

Jani Kuutvuori

# Moottoriöljyn ikääntymisen vaikutus päästöihin dieselmoottorissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

23.5.2013

Tekijä(t) Otsikko	Jani Kuutvuori Moottoriöljyn ikääntymisen vaikutus päästöihin dieselmoottorissa.
Sivumäärä Aika	34 sivua 23.5.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja, dosentti Liisa Pirjola
<p>Tämän työn tarkoituksena on tutkia moottoriöljyn ikääntymisen vaikutusta hiukkaspäästöihin dieselmoottorissa. Hiukkaspäästöt voidaan yleensä jakaa koon mukaan kahteen eri ryhmään: 30 nm–1 µm halkaisijaltaan oleviin hiukkasiin kuuluvat akkumulaatio- ja nokimoodin hiukkaset, ja alle 30 nm hiukkasiin kuuluvat nukleaatiomoodin hiukkaset. Nukleaatiomoodin hiukkasten koostumus on jossain ajotilanteissa vähän tunnettu ja on epäilty, että yksi lähde näihin voisi olla moottoriöljyyn lisätyt lisäaineet.</p> <p>Työ tehtiin osana Tekesin ja yritysten rahoittamaa TREAM-projektia (Trends in real-world particle emissions of diesel and gasoline vehicles), jonka eräänä tavoitteena on tutkia, miten öljyn ikääntyminen vaikuttaa dieselhenkilöauton pakokaasupäästöihin. Hankkeen tutkimusosapuolina ovat Tampereen teknillinen yliopisto ja Metropolia Ammattikorkeakoulu.</p> <p>Mittaukset suoritettiin ensin ikäännyttämällä moottoriöljyä Audi A4 -moottorissa ajamalla sillä 28 000 km ilman öljynvaihtoa. Tämän jälkeen suoritettiin mittaukset ajamalla dynamometrillä NEDC-, US60- ja stedy-syklejä. Ajojen jälkeen vaihdettiin öljyt, ajettiin uudestaan samat syklit ja tuloksia verrattiin.</p> <p>Tuloksista nähdään auton moottorin toiminnan ja jälkikäsitteilyn suuri vaikutus päästöjen koostumukseen. Hiukkassuodattimen havaittiin vähentävän pakokaasun hiukkaspäästöjen määrää samoihin lukemiin kuin ympärillä olevassa ilmassa.</p> <p>Uudella öljyllä havaittiin olevan erillainen suhde noki- ja nukleaatiomoodin hiukkasten välillä kuin vanhalla öljyllä. Uudella öljyllä on enemmän nokimoodin hiukkasia suhteessa nukleaatiomoodin hiukkasiin. Toisaalta havaittiin, että myös EGR:n käyttöaste vaikuttaa kyseiseen suhteeseen. EGR:n ollessa pois käytöstä nukleaatiomoodin hiukkasia oli enemmän kuin nokimoodin hiukkasia. EGR:n ollessa käytössä tilanne oli päinvastainen, kun nokimoodin hiukkasia oli enemmän verrattuna nukleaatiomoodin hiukkasiin. Kokonaishiukkaspitoisuudessa ei havaittu eroja vanhan ja uuden öljyn välillä.</p>	
Avainsanat	Dieselmoottorit, hiukkaspäästöt, voiteluaineet

Author(s) Title	Jani Kuutvuori Effects of engine oil aging on exhaust emissions in a diesel engine passenger car.
Number of Pages Date	34 pages 23 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor(s)	Liisa Pirjola, Principal Lecturer, Docent
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to investigate the effect of engine oil aging on exhaust particulate emissions from passenger cars equipped with a diesel engine. Particulate matter (PM) can be commonly divided into two groups according to its size. The particulates with the diameter of which is from 30 nm to 1 µm are either soot mode, or accumulation mode depending on their composition. PM with diameter under 30 nm is called nucleation mode. Under some specific driving conditions, the composition of nucleation mode PM is not well-known, and it has been suspected that one of the sources could be additive substances of engine lubricant oil.</p> <p>This thesis was carried out as a part of TREAM-project (Trends in real world particle-emissions of diesel and gasoline vehicles) in which one of the objectives is to investigate how the oil aging effects the exhaust emissions of diesel passenger cars. The research parties are Tampere University of Technology and Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>The measures were conducted by first aging the engine lubricant oil of Audi A4 by driving with it 28 000 km without oil change. After this, the measuring was conducted by driving on dynamometer specific cycles such as NEDC-, US06- and steady-cycles. After driving the cycles the oil was changed and measuring was conducted again with new lubricant oil in the engine and the results were compared.</p> <p>The results of the thesis show that the effect of engine functioning and exhaust gas after treatment on the composition of exhaust gas are very clearly visible. It was also noticed that the use of exhaust gas recirculation is effecting the amount of PM and also the composition of PM. Also it was noticed that Diesel particulate filter reduces the amount of PM to the same numbers as they are in the surrounding atmospheric air.</p> <p>The new engine lubricant oil seemed to have the composition of PM and relation between soot and nucleation mode was different from the old engine lubricant oil. However, the effect of oil aging on this change was not certain.</p>	
Keywords	Diesel engine, particulate matter, engine lubricant oil

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Moottori	2
1.1	Ruiskutuslaitteistotekniikka	2
1.2	Palamistapahtuma	3
1.3	Exhaust Gas Recirculation (EGR)	4
3	Pakokaasu	4
3.1	Pakokaasu	4
3.2	Eri yhdisteiden osuudet pakokaasussa	5
3.3	Haitalliset yhdisteet	5
3.4	Hiukkaset	6
3.5	Typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen välinen vaihtokauppa	6
4	Öljy	7
4.1	Tehtävät	7
4.2	Koostumus	7
4.3	Lisäaineet	8
4.4	Öljyn ikääntyminen	8
4.5	Testiöljy	9
5	Pakokaasun jälkikäsittely	10
5.1	Diesel Oxidation Catalyst (DOC)	10
5.2	Diesel Particulate Filter (DPF)	11
6	Mittausjärjestelyt	12
6.1	Yleistä	12
6.2	Laimennus	13
6.3	NEDC-sykli.	14
6.4	US06-Sykli	15
6.5	Steady-ajot	16
6.6	Yhteenvedo päivistä	16

7	Mittalaitteet	17
7.1	Elpi	17
7.2	Typenoksidien mittaus	18
7.3	Hiilimonoksidin mittaus	18
8	Tulokset	19
8.1	Kaasupäästöt	19
8.1.1	EGR:n vaikutus typenoksidipäästöihin.	19
8.1.2	DOC:n vaikutus typenoksidipäästöihin	20
8.2	Mittauspiste 1: Hiukkaspäästöt ennen pakokaasun jälkikäsittelyä	20
8.2.1	Mittauspiste 1: Hiukkaset NEDC-syklissä	21
8.2.2	Mittauspiste 1: Hiukkaset Steady-syklissä	22
8.2.3	Mittauspiste 1: Hiukkaset US06-syklissä.	23
8.3	Mittauspiste 2: Hiukkaspäästöt pakokaasun jälkikäsittelyn jälkeen	25
8.3.1	Mittauspiste 2: NEDC-sykli	25
8.3.2	Mittauspiste 2: Steady- ja US06-syklit	26
8.4	Muut huomiot	28
8.4.1	EGR:n vaikutus hiukkaspäästöjen kokojakaumaan	28
8.4.2	Hiukkassuodattimen valvonta ja regeneraatio	30
9	Loppupäätelmät	31
	Lähteet	34

## Lyhenteet

DOC	Diesel Oxidation Catalyst. Osa henkilöautojen pakokaasun jälkikäsittelyä. Tarkoituksena hapettaa hiilimonoksidia, hiilivetyjä ja typpimonoksidia.
DPF	Diesel Particulate Filter. Osa henkilöautojen pakokaasun jälkikäsittelyä. Suodattaa hiukkasia pakokaasusta.
EGR	Exhaust Gas Recirculation. Menetelmä, jossa pakokaasua ohjataan takaisin sylinteriin tarkoituksena vähentää typenoksidipäästöjä.
PAO	Polyalphaolefin. Synteettinen hiilivety.
PIB	Polyisobutene. Synteettinen hiilivety.
OBD	On-board diagnostics. Tarkoittaa ajoneuvon kykyä tehdä itsediagnoosia ja viestiä tilastaan.

## 1 Johdanto

Pienhiukkaset ovat typenoksidipäästöjen ohella suurimmat haitalliset päästöt dieselmoottorin tuottamassa pakokaasussa. Nokihiukkasten lisäksi pakokaasun seassa on pienempiä nukleaatiomoodin hiukkasia, joiden alkuperä vaihtelee. 2011 voimaan tullut Euro 5b –standardi, joka koskee dieselmoottorilla varustettuja henkilöautoja, oli ensimmäinen päästöstandardi, joka ottaa myös hiukkaspäästöjen lukumäärän huomioon eikä pelkästään massaa. Standardin mukaan mitataan kuitenkin pelkästään kiinteitä hiukkasia, joiden halkaisija on yli 23 nm. On huomattu, että jossain tapauksissa tätä suurempien hiukkasten määrän vähentäminen on johtanut pienempien hiukkasten määrän kasvuun. Yksi alkuperä nukleaatiomoodin hiukkasille voi olla moottoriöljyn sisältämät rikki ja metalli yhdisteet.

Moottoriöljyt pystyvät suoriutumaan tehtävistään yhä pidemmällä vaihtoväleillä. Tehtävissään öljy joutuu kuitenkin rajuihin olosuhteisiin, se käy läpi kemiallisia muutoksia, ja lisäksi siihen tarttuu paljon kiinteitä aineita, joista osa jää öljynsuodattimeen. Tämän takia moottoriöljyn ikääntymisen vaikutuksia hiukkaspäästöihin on syytä tutkia.

Työ tehtiin osana Tekesin ja yritysten rahoittamaa TREAM-projektia (Trends in real-world particle emissions of diesel and gasoline vehicles), jonka eräänä tavoitteena on tutkia, miten öljyn ikääntyminen vaikuttaa dieselhenkilöauton pakokaasupäästöihin. Hankkeen tutkimusosapuolina ovat Tampereen teknillinen yliopisto ja Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Työssä ikäännytettiin öljyä ajamalla dieselmoottorilla varustetulla henkilöautolla 28 tkm ilman öljynvaihtoa. Ennen öljyn vaihtoa suoritettiin erilaisia mittauksia, joissa mitattiin kaasu- ja hiukkaspäästöt sekä tallennettiin auton dataa. Heti öljyn vaihtamisen jälkeen suoritettiin uudet mittaukset. Tämän jälkeen käsiteltiin data, joka on nyt esitelty työssä.

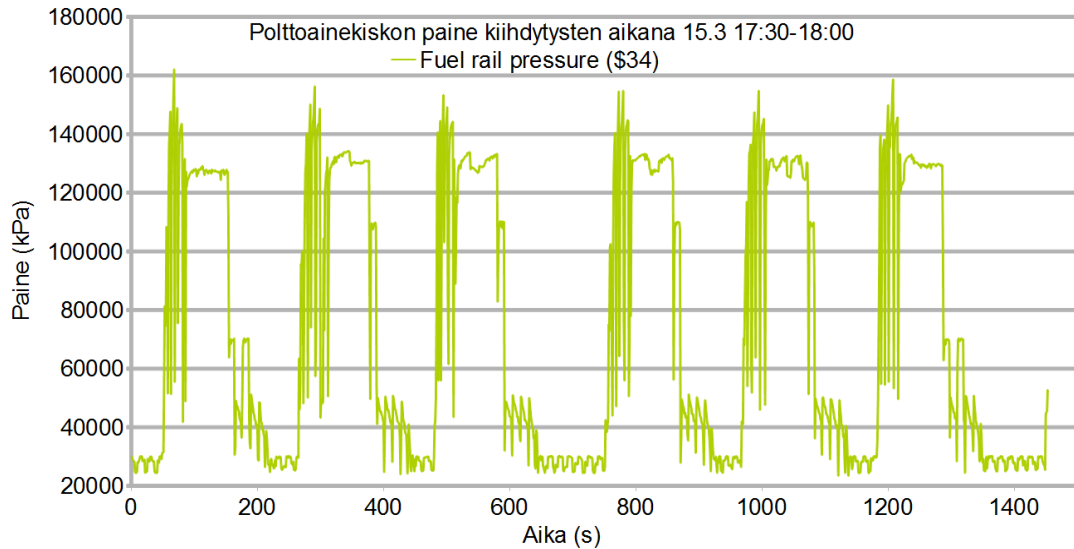
Vaikka mittaukset tehtiin yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston kanssa, tässä työssä käsitellään vain Metropolian hiukkas- ja kaasuanalysaattoreiden tuloksia.

## 2 Moottori

### 1.1 Ruiskutuslaitteistotekniikka

Työssä käytettiin Audi A4:n 2,0-litraista TDI-moottoria, jossa polttoaine suihkutetaan sylinteriin Common Rail -järjestelmällä. Common Rail -järjestelmässä sähköllä toimiva korkeapainepumppu tuottaa polttoainekiskoon suuren paineen, joka vaihtelee kuormituksen mukaan ja on versiosta riippuen tyypillisesti maksimissaan 1600–2000 bar. Polttoaine tulee korkeapainepumpulle polttoainetankista matalapainepumpun avulla. Suihkutustapahtuma alkaa, kun moottorinohjaimelta lähtöisin oleva signaali avaa polttoainesuuttimen kärjen, jolloin korkeapaineinen polttoaine pääsee suihkuamaan suoraan sylinteriin. [1, s. 43–74.] Suuri paine tekee polttoainesuihkun pisaroista pienempiä, jolloin ne muodostavat sylinterissä olevan ilman kanssa syttymiskelpoisen seoksen nopeammin kuin matalalla paineella. Suoraruiskutustekniikan ongelmana on, että polttoainesuihkun alueella polttoaine-ilmaseos on erittäin rikasta, kun taas sylinterin laidoilla seos on laimaa. Common Railin tuoma mahdollisuus vaikuttaa ruiskutushetken ajoitukseen ja pituuteen on sen suurimpia etuja. Lisäksi ruiskutusaine pysyy samana koko ruiskutushetken, jolloin viimeisetkin määrät polttoainetta saavat hyvän edellytyksen höyrystymiselle. Kuviossa 1 on esitetty polttoainekiskon paineen vaihtelu kiihdytysten aikana.





