kuumaviskositeettiluokan myös määrittämässä SAE-luokitusjärjestelmässä Ensimmäinen on kinemaattisen viskositeetin arvo 100 °C:n lämpötilassa. Toisena HTHS-viskositeetti (High Temperature High Shear Rate), joka määritetään erityisellä mittalaitteella, jossa öljyyn kohdistetaan leikkaava voima 150 °C:n lämpötilassa. Tällä testillä mitataan öljyn viskositeetin pysyvyyttä kuumissa ääriolosuhteissa.

Nykyistä kehityskulkua kuvaa myös se, että SAE-luokitusjärjestelmän kuumaviskositeettiluokkien määrä on lisätty. Vuonna 2015 tehdyssä päivityksessä järjestelmään lisättiin SAE 8- ja SAE 12 -luokat. Huomion arvoista uusissa luokissa on erittäin alhaiset 1,7 ja 2,0 mPa·s HTHS-viskositeetit. SAE 16 -luokka tuli järjestelmään 2013. Tätä aikaisemmin useiden vuosien ajan juoksevin moottoriöljyn kuumaviskositeettiluokka oli SAE 20. Kaikkein juoksevimpia öljyä käytetään kuitenkin lähinnä henkilöautokalustossa. [Engine Oil Viscosity Classification 2015.]

Taulukko 1. SAE J300 -viskositeettiluokat moottoriöljyille [Wright 2017].

SAE-luokka	CCS-viskositeetti		Pumpattavuuden rajalämpötila [°C]	Viskositeetti [mm <sup>2</sup> /s @ 100 °C]		HTHS [mPa·s]
	Maksimiarvo [mPa·s]	Mittauslämpötila [°C]		minimi	maksimi	
0 W	6 200	-35	-40	3,8	–	–
5 W	6 600	-30	-35	3,8	–	–
10 W	7 000	-25	-30	4,1	–	–
15 W	7 000	-20	-25	5,6	–	–
20 W	9 500	-15	-20	5,6	–	–
25 W	13 000	-10	-15	9,3	–	–
8	–	–	–	4,0	< 6,1	1,7
12	–	–	–	5,0	< 7,1	2,0
16	–	–	–	6,1	< 8,2	2,3
20	–	–	–	6,9	< 9,3	2,6
30	–	–	–	9,3	< 12,5	2,9
40	–	–	–	12,5	< 16,3	3,5*
40	–	–	–	12,5	< 16,3	3,7**
50	–	–	–	16,3	< 21,9	3,7
60	–	–	–	21,9	< 26,1	3,7

\*) Viskositeettiluokat SAE 0W-40, 5W-40 ja 10W-40  
 \*\*) Viskositeettiluokat SAE 15W-40, 20W-20, 25W-40 ja 40

### 2.1.2 API

Moottoriöljyjen API-luokitus on kehitetty Yhdysvalloissa API:n (American Petroleum Institute), ASTM:n (American Society for Testing and Materials) ja SAE:n yhteistyönä.

Moottoriöljyjen API-luokituksissa on perinteisesti ollut kaksi luokitusryhmää: S-kirjaimella alkavat luokitukset bensiinimoottoreille ja C-kirjaimella alkavat ryhmät dieselmoottoreille. Pohjois-Amerikassa dieselmoottorit ovat henkilöautoissa suhteellisen

harvinaisia, minkä vuoksi C-luokitussarja on käytössä lähinnä raskaammissa dieselmoottoreissa.

API-luokka ilmaistaan kahdella kirjaimella, joista jälkimmäinen kirjain vaihtuu aakkosjärjestyksessä seuraavaan vaatimusten muuttuessa. Dieselmootoreiden C-luokkien yhteydessä perässä on vielä numero 4 tai 2, jossa nelonen viittaa nelitahtiseen dieselmoottoriin; vastaavasti numero 2 viittaisi kaksitahtidieselille tarkoitettuun öljyyn. [Omeis & Harperscheid 2001: 183.]

Tällä hetkellä uudemmissa ajoneuvoissa on vaatimuksena usein API CJ-4. Uusimpana on vuonna 2016 julkaistu CK-4. Vähän vanhemmassa liikenteessä olevassa kalustossa vaatimuksena on usein CH-4 tai CI-4.

API-luokat ovat saman luokitussarjan sisällä taaksepäin yhteensopivia. Jos moottorin vaatimuksena on esimerkiksi API CH-4 -luokan öljy, moottorissa voidaan käyttää API CI-4 -luokan öljyä.

Polttoainetta säästäviä uusia dieselmoottoriöljyjä varten järjestelmään julkaistiin F-luokitussarja vuonna 2016. Uusi luokitussarja tarvittiin, koska järjestelmässä on haluttu pitää kiinni taaksepäin yhteensopivuuden periaatteesta. Ensimmäisenä julkaistuna luokkana on FA. Tässä luokassa on määritetty HTHS-viskositeetiksi 2,9–3,2 mPa·s, kun esimerkiksi ACEA:n E-luokitussarjassa minimivaatimuksena on edelleen 3,5 mPa·s. [Oil Categories.]

Matalampi HTHS-viskositeetti mahdollistaa paremman polttoainetalouden ja pienemmät CO<sub>2</sub>-päästöt. Jos moottoria ei ole suunniteltu käyttämään matalan viskositeetin öljyä, voi seurata ennen aikaista kulumista ja vaurio. HTHS:n merkitystä moottorissa on käsitelty tarkemmin luvussa 4.1.

### 2.1.3 ACEA

ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) on eurooppalainen autovalmistajien yhteinen edunvalvontajärjestö, joka toimii hyvin monella ajoneuvoteollisuutta koskevalla sektorilla. Eurooppalaisuudestaan huolimatta, ACEA:n jäsenenä on kuitenkin tällä hetkellä myös aasialaistaustaisia autovalmistajia. Järjestön muodostavat tällä hetkellä BMW Group, CNH Industrial, DAF Trucks, Daimler, Fiat Chrysler Auto-

mobiles, Ford of Europe, Honda Motor Europe, Hyundai Motor Europe, Jaguar Land Rover, PSA Group, Renault Group, Toyota Motor Europe, Volkswagen Group, Volvo Cars ja Volvo Group. [ACEA represents Europe's car, van, truck and bus manufacturers.]

ACEA-luokitus on jaettu moottorityyppien mukaan kolmeen pääryhmään: bensiinimoottorit (A), kevyen kaluston dieselmoottorit (B) ja raskaan kaluston dieselmoottorit (E).

Tällä hetkellä käytössä olevia raskaan kaluston luokkia ovat E4, E6, E7 ja E9. ACEA-järjestelmässä on huomioitava, että luokat eivät ole numerojärjestyksessä taaksepäin yhteensopivia. ACEA-järjestelmän viimeisin päivitys on julkaistu 2016. [ACEA European Oil Sequences. 2018.]

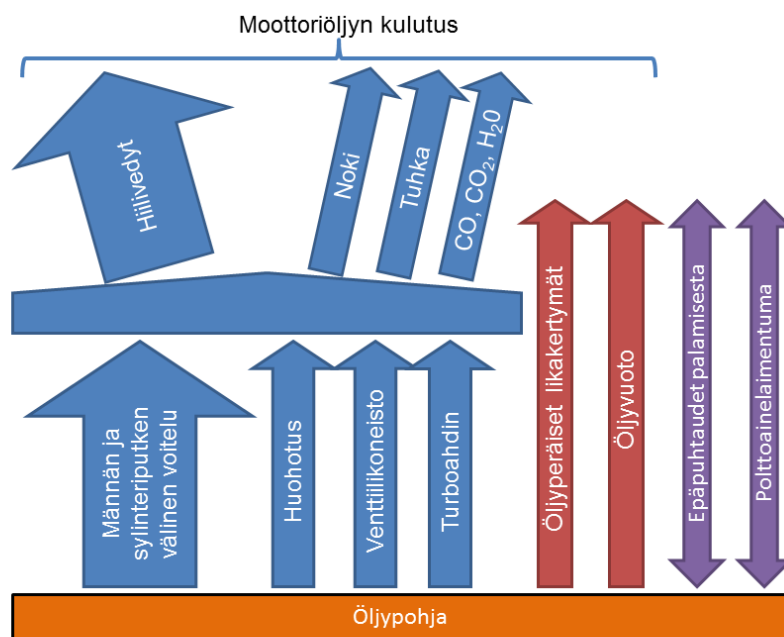
On odotettavissa, että vielä vuoden 2019 aikana ACEA tulee julkaisemaan päivityksen luokitusjärjestelmään. Päivityksen myötä myös ACEA-luokitusjärjestelmään tulee luokat matalan HTHS-viskositeetin moottoriöljyille. Esimerkiksi moottoriöljyjen lisäaineita valmistaman Lubrizolin mukaan uudet luokat tullevat olemaan nimeltään F11 ja F8 ja niiden HTHS-viskositeetti välillä 2,9–3,2 mPa·s kuten API:n FA-luokissa. F11 tulee todennäköisesti olemaan niin sanottu mid-SAPS-öljy ja F8 low-SAPS-öljy. Myös ACEA E6- ja ACEA E9 -luokkien ennustetaan päivittyvän E8- ja E11-luokiksi. [Proposed Changes to the ACEA Heavy-Duty Oil Sequences. 2018.]

## 2.2 Pakokaasupäästöjä alentavien järjestelmien vaikutus moottoriöljyyn

Tässä työssä käsitellään pääasiassa moottoriöljyn vaikutusta polttoaineenkulutukseen, joka on suorassa suhteessa hiilidioksidipäästöihin. Moottoriöljyyn vaikuttaa monin tavoin myös niin sanottuihin lähipäästöihin kohdistuneet päästörajoitukset. Raskaissa ajoneuvomoottoreissa keskeisimmät lähipäästökäsitteet ovat typenoksidit (NO<sub>x</sub>) ja pienhiukkaset (PM). Nämä päästöt heikentävät ilmanlaatua ajoneuvon toimintaympäristön läheisyydessä. Näiden päästöjen vähentämiseksi autoihin on asennettu useita erilaisia järjestelmiä, jotka aiheuttavat vaatimuksia myös moottoriöljylle. NO<sub>x</sub>-päästöjä hillitään pakokaasun takaisinkierrätyksellä sekä selektiiviseen katalyyttiseen pelkistykseen perustuvalla SCR-katalysaattorilla (selective catalytic reduction), joka käyttää toiminnassaan ureaperustaista AdBlue-lisäainetta. Hiukkaspäästöjä hillitään ensisijassa hiukkassuodattimen avulla.

## 2.2.1 Moottoriöljyn kulkeutuminen pakojärjestelmään

Moottoriöljy vaikuttaa pakokaasun jälkikäsitteilyjärjestelmään, sillä öljyä pääsee aina hieman palotilaan, jossa se palaa ja edelleen kulkeutuu pakosarjan kautta eteenpäin. Kuvassa 1 on esitetty seikat, jotka vaikuttavat moottoriöljyn kulumiseen ja öljyn määrän tasapainoon. Suurin osa öljyn kulutuksesta johtuu männän ja sylinteriputkien välisestä voitelusta. Puristus- ja poisto-tahdin aikana mäntä liikkuu ylös, jolloin mäntä työntää edellään öljyä palotilaan. Polttoaineen syttyessä voiteluainetta palaa polttoaineen mukana. Myös männän liikkeessä alaspäin työ- ja imu-tahden aikana, sylinteriputken pinnoille jää hieman öljyä. Osa palamattoman öljyn hiilivedyistä haihtuu kaasumaisiksi sylinterin pinnoilla, osa säilyy nestemäisenä tai muodostaa kiinteämpiä nokihiukkasia. Öljy muodostaa palaessaan myös tuhkaa, joka on erityisen haitallista hiukkassuodattimen kannalta, sillä se ei hiilestä ja hiilivedyistä koostuvien nokipartikkelien tapaan ole poltettavissa pois regenerointipoltolla.



Kuva 1. Moottoriöljyn määrään öljypohjassa vaikuttavat tekijät [mukailien Pistons and Engine Testing 2015: 262].

Kampikammion huuhotusjärjestelmä tasaa kampikammion painetta, ja sen kautta pääsee haihtumaan tavallisesti varsin pieniä määriä voiteluaineperäisiä hiilivetyjä. Pieniä määriä voiteluainetta pääsee sylinteriin ja pakosarjaan turboahdinten kautta. Jos venttiilivarsien tiivistys on kunnossa, venttiilikoneiston kautta moottoriin pääsevän öljyn mää-

rä on nykymoottoreissa lähes olematon. Edellä luetellut öljynkulutusmekanismit ovat normaaleja kunnossa olevassakin moottorissa, kunhan kulutus säilyy suunnitellulla tasolla. Sen sijaan kuvassa punaisella merkityt moottoriöljyn kulutusnuolet kuvaavat seikkoja, jotka eivät saisi aiheuttaa öljyn määrän vähenemistä. Öljyvuodot moottorissa ovat korjausta vaativa vika eikä moottoriöljy itsessään saisi muodostaa likakerrostumia moottoriin vaan päinvastoin sen tulee pitää moottori puhtaana.

Polttoainelaimentuma tarkoittaa ilmiötä, jossa kaikki palotilassa oleva polttoaine ei pala työtahdin aikana vaan osa polttoaineesta jää palotilaan ja kulkeutuu edelleen moottoriöljyn sekaan. Tällöin moottoriöljyn seassa oleva polttoaine lisää moottoriöljyn tilavuutta. Moottoriöljyn lämpötilan noustessa polttoainetta haihtuu öljyn seasta. Polttoaineen palamisesta syntyy myös muita palojäämiä, jotka vähäisessä määrin voivat lisätä moottoriöljyn määrää. [Pistons and engine testing 2015: 261.]

### 2.2.2 Moottoriöljyjen SAPS-rajat

Pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiden käyttöiän turvaamiseksi tarvitaan öljyjä, jotka muodostavat vähän tuhkaa sekä sisältävät vähän fosforia ja rikkiä. Moottoriöljyistä puhuttaessa käytetään usein SAPS-termiä, joka on lyhenne sanoista sulphated ash, phosphorus ja sulphur eli sulfaattituhka, fosfori ja rikki. SAPS-yhdisteiden määrään vaikuttaa sekä moottoriöljyssä käytetty perusöljy että lisäaineistus.

Usein käytetään ilmaisia kuten low-, mid- sekä full- ja normal-SAPS kuvaamaan SAPS-pitoisuutta. Tyypillisesti raskaan kaluston moottoriöljyistä puhuttaessa Low SAPS -öljyiksi kutsutaan öljyjä, jotka alittavat ACEA E6 -luokan rajat SAPS-yhdisteille. Vastaavasti ACEA E9 -luokan öljyjä kutsutaan Mid SAPS -öljyiksi. ACEA E4- ja E7-luokkien öljyillä sulfaattituhkan raja-arvo on löyhempi eikä fosforin ja rikin määrä ei ole rajoitettu. ACEA-luokkien raja-arvot on esitetty taulukossa 2. [ACEA European Oil Sequences 2018.]

Taulukko 2. Raskaan kaluston ACEA 2016 -moottoriöljyluokkien SAPS-rajat painoprosentteina. E6-luokassa rajat ovat tiukimmat [ACEA European Oil Sequences 2018].

	<b>E4</b>	<b>E6</b>	<b>E7</b>	<b>E9</b>
Sulfaattituhka (SA)	≤ 2,0	≤ 1	2	≤ 1
Fosfori (P)	-	≤ 0,08	-	≤ 0,12
Rikki (S)	-	≤ 0,3	-	≤ 0,4

ACEA ja API -luokitusjärjestelmissä käytetty sulfaattituhkamenetelmä on määritetty ASTM D874 -standardilla [ACEA European Oil Sequences 2018]. Tässä menetelmässä öljynäyte sytytetään ja sitä poltetaan, kunnes jäljellä on vain tuhkaa ja hiiltä. Näyte jäädytetään ja käsitellään rikkihapolla (sulfuric acid), jonka jälkeen sitä kuumennetaan 775 °C:n lämpötilassa, kunnes jäljellä oleva hiili on kokonaan hapettunut. Näytteen jäähtyttyä se käsitellään vielä uudelleen rikkihapolla. Näytettä kuumennetaan 775 °C:n lämpötilassa, kunnes sen massa ei enää muutu.

Näin voidaan määrittää öljyn palaessaan muodostaman tuhkan määrä. Tuhkan määrään vaikuttaa erityisesti metalleja sisältävien lisäaineiden määrä öljyssä. [Standard Test Method for Sulfated Ash from Lubricating Oils and Additives.] Lisäaineiden sisältämiä metalleja ovat esimerkiksi magnesium (Mg), kalsium (Ca) ja sinkki (Zn).

Öljyn muodostama tuhka on käytännössä ongelmallista erityisesti hiukkassuodattimen toiminnan kannalta, sillä tuhka kertyy suodattimeen eikä se ole noen tapaan regeneroitavissa. Siksi erityisesti hiukkassuodattimilla varustetuissa ajoneuvoissa on moottori-valmistaja suosittaa käytettäväksi öljyä, jonka sulfaattituhka-arvo on alhainen.

### 2.2.3 SAPS-yhdisteiden määrään vaikuttavat tekijät

Yksi keskeisistä moottoriöljyn SAPS-pitoisuuteen vaikuttavista lisäaineista on sinkki-alkyyliiditiofosfaatit, joista käytetään usein lyhennettä ZDDP. Ne toimivat moottoriöljyssä kulumisenestoaineena, antioksidanttina sekä korroosionestoaineena. Tarkalleen ottaen ZDDP-yhdisteitä on olemassa kolmea rakennetyyppiä: primäärinen alkyyli, sekundaarinen alkyyli ja aryyli. Näillä kaikilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Esimerkiksi sekundäärisellä saadaan hyvät kulumisenesto-ominaisuudet, mutta sen lämpötilastabiileetti on heikompi kuin aryyliisellä ja primäärisellä. [Braun & Omeis 2001: 105.]

ZDDP:n käyttö yleistyi voiteluaineissa jo 1930-luvun lopulta alkaen, ja sitä käytetään edelleen hyvin laajalti moottoriöljyissä ja muissa voiteluaineissa, sillä se on hinnaltaan suhteellisen edullista ja monilta teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvää [Spikes 2004]. Viime vuosina ZDDP:n määrää on vähennetty ja rinnalla on alettu käyttää lisäaineita, jotka auttavat vähentämään SAPS-yhdisteiden määrää.

ZDDP sisältää tyypillisesti noin 19 painoprosenttia rikkiä, 10 painoprosenttia fosforia ja 11 painoprosenttia sinkkiä. Loppuosuus on alkyyli-tyypisiä hiilivetyjä. [Kröger 2004.]

Fosfori (P, lat. phosphorus) on tyypillinen monissa voiteluaineen lisäaineissa esiintyvä alkuaine. Fosfori haittaa suurina määrinä katalysaattoreiden toimintaa.

Moottoriöljyissä rikki (S, sulphur) voi olla peräisin sekä perusöljystä että lisäaineista. Myös rikki on haitallista katalysaattoreiden toiminnalle. Myös ajoneuvossa käytettävä polttoaine voi sisältää rikkiä. Suomessa myytävä dieselpolttoaine täyttää rikittömyyden kriteerin, eli rikkipitoisuus  $\leq 10$  mg/kg. Erityisesti kehittyvissä maissa on edelleen käytössä myös runsasrikkisiä polttoaineita.

#### 2.2.4 Katalysaattoreiden tehoa heikentäviä tekijöitä

On olemassa useita ei-toivottuja kemiallisia ja fysikaalisia ilmiötä, jotka vaikuttavat epäsuotuisasti katalysaattoreiden toimintatehoon ja kestoikään. Vanhenemisilmiöt voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: mekaaninen, terminen ja kemiallinen vanheneminen. [Kröger 2007: 28.]

Mekaanista vanhenemista on esimerkiksi katalysaattorin likaantuminen sekä katalysaattorimateriaalin mekaaninen hajoaminen. Terminen vanheneminen tarkoittaa katalyyttisen pinnan toimintakyvyn heikkenemistä korkean lämpötilan seurauksena. Terminen vanhenemista vauhdittaa myös nopea lämpötilan nousu.

Voiteluaineen kannalta merkityksellisin on kuitenkin kemiallinen vanheneminen. Kemiallinen vanheneminen voi olla niin sanottua katalysaattorin myrkyttymistä, jossa haitalliset yhdisteet kiinnittyvät katalysaattorin aktiiviselle pinnalle ja estävät katalysaattorin toiminnan. Katalysaattorissa voi tapahtua myös muita kemiallisia reaktioita, kuten muodostua ei-toivottuja haituvia orgaanisia yhdisteitä, jotka haittaavat katalysaattorin toimintaa.

Yleisimmin katalysaattorin käyttöiän kannalta olennaisia vanhenemismekanismeja ovat terminen ja kemiallinen vanheneminen, jotka usein vaikuttavat samanaikaisesti. Katalysaattoreita voidaan kehittää edelleen, jotta ne kestäisivät vanhenemista paremmin. On kuitenkin kannattavaa vähentää kemiallista vanhenemista myös voitelu- ja polttoaineiden ominaisuuksia kehittämällä. [Kröger 2007: 27–28.]



Katalysaattorin myrkyttyminen on tyypillisesti hidas ja peruuttamaton ilmiö. Vaikka katalysaattorit ovat olleet yleisesti käytössä jo pitkään, kaikkia vanhenemisilmiöitä ei edelleenkaan tunneta tarkasti.

Tunnetuin katalysaattorimyrkky on ollut lyijy, jota lisättiin liikennekäytössä olevaan bensiiniin aikaisemmin. Tyypillisimmin katalysaattoreita myrkyttävät poltto- ja voiteluainelähtöiset rikki-, fosfori-, sinkki-, ja rikki-pitoiset aineet. Joissain tilanteissa katalysaattoria voivat myrkyttää myös moottorista peräisin olevat kulumametallit. [Kröger 2007: 30–34.]

Fosfori saattaa muodostaa yhdessä sinkin kalsiumin ja magnesiumin kanssa katalysaattorin pinnalle haitallisen pinnoitteen, joka voi olla esimerkiksi sinkkipyrosfosfaattia ( $Zn_2P_2O_7$ ). Matalan pakokaasun lämpötilan on todettu edesauttavan tätä ilmiötä. Katalysaattorin toimintaa haittaavia fosfaattiyhdisteitä on havaittu muodostuvan myös suoraan katalysaattorimateriaalin kanssa, jolloin muodostuu esimerkiksi alumiini- ja ceriumfosfaatteja. [Kröger 2007: 31–32.]

Rikin aiheuttama katalysaattorin myrkyttymisen taustalla on monimutkaisia ilmiöitä. On havaittu, että dieselmootoreiden yhteydessä käytettävät hapetuskatalysaattorit ovat alttiimpia rikin aiheuttamalle katalysaattorin vanhenemiselle kuin bensiinimootoreiden kolmitoimikatalysaattorit. Tämä johtuu siitä, että dieselmootorissa katalysaattorin lämpötila on tyypillisesti alhaisempi. Rikki muodostaa katalysaattorin pinnalle epäaktiivisia sulfaattiyhdisteitä, jotka haittaavat katalysaattorin toimintaa. [Kröger 2007: 33.]

### 2.3 Muita päästöjenalentamistavoitteiden vaikutuksia moottoriöljyyn

Sen lisäksi, että öljyn on oltava yhteensopiva pakokaasun jälkikäsittelyjärjestelmien kanssa, päästöjen alentamiseen tähtäävä moottoritekniikan kehitys on tuonut mukanaan myös muita suoria ja välillisiä vaatimuksia moottoriöljylle.

#### 2.3.1 Vaatimukset termiselle vakaudelle

Uudemmissa moottoreissa on tyypillisesti pyritty saamaan ylin männän rengas mahdollisimman lähelle männän lakea, sillä männänrenkaan yläpuolen ja sylinteriseinämän välisellä alueella ilma-polttoaineseoksen palaminen on epätäydellisempää. Epätäydell-

linen palaminen lisää sekä niin sanottuja säänneltyjä päästöjä että välillisesti myös CO<sub>2</sub>-päästöjä. Koska ylintä männänrengasta on siirretty ylöspäin, sen lämpötila nousee. [Köhler ym. 2010: 287.] Tästä syystä myös öljyyn kohdistuu entistä suurempi lämpökuorma. Myös turboahtimella lämpökuormitus on korkea.

Yksi keskeisistä moottoriöljyä vanhentavista ilmiöistä on hapettuminen, joka nopeutuu lämpötilojen noustessa. Perinteisillä mineraaliöljyillä (API Group I) on suurempi hapettumistaipumus kuin pidemmälle jalostetuilla perusöljyillä (API Group II–IV). Tämä on yksi syy, jonka vuoksi synteettisten perusöljyjen käyttö tulee entisestään lisääntymään. [Jääskeläinen & Majewski 2016.]

### 2.3.2 Pakokaasujen takaisinkierrätyksen likakuormitus

Pakokaasun takaisinkierrätyksen (EGR, Exhaust Gas Recirculation) avulla vähennetään moottorin korkeissa lämpötiloissa syntyviä typenoksidipäästöjä (NO<sub>x</sub>). Tässä järjestelmässä pakokaasua kierrätetään takaisin imupuolelle ja palotilaan. Tämän ansiosta sylinterissä oleva ilma-polttoaineseos palaa alhaisemmalla lämpötilalla, jolloin typen oksidipäästöt ovat alhaisemmat. Tämä järjestelmä muodostaa kuitenkin enemmän partikkelipäästöjä. Lisäksi palotilaan kierrätetty pakokaasu sisältää happamia palamistuotteita ja nokea, jotka edellyttävät käytettävältä moottoriöljyltä tehokkaita puhtaanapito-ominaisuuksia.

Pakokaasun takaisin kierrätyksen määrä vaihtelee eri moottorivalmistajilla. Niissä Euro IV- ja V -tasojen moottoreissa, joissa ei ole SCR-katalysaattoria pakokaasun takaisinkierrätyksen määrä on tyypillisesti suuri. Euro VI -tason moottoreissa NO<sub>x</sub>-päästörajan saavuttaminen kuitenkin on edellyttänyt SCR-tekniikan käyttöönottoa, jolloin pakokaasun takaisinkierrätyksen määrää on voitu vähentää tai jopa kokonaan poistaa. Euro VI -tason moottoreissa pakokaasun takaisinkierrätyksen aiheuttama likakuormitus on siis monissa tapauksissa alhaisempi kuin aikaisemman päästötason moottoreissa. Runsaaseen EGR:n käyttöön perustuvan moottorin öljyssä voi olla vaihtovälin lopussa suuruusluokkaa 3–4 prosenttia nokea. Vastaavasti ilman takaisinkierrätystä tai vähäisellä takaisinkierrätyksellä toimivassa moottorissa osuus on tyypillisesti 1–2 prosenttia. [Brass 2016.]

### 2.3.3 Viskositeetin pysyvyys

Yksi keskeinen vaatimus moottoriöljylle on viskositeetin pysyvyys. Viskositeetin pysyvyydelle on määritteitä useissa eri luokitusjärjestelmissä. Tyypillinen öljyn viskositeettia alentava ilmiö on viskositeetti-indeksin parantajalisäaineen leikkautuminen. Viskositeetti-indeksin parantajat ovat luonteeltaan polymeerejä, jotka paksuntavat öljyä kuumissa olosuhteissa. Polymeerit voivat katketa leikkaavan rasituksen alla eikä leikkautunut polymeeri enää kykene toimimaan. Käytettäessä perusöljyjä, joiden viskositeetti-indeksi on valmiiksi korkea sekä laadukkaita viskositeetti-indeksin parantajia, voidaan taata viskositeetin pysyvyys. [Braun & Omeis 2001: 91.]

Moottoriöljyn viskositeettia voi alentaa polttoainelaimentuma. Palamatonta polttoainetta voi päästä moottoriöljyn sekaan esimerkiksi polttoaineen jälkiruiskutuksen seurauksena. Polttoaineen jälkiruiskutusta käytetään monissa moottoreissa käynnistämään hiukkassuodattimen regenerointi. Polttoainelaimentuman melko yleinen aiheuttaja on viikaantunut polttoaineenruiskutussuutin, joka ei sulkeudu ruiskutuksen jälkeen vaan jää vuotamaan. [Schwartz 2010: 369.]

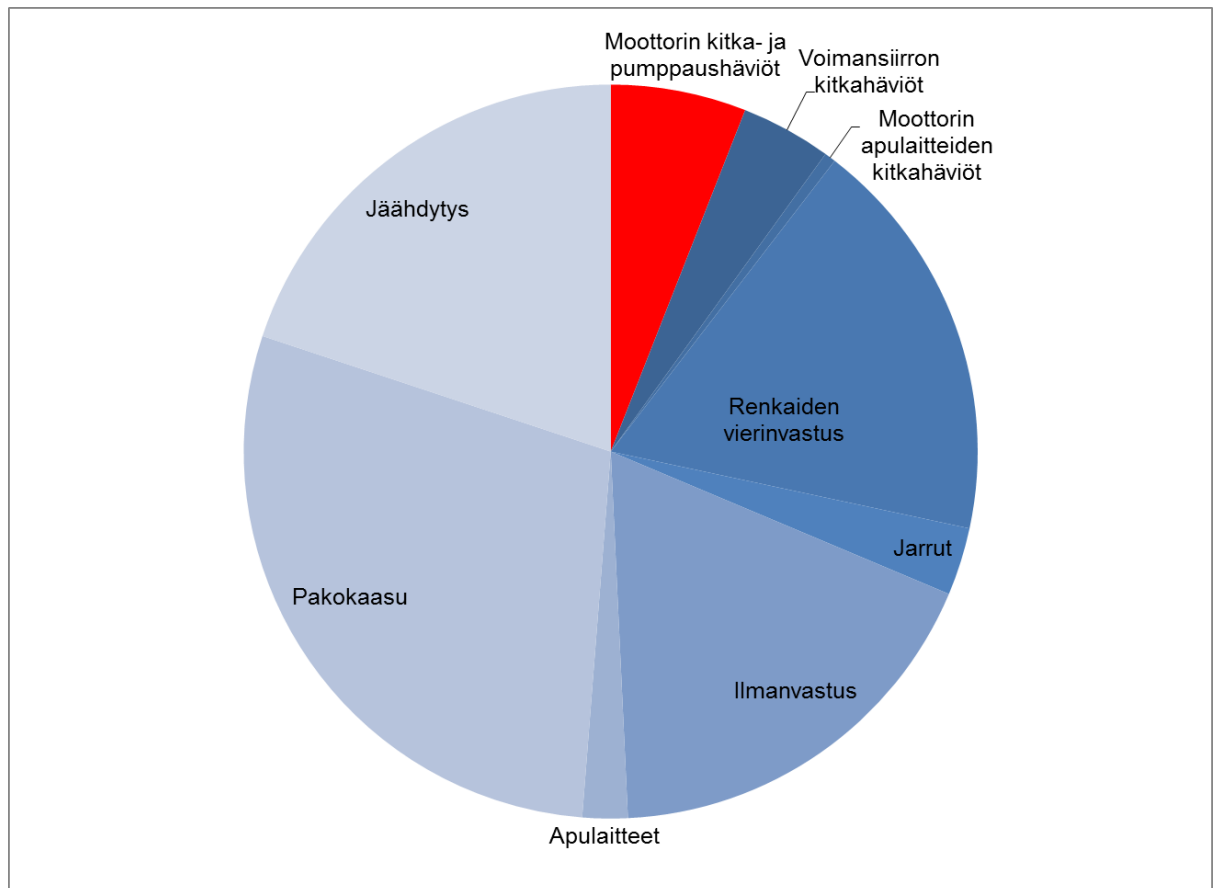
## 3 Kitkahäviöt moottorissa

Ajoneuvon energian kulutuksen jakautuminen erilaisten häviöiden voittamiseen vaihtelee erilaisissa ajosuoritteissa. Esimerkiksi kaupunkiliikenteen linja-autossa, jonka keskinopeus on 20 km/h, ilmanvastuksen osuus kokonaishäviöistä on suuruusluokkaa 2 prosenttia. Nopeudella 80 km/h liikkuvassa puoliperävaunuyhdistelmässä ilmanvastuksen osuus on noin 18 prosenttia. Toisaalta esimerkiksi jarrutuksista johtuva energiahukka on kaupunkiliikenteessä erittäin merkittävä.

Polttoaineen sisältämästä energiasta kaiken kaikkiaan suhteellisen pieni osuus hukkaantuu moottorin kitkahäviöiden voittamiseen. Moottorissa on useita erilaisia tilanteita, joissa liikkuvat metalliset pinnat ovat kosketuksissa toisiinsa. Moottorin keskeisimpiä voitelukohteita ovat kiertokankien ja kampiakselin laakerit, venttiilikoneisto sekä männän ja sylinteriseinämän kontakti.

Holmbergin ym. [2014] mukaan moottorin kitkahäviöiden osuus kokonaisenergiankulutuksesta on tyypillisesti kuorma-autossa 8 %, puoliperävaunuyhdistelmässä 6 %, kaupunkiliikenteen linja-autossa 10 % ja pitkän matkan linja-autossa 4 %.

Kuvassa 2 on esitetty polttoaineen energiasisällön jakautuminen eri kohteisiin puoliperävaunuyhdistelmässä, jonka kokonaispaino on 30 000 kg ja moottorina 12,5-litrainen 6-sylinterinen turboahdettu diesel, jonka teho on 300 kW.



Kuva 2. Polttoaineen energiasisällön jakautuminen puoliperävaunuyhdistelmässä [Holmberg ym. 2014].