Kuvio 1. Polttoainekiskon paineen vaihtelu kiihdytysten aikana. Paineeseen vaikuttavia tekijöitä ovat moottorin kierrosluku sekä kuormitus. Moottorin kierrosluvun ja kuormitustason ollessa korkealla on tarvetta suurelle paineelle, sillä aika, joka polttoaineella on höyrystyä sylinterissä, on suhteellisen lyhyt verrattuna esimerkiksi tyhjäkäyntiin.

## 1.2 Palamistapahtuma

Puristussytytteisen moottorin palotapahtuma saa alkunsa kun mäntä puristaa sylinterissä olevaa ilmaa pienempään tilavuuteen, jolloin sekä paine että lämpötila kasvavat. Dieselmoottorin palotapahtuma on jaettu kolmeen eri osuuteen: Ennen varsinaista palamista esiintyy syttymisjättämä, joka on aika ruiskutuksen alkamisen ja palotapahtuman alkamisen välillä. Syttymisjättämän pituus vaikuttaa suuresti esisekoittumispalamisen osuuteen palotapahtumasta. Esisekoittumispalamista tapahtuu palotapahtuman alussa, kun osa polttoaineesta höyrystyy ja syttyy palamaan korkean lämpötilan vaikutuksesta. Tämäntyylinen palaminen on erittäin nopeaa. Esisekoituspalamista seuraa diffuusiopalaminen, jossa polttoaine yhtyy happeen diffuusion avulla. [4, s. 392.] Tämä palaminen on esisekoituspalamista hitaampaa, sillä se tapahtuu diffuusion nopeudella.

On huomattu, että päästöjä voidaan laskea jakamalla polttoaineen ruiskutus useampaan lyhyempään ruiskutukseen. Lähtökohtaisesti ensin voidaan suihkuttaa lyhyesti polttoainetta, jolloin esisekoituspalamisessa ei synny niin suurta lämpötilan kohoamista kuin yhdellä pitkällä ruiskutuksella. Seuraavaksi tulee pääruiskutus, jonka palaminen tapahtuu pääasiassa diffuusiopalamisena. [1, s. 30–31.] Palamistapahtuman säätämiseen ja päästöjen minimoimiseen on enemmän

mahdollisuuksia pienillä kierrosluvuilla ja kuormilla. Kierrosluvun ja kuormitustason ollessa suuri vaihtoehdot vähenevät, sillä tarvittavan momentin tuottamiseksi joudutaan ruiskuttamaan entistä enemmän polttoainetta.

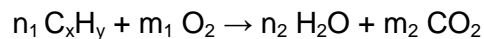
### 1.3 Exhaust Gas Recirculation (EGR)

EGR on moottorin sisäinen keino vaikuttaa typenoksidipäästöihin. Sen toimintaperiaattena on ohjata osa palotapahtumassa syntyneestä pakokaasusta takaisin sylinteriin seuraavaa palotapahtumaa varten. Tällä on kaksi seurausta. Palotapahtuman lämpötila laskee inertin kaasun läsnäolon seurauksena sen sitoessa lämpöenergiaa. Pakokaasu laskee myös ylimääräisen hapen osuutta, jolloin sitä riittää vähemmän typenoksidien syntymiseen. EGR:n käyttö vaikuttaa kuitenkin suuresti hiukkaspäästöihin pidentämällä syttymisjättämää ja vähentämällä hapen määrää. EGR voidaan toteuttaa joko sisäisesti tai ulkoisesti. Sisäinen EGR tarkoittaa, että venttiilien ajoituksia on muokattu niin, että osapakokaasusta jää sylinteriin. Ulkoisessa EGR:ssä on vedetty kanava pakopuolelta imupuolelle. Kanavassa on myös venttiili ja pakokaasun jäähdytin. Moottorinohjainyksikkö säätelee venttiiliä sähköisesti. [2, s. 330–331.]

## 3 Pakokaasu

### 3.1 Pakokaasu

Kun polttoainetta poltetaan riittävän happimäärän läsnäollessa syntyy pakokaasua seuraavan yhtälön mukaisesti:



Pakokaasun seassa on kuitenkin myös muita yhdisteitä, sillä yhtälön kuvaamaan täydelliseen palamiseen on käytännössä mahdotonta päästä. Kaikkiin polttoaineen ruiskutustekniikoihin sisältyy ongelmia, jotka aiheuttavat haitallisia päästöjä.

### 3.2 Eri yhdisteiden osuudet pakokaasussa

Pakokaasun koostumus vaihtelee moottorin kuormituksen mukaan. Kuitenkin aina suurin osa pakokaasusta on typpeä, joka on kulkenut moottorin läpi reagoimatta minkään kanssa. Sen massa vaihtelee välillä 69–75 % kokokaasun massasta. Seuraavaksi suurin osuus on hiilidioksidia, jonka massa moottorin käydessä stökiometrisellä seossuhteella on 21 %. Tällöin puhtaan hapen osuus pakokaasusta jää alle yhteen prosenttiin, ja veden osuus on 8,5 %. Edelleen riippuen moottorin kuormituksesta haitallisten päästöjen osuus käsittelemättömän pakokaasun massasta vaihtelee välillä 0,09–0,9 %. [2, s. 463.]

### 3.3 Haitalliset yhdisteet

Hiilimonoksidi (CO) on myrkyllinen kaasu, joka syrjäyttää hapen veressä. Hiilimonoksidia syntyy, kun palotapahtumassa ei ole tarpeeksi happea läsnä tai kun polttoainepisarat muodostavat ajoittain rikkaita seos alueita. Hiilimonoksidia ei esiinny dieselmootoreiden pakokaasussa paljoa, sillä ne toimivat yleensä runsaalla ilmaylimäärällä. [2, s. 464.]

Hiilivetyjä (HC) syntyy hapen vajaan läsnäolon seurauksena tai kun seos on ajoittain liian rikasta palamaan täydellisesti. Palotapahtuma aikaan saa myös uusia hiilivety yhdisteitä, joita ei ollut alkuperäisessä polttoaineessa, katkaisemalla molekyylivetjuja. Alifaattiset yhdisteet, joita ovat alkaanit, alkeenit, alkyynit ja näiden johdannaiset, ovat käytännössä hajuttomia. Aromatisilla hiilivedyillä, kuten bentseeni ja naftaleeni, on voimakas tuoksu. [2, s. 464.] Myöskään palamattomia hiilivetyjä ei esiinny paljoakaan dieselmootorin tuottamassa pakokaasussa. Ne mielletään yleensä imusarjaruiskutuksen ongelmiksi, jotka aiheutuvat, kun polttoainetta joutuu sylinteristä löytyviin pieniin tiloihin, jonne liekkiintama ei etene.

Typenoksideja (NO<sub>x</sub>) muodostuu, kun ilmaa, jossa on typpeä ja ylimääräistä happea, poltetaan. Tällöin korkeassa lämpötilassa typpi reagoi hapen kanssa muodostaen typpidioksidia ja typpimonoksidia. Typpimonoksidi on hajuton ja väritön kaasu, joka ilmakehässä muuttuu typpidioksidiksi. Typpidioksidi on puna-ruskea kaasu, jolla on läpitunkeva haju. Se on myrkyllistä ja aiheuttaa savusumua, sekä happosateita. [2, s.

464.] Dieselmoottorin käynti runsaalla ilmaylimäärällä johtaa imusarjaruiskutteista bensiinimoottoria korkeampiin typenoksidimääriin.

### 3.4 Hiukkaset

Suoraruiskutustekniikan palotapahtumassa syntyy nokihiukkasia, koska polttoainesuihkun alueella on liian vähän happea suhteessa polttoaineeseen, jotta kaikki polttoaine voisi palaa täydellisesti. Tällöin epätäydellisen palamisen seurauksena syntyy nokihiukkasia, joiden koko vaihtelee välillä 30 nm–1 µm. Jos nokihiukkasten päälle kondensoituu jäähtymisen yhteydessä muita aineita, aletaan niitä kutsua akkumulaatiomoodin hiukkasiksi. Palamistapahtuman seurauksena syntyy myös nokihiukkasia pienempiä, nukleaatiomoodin hiukkasia, joiden halkaisija on alle 30 nm. Nukleaatiomoodin hiukkaset muodostuvat joko homogeenisen nukleaation seurauksena tai kondensoitumalla ei-haihtuvien ytimien ympärille. Nukleaatiohiukkasten alkuperä vaihtelee kuorman mukaan. Matalassa kuormituksessa ajatellaan, että ne olisivat peräsin hiilivedyistä tai voiteluöljyn metalliyhdisteistä. [8]

Tiedetään, että palotapahtuman aikana muodostuu paljon hiukkasia, jotka lopulta palavat muodostaen hiilidioksidia. Vain 5–10% palotapahtuman aikana syntyneistä hiukkasista päätyy pakoputkeen. Suurin määrä nopea syntyy diffuusiopalamisen alussa, kun esipalamisesta syntyneet kuumat reaktiotuotteet ympäröivät polttoainesuihkun ja erottavat sen ilmalta. Kuitenkin suuri lämpötila ja tapahtumaa seuraava sekoittuminen ilman kanssa saavat noen hyvin oksidoitumaan. Lisäksi aika, joka hiukkasille jää agglomeroitua tässä hetkessä, on erittäin lyhyt. Noki, jota syntyy myöhemmässä vaiheessa on vähemmän alttimpaa oksidoitumiselle, koska lämpötila on paljon pienempi tilavuuden laajentumisen seurauksena. Hiukkasia voi siis syntyä paljonkin ruiskutustapahtuman loppuksi, jos ruiskutustekniikka sallii polttoainesuihkun paineen romahtamisen ruiskutuksen loppupuolella. [4, s. 416.]

### 3.5 Typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen välinen vaihtokauppa

Raskaan kaluston turboahdetuissa dieseleissä korkeapaineisen ruiskutuksen ja myöhäisemmän ajoituksen kanssa on huomattu, että suuri osa NO<sub>x</sub>-päästöistä syntyy palotapahtuman painehiipun jälkeen ja että esisekoittumispalaminen voisi enimmillään

tuottaa alle puolet painehiipun aikana syntyneistä NO<sub>x</sub>-päästöistä. On todettu, että NO<sub>x</sub>-päästöjä voidaan vähentää tehokkaasti kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on myöhäistää ruiskutuksen ajoitusta. Tämä perustuu siihen, että esisekoittumispalamisen osuus koko palotapahtumasta pienenee. Toinen tapa on kierrättää jäähtynyttä pakokaasua sylinteriin, jolloin palamistapahtuman lämpötila laskee inerttikaasun läsnäolon seurauksena. Nämä tavat yhdistettynä ratkaisevat NO-ongelmat, mutta lisäävät osaltaan hiukkaspäästöjä. [4, s. 415.]

## 4 Öljy

### 4.1 Tehtävät

Öljyn tehtävät ovat kriittisiä moottorin toiminnan kannalta. Niitä ovat kitkan vähentäminen hankauspintojen välillä, irroneiden ja muodostuneiden hiukkasten poistaminen ahtaista paikoista ja palotilan tiivistäminen. Muita öljyn tehtäviä ovat joidenkin osien jäähdyttäminen ja voiman välitys. Nykyaikaiselta öljyltä odotetaan myös, että sen haihtuminen on mahdollisimman vähäistä, ikääntyminen pientä ja viskositeetin lämpökäyttäytyminen oikeanlaista. Tällä tarkoitetaan, että öljyllä tulisi olla pieni viskositeetti kylmänä ja suuri kuumana. [3, s. 662.]

### 4.2 Koostumus

Suurin osa nykyaikana moottoreissa käytetyistä voiteluaineista on synteettisiä öljyjä. Mineraaliöljyjä käytetään vielä, mutta käyttö vähenee moottoreiden jatkuvasti tiukentuvien vaatimusten takia. Synteettisen öljyn valmistus alkaa etaanin höyrykrakkauksella, josta saadaan eteenia. Krakkaus on kemiallinen prosessi, jossa mutkikkaat orgaaniset yhdisteet pilkkoutuvat yksinkertaisemmiksi. Höyrykrakkaus taas kuuluu lämpökrakkausmenetelmiin. Eteenistä saadaan useiden katalyyttisten prosessien jälkeen synteettisiä hiilivetyjä PAO ja PIB. Jos eteenin annetaan reagoida hapen ja vedyn kanssa katalyytin läsnäollessa saadaan synteettisiä estereitä tai polypropeeniglykoleita ja polyeteeniglykoleita eri askeleissa. Hydrokrakkaamalla etaania saadaan hydrokrattua öljyä ja kevyitä bensiinejä. Uuden teknologian moottoriöljyiksi sopii PAO, PAO ja esterit tai PAO ja hydrokrakattu öljy. Muut synteettiset öljyt kuten polyglykolit sopivat rattaisiin ja hydraulijärjestelmiin.

Synteettisillä hiilivedyillä kuten PAO:lla ja hydrokrakuilla öljyillä on erittäin erityinen molekyyli rakenne, jota ei ole lähtö materiaaleissa. Mineraaliöljyt, esterit, PIB ja PAO ovat kaikki sekoituvia keskenään. Mineraaliöljyjen ja synteettisten öljyjen välissä on välimuoto, osasynteettiset öljyt, joita käytetään yhä matala-kustanteisena vaihtoehtona keskivertokuormituksella. [3, s. 666]

#### 4.3 Lisäaineet

Öljyihin on jouduttu sekoittamaan lisäaineita tuomaan haluttuja ominaisuuksia tai vähentämään ei-toivottuja. Kaikkia öljyn ominaisuuksia ei kuitenkaan pystytä lisäaineilla muuttamaan, kuten lämmön johtavuutta, viskositeetin riippuvuutta paineesta tai kaasuliukoisuutta. Lisäaineet toimivat lähes aina seoksina ja voivat sisältää synergisia tai antagonistisia vaikutuksia. Monet voitelulisäaineet ovat pinta-aktiivisia tai rajapinta-aktiivisia materiaaleja, joiden rakennetta voidaan verrata tulitikkiin. Päässä on funktionaalinen kemikaaliryhmä, joka "syttyy" vedestä, haposta, metalleista tai nokihiukkasista. Sitä kutsutaan myös polaariryhmäksi, missä varsinaiset aktiiviset ainesosat sijaitsevat. Ne voivat olla orgaanisia tai metalliorgaanisia. Tikkuosa koostuu epäpolaarisesta hiilivetyjämmästä oleofiilistä, jota öljy "vetää puoleensa". Sen päätarkoitus on liuottaa lisäaine öljyyn. Monella lisäainetyypillä on useita tikkuosuuksia polaariryhmässään. Toinen tärkeä lisäaine ryhmä koostuu korkeamolekulaarisista hiilivedyistä, joilla on erityinen molekyyli rakenne, joka voi sisältää myös happea. Öljyyn lisättyä metallia sisältäviä lisäaineita mitataan rikki-tuhkaprocentilla. Nämä ovat palamattomia aineita, joista jää tähteitä. Diesel- ja bensiinihenkilöautoissa se on 1–1,5 %. [3, s. 666.]

#### 4.4 Öljyn ikääntyminen

Öljyn ollessa moottorissa siihen kertyy paljon vierasta ainetta, pääasiassa nopea palamisesta. Dieselmootoreissa on erityisesti happoreaktioiden tuotteita, hankautumisesta irronnutta materiaalia ja vettä. Näiden nestemäisten ja kiinteiden aineiden aikaansaama kuormitus aiheuttaa fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia käytetyille öljyille. [3, s. 677.]

Fyysisiin muutoksiin sisältyy öljyn viskositeetin lisääntyminen haihtuvien komponenttien haihtumisen, kiinteän materiaalin lisääntymisen ja öljyn ikääntymisen eli hapettumisen ja polymeroinnin takia. Moniluokkaiset öljyt voivat kokea lopullisen viskositeetin katoamisen viskositeetin muokkaukseen tarkoitetun lisäaineen katoamisen seurauksena, jos lisäaine ei ole tarpeeksi leikkausta kestävä. Suurin osa vieraista kappaleista öljyn seassa on kokoluokkaa 0,1–0,5 µm kun hienoimman filterin hukoiset ovat paljon isompia. [3, s. 679.]

Moottoriöljyn kemiallista muutosta kuvataan kahdella luvulla: Total Base Number ja Total Acid Number. Total Base Number kertoo, kuinka paljon öljy pystyy vielä neutralisoimaan happamia palamistuotteita. Total Acid Number taas kertoo, kuinka paljon öljyyn on liennut mietoja ja vahvoja happoja. TBN-luku voi laskea öljynvaihtojen välissä yli 50 %, jota pidetään yleisesti hyväksyttävänä. Mustaa lietettä syntyy, kun palotapahtumassa syntyneet typenoksidit ajautuvat ohipuhalluksen seurauksena kampikammioon ja siellä typpidioksidi reagoi polaaristen lisäainekomponenttien kanssa luoden orgaanisia nitraatteja eli nk. mustaa lietettä. Tätä prosessia kutsutaan nitraukseksi. Polttamalla polttoaine-ilmaseosta lambdakertoimen ollessa yksi, voidaan ongelmaa pienentää. Lisäksi moderneissa henkilöautoissa öljyä kuluu noin. 100 ml / 1000 km; tällöin ei varsinaista ongelmaa esiinny uuden öljyn lisäämisen takia ja vaihdettaessa öljy esim. 15 000 km:n välein. [3, s. 683.]

#### 4.5 Testiöljy

Testi öljynä käytettiin Neste City Pro W LongLife III 5W-30 -öljyä. Se on nesteen kehittämä pitkän vaihtovälin öljy, joka korvaa useimmissa autoissa aikaisemmat longlife-öljyt. Öljy sopii nimenomaan autoihin, joissa käytetään dieselpartikkelisuodattimia. [7] Öljyn ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Öljyn ominaisuudet [7].

Tyypilliset analyysiarvot	5W-30
Tiheys kg/m <sup>3</sup> 15 °C	853
Leimahduspiste °C (COC)	230
Jähmepiste °C	-42
Viskositeetti-indeksi	170
ViskositeettiSt/ 40 °C	69
ViskositeettiSt/ 100 °C	11,8
Viskositeetti cP/ -30 °C	5800

## 5 Pakokaasun jälkikäsittely

### 5.1 Diesel Oxidation Catalyst (DOC)

Diesel Oxidation Catalyst sijaitsee pakoputkessa Diesel Particle Filterin edessä. Sen tehtävänä on vähentää CO ja HC päästöjä, hapettaa NO NO<sub>2</sub>:ksi ja tarpeen vaatiessa toimia katalyyttisenä polttimena. [2, s. 352.]

CO- ja HC-päästöjen hapetus on lähes täydellistä kun on saavutettu nk. syttymislämpötila, jossa noin. 90 % HC ja CO päästöistä muuttuu hiilidioksidiksi CO<sub>2</sub> ja vedeksi H<sub>2</sub>O. Syttymislämpötila riippuu pakokaasun rakenteesta, virtausnopeudesta ja katalyytin rakenteesta mutta on suunnilleen 170–200 °C. Myös osa pakokaasun seassa olevien hiukkasten massasta katoaa DOC:ssa, sillä korkeassa lämpötilassa osa hiilivedystä, jota on partikkelien ytimessä irtoaa ja hapettuu. Tällä tavoin hiukkasmassasta katoaa 15–30 %. CO ja HC päästöjen hapettumisreaktiossa syntyy lämpöä, n. 90 °C:tta yhtä tilavuusprosenttia CO:ta kohden. Tällöin voidaan moottorissa palotapahtuman päättymisen jälkeen ruiskuttaa sylinteriin ylimääräistä polttoainetta, joka joutuu DOC:iin ja siellä syntynyttä lämpöä käytetään DPF:n regeneroimiseen. [2, s. 352]



DOC:n toinen tarkoitus on hapettaa typpimonoksidi NO typpidioksidiksi  $\text{NO}_2$ . Typpidioksidin suuri osuus typpioksidissa on tärkeää DOC:n takana sijaitseville hiukkasia vähentäville komponentille. Käsittelemättömässä pakokaasussa typpidioksidin osuus typenoksideista on noin yksi kymmentä typpimonoksidia kohden. Hapen läsnäollessa typpidioksidi on lämpötila riippuvaisessa tasapainotilassa typpimonoksidin kanssa. Alle  $250\text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa  $\text{NO}_2$ :n osuus  $\text{NO}_x$ :sta on kuitenkin lähes puolet. DOC:n tehtävä on nostaa  $\text{NO}_2$ -NO-suhdetta pakottamalla termodynaaminen tasapainotila. Riippuen katalyytin pinnoitteesta ja pakokaasun koostumuksesta tasapainotila saavutetaan  $180\text{--}230\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa. [2, s. 352.]

## 5.2 Diesel Particulate Filter (DPF)

Diesel Particulate Filter sijaitsee pakoputkessa Diesel Oxidation Catalyysin jälkeen. DPF:n tarkoituksena on suodattaa hiukkaspäästöt pois pakokaasusta. [2, s. 344.]

Keraamiset hiukkassuodattimet sisältävät hunajakennomaisen rakenteen, joka on tehty piikarbidista tai kordieritistä ja jossa on rinnakkain poikkipinta-alaltaan neliön muotoisia kanavia. Kanavien välisen seinän leveys vaihtelee välillä  $300\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$ . Pakokaasun sisäänmeno suunnassa on vierekkäisistä kanavista jokatoinen tukittu keraamisilla tulpilla. Tällöin niiden kanavien, joiden sisäänmenoa ei ollut tukittu, ulosmeno on tukittu keraamisilla tulpilla; näin pakokaasu joutuu ulospäästykseen tunkeutumaan kanavien seinien läpi. Keraamisten seinien välissä on huokoisia seinämiä, joihin partikkelit kiinnittyvät. Toisessa ratkaisussa partikkelit säilötään keraamisten seinien pinnalle. Kun suodatin kyllästyy partikkeleista, sen aiheuttama vastapaine putkistossa nousee. Tällöin suodatin täytyy regeneroida. [2, s. 344.]

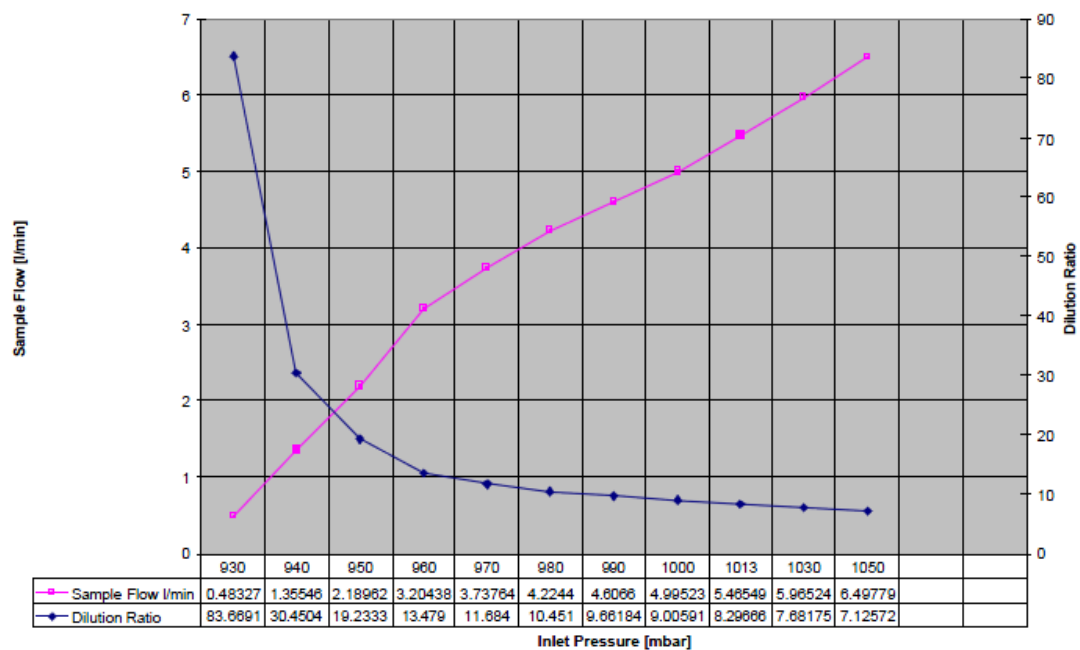
Suodattimen regenerointi välit vaihtelevat välillä  $300\text{--}800\text{ km}$ , riippuen niin moottorin toiminnasta kuin valitusta suodattimesta. Aktiivisessa regeneraatioissa suodattimen läpi viedään pakokaasua, jossa on happea jatkuvasti saatavilla. Tämän lisäksi pakokaasun lämpötilan on oltava noin  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . Tällöin partikkelit palavat muodostaen hiilidioksidia ja vesihöyryä. Käyttäessä typpidioksidia partikkeleiden hapettamiseen, on tarvittava lämpötila enää  $450\text{ }^\circ\text{C}$ . [2, s. 344.]



## 6.2 Laimennus

Näytteenottolinjassa jouduttiin käyttämään laimennusta, sillä tarkkojen mittalaitteiden asteikot eivät ole riittävän suuret raakan pakokaasun mittaamiseen. Näyte laimennettiin käyttämällä huokoista putkilaimenninta ja sen jälkeen olevaa ejektoria. Ejektoriin syötetään paineilmaa, jonka vaikutuksesta sen läpi kulkenut näytevirta laimenee. Ejektorin laimennuskertoimen riippuvuus näytteenottolinjan virtausnopeudesta on havainnollistettu kuviossa 3. Tyypillisesti ejektorin laimennuskerroin vaihtelee välillä 9-12.

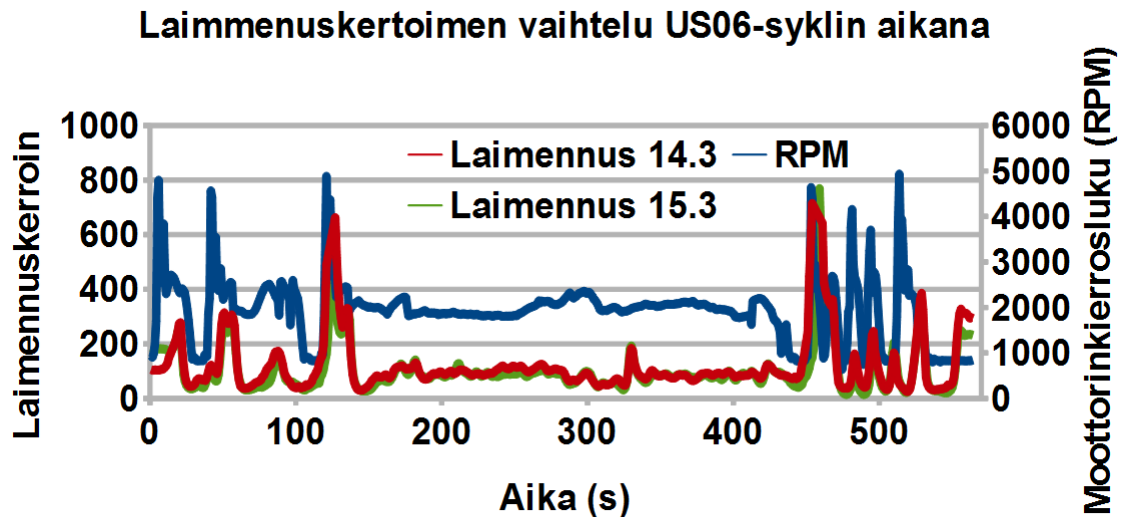
*Dekati diluter data chart*



Kuvio 3. Näytevirran virtausnopeuden vaikutus laimennuskertoimeen. Mitä pienempi nopeus, sitä suurempi laimennuskerroin. Sinisellä laimennuskerroin ja lilalla virtausnopeus.