### 3.1 Kitkahäviöiden muodostuminen ja jakautuminen

Öljykalvon paksuuden vaikutusta kitkakertoimeen esittää kuvassa 3 esitetty ns. Stribeckin-käyrä. Kuvaajan x-akselina oleva voiteluainekalvon ominaispaksuutta kuvaava  $\lambda$ -arvo ( $\lambda$ ) on voiteluainekalvon minimipaksuuden ja pinnankarkeuksien neliösumman osamäärä. Käyrästä voidaan havaita, että kitkakerroin on alhaisimmillaan kun

voitelukalvo on hyvin ohut, mutta ei kuitenkaan liian ohut, jolloin pintojen epätasaisuuksien välinen hankaus alkaa kasvattaa kitkaa ja kulumista. Käyrän muoto vaihtelee hieman eri öljyillä, mutta perusperiaate on kuitenkin sama. [Kassfeldt ym. 2014: 11.]

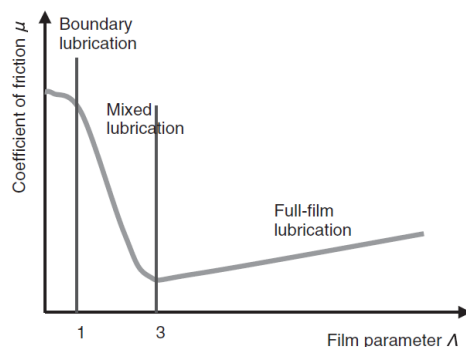
Voitelutilanteita on voitelukalvon suhteellisesta paksuudesta ja pinnan laatueroista riippuen useita erilaisia. Kuva 4 havainnollistaa voitelutilanteita.

Rajavoiteluksi (boundary lubrication) kutsutaan voitelutilannetta, jossa liikkuvien pintojen kitkaan ja kulumiseen vaikuttavat lähinnä pintojen ja voiteluaineen ominaisuudet. Pintojen ja voiteluaineen kemiallisilla reaktioilla on keskeinen merkitys kitkan ja kulumisen kannalta, sillä rajavoitelutilanteessa pinnan karkeuksien huiput ovat kontaktissa toisiinsa.

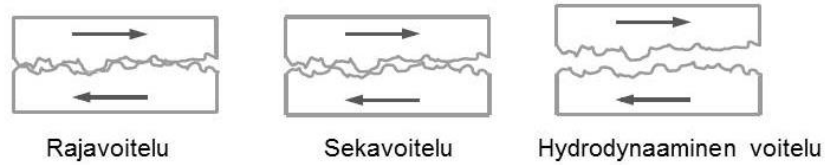
Sekavoitelutilanne (mixed film lubrication) on rajavoitelun ja hydrodynaamisen voitelun raja-alueella. Sekavoitelutilanteessa voitelukalvo ei riitä pitämään pintoja kokonaan irti toisistaan ja pinnankarkeuksien huiput ovat toisinaan kontaktissa toisiinsa.

Hydrodynaaminen voitelu on tilanne, jossa liikkuvien pintojen muoto ja suhteellinen liike saavat aikaan voitelukalvon, joka pitää voideltavat pinnat erillään.

Hydrodynaamisen ja sekavoitelutilanteen välillä on vielä elastohydrodynaaminen voitelutilanne. Elastohydrodynaamisessa voitelutilanteessa muodostuu pinnat toisistaan erottava voitelukalvo yhteisvaikutuksesta, jonka aikaansaavat liikkuvien pintojen muoto, suhteellinen liike, kuormitus sekä pintojen kimmoisuus ja voiteluaineen kosketuskohdassa hetkellisesti paineen alla kasvava viskositeetti. [Kivioja ym. 2004: 13.]

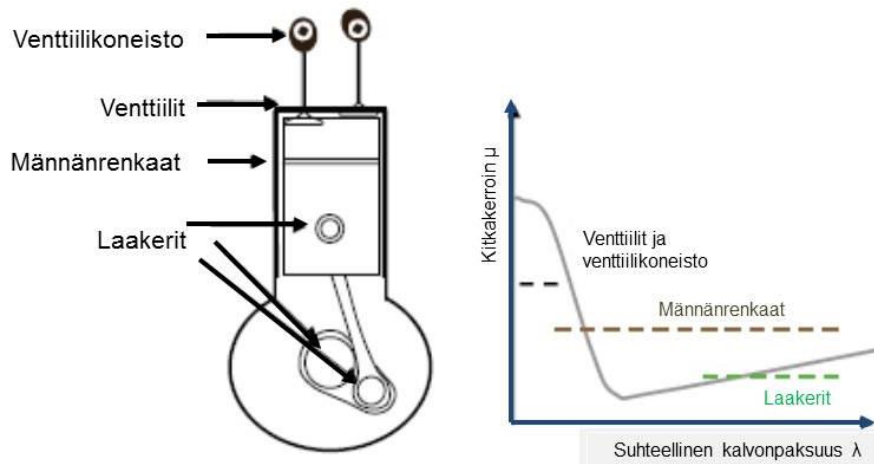


Kuva 3. Stribeckin käyrä kuvaa voiteluainekalvon suhteellisen paksuuden ja kitkakertoimen suhdetta [Kassfeldt ym. 2014: 99].



Kuva 4. Voitelutilanteet liikkuvien pintojen välillä [Kassfeldt ym. 2014: 99].

Alhaisemman viskositeetin öljyillä voidaan siis saavuttaa pienemmät moottorin sisäiset häviöt, mikä edesauttaa polttoainetehokkuuden parantamisessa, niin kauan kuin pysytään hydrodynaamisen voitelun alueella.

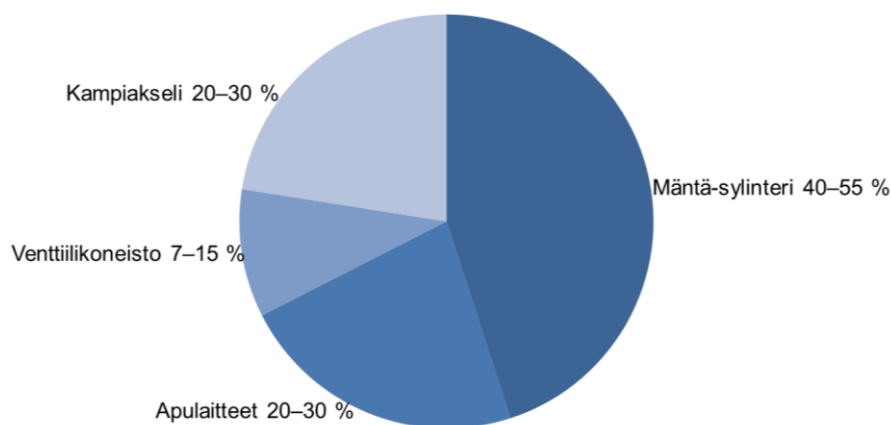


$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{qA}^2 + R_{qB}^2}}$$

Kuva 5. Moottorissa esiintyvät tyypilliset voitelutilanteet. Optimaalisella öljyn viskositeettivalinalla kitkakerroin (y-akseli) saadaan pieneksi. X-akselin  $\lambda$ -arvo on voiteluainekalvon minimipaksuuden ( $h_{min}$ ) ja pinnankarkeuksien ( $R$ ) neliösumman osamäärä. [Kassfeldt ym. 2014: 107.]

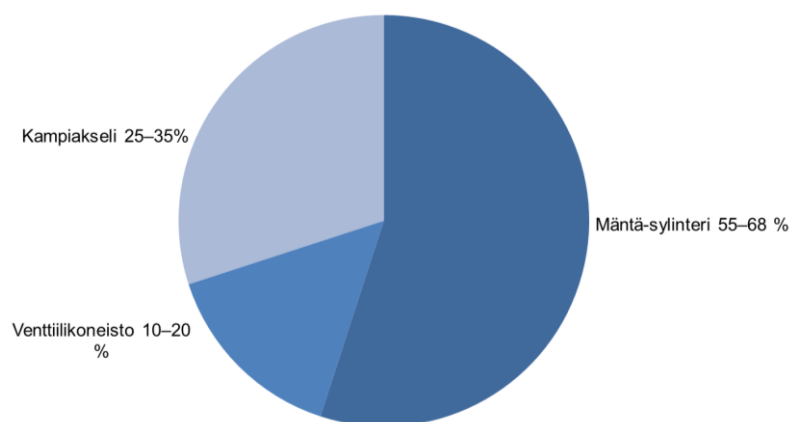
Moottorin mekaanisten kitkahäviöiden voittamiseen kuluu suuruusluokkaa 4–15 prosenttia polttoaineen sisältämästä energiasta. Osuus vaihtelee runsaasti muun muassa moottorin kuormitusasteesta riippuen. Kevyesti kuormitetussa moottorissa kitkahäviöiden suhteellinen osuus on suurempi kuin raskaasti kuormitetussa moottorissa. Kaiken kaikkiaan polttoaineen sisältämästä energiasta saadaan hyödynnettyä moottorista ulossaattavana tehona noin 30–40 prosenttia.

Moottorin tehohäviöihin vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi kaasujenvaihdosta johtuvat häviöt. Varsinaiset mekaaniset häviöt voidaan jakaa kitkahäviöihin sekä apulaitteiden vaatimaan tehoon. Apulaitteita ovat esimerkiksi jäähdytysnesteenpumppu ja jäähdytyspuhallin, öljypumppu, polttoainepumppu, paineilma- ja ilmastointikompressorit sekä generaattori. Apulaitteiden osuus on tyypillisesti noin neljännes häviöistä, mutta osuus vaihtelee huomattavasti erilaisissa ajoneuvoissa ja käyttöolosuhteissa. Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen dieselmoottorin mekaanisten häviöiden jakauma.



Kuva 6. Moottorin mekaanisten häviöiden jakautuminen. Kitkan lisäksi apulaitteet aiheuttavan merkittäviä häviöitä. [Wong 2016: 4.]

Moottorin kitkahäviöiden syntyalueet voidaan jakaa kolmeen eri pääkohteeseen: männän ja sylinteriseinämän välillä tapahtuvassa liikkeessä syntyvät kitkahäviöt, kampiakselin laakeroinnin kitkat ja kolmantena venttiilikoneistossa tapahtuvat kitkahäviöt. [Wong 2016: 4.] Kuvassa 7 on esitetty kitkahäviöiden osuudet näissä kolmessa kohteessa.

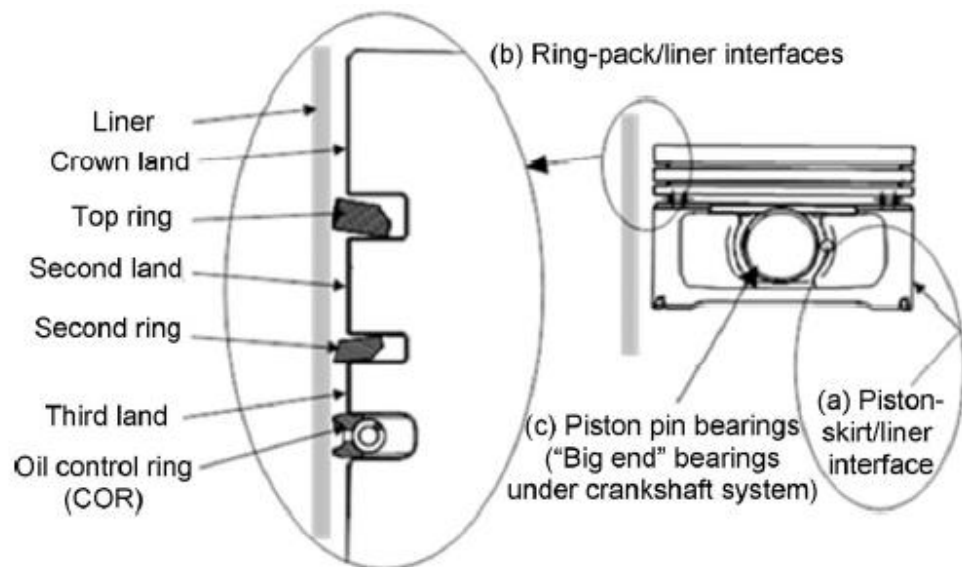


Kuva 7. Kitkahäviöiden jakautuminen dieselmoottorissa [Wong 2016: 4].

### 3.2 Kitkatilanteet mäntä-sylinteri kontaktissa

Moottorin suurimmat kitkahäviöt tapahtuvat männissä, joiden edestakaiseen liikkeeseen liittyy useampia erilaisia kitka- ja voitelutilanteita: Männän helma liukuu pitkin sylinteriseinämää, männän renkaat liukuvat pitkin sylinteriseinämää ja kolmanneksi männän tapin ja kiertokangen välillä on pyörivä liike. Kitkahäviöiden kannalta olennaisimpia ovat kaksi ensimmäistä. Söderfjäll ym. [2017: 272] mukaan männän ja sylinterin välillä syntyy jopa 75 prosenttia kitkahäviöistä moottorissa ja puolet tästä johtuu männän renkaista.

Kuvassa 8 on esitetty nämä kolme keskeistä kitkatilannetta. Neljäntenä kitka- ja voitelutilanteena on männänrenkaan liike männänrenkaan urassa. Tällä ei juuri ole merkitystä moottorin kitkahäviöiden kannalta, mutta männänrenkaiden ja niiden urien kulumista ajatellen renkaiden ja männän välisellä kitkalla on toki huomattava merkitys.



Kuva 8. Kitkatilanteet mäntä-sylinterikontaktissa. Kitkatilanteet voidaan jakaa kolmeen keskeiseen osaan a) männän helman ja sylinteriseinämän väliseen kitkaan, b) männän renkaiden ja sylinteriseinämän väliseen kitkaan ja c) kitka kiertokangen männän tapin sekä kampiakselin laakeripinnoissa [Wong 2016: 5].

Sylinterin ja männän helman väliseen kitkaan vaikuttaa merkittävästi kampiakselin ja kierokangen mittasuhteet, jotka vaikuttavat männän sylinteriseinämään kohdistamien sivuttaisvoimien suuruuteen. Vaikka männänrenkaat ottavat osaltaan vastaan myös sivuttaisvoimaa, suurin osa voimasta kohdistuu männän helman ja sylinterin välille. Kun mäntä on tasaisessa liikkeessä ylös- tai alaspäin voitelutilanne on hydrodynami-



nen. Ala- ja yläkuolon kohdissa, jolloin mäntä vaihtaa liikesuuntaansa ja nopeus on hetkellisesti nolla, voitelukalvo ei yleensä kykene kokonaan estämään metalli-metallikosketusta, jolloin mennään seka- tai rajavoitelutilanteeseen.

Voiteluaineen viskositeetin kasvattaminen lisää kalvonpaksuutta, jolloin voitelutilanne pysyy pidempään tai jopa kokonaan hydrodynaamisella alueella ja kitka ala- ja yläkuolonkohdissa pienenee. Kalvon paksuuden kasvattaminen kuitenkin lisää kitkakerrointa ja -häviöitä männän ollessa liikkeessä suurella nopeudella. Se, kumpi näistä voitelutilanteista on dominoivampi, riippuu männän ja sylinteriseinämän materiaaleista, pinnanlaaduista, mitoituksesta, muodosta sekä voitelusta. Kun moottorisuunnittelussa varmistetaan siitä, että moottoriöljyä on riittävästi männän ja sylinteriseinämän välissä, saadaan rajavoitelutilanteet minimoitua hyväksyttävälle tasolle ohuemmallakin öljyllä. [Wong 2016: 5.]

Kitkatilanteet männän renkaiden ja sylinteriseinämän välillä ovat hieman monisyisempiä kuin edellä. Tyypillisesti männässä on kuvan 8 mukaisesti kolme rengasta. Alimpana on öljyrenkas ja sen yläpuolella on kaksi puristusrengasta. Puristusrenkaiden tehtävänä on tiivistää palotila kampikammioista. Männän rengas tukeutuu männässä olevaan uraan ja renkaassa oleva jännitys tiivistää renkaan sylinterin seinämää vasten. Käytännössä kitkahäviöihin männän rengaskontaktissa vaikuttaa merkittävästi käytetyt materiaalit, pinnanlaadut sekä voiteluaine sekä renkaiden jännitysvoiman suuruus.

Männärenkaiden toimintaan vaikuttaa keskeisesti myös palotilasta renkaaseen kohdistuva paine. Puristusrenkaissa – erityisesti ylemmässä – kitkatilanne vaihtelee voimakkaasti riippuen männän asemasta. Kitkahäviöt ovat hetkellisesti suurimmillaan ylemmässä renkaassa ja yläkuolonkohdassa, jossa mennään hetkellisesti rajavoitelualueelle. Suurimman osan ajasta männärenkaatkin toimivat hydrodynaamisella alueella. [Wong 2016: 7.]

Söderfjäll ym. ovat tutkineet [2017: 273] useampia erilaisia männärenkasmateriaaleja sekä sylinteriputkimateriaaleja raskaan kaluston dieselmoottoria simuloivassa testipenkissä. Tutkimuksessa käytettiin voiteluaineina SAE 30- ja SAE 10W-30 -luokkien moottoriöljyä. Kaksi tutkimuksessa olleista sylinteriputkista oli perinteisiä plateau-tyyppisellä tasohoonauksella olevia valurautaputkia, joista toinen oli hoonattu tavanomaista hienommaksi. Kolmas sylinteriputki oli plasmapinnoitettu. Ylimpänä renkaana testattiin kahta eri rengastyyppeä, joista toinen oli DLC-pinnoitettu (diamond like carbon) ja toi-

nen Euro 6 -moottorin vakio rengas. Vakio renkaan jännitysvoima oli 33,2 N ja DLC-renkaan 30,2 N. Erilaisia öljyrenkasrakenteita tutkimuksessa oli mukana neljä ja niiden jännitysvoimat olivat välillä 25,0–65,2 N. Odotusten mukaisesti tutkimuksessa havaittiin, että matala öljyrenkaan jännitysvoima sekä DLC-pinnoitettu ylin rengas saivat aikaan pienimmät kitkavoimat. Kitkahäviöteho oli suurimmillaan 160 W ja pienimmillään 105 W, kun pyörintänopeus oli 1200 1/min. Alhaisemmalla pyörintänopeudella erot olivat hieman vähäisempiä. Tutkimuksen havaittiin myös se, että osa öljyrenkasrakenteista jätti jälkeensä liian vähän öljyä, joka omalta osaltaan lisäsi kitkaa ylemmissä männänrenkaissa. Tässä tutkimuksessa tarkkailtiin myös öljyrenkaan rakenteen vaikutusta öljynkulutukseen. Havaintona oli, että portaittainen öljyrenkaan rakenne vaikuttaisi sallivan alhaisemman jännitysvoiman ja siten lähes 50 prosenttia pienemmän kitkan verrattuna vakioratkaisuun öljynkulutuksen kasvamatta.

Mielenkiintoinen havainto tässä tutkimuksessa liittyi sylinteriputken materiaalin ja männänrenkaan vuorovaikutukseen. Pääsääntöisesti alhaisin kitka eri männänrengaskombinaatioilla saatiin käyttämällä tavanomaista hienommaksi hoonattua sylinteriputkea. Kuitenkin normaalilla hoonauksella varustella sylinteriputkella saatiin alhaisempi kitka, silloin kun kokoonpanossa oli DLC-pinnoitetut männänrenkaat ja alhaisen jännityksen öljyrenkas. Plasmapinnoitettu sylinteriputki oli kaikissa testatuissa kokoonpanoissa runsaskitkainen. [Söderfjäll ym. 2017.]

### 3.3 Kitkatilanteet kampikoneistossa

Kampikoneiston koostuu kiertokangesta, joka kiinnittyy yläpäästään kuvan 8 esittämällä tavalla männän tappiin. Kiertokangen toinen pää kiinnittyy kampiakseliin ja kampiakseli on runkolaakereiden välityksellä kiinni moottorissa. Nelitahtimoottorissa nämä kaikki voitelutilanteet ovat liukulaakerityyppisiä. Kunnossa olevassa moottorissa voitelutilanteen tulisi pysyä kampiakselilla moottorin käydessä hydrodynaamisella alueella. Laakereille on öljykanavat, jotka syöttävät paineen alaista öljyä laakereille.

Männän tappi on yksi moottorin kuormitetuimmista komponenteista. Sen kohdalla on kyse kahdesta eri kitkatilanteesta: kontakti männän tapin ja kiertokangen välillä ja kontakti männän tapin ja männän välillä. Männän tapissa pyörivä liike on varsin hidas, jonka vuoksi voitelutilanne on pääasiassa sekavoitelualueella. Rajavoitelutilanteita ilmenee erityisesti silloin, jos männän tappi taipuu työkierron mukana. [Wong 2016: 9.]

### 3.4 Kitkatilanteet venttiilikoneistossa

Nelitahtisessa moottorissa venttiilit säätelevät kaasujen vaihtoa. Imuventtiilit päästävät imuilman sisään ja pakoventtiilit päästävät pakokaasun pakotahdin aikana ulos. Venttiilikoneistotyyppisiä on useita erilaisia. Kaikille tavanomaisille rakenteille on kuitenkin yhteistä se, että moottorin kampiakselilta välitetään voima nokka-akselille, joka edelleen käyttää venttiilikoneistoa. Nokka-akseli on sijoitettu uudemmissa moottoreissa yleensä sylinterikannen yläpuolelle. Henkilöautomootoreissa nokka-akseleita on usein kaksi, mutta raskaan kaluston moottoreissa yhden nokka-akselin rakenteet ovat tavallisia.

Venttiilikoneistoissa ilmenee tyypillisesti kaikkia voitelutilanteita rajavoitelusta hydrodynaamiseen voiteluun. Tyypillisissä nykyaikaisissa moottoreissa venttiilikoneiston kitkahäviöt ovat suuruusluokkaa 15–20 prosenttia moottorin kaikista kitkahäviöistä. Tyypillisesti venttiilikoneiston suhteellinen kitkahäviö on suurempi matalilla moottorin pyörintänopeuksilla. [Wong 2017: 11.]

## 4 Moottoriöljyn vaikutus hyötysuhteeseen

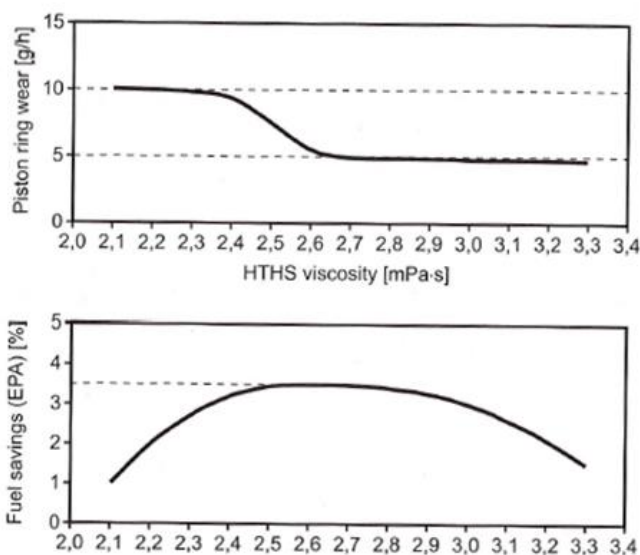
Pääsääntönä voidaan pitää, että alhaisempi viskositeetti vähentää häviöitä ja parantaa moottorin hyötysuhdetta. Kylmäkäynnistystilanteessa on olennaista, että öljy on pumppattavissa ja se virtaa sujuvasti, jolloin moottorin liikkuvat osat saavat suojaa. Käyntilämpöisessä moottorissa sen sijaan on olennaista moottorin kuumaominaisuudet. Moottoriöljyn ominaisuuksia muuttamalla ei voida kokonaan poistaa kitkahäviöitä.

Voiteluaineen viskositeettia alennettaessa on huolehdittava siitä, että voitelu ei heikene ja kuluminen ei siten kasva. Uusien moottoreiden valmistustekniikka on kehittynyt, minkä vuoksi pinnanlaadut ovat entistä paremmin hallittavissa. Myös moottoriöljyt ovat kehittyneet niin perusöljyn kuin lisäaineistuksenkin osalta, jolloin voiteluaine säilyttää ominaisuutensa luotettavasti suunnitellun vaihtovälin ajan. Uusissa öljyluokituksissa kuten API CK-4:ssa on asetettu uusia vaihtovälivarmuuteen liittyviä vaatimuksia, joita ovat esimerkiksi viskositeetin pysyvyys ja hapetuskestävyys.

#### 4.1 Kuumaviskositeetti

Kuumaviskositeettiominaisuuksia vertaillaan tavallisimmin kahden eri viskositeettimittauksen perusteella: kinemaattinen viskositeetti 100 °C:n lämpötilassa ja HTHS-viskositeetti. HTHS-viskositeetti (high temperature high shear) mitataan kohdistamalla öljyyn leikkaava voima 150 °C:n lämpötilassa. Tämä mittaustapa edustaa paremmin moottorissa esiintyviä korkeita kuormitustilanteita kuin kinemaattisen viskositeetin mitaus, sillä kinemaattisen viskositeetin mittauksessa öljyyn kohdistuu vain painovoima.

HTHS-viskositeetin pudottaminen on tasapainon hakemista. Viskositeetin alentaminen parantaa polttoainetaloutta, mutta liiallinen viskositeetin pudottaminen lisää kulumista. Kuvassa 9 on esitetty Nakadan vuonna 1996 tekemän tutkimuksen tuloksia. Sen perusteella 2,6 mPa·s on raja, jonka alle mentäessä männän renkaiden kulumisen (piston ring wear) kasvaa. 2,6 mPa·s viskositeetin kohdalla saavutettiin myös paras säästö polttoaineen kulutuksessa (fuel savings). [Omeis & Harperscheid 2001: 192.]



Kuva 9. HTHS-viskositeetin vaikutus männänrenkaan kulumiseen ja polttoaineensäästöön. Nakadan 1996 tekemässä tutkimuksessa päädyttiin siihen, että 2,6 mPa·s on optimaalinen HTHS-viskositeetti, sillä silloin kulumisen ei lisääntynyt ja samalla polttoaineenkulutus oli alhaisimmillaan.

API:n raskaan kaluston öljyjen FA-4 luokituksessa HTHS-viskositeetin rajoiksi on asetettu 2,9–3,2 mPa·s, mutta henkilöautopuolelle on siirrytty tätäkin alhaisempaan HTHS-viskositeettiin. SAE-viskositeettiluokitusjärjestelmä mahdollistaa alhaisimmillaan 1,7 mPa·s HTHS-viskositeetti SAE 8 -luokan öljylle. [Engine Oil Viscosity Classification.]

## 4.2 Kitkanmuokkaajalisäaineet

Joissakin tapauksissa moottoriöljyissä voidaan käyttää myös erityisiä kitkaa alentavia kitkanmuokkaajalisäaineita (friction modifier). Nämä ovat pinta-aktiivisia yhdisteitä, jotka sitoutuvat voideltavien pintojen välille.

Moottoriöljyissä käytetään yleisemmin kemiallisessa mielessä kahteen eri pääryhmään kuuluvia lisäaineita. Pinta-aktiiviset kitkanmuokkaajalisäaineet ovat pitkäketjuisia hiilivetymolekyylejä ja niitä kutsutaan myös orgaanisiksi kitkanmuokkaajalisäaineiksi. Näissä molekyyleissä on polaarinen pää, joka kiinnittyy metallipintaan ja muodostaa metallipinnalle liukkaan kalvon. Tällaisia lisäaineita ovat tyypillisesti oleamidit, boraattiesterit ja amiinit sekä glyserolimono-oleaatti.

Toisen ryhmän muodostavat kemiallisesti reaktiiviset kitkanmuokkaajalisäaineet, jotka nimensä mukaisesti reagoivat kemiallisesti metallipinnan kanssa ja muodostavat suojaavan pinnan. Tämän tyyppiset lisäaineet perustuvat usein orgaanisiin molybdeeniyhdisteisiin. Tyypillisiä tämän tyyppin lisäaineita ovat esimerkiksi molybdeeniditiokarbaamaatti, molybdeeniditiofosfaatti ja molybdaattiesteri. Näillä lisäaineilla on myös kulumista ja hapettumista estäviä ominaisuuksia. Tämän tyyppisten lisäaineiden käytön yleistymistä rajoittaa niiden heikohko liukenevuus, mikä tuo lisähaasteita ominaisuuksiltaan vakaan ja tasapainoisen moottoriöljyn valmistamiselle. Tämän tyyppiset lisäaineet voivat myös ajan kuluessa erkaantua, joka heikentää öljyn ominaisuuksia. Erkaantumisongelmaa on havaittu erityisesti molybdeeniditiokarbaamaatin kohdalla. Viimeaikaisen ligandi-kemian kehityksen odotetaan ratkaisevan tämän ongelman. [Wong 2016: 19.]

Kitkanmuokkaajalisäaineiden hyöty tulee parhaiten esille rajavoitelutilanteissa. Kitkanmuokkaajalisäaineista saatavaa käytännön hyötyä on vähentänyt erilaisten kitkaa- ja kulumista ehkäisevien moottorin osien pinnoitteiden yleistyminen sekä koneistustarkkuuksien parantuminen. Voiteluaineen viskositeetin pienentämisellä saadaan usein aikaan suhteellisesti suurempi vaikutus polttoainetalouden parantumisessa kuin kitkanmuokkaajalisäainetta käyttämällä. Esimerkiksi eräässä Chevron Oroniten tekemässä tutkimuksessa voiteluaineen viskositeetin pudottaminen SAE 15W-40 -luokasta SAE 5W-30 -luokkaan sai aikaan 0,8 prosentin säästön polttoainekulutuksessa. Kitkanmuokkaajalisäaineella saatiin aikaan noin 0,4 prosenttiyksikön lisäsäästö. Tässä tutki-

muksessa testimootorina oli raskaan kalustossa käytettävä Volvo D12D -dieselmoottori.

Kitkanmuokkaajalisäaineiden merkitys kasvaa kun siirrytään käyttämään nykymittapuun mukaan poikkeuksellisen alhaisen viskositeetin, esimerkiksi SAE 0W-16 -luokan öljyjä. [Canter 2013.]

## 5 Muita tutkimuksia

Moottoriöljyn tarjoamaa polttoaineensäästöpotentiaalia on tutkittu varsin paljon. Erityisesti Pohjois-Amerikan ja Japanin markkinoilla henkilöautojen polttoaineenkulutusta on pyritty alentamaan juoksevamman moottoriöljyn käytöllä. Seuraavassa on esitetty muutamia tutkimuksia, joissa tarkastelu kohdistuu pääosin raskaan kaluston dieselmootto-reihin.

### 5.1 VTT:n tutkimukset

Suomessa VTT on tutkinut HDenergia-tutkimuskokonaisuuteen liittyen vaikutusta raskaan kaluston polttoaineen kulutukseen. Näissä tutkimuksissa vertailtiin 12 eri öljyläätua ja referenssiöljynä käytettiin 15W-40-luokan öljyä. Ensimmäisessä vuonna 2003 tehdyssä tutkimuksessa koemootorina oli Euro II -päästötason kuusisylinterinen Volvo DH10A-285 -linja-automoottori, jonka teho oli 210 kW. Tässä testissä paras kulutus säästö 2,5 prosenttia saatiin 10W-30-öljyllä ja 5W-30-luokan öljyillä säästö oli 2–2,5 prosentin välissä. Tässä laboratoriotutkimuksessa kulutukset oli mitattu erikseen kahdeksalla eri moottorin pyörintänopeuden ja kuormitustason yhdistelmällä. 5W-30-öljyn polttoaineenkulutussäästö on suurimmillaan 4,8 prosenttia ajotilanteessa, jossa moottorin pyörintänopeus oli suhteellisen korkea 1790 1/min, mutta kuormitus oli 25 prosenttia testissä käytetystä maksimikuormasta. Vastaavasti suuremmilla 75 ja 100 prosentin kuormituksilla ajettaessa etu oli vähäisempi. [Murtonen & Kytö 2003.]

Vuonna 2004 tehdyssä tutkimuksessa koemootorina laboratoriotesteissä oli Scania DC11 -kuorma-automoottori, joka edusti Euro III -päästötaso. Kyseessä on 6-sylinterinen moottori, joka tuottaa 250 kW tehon. Tässä tutkimuksessa saatiin polttoainetta säästävällä öljyllä enimmillään 1,08 prosentin säästövaikutus 0W-30-luokan öljyil-

lä. Kahdella testissä mukana olleella 5W-30-öljyllä säästövaikutus oli 0,60 ja 0,41 prosenttia. [Söderström ym. 2004.]

Myöhemmin VTT on vertaillut moottoriöljyjä Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo – HDENIQ -projektissa. Tässä tutkimuksessa mittaukset tehtiin Iveco Irisbus Crossway LE -kaupunkilinja-autoilla, jotka olivat vuosimalliltaan 2010. Moottorina oli EEV-päästötason Iveco Cursor -moottori. Tässä tutkimuksessa oli mukana kolme öljylaatua: Nexbase 5W-30 (Neste Oil kehitystuote), Shell Rimula R6 LME 5W-30 ja Teboil Super XLD EEV 10W-40, joka toimi tässä VTT:n testissä referenssiöljynä. Shellin 5W-30-luokan öljyllä saatiin testissä yhden prosentin säästö. Sen sijaan Nexbase 5W-30 kuluus oli jopa hieman referenssiöljyä korkeampi. Tässä tutkimuksessa öljyjä testattiin myös vaihtovälin lopulla 40 000 km ajon jälkeen. Shellin 5W-30 tuotteen kohdalla polttoaineenkulutusetu hieman heikkeni vaihtovälin loppua kohti. Teboilin ja Nesteen tuotteiden kohdalla polttoaineen kehitys oli päinvastainen. Erot olivat kuitenkin pieniä. [Erkkilä ym. 2013.]