Huokoisen putkilaimentimen laimennuskerroin vaihteli mittausten aikana välillä 11-17. Laimennuksen suuren vaihtelun takia mitattiin pakoputken raakaa hiilidioksidia ja hiilidioksidia laimennuksen jälkeen ja niiden suhteesta laskettiin laimennuskerroin. Myös taustailman hiilidioksidipitoisuus mitattiin ja se vähennettiin mittaustuloksista. Laimennuskerroin jouduttiin kuitenkin laskemaan eri toistojen välisistä ajoista, jolloin kujettajan, moottorin ja ympäristön vaikutuksen pääsivät vaikuttamaan siihen. Tämän takia eri ajanhetkiä ei kerrottu vastaavalla kertoimella, vaan kertoimista laskettiin

keskiarvo, jolla kaikki arvot lopuksi kerrottiin. Kuviossa 4 on esitetty laimennuskertoimen vaihtelu sekä vaihteluun vaikuttavista tekijöistä moottorinkierrosluku.



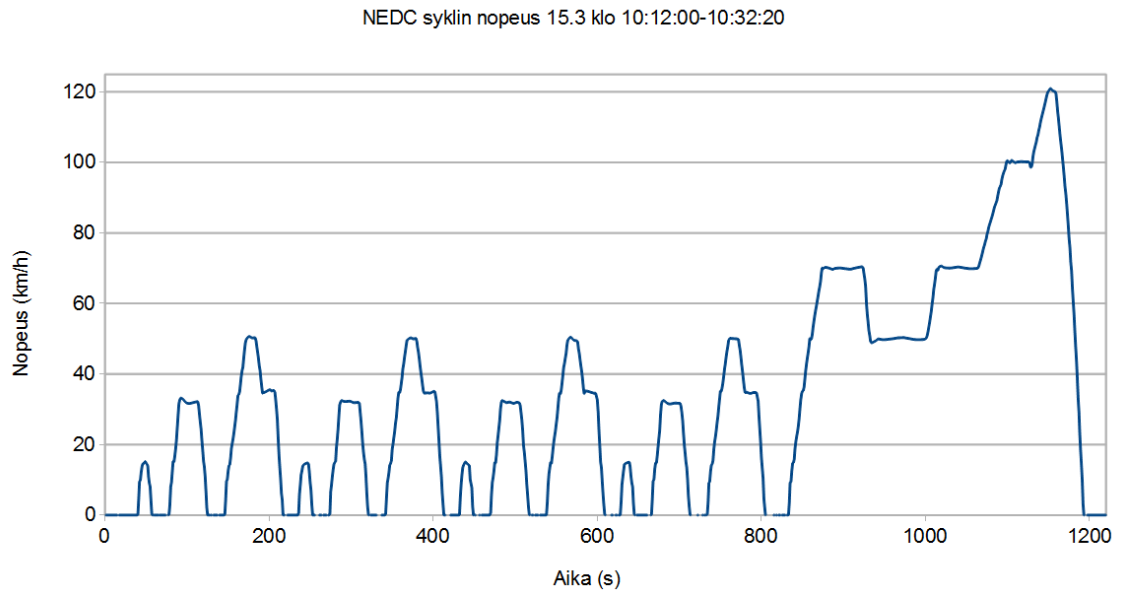
Kuvio 4. 14. ja 15. päivän laimennuskertoimet. Sinisellä moottorinkierrosluku.

### 6.3 NEDC-sykli.

NEDC (New European Driving Cycle) -sykliä käytetään kevyiden ajoneuvojen päästöjen ja polttoaineen kulutuksen EU-tyyppihyväksynnän testaamiseen. Syklissä ajetaan neljä ECE-osiota peräkkäin, joiden jälkeen seuraa yksi EUDC-osio (Kuvio 5). Koko NEDC-sykli kestää 1220 sekuntia. Tähän aikaan sisältyy 40 sekunnin tyhjäkäynti alussa, joka on syklin uudesta versiosta poistettu. [5]

ECE-sykli muistuttaa kaupunkioissa ajamista: hitaita ajonopeuksia, matala moottorin kuormitus ja matala pakokaasun lämpötila. [5]

Neljännän ECE-syklin jälkeen tulevassa EUDC-syklissä ajetaan enemmän maantieajoa muistuttavia nopeuksia, ajonopeuden vaihdella välillä 50–120 km/h. [5]



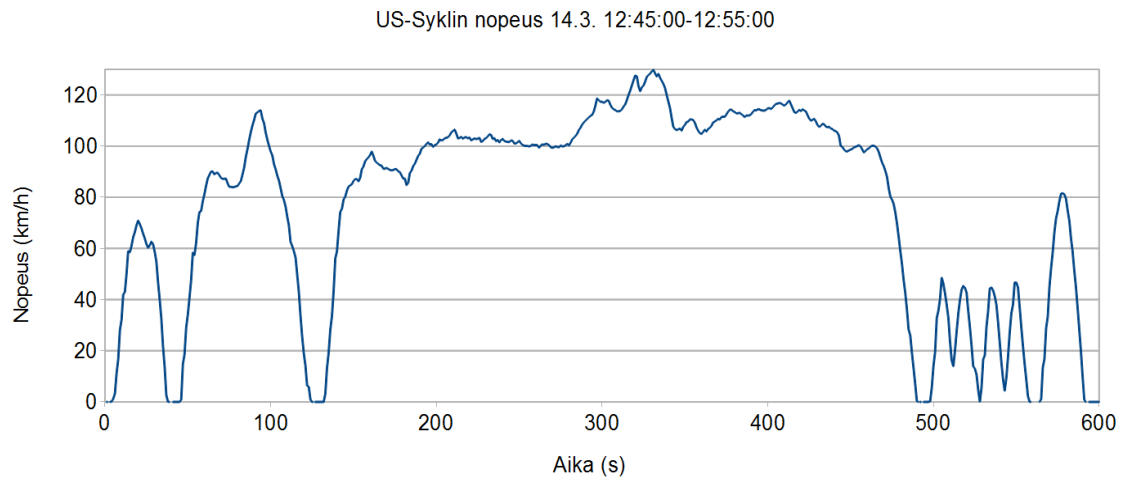
Kuvio 5. Dynamorullien nopeus erään NEDC-syklin aikana.

Virallisen NEDC syklin aikana kuljetun matkan pituus on 11 007 m. Ihmiskuljettajan ajamana eri toistojen välillä esiintyy siis eroja. 12.3.–15.3. Ajettujen NEDC-sykliden matkojen pituudet sijoittuivat välille 11 030 – 11 211 m ja keskihajontana oli 0,0459.

#### 6.4 US06-Sykli

US06 Supplemental Federal Test Procedure kehitettiin osoittamaan FTP-75 testi-syklin epäkohtia. FTP-75-sykliä on käytetty Yhdysvalloissa päästöjen ja polttoaineen kulutuksen mittaukseen, ja vuodesta 2000 lähtien on ajoneuvojen läpäistävä FTP-75-syklin lisäksi myös US06-sykli ja ilmastointilaitteen käytön vaikutukset huomioon ottava SC03-sykli. US06-syklin (kuviokuva 6) tarkoituksena on esittää aggressiivista ajoa, korkeita nopeuksia ja nopeita kiihdytyksiä, pikaista nopeuden vaihtelua ja liikkellelähtöä muistuttavia ajotilanteita. [5]

Syklin aikana ajettun matkan pituus on 12 800 m. Testiajoissa matkan pituus vaihteli välillä 12 722 – 12 926 m ja keskihajonnaksi tuli 0,0658.



Kuvio 6. Dynamorullien nopeus erään US06-syklin aikana.

### 6.5 Steady-ajot

Steady-ajossa ajetaan rullilla tasaista nopeutta 80 km/h 6-vaihteella. Ajon aikana rullien vastusta vaihdellaan, jolloin moottori joutuu tekemään enemmän työtä pyörittääksien renkaita. Tällöin voidaan tarkastella kuormituksen muutoksen vaikutuksia päästöihin. Vastusta vaihdeltiin niin, että pyöräteho vaihteli asteittain: 5 kW, 10 kW ja 20 kW. Käytännössä yhtä kuormaa ajettiin 11–18 minuuttia. Steadyn etuna on, että siinä kuljettajan vaikutus tuloksiin on erittäin pieni.

### 6.6 Yhteenveto päivistä

Mittalaitteet ja näytteenottolinjat koottiin 8.3. Tämän jälkeen mittauksille oli varattu viikko aikaa: kaksi päivää vanhalla öljyllä kahdesta eri mittapisteestä, sama uudella öljyllä ja yksi varapäivä. Eri mittauspäivinä ajetut syklit on esitetty taulukossa 2.

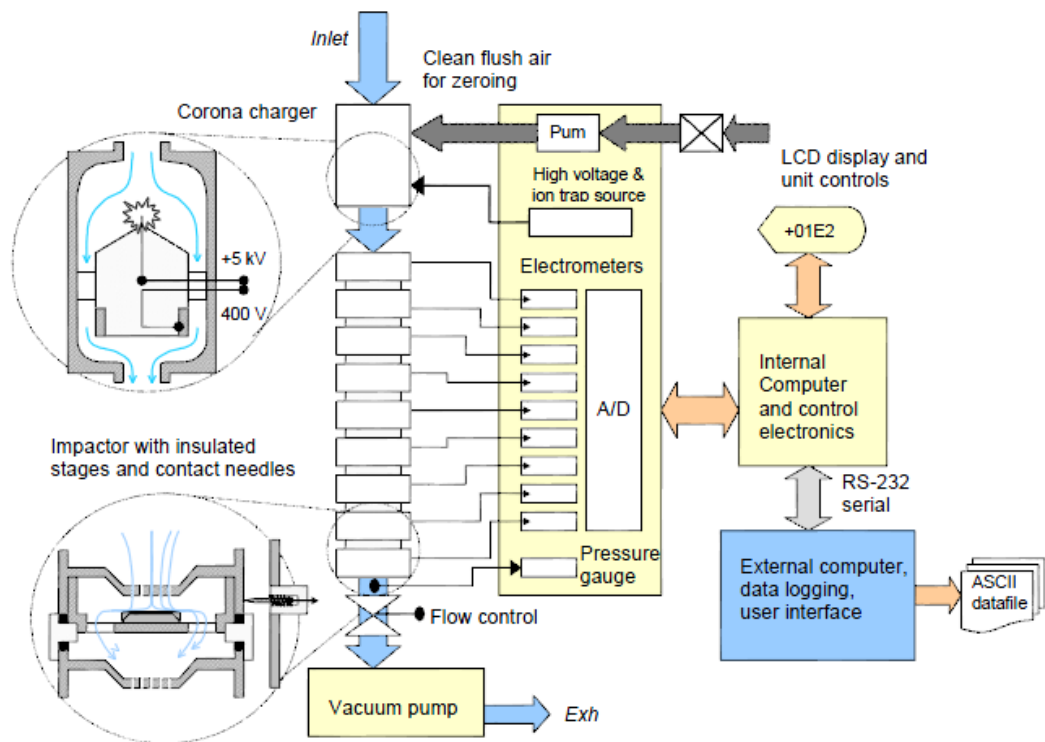
Taulukko 2. Eri päivinä ajetut syklit, käytetyt mittauspisteet ja öljy.

Mittauspäivä	Mitattavat muuttujat	Ajetut syklit
11.03.13	Vanha öljy, mittauspiste 1	3 kpl NEDC-syklejä 6 kpl kiihdytyksiä Steady 5 kW, 10 kW, 20 kW
12.03.13	Vanha öljy, mittauspiste 2	5 kpl NEDC-syklejä 8 kpl kiihdytyksiä Steady 5 kW, 10 kW, 20 kW, 10 kW, 5 kW
13.03.13	Vanha öljy, mittauspiste 1	2 kpl NEDC-syklejä
14.03.13	Vanha öljy, mittauspiste 1	3 kpl NEDC-syklejä 5 kpl US06-syklejä Steady 5 kW, 10 kW, 20 kW
15.03.13	Uusi öljy, mittauspiste 1 ja 2	Mittauspiste 1: 5 kpl NEDC-syklejä 4 kpl US06-syklejä 6 kpl kiihdytyksiä Steady 5 kW, 10 kW, 20 kW Mittauspiste 2: 3 kpl NEDC-syklejä 2 kpl US06-syklejä 6 kpl kiihdytyksiä Steady 5 kW, 10 kW, 20 kW, 5 kW

## 7 Mittalaitteet

### 7.1 Elpi

Hiukkasten mittaamiseen käytettiin Electrical Low Pressure Impactor -nimistä mittalaitetta, jolla voidaan mitata reaaliajassa erikokoisten aerosolihiukkasten lukumäärää. Laitteen mitta-asteikko mittasi hiukkasia kokovälillä 7 nm – 10 µm 12-kanavan resoluutiolla. Toiminta perustuu siihen, että sisään menevät hiukkaset ensin varataan sähköisesti. Tämän jälkeen hiukkaset osuvat impaktoripinnoille, jotka on sijoitettu niin, että ilmvirran tekemät mutkittelut jyrkkenevät asteittain, jolloin ensimmäisiin impaktoreihin osuvat hiukkaset ovat isompia ja viimeisiin osuvat ovat pienimpiä. Varatun hiukkasen osuessa impaktoriin muodostuu siihen pieni virta, jonka suuruus mitataan elektrometrillä. Muodostuneen virran suuruudesta voidaan laskea hiukkasten lukumäärä. [6] ELPIn rakenne on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. ELPI:n rakenne.

## 7.2 Typenoksidien mittaus

Typenoksidien mittaamiseen käytettiin Horiban APNA-360CE -laitetta, jonka toiminta perustuu kemiluminenssireaktioon, joka aiheutuu, kun typpimonoksidi reagoi otsonin kanssa. Tällöin syntyy typpidioksidi, joka on hetkellisesti viritetyssä tilassa. Palatessaan normaalitilaan se säteilee valoa, jonka kirkkaus on suoraan verrannollinen typpimonoksidin määrään. Typpidioksidin määrä saadaan mitattua muuntamalla se ennen mittalaitteeseen menoa typpimonoksidiksi hapenpoistumuuntimen avulla.

## 7.3 Hiilimonoksidin mittaus

Hiilimonoksidi mitattiin Environnement SA:n CO12-modulella. Se mittaa hiilimonoksidin määrän kaasun absorboiman infrapunavalon perusteella.

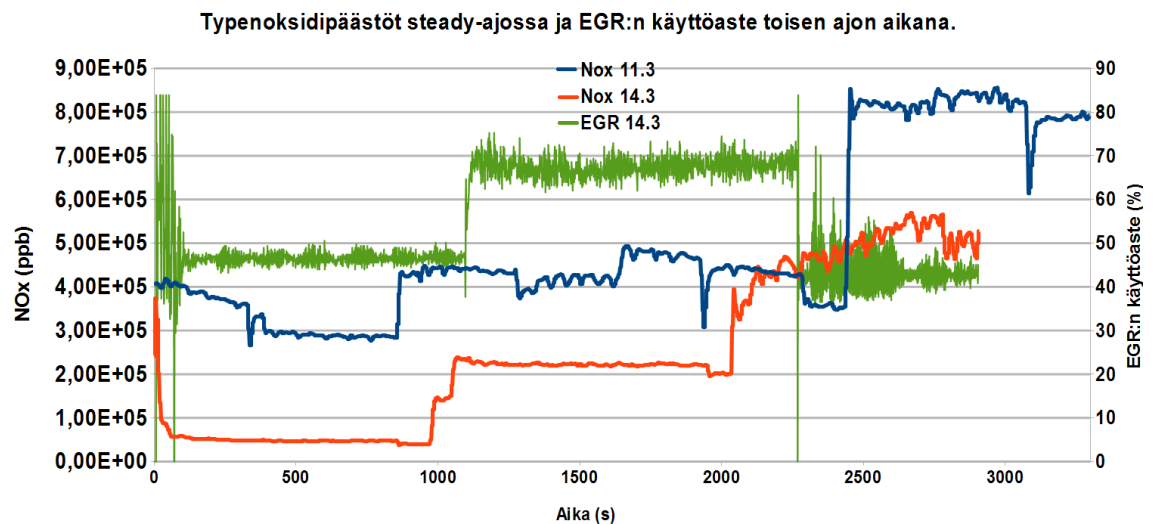


## 8 Tulokset

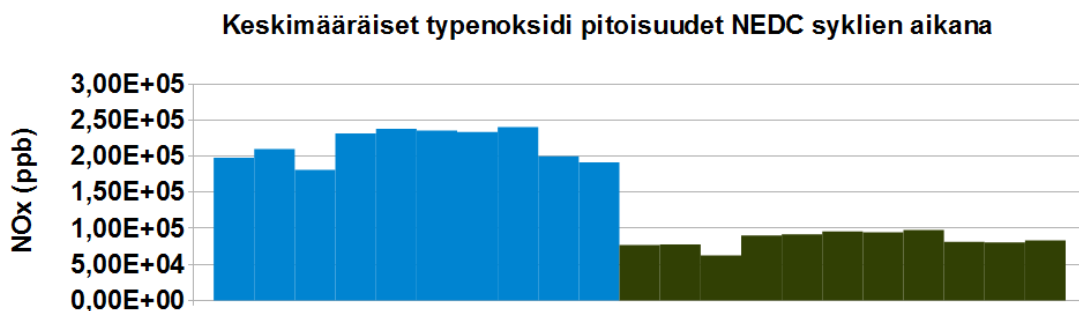
### 8.1 Kaasupäästöt

#### 8.1.1 EGR:n vaikutus typenoksidipäästöihin.

Mittaustulokset osoittivat, että öljyn ikääntymisen vaikutus kaasupäästöihin on hyvin pieni tai olematon. EGR:n vaikutus typenoksidi- ja hiukkaspäästöihin havaittiin kuitenkin hyvin selkeästi. Kuviossa 8 on esitetty  $\text{NO}_x$ -päästöt kahdelta päivältä Steady-sykleiltä. Vaikka yhtä vakiokuormaa ajettiin eri aika eri päivinä, on kuviosta selvästi nähtävissä, kuinka EGR-päivänä on matalammat typenoksidipäästöt. Sama asia on havaittavissa myös kuviosta 9, jossa on nähtävissä keskimääräiset typenoksidipitoisuudet eri NEDC-syklien aikana.



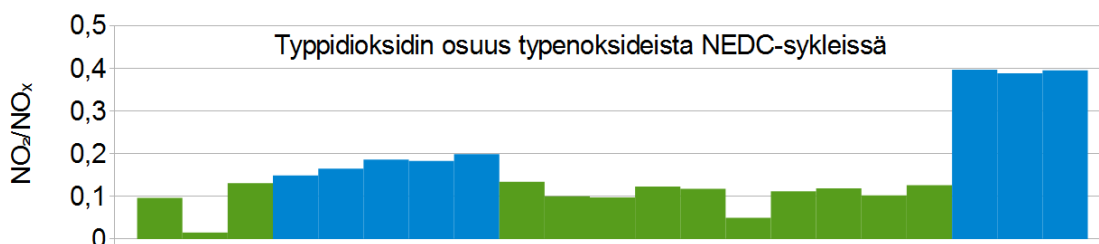
Kuvio 8. Typenoksidipäästöt kahden eri steady-syklin aikana. Sinisellä typenoksidipäästöt EGR:n ollessa pois käytöstä. Punaisella on typenoksidipäästöt EGR:n ollessa käytössä ja vihreällä EGR:n käyttöaste.



Kuvio 9. Kuvassa on esitetty eri päivinä ajettujen NEDC-syklien keskimääräiset typenoksidipitoisuudet. Sinisellä esitetty ajot, joissa ei EGR ollut käytössä ja vihreällä ajot, joissa EGR oli käytössä.

### 8.1.2 DOC:n vaikutus typenoksidipäästöihin

DOC:n typpimonoksidia hapettava vaikutus on hainnollistettu kuviossa 10. DOC:n lisäksi suhteeseen vaikuttaa EGR:n käyttöaste. Typpidioksidia tarvitaan DPF:n passiivisessa regeneroinnissa. Siinä noki muuttuu hiilidioksidiksi, kun se reagoi typpidioksidin kanssa 350 °–500 °C:n lämpötilassa.



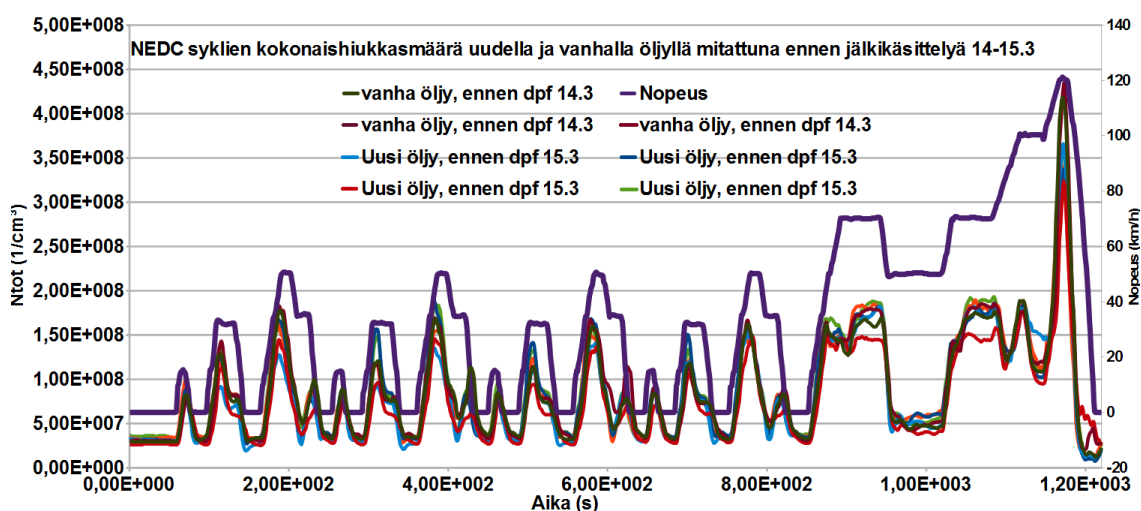
Kuvio 10. Typpidioksidin osuus typenoksidipäästöistä NEDC-sykleiltä. Vihreällä ovat mittaustulokset ennen DOC:a ja sinisellä tulokset DOC:n jälkeen.

### 8.2 Mittauspiste 1: Hiukkaspäästöt ennen pakokaasun jälkikäsittelyä

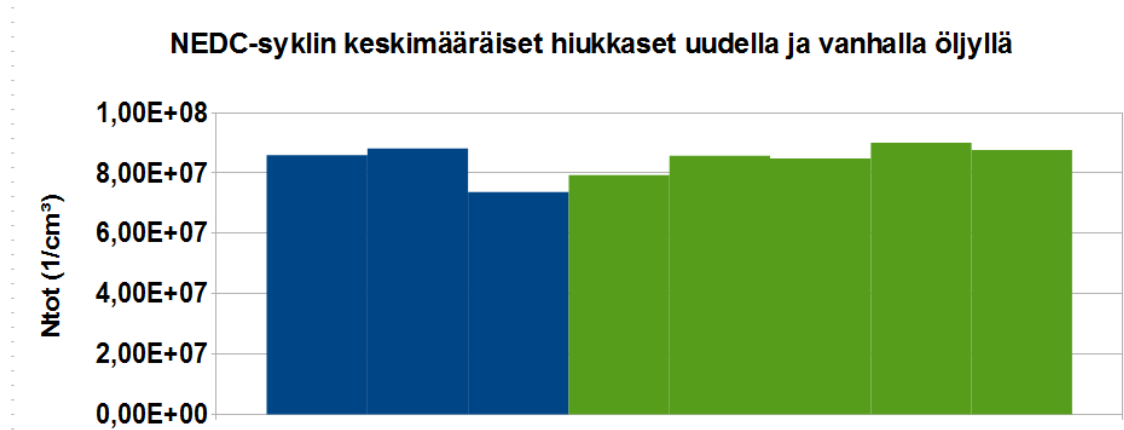
Koska tiedetään ja myöhemmin myös osoitetaan, että pakokaasun jälkikäsittely vähentää hiukkaspäästöt lähes mittaamattomille alueille, päätettiin toinen näytteenottolinja sijoittaa ennen jälkikäsittelyä. Tällöin hiukkasten syntymiseen johtavat tapahtumat ovat helpommin hahmotettavissa.

### 8.2.1 Mittauspiste 1: Hiukkaset NEDC-syklissä

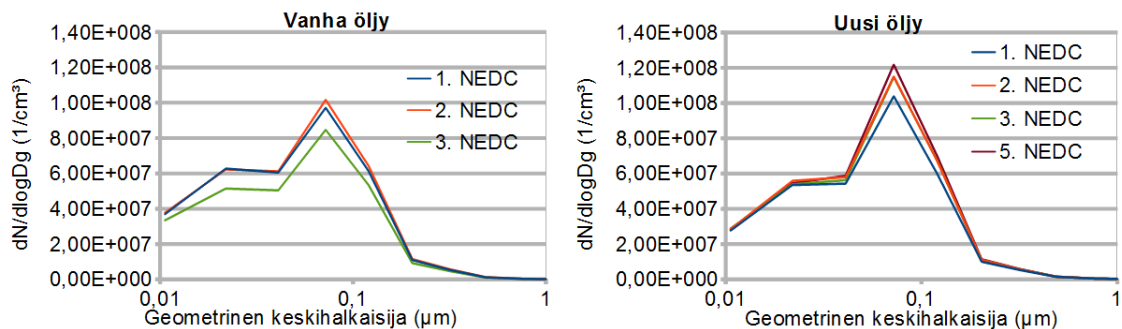
Ensiksi verrattiin NEDC-syklin ennen jälkikäsitteilyä mitattuja tuloksia. NEDC-syklin etuna on sen rauhallisen luonteen vuoksi hyvä toistettavuus. Hiukkaspääköt seurailevat tasaisesti NEDC-syklin nopeuskäyrää kuvion 11 osoittamalla tavalla ja ilmaantuvat kun kiihdytetään tai pidetään yllä nopeutta. Viimeinen hiukkaspääköt aiheutuu kun kiihdytetään nopeudesta 100 km/h nopeuteen 120 km/h. Tämä piikki on suhteellisen suuri verrattuna edellisiin. Esimerkiksi korkeinta piikkiä edeltävä huippu aiheutuu, kun kiihdytetään nopeudesta 70 km/h nopeuteen 100 km/h. Yksi syy suuren hiukkasmäärän syntymiseen voi olla polttoaineen ruiskutusstrategian muutos. Kuten kuviossa 12 nähdään, hiukkasmäärän muutokset eri toistojen välillä ovat melko pieniä. Kokojakaumassa näkyy hallitseva nokimoodi, mutta nukleaatiomoodi on myös hyvin esillä. Kuvio 13 osoittaa, että vanhalla ja uudella öljyllä ajettujen NEDC-sykliden kokojakaumissa on eroja. Vanhalla öljyllä nukleaatiomoodin hiukkasia on selvästi enemmän ja nokimoodin hiukkasia vähemmän kuin uudella öljyllä.