## 5.2 Lisäainevalmistajien tutkimuksia

Voiteluaineteollisuuden lisäainevalmistajat tekevät paljon tutkimusta liittyen moottoriöljyn polttoainetta säätäviin ominaisuuksiin. Esimeriksi lisäainevalmistaja Lubrizol on tehnyt testejä kokonaispainoltaan 44 tonnin ajoneuvoyhdistelmällä. Näissä testeissä on saatu mitattu 5W-30-luokan öljyllä selvä parannus polttoainetaloudessa verrattuna 15W-40-luokan referenssiöljyyn. Polttoaineen kulutusta mitattiin kolmella eri ajoreitillä pohjoisessa Euroopassa, ja säästöprosentit eri reiteillä olivat 1,4 %, 3,0 % ja 3,5 %. [Enabling fuel economy: proof, performance and practice.]

## 5.3 5W-30-öljyn kenttätutkimus CNG-busseissa

Tormos ym. [2017] tutkivat SAE 5W-30 -viskositeettiluokan öljyn käyttöä paineistettua metaania (CNG) käyttävissä linja-autoissa kahdella eri öljyllä. Testiautot edustivat vuosimallia 2007, ja niissä oli 12-litrainen 6-sylinterinen moottori, joka tuotti 180 kW:n tehon. Verrokkiöljynä oli SAE 10W-40 -luokan öljy. Molemmissa öljyissä oli Low SAPS -tyyppinen lisäaineistus. Tutkimuksessa seurattiin autojen polttoaineenkulutusta kahden

30 000 km:n öljynvaihtovälin ajan eli yhteensä 60 000 km. 5W-30-luokan öljyllä havaittiin kenttätestissä 3,7 prosenttia alhaisempi polttoaineenkulutus.

Samassa tutkimuksen yhteydessä tehtiin öljyille vertailua myös moottorin sylinteriä simuloivassa Cameron-Plint TE77 -testilaitteessa. Tämän testin perusteella 5W-30-luokan öljy vähensi kitkakerrointa 4,2 prosentilla. Tutkimuksessa havaittiin myös se, että matalan viskositeetin alentava vaikutus kasvaa männän nopeuden noustessa. Tällöin voitelu toimii hydrodynaamisella alueella. Toisaalta testissä tehtiin havainto, että hyvin hitaalla männänliikkeellä 5W-30-luokan öljyn kitkakerroin nousi jyrkästi. Tämä johtui siitä, että testilaitteessa voitelu ei 5W-30-öljyllä pysynyt enää hydrodynaamisella alueella vaan siirtyi seka- ja rajavoitelutilanteeseen.

Tutkimuksen yhteydessä tehtiin mittauksia myös liukulaakereita simuloivassa testilaitteessa. Näissä testeissä 5W-30-öljyllä mitattiin 8 prosenttia pienempi kitkakerroin kuin verrokkiöljyllä. [Tormos ym. 2017.]

#### 5.4 Öljytesti yksisylinterisessä dieselmoottorissa

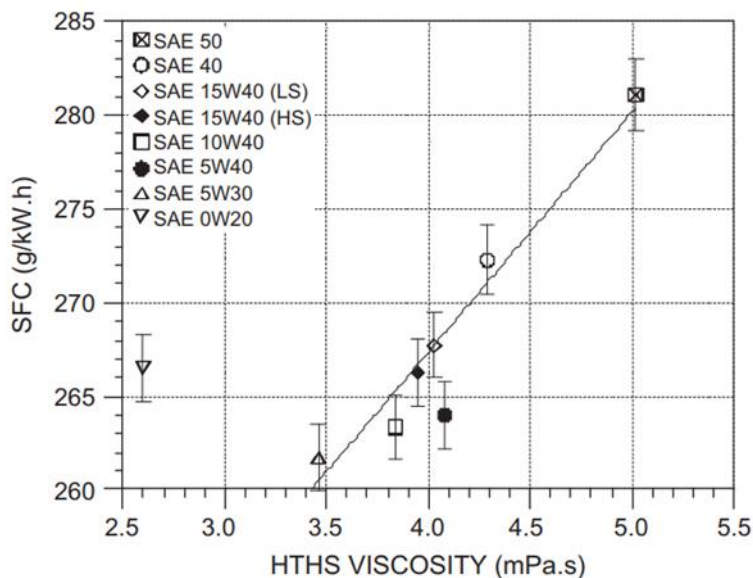
Carvalho ym. [2010] tutkivat seitsemän erilaisen moottoriöljyn vaikutusta dieselmoottorin polttoaineenkulutukseen. Tutkimuksessa käytettiin yksisylinteristä testimoottoria, jonka iskutilavuus oli 744 cm<sup>3</sup>, suurin teho 13 kW (3000 1/min) ja suurin vääntömomentti 42 Nm (2400 1/min). Tässä tutkimuksessa vertailtiin seitsemää eri öljyä:

- SAE 40, yksiasteinen mineraaliöljy
- SAE 50, yksiasteinen mineraaliöljy
- SAE 15W-40 (LS), mineraaliöljy, heikosti leikkausvoimia kestävä VI-parantajapolymeeri (Low Shear)
- SAE 15W-40 (HS), mineraaliöljy, hyvin stabiili leikkausvoimia kestävä VI-parantajapolymeeri (High Shear)
- SAE 10W-40, osasynteettinen, HS-polymeeri
- SAE 5W-40, synteettinen, HS-polymeeri
- SAE 5W-30, synteettinen, HS-polymeeri
- SAE 0W-20, synteettinen, HS-polymeeri.

Kuvassa 10 on esitetty vertailtujen öljylaatujen ominaiskulutukset. Tutkimuksessa havaittiin, että hyvin ohut SAE 0W-20 -luokan öljyn kohdalla viskositeetti oli koemoottorille



jo liian alhainen. Tätä öljyä testattaessa moottori oli pitänyt poikkeuksellisen voimakasta käyntiääntä. Tätä poikkeusta lukuun ottamatta tutkimuksessa havaittiin selvä riippuvuussuhde alhaisen viskositeetin ja alentuneen polttoaineenkulutuksen välillä.



Kuva 10. HTHS-viskositeetin ja polttoaineen ominaiskulutuksen välinen riippuvuus [Carvalho ym. 2010].

## 6 Tutkimusasetelma

Nyt tehdyssä tutkimuksessa voiteluaineen vaikutusta raskaan ajoneuvoyhdistelmän polttoaineen kulutukseen lähdettiin selvittämään hyvin käytännönläheisissä olosuhteissa normaalissa tieliikenteessä. Autot liikennöivät seurantajakson aikana normaalisti, eikä ajosuoritteisiin tai ajoneuvojen kuljettajien toimintaan pyritty vaikuttamaan millään tavalla. Tutkimuksessa vertailtiin kahta eri moottoriöljylaatua.

### 6.1 Tutkitut öljyt

Varsinaisena tutkimuskohteena oli Teboil Super XLD EEV 5W-30 -moottoriöljy, josta käytettiin tutkimuksen aikana nimitystä Testiöljy A. Tämä öljy on niin sanottu Low SAPS -öljy. Verrokkiöljynä oli autoissa tavallisesti käytettävä Teboil Super HPD ECV 15W-40 -moottoriöljy, jossa on Mid-SAPS-tyyppinen lisäaineistus. Taulukossa 3 on esitetty tut-

kimuksessa käytettyjen öljyjen keskeisimmät viskometriset ominaisuudet sekä suorituskykyluokat. Molemmat öljyistä ylittävät Volvo VDS-4 -suorituskykyvaatimukset.

Taulukko 3. Vertailtujen öljyjen keskeisimmät viskometriset ominaisuudet ja suorituskykyluokat.

	Kinemaattinen viskositeetti [mm <sup>2</sup> /s]		HTHS-viskositeetti [mPa·s]	Keskeisimmät suorituskykyluokat
	40 °C	100 °C		
Testiöljy 5W-30	68	11,9	3,6	ACEA E6, API CJ-4, MB 228.51, Volvo VDS-4
Verrokki 15W-40	108	14,3	3,9	ACEA E9, API CJ-4, Volvo VDS-4

## 6.2 Ajoneuvot

Tutkimuksessa tarkastelun kohteena oli 10 ajoneuvoyhdistelmää, jotka koostuvat neliakselisestä vetoautosta ja viisiakselisesta varsinaisesta perävaunusta. Kuva 11 esittää yhtä tutkimuskohteena olevista ajoneuvoista. Alun perin seurattavia ajoneuvoyhdistelmiä oli 11, mutta yksi referenssiyksilöksi tarkoitettu yhdistelmä suljettiin tarkastelun ulkopuolelle, sillä kyseisen ajoneuvoyhdistelmän liikennöitsijä oli itse pyytänyt autoonsa tavanomaisesta poikkeavaa öljyä. Tästä tehtiin oletus, että tämän ajoneuvon kohdalla on voitu tehdä muitakin toimenpiteitä, jotka ovat tähänneet polttoaineen kulutuksen alentamiseen, kuten poikkeuksellista panostusta taloudelliseen ajotapaan tai polttoainetalouden suhteen optimoituihin rengasratkaisuihin.



Kuva 11. Kuva tutkimuksessa seuratusa ajoneuvoyhdistelmästä. Vetoautoina oli Volvo FH 13 -kuorma-autot joihin oli kytketty Jykin valmistamat perävaunut.

Vetoautoina oli Volvo FH 13 540 -kuorma-autot, joissa on kaksi vetävää akselia ja takana vapaasti pyörivä teli. Vetoauton moottorin tekniset tiedot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Volvo FH 13:n tekniset tiedot

Moottorityyppi	D13K
Päästöstandardi	Euro 6
Iskutilavuus	12,8 litraa
Iskunpituus	158 mm
Sylinterin halkaisija	131 mm
Puristussuhde	17:1
Suurin teho	397 kW (1450–1800 1/min)
Suurin vääntömomentti	2600 Nm (1000–1450 1/min)
Vaihteisto	12-nopeuksinen I-Shift

Perävaunut olivat Jykin valmistamia varsinaisia perävaunuja, joissa on kaksi akselia perävaunun etuosassa ja kolme akselia vaunun takaosassa. Neljä ensimmäistä akselia on varustettu paripyörillä ja takimmainen akseli single-pyörillä.

Kuormatilana ovat lukkokiinnitteiset lavat, joissa on päällä pressupeite. Vetoauton päällä on yksi lava ja perävaunussa kaksi lavaa. Kuorman purku tapahtuu irrottamalla lava ja nostamalla se pois ajoneuvon päältä. Ajoneuvoissa ei siis ole kippihydrauliikka tai muuta kuormanpurkuun tarkoitettua laitteistoa.

Kaikki vetoautot ja perävaunut ovat olleet käyttöönottohetkellä keskenään samanlaisia. Eri ajoneuvoyksilöissä lavarakenteet poikkesivat hieman toisistaan. Lisäksi ennen tutkimusjakson alkua autoissa käytettävissä renkaissa oli tapahtunut muutoksia. Näiden seikkojen vaikutusta on tarkasteltu tarkemmin luvussa 7.4. Kaikki ajoneuvot on otettu käyttöön tammi-maaliskuun aikana 2017. Mittaustiedon keräämisen alkaessa autojen matkamittarilukemat olivat välillä 375 000–410 000 km ja tiedon keräämisen lopussa 418 000–456 000 km.

Tässä raportissa testiöljyä käyttävistä ajoneuvoyhdistelmistä käytetään nimityksiä T1, T2, T3, T4 ja T5 (T-ryhmä). Vastaavasti referenssinä toimivat ajoneuvoyhdistelmät, joiden moottorissa on 15W-40-viskositeettiluokan öljy, on nimetty R1, R2, R3, R4 ja R5 (R-ryhmä).

### 6.3 Tutkimusaika ja -paikka

Varsinainen mittaustiedon kerääminen suoritettiin 30.7.–27.9. välisenä aikana. Tiedon keruu tapahtui autoissa olevan Volvo Dynafleet -tietojärjestelmän välityksellä. Järjestelmä yhdistää auton ohjainlaitteilta tulevan tiedon sekä GPS-paikannukseen perustuvan sijaintitiedon.

Mittausdataa kerättiin Boliden Kevitsa Mining Oy ja Kemin sataman välisellä 300 km pitkällä tieosuudella. Purku- ja lastauspaikoilla tapahtuva liikenne rajattiin pois tarkastelusta. Lisäksi ajoista poistettiin ne ajosuoritteet, joissa ajoneuvo on kilometrikertymän perusteella poikennut tavalliselta reitiltään kymmenen kilometriä tai enemmän.

Reitti Kemin sataman ja Kevitsan kaivoksen välillä on suurimmaksi osaksi valtatie 4 (E75). Tieosuus on pääosin suhteellisen ruuhkaton. Liikennevalo-ohjattuja risteysmatkan varrella on kolme: Sodankylässä Unarintien risteys sekä Kasarmintien risteys ja Rovaniemellä Isoaavantien risteys.

Kevitsan kaivoksen portti on noin 215 metriä korkeammalla kuin Kemin sataman portti. Autot siis ajavat täytenä enemmän alamäkeä kuin tyhjänä.

Tutkimusajankohta valittiin siten, että alueella aikaisemmin kesän aikana käynnissä olleet tietyt oli saatu päätökseen, ja näin ne eivät aiheuttaneet ylimääräisiä hidastuksia, kiihdytyksiä tai pysähdyksiä.

Tutkimusajankohta valittiin tarkoituksella siten, että ajo-olosuhde on kesäinen eikä tiellä ole lunta, loskaa tai liukkaita, jotka omalta osaltaan toisivat lisää vaihtelua ajovastuksiin. Polttoaineena ajoneuvoissa oli kesälaatuinen diesel.

#### 6.4 Öljynvaihdot

Autoissa on huoltosopimus ja autot käyvät huollossa Wetteri Power Oy:n toimipaikoissa siten että autoista viisi käy huollossa Rovaniemellä ja kuusi Kemissä (Keminmaa). Testiöljyn käyttäjiksi valittiin sattumanvaraisesti viisi Kemissä huollossa käyvää yhdistelmää. Ajoneuvoille tehtiin tarkoituksella öljynvaihto testiöljyllä jo ennen testijakson alkamista, sillä näin voitiin varmistua, ettei moottorissa ole jäämiä tavanomaisesti käytettävästä öljystä. Testiöljyerästä poistettiin tavanomaisesti tynnyreissä olevat kaupalliseen tuotteeseen viittaavat merkinnät ja ne korvattiin ilmaisulla ”Testiöljy A”. Ajoneuvon kuljettajille ei tarkoituksellisesti välitetty tietoa siitä, että ajoneuvojen kulutusta seurataan.

Osasta autoja otettiin öljynvaihdon yhteydessä öljynäytteet, joiden perusteella vertailtiin laboratoriossa testi- ja referenssiöljyjen kykyä säilyttää ominaisuutensa.

## 7 Tulokset

### 7.1 Tulosten käsittely

Volvon Dynafleet -järjestelmästä saatiin tieto jokaisen ajomatkan kilometrisuoritteesta sekä ajomatkasta. Tutkimuksesta suljettiin pois purku- ja lastauspaikan liikenne, jossa autolla ajetaan hiljaa ja autolle kertyy myös tyhjäkäyntiä. Ajomatka yhteen suuntaan on 300 km. Joissain tapauksissa ajoneuvojen ajomatassa oli hieman poikkeamaa. Reitti-poikkeamat selittyvät luonnollisilla syillä kuten tankkauksilla, huolloilla, kuljettajavaihdolla. Aineistosta poistettiin ne ajosuoritteet, joissa ajoneuvon ajama matka oli 310 km tai yli. Tällaisia kertoja oli enemmän tyhjällä autolla kuin täydellä autolla. Tämän vuoksi käsiteltyyn aineistoon sisältyi hieman vähemmän tyhjänä ajettuja ajoja.