Kuvio 11. Raa'an pakokaasun NEDC-sykliden hiukkaspitoisuudet uudella ja vanhalla öljyllä sekä syklin nopeuskäyrä.



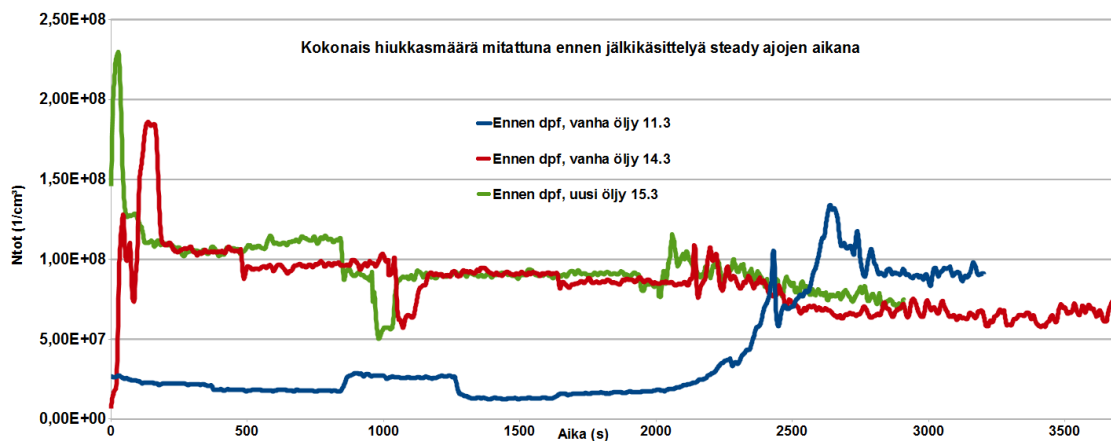
Kuvio 12. NEDC-syklin keskimääräiset hiukkaspitoisuudet. Vanha öljy on merkitty sinisellä ja uusi vihreällä. Kuvassa on verrattu vain 14.3. ja 15.3. ajettuja NEDC-syklejä, jolloin EGR:n käyttöaste oli lähes sama.



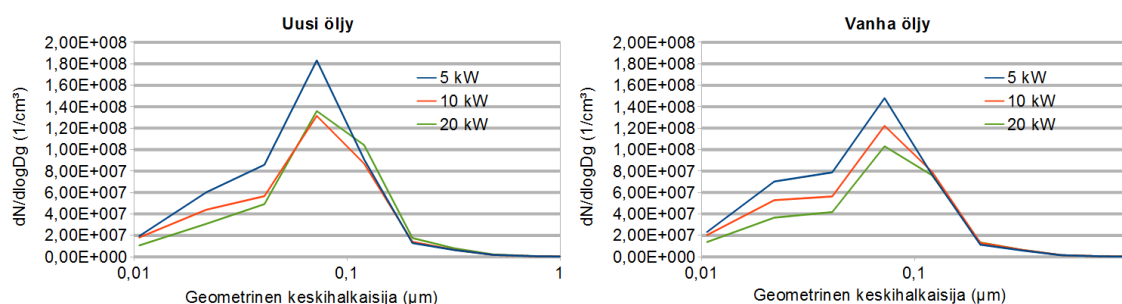
Kuvio 13. Hiukkasten kokojakaumat NEDC-sykleissä. Vasemmalla uusi öljy ja oikealla vanha

### 8.2.2 Mittauspiste 1: Hiukkaset Steady-syklissä

Steady-ajot osoittavat hiukkastasojen pysyvän lähes yhtäsuurina öljyn vaihtojen välillä. Moottoritekniikan asiat, kuten EGR:n käyttö vaikuttavat kuitenkin selvästi tuloksiin. Kuviossa 14 on esitetty hiukkaspitoisuudet steady-sykleissä vanhalla ja uudella öljyllä. 14. ja 15.3. EGR:n käyttöaste steadyssä oli lähes sama. 11.5. ei moottorinohjain käyttänyt EGR:ää ollenkaan. Kuviossa 15 kokojakaumista voidaan jälleen havaita, kuinka nokimoodin huippu on uudella öljyllä korkeampi kuin vanhalla, mutta nukleaatiomoodin hiukkasia on taas enemmän vanhalla.



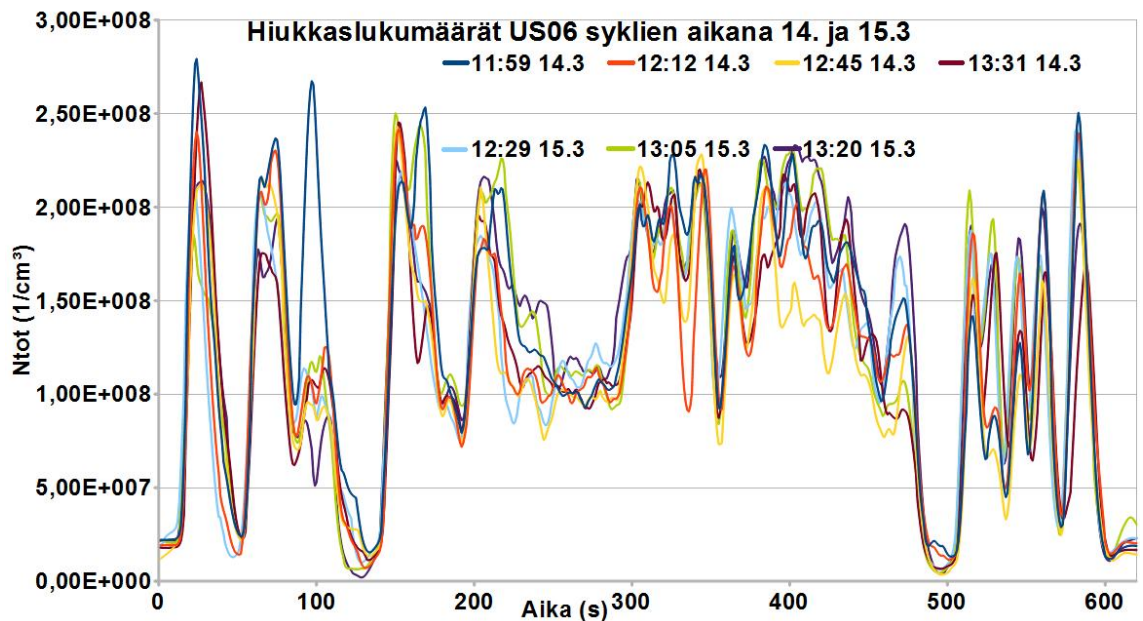
Kuvio 14. Kokonaishiukkaspitoisuus uudella ja vanhalla öljyllä steady-syklien aikana. Punaisella vanhan öljyn hiukkaset EGR:n ollessa käytössä, sinisellä vanhan öljyn hiukkaset EGR:n ollessa pois käytöstä ja vihreällä uuden öljyn hiukkaset EGR:n ollessa käytössä.



Kuvio 15. Steady-syklin aikana syntyneiden hiukkaspitoisuuksien keskiarvojen kokojakaumat. Vasemmalla uusi öljy ja oikealla vanha.

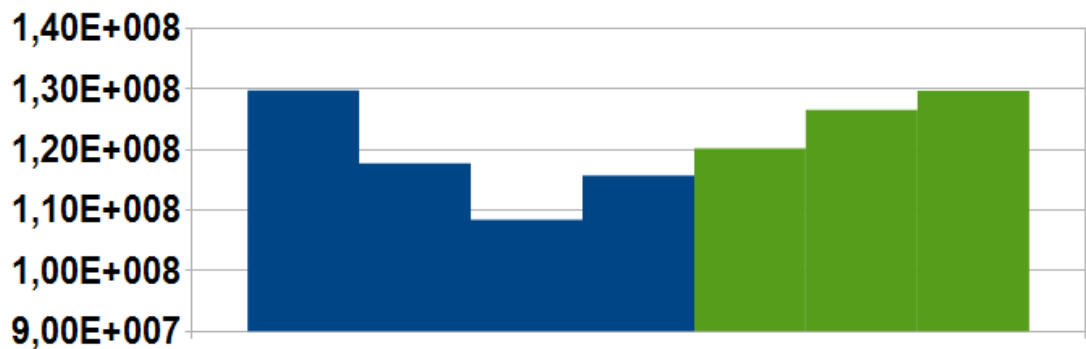
### 8.2.3 Mittauspiste 1: Hiukkaset US06-syklissä.

US06-syklin etuna on sen mallintama aggressiivinen ajotyyli, joka suoraruiskutustekniikassa kaventaa käytössä olevia mahdollisuuksia polttoaineen ruiskutuksen suhteen. Sen ongelmana on kuitenkin etenkin manuaalivaihteisella autolla heikko toistettavuus. Myöskin renkaiden pito rullilla tuntui tulevan helpommin vastaan kuin asfaltilla ajettaessa. Kuviossa 16 nähdään, kuinka hiukkaspitoisuus kuvaajat eroavat toisistaan. Aiemmissa sykleissä huomattu ero nukleatiohiukkasissa ja nokihiukkasissa ei enää näy, kuten kuvio 18 osoittaa, US06-syklissä aivan yhtä selvästi ja lisäksi kuvion 17 osoittamissa keskiarvoissakin on eroavaisuuksia. Todetaan, että US06-sykli soveltuisi paremmin automaattivaihteisen auton kanssa ajettavaksi, jolloin kiihdytyksissä tapahtuvat vaihtenvaihdot eivät vaikuta niin suuresti tuloksiin.

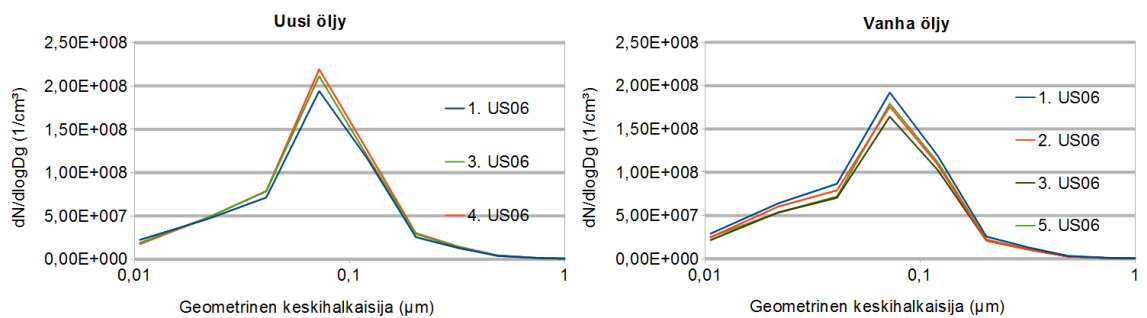


Kuvio 16. Hiukaspitoisuudet US06-syklin aikana.

### US06-syklin Ntot keskiarvo



Kuvio 17. US06-syklien aikana syntyneiden hiukaspitoisuuksien keskiarvot. Sinisellä vanha öljy ja vihreällä uusi.



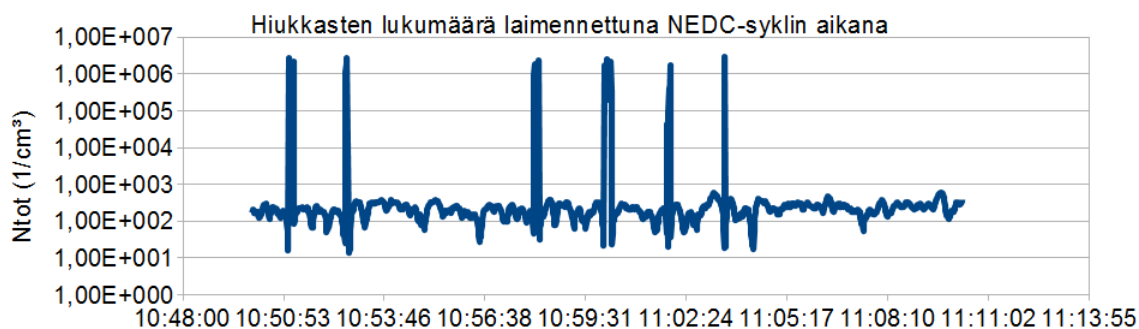
Kuvio 18. US06-syklin aikana syntyneiden hiukasten keskiarvojen kokojakaumat.

### 8.3 Mittauspiste 2: Hiukkaspäästöt pakokaasun jälkikäsitellyn jälkeen

Mittauspiste 2 sijaitsi pakoputkessa jälkikäsitellyn jälkeen. Sen tarkoituksena oli mitata päästöt niiden tullessa pakoputkesta ulos. Huomattiin, että DPF vähentää hiukkasten lukumäärän käytännössä katsoen erittäin vähiin. Koska hiukkasia on tällöin erittäin vähän, niiden lukumäärät eivät mukaile ajettavia ajotilanteita eikä niiden alkuperästä voida olla varmoja. Osa niistä voi olla myös peräisin laimennuksessa käytetystä paineilmasta. Mittaustuloksissa 12. päivä havaittiin hiukkaspiikkejä, joiden alkuperästä ei ole varmuutta, sillä ne ilmaantuivat täysin epäsäännöllisesti. Ne voivat liittyä kuitenkin hiukkassuodattimen tilaan, sillä 15. päivä tehdyissä mittauksissa ei havaittu ollenkaan samankaltaisia piikkejä.

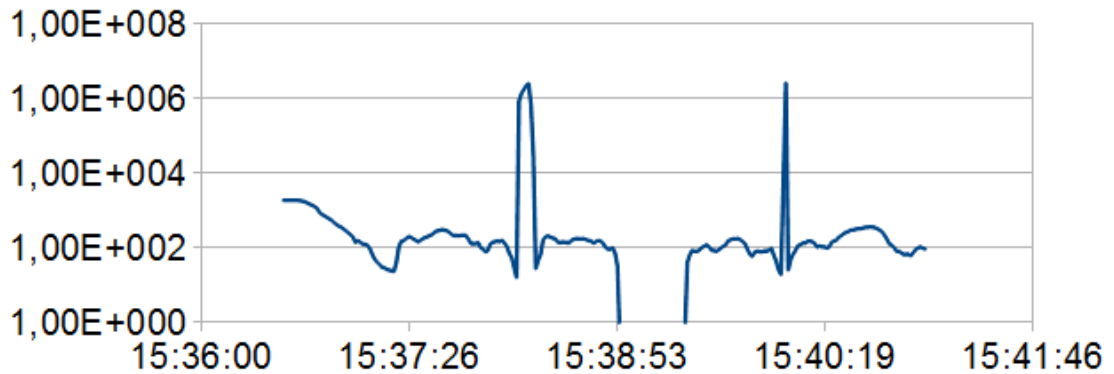
#### 8.3.1 Mittauspiste 2: NEDC-sykli

Kuviossa 19 on nähtävissä hiukkasten kokonaispitoisuus laimennettuna. Kuvaaja on yhden NEDC-syklin yli. Aikaisemmassa kuviossa 8 nähtiin, että hiukkasten syntyminen on verrannollista moottorin kuormituksen tilaan. Kun hiukkasia mitataan jälkikäsitellyn jälkeen, niitä esiintyy tasaisesti. Voidaan todeta, että matalassa kuormituksessa DPF vähentää hiukkasten määrää lähes 100 %:lla. Kuviossa 20 nähdään paineilmassa olevien hiukkasten pitoisuus. Kuvio 21 osoittaa, kuinka 15.3. kokonaishiukkaspitoisuuden kuvaajissa ei havaittu samankaltaisia piikkejä kuin 12.3.



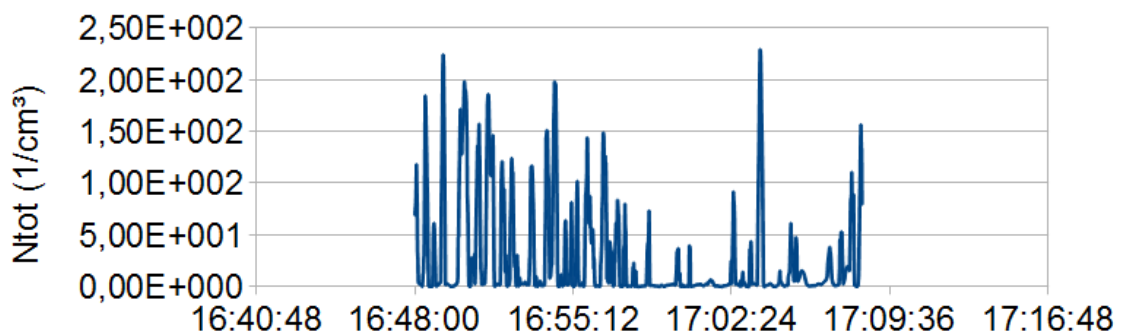
Kuvio 19. Laimennettujen hiukkasten pitoisuus NEDC-syklin aikana 12.3.

Hiukkasten määrä paineilmassa 12.3



Kuvio 20. Hiukkasten pitoisuus paineilmassa.

Hiukkasten lukumäärä NEDC-syklin aikana 15.3. Mittauspiste 2



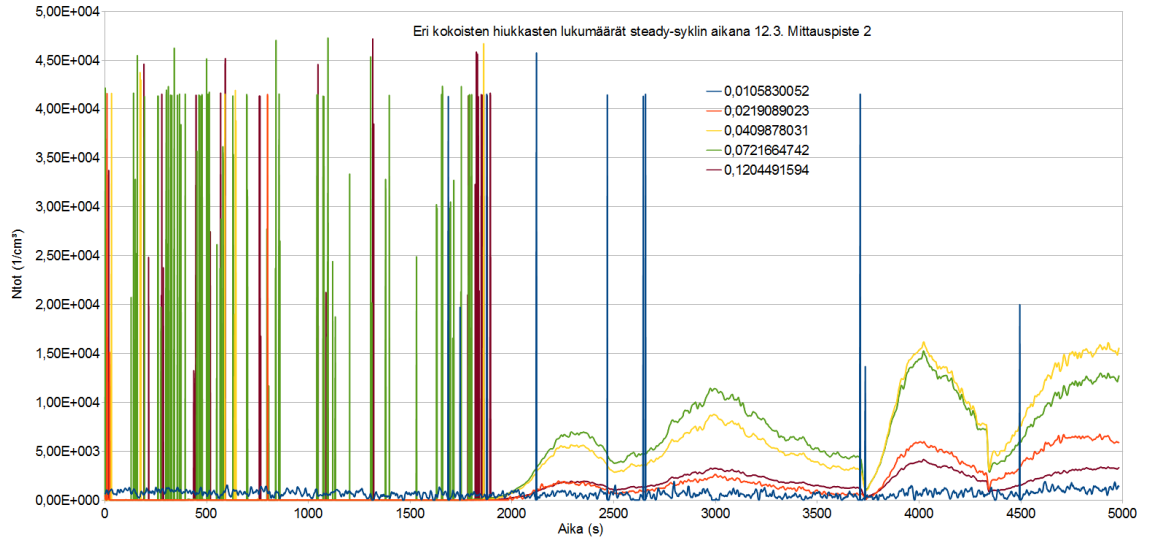
Kuvio 21. Laimennettujen hiukkasten pitoisuus NEDC-syklin aikana 15.3.

### 8.3.2 Mittauspiste 2: Steady- ja US06-syklit

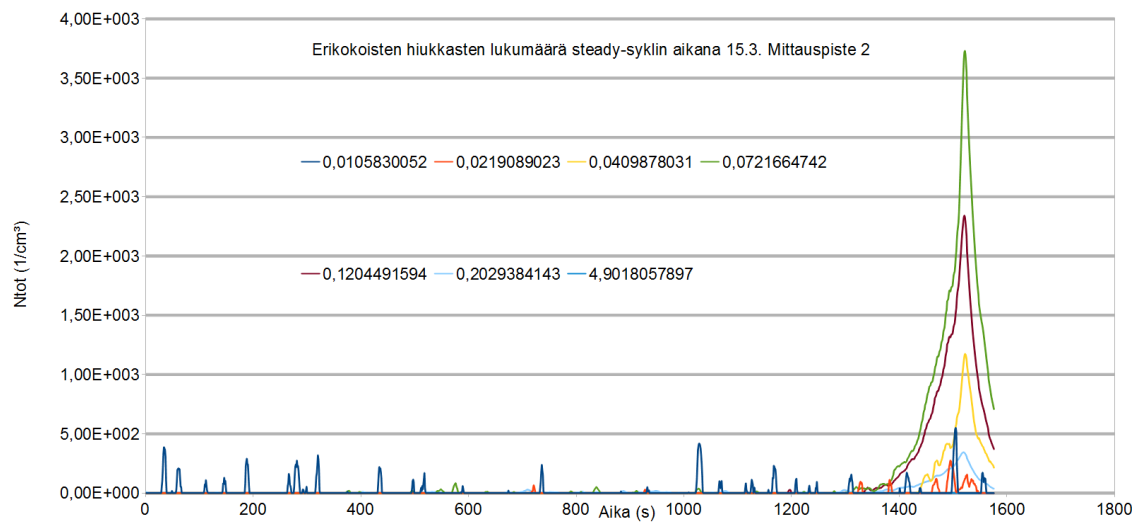
Ajettaessa Steady-syklejä 5 kW ja 10 kW kuormilla ei näkynyt juuri mitään luotettavia arvoja. Syklien loppupuolella alkoi kuitenkin hiukkasia ilmaantua. Kuvio 22 osoittaa, että kun on ajettu 11 minuuttia 5 kW:n kuormalla, 11 minuuttia 10 kW:n kuormalla ja 10 minuuttia 20 kW:n kuormalla alkaa DPF:n läpi päästä pieniä pitoisuuksia nokimoodin hiukkasia. Myös kuvio 23 näyttää, kuinka hiukkasia voidaan havaita, kun on ajettu tarpeeksi kauan vakiokuormalla. Tässä ajettiin 10 kW:n kuormalla kuitenkin huomattavasti vähemmän aikaa, vain kolme minuuttia. Kuvio 24 näyttää että US06-syklin aikana voidaan havaita epäsäännöllisesti kovan kuormituksen tilanteissa hiukkaspikkejä. Kuvioden hiukkaspitoisuudet ovat laimennettuja, sillä hiukkasten



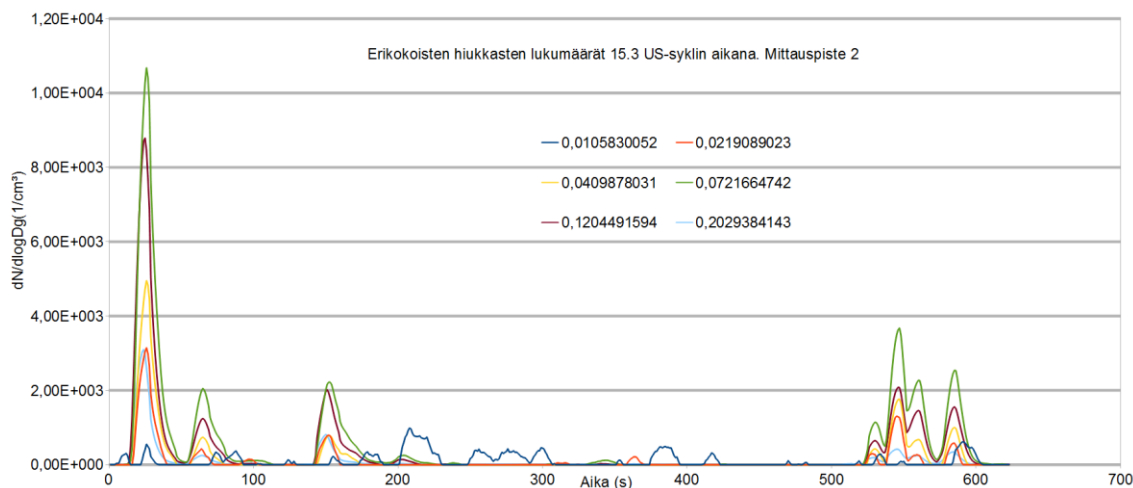
pienien pitoisuuksien takia niiden kertominen laimennus kertoimella voi johtaa virheellisiin arvoihin. Laimennuskerroin vaihteli mittaupiste 2 -mittauksissa välillä 130–160.



Kuvio 22. Erikoisten hiukkasten pitoisuus steady-syklin aikana 12.3.



Kuvio 23. Erikoisten hiukkasten pitoisuus steady-syklin aikana 15.3.

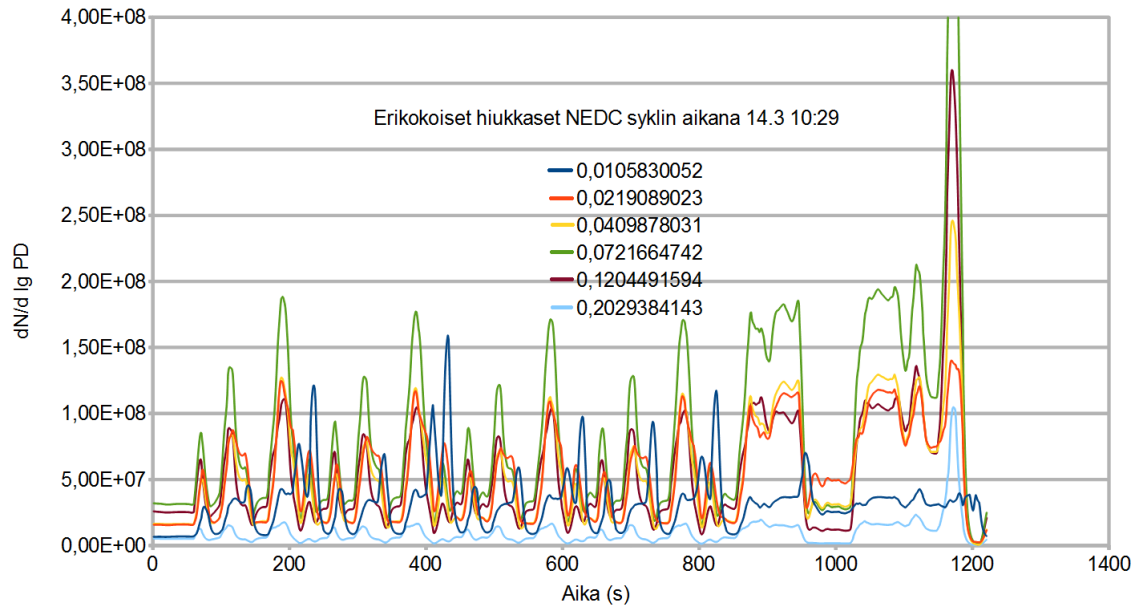


Kuvio 24. Erikokoisten hiukkasten pitoisuudet erään US06-syklin aikana 15.3.