### 7.2 Ajoneuvokohtaiset kulutukset

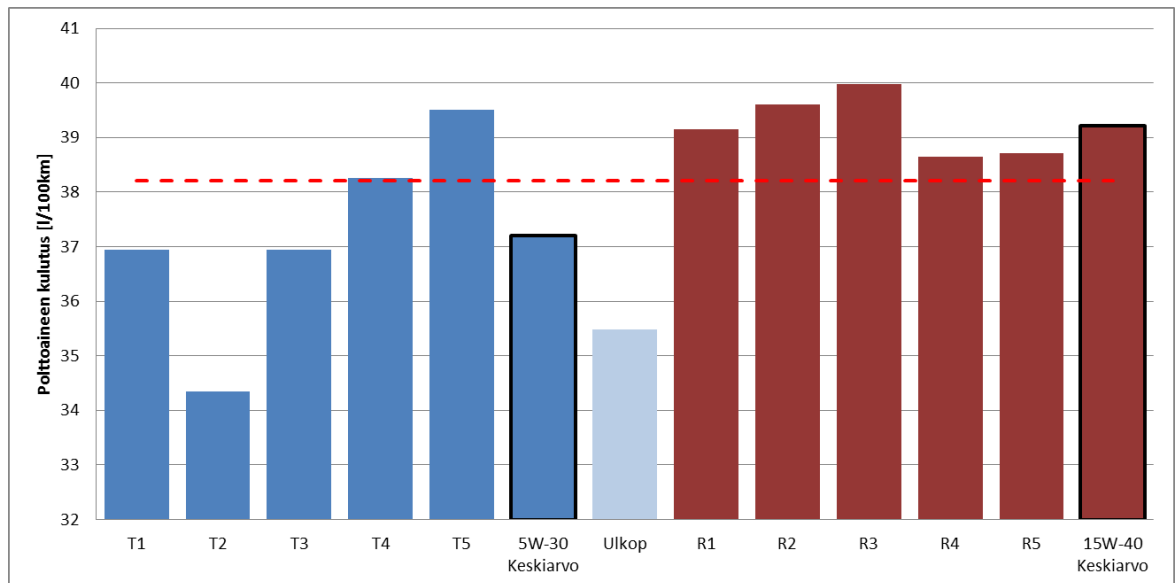
Ajoneuvokohtaiset keskilukulutukset sekä tarkastelun kohteena olleiden ajosuoritteiden määrä on esitetty taulukossa 5. Kulutuksia tarkasteltaessa voidaan huomata, että testiöljyllä ajavien autojen ryhmässä T2:n polttoaineen kulutus on havaittavasti alhaisempi ja toisaalta T5:n kulutus on suurin. Normaalilla 15W-40-öljyllä ajavista autoista taloudellisin tyhjänä oli R4 ja täytenä R5. Molemmissa tapauksissa taloudellisimman 15W-40-öljyllä ajava yhdistelmän kulutus on pienempi kuin epätaloudellisimman testiöljyllä ajavan ajoneuvon. Pienenä mielenkiintoisena yksityiskohtana voi havaita ajoneuvot T1 ja T3, joilla molempien suuntien keskiarvokulutus on kahden desimaalin tarkkuudella sama. Kyseessä ei siis ole virhe taulukon kokoamisessa. Ajoneuvoyhdistelmien yksilöllisten erojen vaikutusta arvioidaan tarkemmin luvussa 7.4.

Taulukko 5. Ajoneuvoyhdistelmien keskikulutukset sekä keskiarvon laskennan lähtökohtana olleiden ajosuoritteiden määrä. Taloudellisin on merkitty vihreällä huomiovärillä ja epätaloudellisimmat punaisella.

<b>Testiöljy, kuormattu ajoneuvoyhdistelmä</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Keskiarvo</b>
Ajojen lukumäärä	75	75	76	75	75	
Keskiarvo [litraa/100 km]	43,72	40,61	43,52	45,25	46,54	43,93
Ero saman ryhmän keskiarvoon [litraa]	-0,20	-3,32	-0,41	+1,32	+2,61	
Ero kaikkien ajoneuvojen keskiarvoon [litraa]	-1,44	-4,56	-1,65	+0,08	+1,37	
<b>Testiöljy, tyhjä ajoneuvoyhdistelmä</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Keskiarvo</b>
Ajojen lukumäärä	70	72	73	71	72	
Keskiarvo [litraa/100 km]	30,15	28,10	30,36	31,28	32,47	30,47
Ero saman ryhmän keskiarvoon [litraa]	-0,32	-2,37	-0,11	+0,81	+2,00	
Ero kaikkien ajoneuvojen keskiarvoon [litraa]	-1,10	-3,16	-0,89	+0,02	+1,22	
<b>Testiöljy, molemmat suunnat testiöljy</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Keskiarvo</b>
Ajojen lukumäärä	145	147	149	146	147	
Keskiarvo [litraa/100 km]	36,94	34,35	36,94	38,26	39,50	37,20
Ero saman ryhmän keskiarvoon [litraa]	-0,26	-2,85	-0,26	+1,06	+2,30	
Ero kaikkien ajoneuvojen keskiarvoon [litraa]	-1,27	-3,86	-1,27	+0,05	+1,29	
<b>15W-40-öljy, kuormattu ajoneuvoyhdistelmä</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>Keskiarvo</b>
Ajojen lukumäärä	76	75	75	72	76	
Keskiarvo [litraa/100 km]	46,36	47,40	47,34	45,96	44,95	46,40
Ero saman ryhmän keskiarvoon [litraa]	-0,05	+1,00	+0,94	-0,44	-1,45	
Ero kaikkien ajoneuvojen keskiarvoon [litraa]	+1,19	+2,23	+2,18	+0,80	-0,21	
<b>15W-40 öljy, tyhjä ajoneuvoyhdistelmä</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>Keskiarvo</b>
Ajojen lukumäärä	70	70	72	70	73	
Keskiarvo [litraa/100 km]	31,95	31,80	32,63	31,35	32,46	32,04
Ero saman ryhmän keskiarvoon [litraa]	-0,09	-0,24	+0,59	-0,69	+0,42	
Ero kaikkien ajoneuvojen keskiarvoon [litraa]	+0,69	+0,55	+1,38	+0,09	+1,21	
<b>15W-40 öljy, molemmat suunnat</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>Keskiarvo</b>
Ajojen lukumäärä	146	145	147	142	149	
Keskiarvo [litraa/100 km]	39,15	39,60	39,99	38,66	38,71	39,22
Ero saman ryhmän keskiarvoon [litraa]	-0,07	+0,38	+0,77	-0,56	-0,51	
Ero kaikkien ajoneuvojen keskiarvoon [litraa]	+0,94	+1,39	+1,78	+0,45	+0,50	
Kaikkien ajoneuvojen keskikulutus kuormattuna [litraa/100 km]				45,17		
Kaikkien ajoneuvojen keskikulutus ilman kuormaa [litraa/100 km]				31,25		
Kaikkien ajoneuvojen keskikulutus molemmat suunnat [litraa/100 km]				38,21		

Tutkimusaineiston ulkopuolelle rajatun ajoneuvon kohdalla polttoaineen keskimääräinen kulutus tyhjänä oli 28,2 l / 100 km ja täytenä 42,74 l / 100km, jolloin molempien suuntien keskikulutukseksi muodostuu 35,48 l / 100 km, eli auto olisi testiöljyä käyttävien autojen joukossa toiseksi taloudellisin.

Kuvassa 12 on esitetty palkkikaaviona eri ajoneuvoyksilöiden molempien suuntien keskimääräinen kulutus. Punainen katkoviiva kuvaa kaikkien ajoneuvojen keskikulutusta. Keskiarvon laskennassa ei kuitenkaan ole mukana varsinaisen tutkimuksen ulkopuolelle suljettu ajoneuvo, vaikka kyseinen auto on otettu mukaan kuvaan.



Kuva 12. Ajoneuvoyhdistelmäkohtaiset polttoaineenkulutukset. Punainen katkoviiva edustaa T- ja R-ryhmien ajoneuvojen keskimääräistä kulutusta.

Yksinomaan keskiarvojen perusteella tarkasteltaessa ero polttoaineenkulutuksessa on testiöljyn hyväksi molemmat ajosuunnat mukaan laskettuna yli viisi prosenttia. Kulutuserot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Polttoaineenkulutukset keskiarvojen perusteella laskettuna kun mukana laskennassa ovat viisi testiöljyä käyttävää ja viisi verrokkiöljyä käyttävää autoa.

	Testiöljy (T) [litraa / 100 km]	15W-40 (R) [litraa / 100 km]	Erotus [litraa / 100 km]	Säästö %
Kuormattu	43,93	46,40	-2,48	-5,3 %
Kuormaamaton	30,47	32,04	-1,57	-4,9 %
Molemmat suunnat	37,20	39,22	-2,02	-5,2 %



Jos vertailusta suljetaan pois vähiten ja eniten kuluttaneet ajoneuvoyksilöt, ero testiöljyn ja tavanomaisen öljyn välillä kaventuu 4,5 prosenttiin. Taulukossa 7 esitetystä vertailusta ovat mukana testiöljyä käyttäneistä autoista T1, T3 ja T4, jotka edustivat keski-joukkoa sekä tyhjänä että täytenä. Tavanomaista öljyä käyttäneiden autojen kohdalla R2 kulutti eniten täytenä, mutta tyhjänä R3 kulutti eniten. Myös taloudellisin yksilö oli eri tyhjänä ja täytenä R-ryhmässä. Kuormattuna taloudellisin oli R5 ja tyhjänä R4.

Taulukko 7. Polttoaineenkulutukset keskiarvojen perusteella laskettuna, kun mukana laskennassa on kolme testiöljyä käyttävää ja kolme verrokkiöljyä käyttävää autoa. Eniten ja vähiten polttoainetta kuluttaneet autot on rajattu pois.

	<b>Testiöljy (T)</b> [litraa / 100km]	<b>15W-40 (R)</b> [litraa / 100km]	<b>Erotus</b> [litraa / 100km]	<b>Säästö %</b>
Kuormattu	44,16	46,56	-2,39	-5,1 %
Kuormaamaton	30,60	32,07	-1,47	-4,6 %
Molemmat suunnat	37,38	39,15	-1,77	-4,5 %

Tuloksia tarkasteltaessa voidaan havaita, että polttoaineen säästö on keskimäärin suurempi kuormatulla autolla, vaikka kuormatulla autolla ajovastukset ovat lähtökohtaisesti suuremmat ja siten moottorin kitkahäviöiden osuus suhteellisesti pienempi. Tyhjä auto ajaa kuitenkin keskimäärin enemmän ylämäkeä, sillä kaivosalue on noin 215 metriä korkeammalla kuin satama. Tämä tasoittaa eroa ajovastuksissa.

### 7.3 Tilastollinen analyysi

Saatuja polttoaineenkulutusrvoja analysoitiin tilastomatemattisesti käyttämällä Studentin t-jakaumaa, joka soveltuu tilastollisen analyysin tekemiseen silloin, kun otoskoko on pieni. Analyysin tekeminen suoritettiin Microsoft Excel -ohjelman Data Analysis -työkalulla. Tarkastelu suoritettiin erikseen kuormaamattomalle ja kuormatulle autolle. T-testin avulla selvitettiin tulosten tilastollista merkitsevyyttä kolmella eri luottamustasolla eli kolmella eri merkitsevyytason ( $\alpha$ ) arvolla:

- $\alpha = 0,1$  tilastollisesti suuntaa antava
- $\alpha = 0,05$  tilastollisesti melkein merkitsevä
- $\alpha = 0,01$  tilastollisesti merkitsevä.

Tutkimushypoteesit asetettiin seuraavasti:

- $H_0$ -hypoteesi: Öljyalaadulla ei ole merkitystä polttoaineenkulutukseen
- $H_1$ -hypoteesi: Testiöljy alentaa polttoaineenkulutusta.

Testien tuloksena oli, että luottamustason ollessa 0,9 ja 0,95 eli  $\alpha$ -arvoilla 0,1 ja 0,05 testi mahdollistaa  $H_0$ -hypoteesin hylkäämisen. Sen sijaan luottamustasolla 0,99 eli  $\alpha$ -arvolla 0,01  $H_0$ -hypoteesia ei voida hylätä. Testit on esitetty tarkemmin liitteessä 1. T-testin perusteella määritetyt luottamusrajat 0,9 ja 0,95 luottamustasolla on esitetty taulukossa 8. Taulukossa on laskettuna myös keskihajonnat sekä varianssit, jotka molemmat ovat selvästi suurempia testiöljyä käyttävien autojen joukossa. Käytännössä testit tehtiin Microsoft Excel -ohjelman asennetun Data Analysis -työkalun avulla käyttämällä apuna t-test: Two-Sample Assuming Unequal Variances -testiä.

Taulukko 8. Luottamusrajojen laskenta luottamustasoilla 0,9 ja 0,95.

**Lastattu auto**

	Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]	
	Testiöljy	Normaaliöljy
	43,72	46,36
	40,61	47,40
	43,52	47,34
	45,25	45,96
	46,54	44,95
Keskihajonta	2,22	1,02
Varianssi	4,94	1,05
Keskiarvo	43,93	46,40

<b>Luottamustasolla 0,95</b>		<b>Luottamusraja ±</b>
Polttoaineensäästö [l / 100 km]	-2,48	2,13
<b>Luottamustasolla 0,90</b>		
Polttoaineensäästö [l / 100 km]	-2,48	1,58

**Tyhjä auto**

	Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]	
	Testiöljy	Normaaliöljy
	30,15	31,95
	28,10	31,80
	30,36	32,63
	31,28	31,35
	32,47	32,46
Keskihajonta	1,61	0,52
Varianssi	2,60	0,27
Keskiarvo	30,47	32,04

<b>Luottamustasolla 0,95</b>		<b>Luottamusraja ±</b>
Polttoaineensäästö [l / 100 km]	-1,57	1,53
<b>Luottamustasolla 0,90</b>		
Polttoaineensäästö [l / 100 km]	-1,57	1,12

Toisin sanoen luottamustasolla 0,95 säästö polttoaineenkulutuksessa on välillä 0,35–4,60 l / 100 km täydellä ajoneuvoyhdistelmällä ajettaessa ja 0,04–3,09 l / 100 km tyhjänä ajettaessa.

Alhaisemmalla 0,90-luottamustasolla säästö polttoaineenkulutuksessa on välillä 0,90–4,05 l / 100 km täydellä ajoneuvoyhdistelmällä ajettaessa ja 0,45–2,68 l / 100 km tyhjänä ajettaessa.

#### 7.4 Tutkimuksen virhelähteet

Tutkimuksen kohteeksi valitussa liikennöinnissä oli poikkeuksellisen vähän erilaisia virhelähteitä ottaen huomioon, että kyseessä oli normaalissa tieliikenteessä oleva kalusto. On melko harvinaista, että samanlaisia ajoneuvoyhdistelmiä otetaan samaan ajosuoritteeseen käyttöön lähes samanaikaisesti näin paljon. Myös autoihin kertyneet kokonaisajokilometrit olivat samaa suuruusluokkaa.

##### 7.4.1 Tutkitut ajosuoritteet

Tutkimusasetelman kannalta oli eduksi, että autot ovat aina joko täyteen kuormattuja tai tyhjiä eli vajaalla kuormalla ajoa ei ole. Pohjoisessa Suomessa ajosuoritetta eivät pääsääntöisesti häiritse merkittävästi ajoa haittaavat liikenneuhkat.

Jokaista ajoneuvoyksilöä kohden kertyi tutkimusaikana ajosuoritteita, joista vähintään 70 tyhjänä ja 70 täytenä. Molemmat suunnat huomioon ottaen tarkastelussa mukana olleita ajosuoritteita oli 142–149. Suuri ajosuoritteiden määrä vähentää merkittävästi yksittäisissä ajosuoritteissa mahdollisesti tapahtuneiden poikkeuksellisten tilanteiden vaikutusta keskiarvoon. Eri ajoneuvojen välillä ajosuoritteiden samankaltaisuutta lisäsi se, että autojen lastaus tapahtui melko tiiviillä aikataululla, minkä vuoksi autot pääsääntöisesti ajoivat ajosuoritteensa likimain samaan vuorokauden aikaa. Näin ollen esimerkiksi keliolosuhteet olivat autoille varsin samankaltaisia.

Tarkastelusta suljettiin pois ajosuoritteet, joissa ajettu matka poikkesi tavanomaisesta. Tällä haluttiin varmistaa, että ajosuoritteet olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia. Polttoaineen kulutusta seurattiin ainoastaan lastaus- ja purkualueiden porttien ulkopuolisella tiealueella. Näin ollen esimerkiksi lastaus- tai purkupaikalla tapahtuva odotusaika ei vaikuta kulutukseen.

Vaikka ajoneuvot oli otettu käyttöön samaan aikaan ja ne olivat rakenteeltaan periaatteessa hyvin samanlaisia, niissä havaittiin kuitenkin eräitä eroja ajoneuvoille tehdyn

katselmuksen yhteydessä. Suurelta osin eroavaisuudet ajoneuvoissa ja niiden välillä kuitenkin kumoavat toisiaan. Seuraavassa on selostettu tarkemmin ajoneuvoissa olleita eroavaisuuksia.

#### 7.4.2 Kuormatilojen erot

Ajoneuvojen kuormatilat erosivat hieman toisistaan, jolloin eri ajoneuvoyhdistelmien ilmanvastus ei ole aivan vakio. Merkittäviä eroja oli lähinnä vetoauton päällä olevassa lavarakenteessa. Erilaiset lavarakenteet jakaantuivat tasaisesti sekä T- että R-ryhmän ajoneuvoyhdistelmiin. Vetoauton lavaa on luonnehdittu ilmaisuilla

- Tyyppi 1, Lyhyt ja korkea
- Tyyppi 2, Pitkä ja korkea
- Tyyppi 3, Pitkä ja matala.

Kuvassa 13 on esitetty esimerkit lavamalleista. Kuvan viereen on kirjattu ne testi ajoneuvot, joissa kyseinen lavarakenne oli ajoneuvoille tehdyssä katselmuksessa.



**Lavatyyppi 1**  
Lyhyt, korkea  
T3, T5  
R1, R5



**Lavatyyppi 2**  
Pitkä, korkea  
T2  
R3,R4



**Lavatyyppi 3**  
Pitkä, matala  
T1, T4  
R2

Kuva 13. Vetoautoissa käytössä olleet lavatyypit sekä ajoneuvot, joissa kyseinen lavatyyppi oli käytössä.

Ajateltavissa on, että korkea ja lyhyt tyypin 1 lava aiheuttaisi enemmän ilmanvastusta kuin muut lavatyypit, sillä lavan ja ohjaamon välissä on enemmän tilaa ilman pyörteilylle. Tällaisella lavarakenteella varustettu ajoneuvo T5 olikin eniten kuluttava ajoneuvoyksilö testiöljyä käyttävien autojen joukossa. Samalla lavarakenteella varustettu T3 oli kuitenkin hieman testiöljyryhmän keskiarvoa taloudellisempi. Tyypin 1 lavalla varus-

tetut R1 ja R5 olivat keskiarvoa taloudellisempia. R5 ajoi täydellä kuormalla testiryhmänsä pienimmällä kulutuksella.

Tyyppin 2 lavalla varustettu T2 oli selvästi taloudellisin testiöljyä käyttävien autojen ryhmässä. Toisaalta referenssiautojen ryhmässä samankaltaisella kuormatilalla varustetuista autoista R3 kulutti eniten ja R4 kulutti vähiten.

Tyyppin 3 lavan kohdallakaan lavamalli ei vaikuttaisi olevan ratkaisevassa roolissa kulutuksen kannalta. T1:n kulutus on hieman keskiarvoa alhaisempi ja T4:n keskiarvoa korkeampi.

Ajoneuvoyhdistelmäkohtaisia kulutuslukemia tarkastellessa voi huomata myös, että T1:llä ja T3:llä on molempien suuntien keskipolttokulutus sama huolimatta erilaisesta lavarakenteesta.

#### 7.4.3 Renkaat ja akselistot

Ajoneuvojen renkaat olivat merkittävin muuttuja, jota testin aikana ei kontrolloitu. Ajoneuvoille suoritetun katselmuksen aikana kävi ilmi, että autoissa on käytössä erilaisia renkaita, joiden vierinvastukset voivat erota toisistaan. Autoille tehdyn katselmuksen yhteydessä ei ollut käytännön syistä mahdollista mitata rengaspaineita tai havainnoida aivan jokaisen renkaan merkki- ja mallitietoa. Kaikista renkaista mitattiin kuitenkin urasyvytydet työntömittaa käyttämällä sekä dokumentoitiin kaikkien akseleissa ulompi- ja sisempi-akselien olevien renkaiden merkit ja mallit. Lisäksi silmämääräisesti havainnoitiin eroja kulutuspintojen kulumismuodossa, jotka voisivat antaa viitteitä esimerkiksi ongelmista akselistojen suuntauksessa. Joitain ajoneuvoyhdistelmien renkaita oli vaihdettu testijakson aikana. Ajoneuvoissa käytössä olleet rengaskoot olivat

- auton etuakseli 385/55R22.5 (Autoissa R1 ja T5 315/70R22.5-renkaat)
- auton vetävä teli, paripyöräasennus 315/70R22.5
- auton takimmainen nouseva teli, single-asennus 385/55R22.5
- perävaunun akselit 1.–4. paripyöräasennus 275/70R22.5
- perävaunun 5. akseli, nouseva teli, single-asennus 385/55R22.5.

Renkaiden merkitystä polttoaineen kulutukseen on tutkittu paljon Suomessakin. Esimerkiksi Mutanen [2004: 3–5] on mitannut polttoainetaloudellisuutta 275/70R22,5-

kokoisilla linja-autorenkailla. Uudelleen uritetulla kuluneella renkaalla, jossa kulutuspin-  
taa oli jäljellä 4 mm, kulutus oli 6,4 prosenttia alhaisempi kuin samalla rengasmallilla  
uutena, jolloin kulutuspinna oli 15 mm. Samassa tutkimuksessa oli mukana myös talvi-  
olosuhteisiin tarkoitettu pinnoitettu vetorengas, jolla kulutus oli 6,4 prosenttia suurempi  
kuin edellä mainitulla uudella vertailurenkaalla. Mutasen tutkimuksessa ajoneuvona  
Kabus-linja-auto, joka oli alumiinirakenteinen ja polttoaineenkulutuksen suhteen muu-  
toinkin optimoitu Tällaisessa autossa renkaiden vierivastuksen osuus ajoneuvon koko-  
naisvastuksista on merkittävästi suurempi kuin raskaassa täysperävaunuyhdistelmässä  
ja tämän vuoksi prosentuaaliset erot ovat suurempia.

Tämän tutkimuksen kannalta oleellinen havainto oli, että molemmissa ajoneuvoryhmis-  
sä oli samankaltaista vaihtelua ajoneuvojen rengastuksessa. Testiöljyllä ajavissa au-  
toissa urasyvyys oli keskimäärin 8,5 mm ja referenssiautoissa keskimäärin 10,2 mm, eli  
eroa oli 1,8 mm. Koko joukon keskimääräinen urasyvyys oli siis tarkastushetkellä 9,4  
mm.

Erityisenä havaintona oli kuitenkin, että kaikkien pienimmällä kulutuksella ajaneessa  
T2- ajoneuvoyhdistelmässä renkaina oli varsin kuluneita ns. premium-merkkien renkai-  
ta. Keskimääräinen urasyvyys tässä autossa oli 6,4 mm. Yhtenä osatekijänä ajoneuvon  
T2 taloudellisuudessa ovat hyvin todennäköisesti myös renkaat.

Kapeammalla 315/70T22.5-eturenkaalla varustettu testiöljyä käyttävä T5 oli omassa  
ryhmässään eniten polttoainetta kuluttava yksilö, mutta referenssiöljyllä ajava R1 oli  
polttoaineen kulutuksen suhteen hyvin lähellä oman ryhmänsä keskiarvoa, ero keskiar-  
voon oli -0,07 l/100 km. Kapeampi rengas ei siis vaikuttaisi olevan ratkaisevan merki-  
tyksellinen kokonaisen yhdistelmän polttoaineenkulutuksen kannalta.

Sekä T5:ssä että tavanomaisella öljyllä ajaneiden autojen ryhmässä eniten polttoainet-  
ta kuluttaneessa R3:ssä keskimääräinen urasyvyys oli molemmissa sama 11,5 mm.

Testiöljyä käyttäneiden autojen ryhmässä urasyvyys oli suurin ja testiöljyä käyttävien  
autojen ryhmässä R3 osui urasyvyyden puolesta mediaaniin. R3:ssä oli alla pinnoitettu-  
ja renkaita, joilla saattaa olla kokonaan tehdasuutta rengasta suurempi vierinvastus.  
Tavanomaista öljyä käyttävien autojen joukosta taloudellisimman R4:n renkaiden  
urasyvyys oli keskimäärin 11,8 mm, joka on sekä eniten kuluttavaa autoa että keski-  
määräistä suurempi urasyvyys.



Edellä kerrotun perusteella voidaan arvioida, että urasyvyydellä on merkitystä yksittäisen ajoneuvonyhdistelmän polttoaineenkulutukseen. Yhtä olennaisena seikkana voidaan pitää eri rengasmerkeille ja malleille ominaisia erilaisia vierinvastuksia.

## 7.5 Öljynäytteiden analysointi

Tutkimuksessa seurattiin myös öljyn ominaisuuksien säilymistä vaihtovälin aikana. Testiöljyä käyttäneestä ajoneuvosta T1 otettiin kaksi näytettä ja ajoneuvoista T2, T4 sekä T5 otettiin yhdet näytteet. Vertailukohdaksi otettiin näytteet ajoneuvoista R3 ja R4.

Laboratorionäytteiden analyysitulosten perusteella voidaan tehdä päätelmä, että alhaisemman viskositeettiluokan öljy ei ole aiheuttanut lisäystä kulumametallien määrässä.

Testiöljynä käytetty 5W-30-luokan öljyllä viskometristen ominaisuuksien muutos oli vaihtovälin aikana merkittävästi vähäisempi kuin verrokkiöljyllä.

## 7.6 Polttoaineenkulutuksen merkitys kuljetustalouden kannalta

Polttoaine edustaa huomattavaa osaa kuljetusyrittäjien kuluista. Hyötyajoneuvossa, jossa kilometrejä kertyy paljon pienetkin erot polttoaineenkulutuksessa voivat vaikuttaa merkittävästi kuljetusyrittäjien kannattavuuteen.

Taulukossa 9 on laskettu yhdellä öljynvaihtovälillä saatava säästö polttoaineen kulutuksessa, vähennys hiilidioksidipäästöissä (CO<sub>2</sub>) sekä säästö polttoainekuluissa euroissa. Koska tutkimuksen perusteella ei voitu tarkasti selvittää polttoaineen kulutuksen suuruutta, laskelma on tehty kolmella eri säästötasolla:

- keskimääräinen kulutusero kun tarkastelussa ovat mukana kaikki T- ja R-ryhmiin kuuluvat autot ja molemmat ajosuunnat
- keskimääräinen kulutusero, kun tarkastelusta on suljettu pois T- ja R-ryhmistä eniten ja vähiten kuluttaneet ajoneuvoyksilöt, mukana molemmat ajosuunnat
- vähäisin säästö polttoaineen kulutuksessa molempiin suuntiin ajettaessa Studentin t-testin luottamustasolla 0,95 lasketun luottamuvälin perusteella.

Taulukko 9. Säästöt polttoaineenkulutuksessa 45 000 kilometrin öljynvaihtovälillä.

	Säästö [l / 100km]	Säästö öljyn- vaihto- välillä [litraa]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästös- sä [g/km]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästössä [kg]	Säästö euroa
Kaikki autot mukana	-2,02	-909	-54	-2418	-1227
Parhaimmat ja huonoimmat karsittu	-1,77	-797	-47	-2119	-1075
Pienin säästö luottamustasolla 0,95	-0,20	-88	-5	-233	-118
Polttoaineen arvonlisäverollinen hinta	1,35	euroa			

Tässä tutkimuksessa vertailtiin kahta öljyä, joista polttoainetta säästäväksi osoittanut moottoriöljy on hankintahinnaltaan kalliimpaa. Tässä tapauksessa testiöljyn ja verrokkiöljyn arvonlisäverollisessa litrahinnassa on eroa noin 3 euroa litralta, eli 35 litran öljynvaihdossa kustannuslisä on sadan euron suuruusluokkaa. Näissä laskelmissa öljynvaihtoväliksi on oletettu 45 000 km. Jos oletetaan polttoaineen verolliseksi hinnaksi 1,35 euroa/litra, niin jo 0,16 litran säästö sadalla kilometrillä riittää kompensoimaan moottoriöljyjen hintaeron.

Tilastokeskuksen mukaan raskailla ajoneuvoyhdistelmillä ajettiin Suomessa vuonna 2017 keskimäärin 74 000 km vuodessa [Lahtinen 2018]. Taulukossa 10 on esitetty laskelma kokonaissäästöstä tällä keskimääräisellä ajokilometrimäärällä.

Taulukko 10. Vuotuinen säästö raskaan ajoneuvon yhdistelmän keskimääräisellä ajosuoritteella 74 000 km/vuosi.

	Säästö [l / 100 km]	Säästö vuodessa [litraa]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästössä [g/km]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästössä [kg]	Säästö euroa
Kaikki autot mukana	-2,02	-1495	-54	-3976	-2018
Parhaimmat ja huonoimmat karsittu	-1,77	-1310	-47	-3484	-1768
Pienin säästö luottamustasolla 0,95	-0,20	-144	-5	-384	-195
Polttoaineen arvonlisäverollinen hinta	1,35	euroa			

Käytännön kokemukseen perustuen suurimmassa osassa pitkän matkan liikennettä ajavissa kuljetusyrityksissä ajokilometrimäärä on merkittävästi suurempi kuin edellä mainittu keskiarvo. Hyvin usein rahtiliikenteessä vuotuinen kilometrimäärä on suuruus-

luokkaa 150 000–200 000 km vuodessa eivätkä tätä suuremmatkaan ajokilometrisuoritteet ole harvinaisia. Taulukossa 11 on laskettu säästöpotentiaali 150 000 km vuodessa ajavalle ajoneuvoyhdistelmälle samalla periaatteella kuin edellisissä laskelmissa.

Taulukko 11. Vuotuinen säästö raskaan ajoneuvoyhdistelmän 150 000 km/vuosi ajomäärällä.

	Säästö [l / 100 km]	Säästö vuodessa [litraa]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästössä [g/km]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästössä [kg]	Säästö euroa
Kaikki autot mukana	-2,02	-3030	-54	-8060	-4091
Parhaimmat ja huonoimmat karsittu	-1,77	-2655	-47	-7062	-3584
Pienin säästö luottamustasolla 0,95	-0,20	-293	-5	-778	-395
Polttoaineen arvonlisäverollinen hinta	1,35	euroa			

Hyvin usein kuljetusyriyksellä on useampia autoja, jolloin säästöhyöty kertautuu vastaavalla tavalla. Hiilidioksidipäästöjä arvioitaessa on syytä pitää mielessä myös laajempi näkökulma. Taulukossa 12 on esitetty hiilidioksidipäästöjen alentamispotentiaali valtakunnallisella tasolla.

Tilastotietojen perustana on käytetty Traficomien Liikennefakta.fi-sivustoa, jonka tiedot perustuvat LIPASTO-laskentajärjestelmään. Sen mukaan kuorma-autojen ajosuorite oli vuosina 2012–2016 keskimäärin 4041 miljoonaa kilometriä. Kuorma-autoliikenteen hiilidioksidipäästöt Suomessa olivat vuosina 2012–2016 keskimäärin noin 3,2 miljoona tonnia. [Liikennefakta 2019.]

Taulukko 12. Vuotuisten CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentämismahdollisuus suomalaisessa kuorma-autoliikenteessä kolmella eri kulutuksen alentumisen tasolla.

	Säästö [l / 100km]	Säästö valtakunnallisesti vuodessa [litraa]	Vähennys CO <sub>2</sub> - päästössä valtakunnalli- sesti vuodessa [1000 kg]
Kaikki autot mukana	-2,02	-81 628 000	-217 000
Parhaimmat ja huonoimmat karsittu	-1,77	-71 526 000	-190 000
Pienin säästö luottamustasolla 0,95	-0,20	-7 880 000	-21 000

Kokonaispäästöön nähden moottoriöljyllä saavutettava hiilidioksidipäästön vähennys olisi siis edellä käytetyillä polttoaineen säästön toteutumilla 0,6–6 prosenttia. Taulukossa 12 tehdyssä laskelmassa on tehty oletus, että polttoaineena on diesel, sillä muilla käyttövoimilla toimivat raskaat ajoneuvot ovat edelleen suhteellisen harvinaisia, vaikkakin yleistä. Vuoden 2017 lopussa 98,1 prosenttia kuorma- ja linja-autoista oli dieselillä toimivia. Liikennefaktan mukaan kuorma-autojen keskimääräinen polttoaineenkulutus on ollut 37,4 l / 100 km, joka myötä nyt tutkittu ajoneuvoryhmä sijoittuu melko lähelle kulutuksen keskiarvoa. [Liikennefakta: 2019.]

## 8 Yhteenveto

Työssä selvitettiin 5W-30-viskositeettiluokan moottoriöljyn vaikutusta raskaan ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen todellisissa suomalaisissa ajo-olosuhteissa. Verrokkina oli 15W-40-viskositeettiluokan öljy. Tutkimusta varten löydetty ajoneuvot tarjosivat poikkeuksellisen otollisen mahdollisuuden selvittää asiaa, sillä samaa ajotehtävää suoritti useita lähes identtisiä ajoneuvoyhdistelmiä. Tutkimuksen aikana selvisi, että ajoneuvoissa oli kuitenkin eroavaisuuksia esimerkiksi kuormatilarakenteen ja renkasvalintojen suhteen. Nämä heikensivät tulosten luotettavuutta hieman.

Taloudellisen ajamisen tavoittelussa avainasemassa on aina kuljettaja. Tässä tutkimuksessa ei seurattu kuljettajakohtaisia tai yksittäisten ajosuoritteiden kulutuslukemia vaan tietoa käsiteltiin suurempina joukkoina. Tällöin myös yksittäisten liikennehäiriöiden merkitys tuloksiin vaimenee.

Tutkimuksen perusteella voitiin todeta, että testiöljyä käyttävän autojoukon polttoaineen kulutus oli keskimäärin alhaisempi kuin verrokkijoukossa. Testiöljyä käyttäneiden ajoneuvojen joukossa erot ajoneuvoyksilöiden välillä olivat kuitenkin merkittävästi suurempia kuin verrokkiryhmässä. Suurehkon varianssin vuoksi ei voida luotettavasti tehdä tarkkaa johtopäätöstä testiöljyn polttoainetta säästävän vaikutuksen suuruudesta.

Muu tutkimustieto kuitenkin tukee ajatusta siitä, että yleisimmin saavutettava säästö polttoaineen kulutuksessa voi olla suuruusluokaltaan 1–4 prosenttia tai tietyissä ajosuoritteissa jopa 5 prosenttia. Samaan aikaan voidaan kuitenkin todeta, että hyötyajoneuvon kohdalla hyvinkin pieni säästö riittää kompensoimaan polttoainetta säästävän öljyn hieman kalliimman hinnan. Polttoaineenkulutuksen alentuminen vaikuttaa suo-

raan myös ajoneuvon tuottamiin hiilidioksidipäästöihin, minkä myötä jo pienessä kuljetusyrityksessä on mahdollisuus saada aikaan useiden tonnien hiilidioksidipäästöjen vähenemä.

Tätä taustaa vasten on perustelua, että voiteluainemyynnissä ohjataan asiakkaita valitsemaan SAE 5W-30 -luokan öljy silloin, kun se ajoneuvon käytön kannalta on tarkoituksenmukaista ja moottorivalmistaja sallii tämän viskositeettiluokan öljyn käytön.

Kuljetusliikkeen kannalta on taloudellisesti kannattavaa ottaa polttoainetta säästävä moottoriöljy yhdeksi keinoksi muiden joukkoon, jolla voidaan pienentää polttoaineen kulutusta, parantaa kuljetusliiketoiminnan kannattavuutta sekä vähentää kuljetusten ympäristökuormitusta.

## Lähteet

ACEA European Oil Sequences. 2018. Verkkoaineisto. <[https://www.acea.be/uploads/news\\_documents/ACEA\\_European\\_oil\\_sequences\\_2016\\_update\\_REV\\_2.pdf](https://www.acea.be/uploads/news_documents/ACEA_European_oil_sequences_2016_update_REV_2.pdf)>. Päivitetty 1.12.2018. Luettu 20.4.2019.

ACEA represents Europe's car, van, truck and bus manufacturers. Verkkoaineisto. <<https://www.acea.be/about-acea/who-we-are>>. Luettu 22.4.2019.

Braun, Jürgen & Omeis, Jürgen. 2001. Lubricants and Lubrication. Teoksessa Mang, Theo & Dresel Willfried (ed.). Weinheim: Wiley-VHC GmbH.

Brass David. 2016. Heavy duty diesel engine oil fuel economy: Today, Tomorrow and Beyond. 39th Automotive/Petroleum Industry Forum. Verkkoaineisto. <[http://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/7DD%20Fuel%20Economy%20Today%20Tomorrow%20and%20Beyond%20Final\\_1.pdf](http://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/7DD%20Fuel%20Economy%20Today%20Tomorrow%20and%20Beyond%20Final_1.pdf)>. Infenium. Luettu 16.4.2019.

Canter Neil, 2013. Fuel Economy, The role of friction modifiers and VI improvers. Verkkoaineisto. Society of Tribologist and Lubrication Engineers. <<https://oil-additives.evonik.com/product/oil-additives/downloads/the-role-of-friction-modifiers-and-vi-improvers-en.pdf>>. Luettu 3.5.2019.

de Carvalho, Margareth Judith Souza; Seidl, Peter Rudolf; Belchior, Carlos Rodrigues Pereira; Sodré, José Ricardo. 2010. Lubricant viscosity and viscosity improver additive effects on diesel fuel economy. Verkkoaineisto. Tribology International. <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.07.014>>. Luettu 1.5.2019.

Engine Oil Viscosity Classification. SAE International. 2015. Verkkoaineisto. <[https://www.sae.org/standards/content/j300\\_201501/](https://www.sae.org/standards/content/j300_201501/)>. Luettu 21.4.2019.

Enabling fuel economy: proof, performance and practice. 2013. Commercialvehicle.in. Lubrizol.

Erkkilä, Kimmo; Laine, Petri; Naskali, Timo; Rahkola, Pekka; Karvonen, Veikko; Iso-maa, Juha-Matti; Juhala, Matti; Nojonen, Kai; Partala, Juha; Liimatainen, Heikki; Wahlsten, Rami; Bergman, Micke; Paula, Silvonen; Ahtiainen, Matti; Murtonen, Timo; Lappi, Maija; Nylund, Nils-Olof; Laamanen Mikko & Kankare Johannes. 2013. Verkkoaineisto. Loppuraportti Energiatohokas ja älykäs raskas ajoneuvo – HDENIQ. <[http://www.transec.fi/files/698/Energiatohokas\\_ja\\_alykas\\_raskas\\_ajoneuvo\\_HDENIQ\\_Loppuraportti.pdf](http://www.transec.fi/files/698/Energiatohokas_ja_alykas_raskas_ajoneuvo_HDENIQ_Loppuraportti.pdf)>. Julkaistu 20.5.2013. Luettu 11.4.2019. Espoo. VTT.

Holmberg, Kenneth; Andersson, Peter; Nylund, Nils-Olof; Mäkelä, Kari & Erdemir, Ali. 2014. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. Verkkoaineisto. Tribology International. <<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2014.05.004>>. Luettu 3.5.2019.

Jääskeläinen, Hannu & Majewski, Addy. Dieselnet. Diesel Engine Lubricants. Verkkoaineisto. <<https://www.dieselnet.com/tech/lube.php>>. Päivitetty 03/2016. Luettu 4.4.2019.

Kassfeldt, Elisabeth; Kasmann, Rudolphi Åsa & Torbacke, Marika. 2014. Lubricants – Introduction to Properties and Performance. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Kröger, Virpi. 2007. Poisoning of automotive exhaust gas catalyst components. Poisoning of automotive exhaust gas catalyst components. The role of phosphorus in the poisoning phenomena. Verkkoaineisto. <<http://urn.fi/urn:isbn:9789514286087>>. Academic dissertation the Faculty of Technology of the University of Oulu.

Köhler, Eduard; Schopf, Eckhart & Mohr Uwe. 2010. Hand Book of Diesel Engines. Teoksessa Mollenhaeur, Klaus & Tschoeke, Helmut Heidelberg (ed.). Springer-Verlag.

Lahtinen Sami. 2018. Henkilöautoilla ajettiin edellisvuosien lailla – maanteiden tavarankuljetukset tehostuivat. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<http://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2018/henkiloautoilla-ajettiin-edellisvuosien-lailla-maanteiden-tavarankuljetukset-tehostuivat/>>. Luettu 3.5.2019.

Liikennefakta. 2018. Paketti- ja kuorma-autojen päästöt ja kulutus. Traficom. Verkkoaineisto. <[https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/paketti\\_ ja\\_kuorma-autot/paastot\\_ ja\\_kulutus](https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/paketti_ ja_kuorma-autot/paastot_ ja_kulutus)>. Päivitetty 18.09.2018. Luettu 6.5.2019.

Liikennefakta - Paketti- ja kuorma-autojen käyttövoimat. 2019. Verkkoaineisto. Traficom. <[https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/paketti\\_ ja\\_kuorma-autot/kayttovoimat](https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/paketti_ ja_kuorma-autot/kayttovoimat)>. Luettu 3.5.2019.

Mutanen, Tommi. 2004. Verkkoaineisto. Rengastyypin vaikutus linja-auton energiankulutukseen: Mittaukset kesällä 2004. <[https://www.motiva.fi/files/1048/HD-energia\\_rengastyypin\\_vaikutus\\_linja-auton\\_energiankulutukseen.pdf](https://www.motiva.fi/files/1048/HD-energia_rengastyypin_vaikutus_linja-auton_energiankulutukseen.pdf)>. Luettu 11.4.2019.

Murtonen, Timo & Kytö Matti. 2003. The the effect of lubrication oil on the fuel consumption of heavy duty diesel engine. Tutkimusraportti. VTT. Verkkoaineisto. <[https://www.motiva.fi/files/1051/HD-energia\\_VoiteluVolvo2003.pdf](https://www.motiva.fi/files/1051/HD-energia_VoiteluVolvo2003.pdf)>. Luettu 1.5.2019.

Oil Categories. Verkkoaineisto. API. <<https://www.api.org/products-and-services/engine-oil/eolcs-categories-and-classifications/oil-categories#tab-diesel-c-categories>>. Luettu 1.5.2019.

Omeis, Jürgen & Harperscheid, Manfred. 2001. Lubricants and Lubrication. Teoksessa Mang, Theo & Dresel Willfried (ed.). Weinheim: Wiley-VHC GmbH.

Pistons and engine testing. 2015. 2nd Edition. Mahle GmbH. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Proposed Changes to the ACEA Heavy-Duty Oil Sequences. 2018. Verkkoaineisto. <<https://www.lubrizoladditives360.com/introduction-of-acea-2018-heavy-duty-oil-sequences/>>. Julkaistu 10.9.2018. Luettu 22.4.2019.

Spikes, H. 2004. The history and mechanisms of ZDDP. Verkkoaineisto. Tribology Letters, Vol. 17, No. 3. <<https://pdfs.semanticscholar.org/e2dc/da55f2a51bde3dabb2ef06543fc401d61ed4.pdf>>. Luettu 6.5.2019.

Standard Test Method for Sulfated Ash from Lubricating Oils and Additives. 2018. Verkkoaineisto. ASTM International. <<https://www.astm.org/Standards/D874.htm>> Luettu 10.4.2019.

Schwartze, Hubert. 2010. Hand Book of Diesel Engines. Teoksessa Mollenhaeur, Klaus & Tschoeke, Helmut Heidelberg (ed.). Springer-Verlag.

Söderström, Christer; Westerholm, Mårten & Kytö, Matti. 2004. The effect of lubrication oil on the fuel consumption of a heavy-duty diesel engine. Tutkimusraportti. VTT. Verkkoaineisto. <[https://www.motiva.fi/files/1052/HD-energia\\_VoiteluScania2004.pdf](https://www.motiva.fi/files/1052/HD-energia_VoiteluScania2004.pdf)>. Luettu 1.5.2019.

Söderfjäll, Markus; Herbst, Hubert M; Larsson, Roland & Almqvist, Andreas. 2017. Verkkoaineisto. Influence on friction from piston ring design, cylinder liner roughness and lubricant properties. Verkkoaineisto. Tribology International. <<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2017.07.015>>. Luettu 27.4.2019.

Tormos, Bernardo; Ramírez, Leonardo; Johansson, Jens; Björling, Marcus & Larsson Roland. 2017. Fuel consumption and friction benefits of low viscosity engine oils for heavy duty applications. Verkkoaineisto. Tribology International. <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.007>>. Luettu 1.5.2019.

Wong, Victor W & Tung, Simon C. 2016. Overview of automotive engine friction and reduction trends – Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. Verkkoaineisto. Springerlink.com. <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs40544-016-0107-9.pdf>>. Julkaistu 29.2.2016. Luettu 21.4.2019.

Wright, Edward. 2017. The Impact of SAE Critical Specifications to the formulating and manufacture of automotive oils. Verkkoaineisto. <<http://www.lube-media.com/wp-content/uploads/2017/12/Lube-Tech-113-The-Impact-of-SAE-Critical-Specifications-to-the-formulating-and-manufacture-of-automotive-oils.pdf>>. Luettu 13.5.2019.



## Studentin t-testit luottamustasoilla 0,9; 0,95 ja 0,99

Luottamustaso 0,90					
H <sub>0</sub> -hypoteesi:	Öljyلاadulla ei ole merkitystä polttoaineenkulutukseen				
H <sub>1</sub> -hypoteesi:	Testiöljy alentaa polttoaineenkulutusta				
<b>Lastattu auto</b>					
	Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]				
	Testiöljy	Normaaliöljy			t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances
	43,72	46,36			
	40,61	47,40			
	43,52	47,34			
	45,25	45,96			
	46,54	44,95			
Keskihajonta	2,22	1,02			Variable 1
Varianssi	4,94	1,05			Variable 2
Keskiarvo	43,93	46,40	-2,48	45,17	Mean
					Variance
					Observations
					Hypothesized Mean Difference
					df
					t Stat
					P(T<=t) one-tail
					t Critical one-tail
					P(T<=t) two-tail
					t Critical two-tail
$\sigma_{x1-x2}$	1,09				
		plus miinus			
Luottamusrajat	-2,48	1,58			
Täydellä kuormalla testiöljy säästää polttoainetta	2,48 ±	1,58 litraa	Polttoainetta säästyy vähintään		0,90 litraa
		5,3 %			1,9 %
<b>Tyhjä auto</b>					
	Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]				
	Testiöljy	Normaaliöljy			t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances
	30,15	31,95			
	28,10	31,80			
	30,36	32,63			
	31,28	31,35			
	32,47	32,46			
Keskihajonta	1,61	0,52			Variable 1
Varianssi	2,60	0,27			Variable 2
Keskiarvo	30,47	32,04	-1,57	31,25	Mean
					Variance
					Observations
					Hypothesized Mean Difference
					df
					t Stat
					P(T<=t) one-tail
					t Critical one-tail
					P(T<=t) two-tail
					t Critical two-tail
$\sigma_{x1-x2}$	0,76				
		plus miinus			
Luottamusrajat	-1,57	1,12			
Tyhjällä autolla testiöljy säästää polttoainetta	1,57 ±	1,12 litraa	Polttoainetta säästyy vähintään		0,45 litraa
		4,9 %			1,4 %

Luottamustaso 0,95				
H <sub>0</sub> -hypoteesi:	Öljyلاadulla ei ole merkitystä polttoaineenkulutukseen			
H <sub>1</sub> -hypoteesi:	Testiöljy alentaa polttoaineenkulutusta			
<b>Lastattu auto</b>				
Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]				
Testiöljy	Normaaliöljy			
43,72	46,36			
40,61	47,40			
43,52	47,34			
45,25	45,96			
46,54	44,95			
Keskihajonta	2,22	1,02		
Varianssi	4,94	1,05		
Keskiarvo	43,93	46,40	-2,48	45,17
σ <sub>x1-x2</sub>	1,09			
		plus miinus		
Luottamusrajat	-2,48	2,13		
t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances				
	Variable 1	Variable 2		
Mean	43,92674646	46,4032772		
Variance	4,944673734	1,04527323		
Observations	5	5		
Hypothesized Mea	0			
df	6			
t Stat	-2,26264923			
P(T<=t) one-tail	0,032156837		P < 0,05 = H <sub>0</sub> -hypoteesi voidaan hylätä	
t Critical one-tail	1,943180281			
P(T<=t) two-tail	0,064313675			
t Critical two-tail	2,446911851			
Täydellä kuormalla testiöljy säästää polttoainetta 2,48 ± 2,13 litraa Polttoainetta säästyy vähintään 0,35 litraa				
	5,3 %			0,8 %
<b>Tyhjä auto</b>				
Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]				
Testiöljy	Normaaliöljy			
30,15	31,95			
28,10	31,80			
30,36	32,63			
31,28	31,35			
32,47	32,46			
Keskihajonta	1,61	0,52		
Varianssi	2,60	0,27		
Keskiarvo	30,47	32,04	-1,57	31,25
σ <sub>x1-x2</sub>	0,76			
		plus miinus		
Luottamusrajat	-1,57	1,53		
t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances				
	Variable 1	Variable 2		
Mean	29,89722534	31,4880111		
Variance	2,675300891	0,2671388		
Observations	5	5		
Hypothesized Mea	0			
df	5			
t Stat	-2,07368556			
P(T<=t) one-tail	0,046401874		P < 0,05 = H <sub>0</sub> -hypoteesi voidaan hylätä	
t Critical one-tail	2,015048373			
P(T<=t) two-tail	0,092803748			
t Critical two-tail	2,570581836			
Tyhjällä autolla testiöljy säästää polttoainetta 1,57 ± 1,53 litraa Polttoainetta säästyy vähintään 0,04 litraa				
	4,9 %			0,1 %

Luottamustaso 0,99										
H <sub>0</sub> -hypoteesi:	Öljyalaadulla ei ole merkitystä polttoaineenkulutukseen									
H <sub>1</sub> -hypoteesi:	Testiöljy alentaa polttoaineenkulutusta									
<b>Lastattu auto</b>										
		Polttoaineenkulutus				t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances				
	Testiöljy	Normaaliöljy								
	43,72	46,36								
	40,61	47,40								
	43,52	47,34								
	45,25	45,96								
	46,54	44,95								
Keskihajonta	2,22	1,02								
Varianssi	4,94	1,05								
Keskiarvo	43,93	46,40	-2,48	45,17						
σ <sub>x1-x2</sub>	1,09									
		plus miinus								
Luottamusrajat	-2,48	3,44								
		Täydellä kuormalla testiöljy säästää polttoainetta		2,48 ±	3,44 litraa	Polttoainetta säästyy vähintään		-0,96 litraa		
				5,3 %				-2,1 %		
<b>Tyhjä auto</b>										
		Polttoaineenkulutus [litraa/100 km]				t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances				
	Testiöljy	Normaaliöljy								
	30,15	31,95								
	28,10	31,80								
	30,36	32,63								
	31,28	31,35								
	32,47	32,46								
Keskihajonta	1,61	0,52								
Varianssi	2,60	0,27								
Keskiarvo	30,47	32,04	-1,57	31,25						
σ <sub>x1-x2</sub>	0,76									
		plus miinus								
Luottamusrajat	-1,57	2,55								
		Tyhjällä autolla testiöljy säästää polttoainetta		1,57 ±	2,55 litraa	Polttoainetta säästyy vähintään		-0,98 litraa		
				4,9 %				-3,1 %		