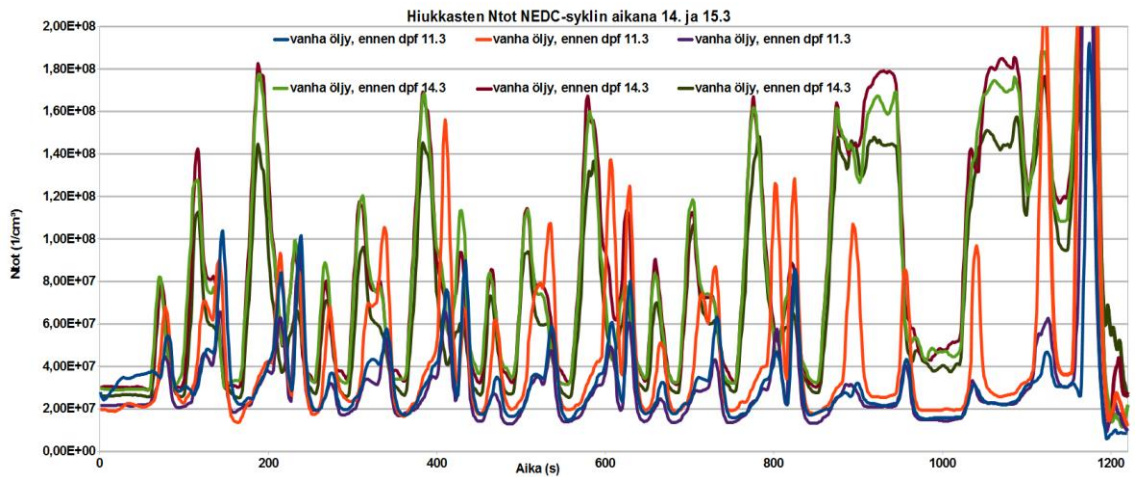
## 8.4 Muut huomiot

### 8.4.1 EGR:n vaikutus hiukkaspäästöjen kokojakaumaan

Kun 14.5. toistettiin mittaukset samalla tavalla kuin 11.5., huomattiin NEDC-syklin aikana syntyneiden hiukkasiikkien sijoittuvan eri kohtiin. 14. päivän hiukkasjakaumassa nähtiin selvästi hallitseva nokimoodi, mutta 11. päivänä oli suurin osa hiukkasista peräisin nukleaatiomoodista. Olosuhteet palotapahtumassa olivat erilaiset ainakin EGR:n osalta, sillä 11. päivänä ei EGR ollut käytössä ollenkaan. Keskiarvoista nähdäänkin, kuinka hiukkasten lukumääräpitoisuus oli huomattavasti suurempi 14. päivä EGR:n ollessa käytössä. Kuvio 25 osoittaa, kuinka nukleaatiomoodin hiukkasia muodostuu myös EGR:n ollessa käytössä, mutta niiden osuus kaikista hiukkasista on paljon pienempi. Kuviossa 26 on verrattu 11. ja 14. päivän NEDC-sykliden hiukkasten lukumääriä. Kuvioissa 25 ja 26 on havaittavissa samankaltaisuuksia, vaikka kuvio 25 esittää yhden NEDC-syklin aikana esiintyneitä erikokoisia hiukkasia ja kuvio 26 esittää kaikkien hiukkasten kokonaispitoisuudet eri NEDC-sykliden aikana. Kuviossa 27 on esitetty keskiarvot hiukkasten pitoisuuksista eri sykleillä. Kuviossa 28 on esitetty hiukkasten kokojakaumat 11. päivän NEDC-sykleissä.

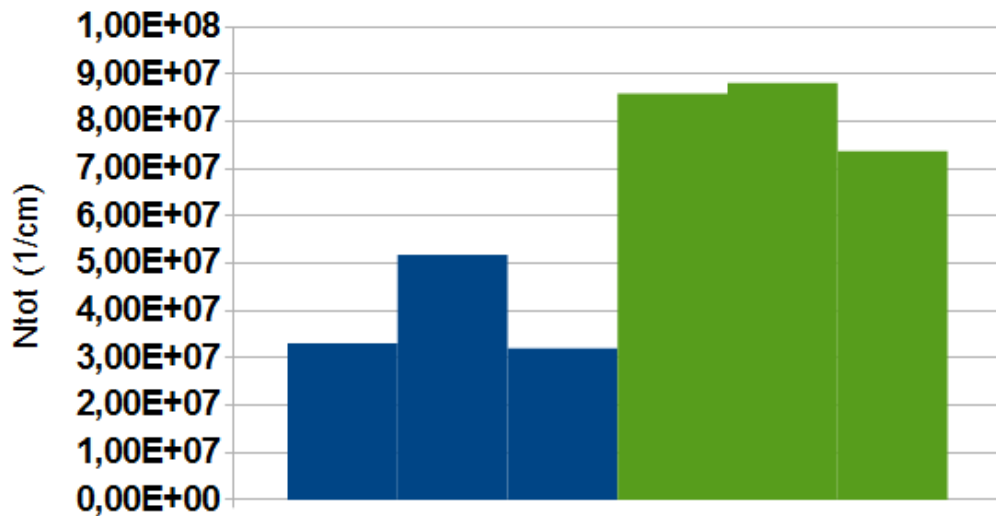


Kuvio 25. Erikokoisten hiukkasten pitoisuudet NEDC-syklin aikana. Sinisellä nähdään nukleatiomoodin hiukkaset, joiden lukumäärä kasvaa muiden hiukkasten vähentyessä.



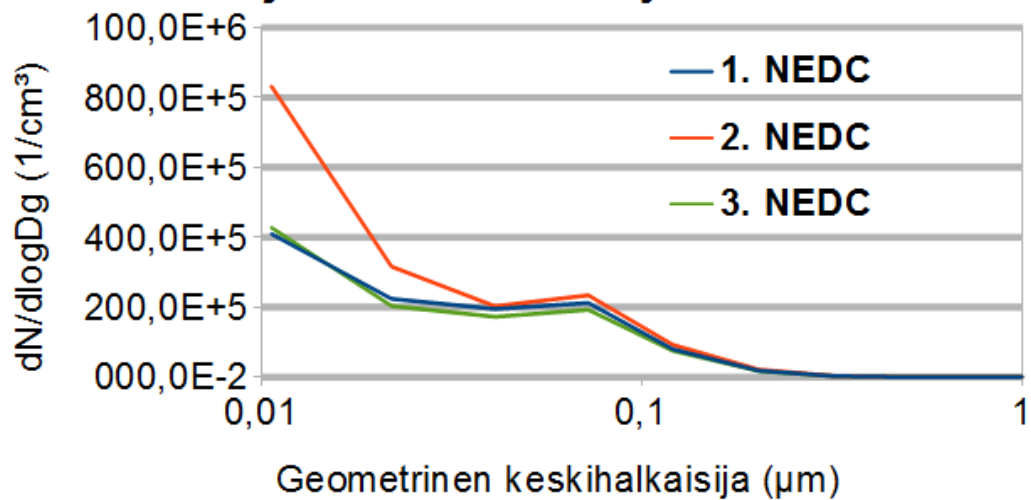
Kuvio 26. Hiukkasten pitoisuudet 11. ja 14. päivä NEDC-syklissä. 11. Päivä on sinisellä ja oranssilla. 14. Päivä vihreällä ja tummanpunaisella.

**Ntot keskiarvo 11. ja 14. pv NEDC-syklissä**



Kuvio 27. Hiukkasten keskiarvopitoisuudet NEDC-syklin yli. Sinisellä 11.5. ja vihreällä 14.5.

**Kokojakaumat NEDC-syklissä 11.3**

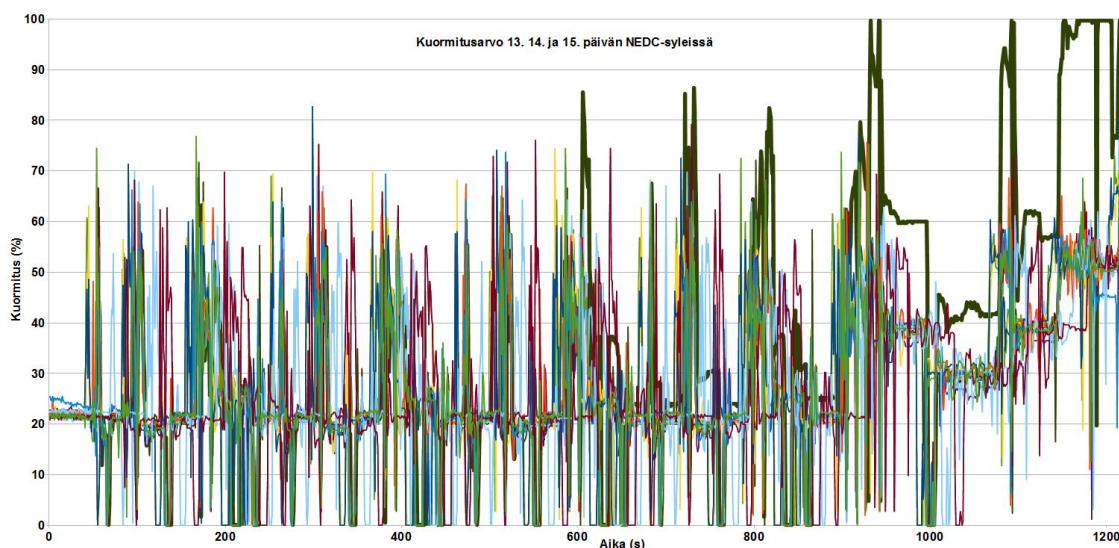


Kuvio 28. 11. päivän NEDC-syklien kokojakaumat

#### 8.4.2 Hiukkassuodattimen valvonta ja regeneraatio

Koska hiukkassuodatin tukkeutuu ennen pitkää sen ilmasta puhdistamista hiukkasista, se täytyy regeneroida. Hiukkassuodattimen tila ei itsessään vaikuta suuresti hiukkaspäästöihin. Moottorinohjausyksikkö kuitenkin valvoo hiukkassuodattimen tilaa sen pakoputkessa aiheuttaman paine-eron ja pakokaasun lämpötilan avulla. Paine-

eroa mitataan suodattimen eri puolilla olevilla paineantureilla. Tällöin käytetty näytteenottolinja on voinut vaikuttaa moottorinohjaimen käsitykseen hiukkassuodattimen tilasta. Auton OBD-datasta nähdään, että EGR ei ollut käytössä kolmena ensimmäisenä päivänä, tämä voi johtua moottorinohjaimen vääristyneestä käsityksestä koskien suodattimen tilaa. Huomattiin, että mahdollinen aktiivinen regeneraatio luultavasti tapahtui 13.5. toisen NEDC-syklin aikana, sillä tällöin OBD:stä saadussa datassa huomattiin selkästi normaalia suurempia kuormitusarvoja. Aktiivisessa regeneroinnissa pakokaasun lämpötila nostetaan yli 600 °C:seen ja pakokaasussa on jatkuvasti läsnä ylimääräistä happea. Varmistaakseen hapen riittävän suuren osuuden pakokaasussa moottorinohjain kytkee EGR:n pois käytöstä. Kuormitusarvo on laskennallinen suure ja vaihtelee erittäin suuresti moottorin jatkuvasti säätäessä toimintaansa. Kuvioista 29 voidaan kuitenkin nähdä, kuinka 13.5. toisella NEDC-syklillä arvo on selvästi muita suurempi.



Kuvio 29. Kuormitusarvo NEDC-sykliden aikana 13. 14. ja 15. päivä. Lihavoidulla 13. päivän toinen NEDC-sykli.

## 9 Loppupäätelmät

Tuloksista huomattiin, että tyypillisen NEDC-syklin aikana keskimääräinen hiukkaspitoisuus on noin. 80 miljoonaa hiukkasta kuutiosenttimetrin tilavuudessa. US06-syklin aikana pitoisuus vaihteli välillä  $110\text{--}130 \cdot 10^6$  ( $1/\text{cm}^3$ ). Hiukkassuodattimen todettiin kuitenkin vähentävän tätä määrää lähes 100 %:lla.

Kokojakaumassa havaittiin joko hallitseva nukleaatiomoodi, jonka keskihalkaisija on 0,01058  $\mu\text{m}$  tai hallitseva nokimoodin, jonka keskihalkaisija on 0,07217  $\mu\text{m}$ . Kokojaumasta laskettiin suhdeluku, joka kertoo nukleaatiomoodin hiukkasten suhteesta nokimoodin hiukkasiin. Suhdeluvussa nukleaatiomoodin hiukkasiksi laskettiin geometriseltä keskihalkaisijaltaan ryhmiin 0,01058  $\mu\text{m}$  ja 0,02191  $\mu\text{m}$  kuuluvat hiukkaset. Nokimoodiin laskettiin geometriseltä keskihalkaisijaltaan välillä 0,04099  $\mu\text{m}$  – 4,90181  $\mu\text{m}$  olevat hiukkaset. Taulukossa 3 on esitettyä suhdeluvun keskiarvo eri sykleistä uudella ja vanhalla öljyllä. EGR:n ollessa pois päältä vanhalla öljyllä suhdeluvun keskiarvo NEDC-sykleillä oli 2,16204.

Taulukko 3. Nukleaatiomoodin hiukkasten suhde nokimoodin hiukkasiin vanhalla ja uudella öljyllä eri sykleissä.

Sykli	Vanha öljy	Uusi öljy
NEDC	0,54822	0,42417
US06	0,26786	0,20286
Steady	0,32336	0,23408

Hiukkaspitoisuuksissa ei ole huomattavissa öljystä johtuvia muutoksia, sillä erot eri toistojen välillä johtuvat luultavasti kuljettajan hieman eroavista ajosuorituksista.

Tuloksista on nähtävissä myös, kuinka moni muuttuja vaikuttaa tuloksiin. Kuljettajan ajotapa ja reagointi syklin aikana tapahtuviin nopeuden muutoksiin ja esimerkiksi tapa vaihtaa vaihdetta vaikuttavat mittaustuloksiin. Ympäristö vaikuttaa myös, mutta sen vaikutukset pystytään osittain poistamaan. Esimerkiksi paineilmassa olevien hiukkasten määrällä ei ole väliä, jos mittauspiste on ennen jälkikäsitelyä, sillä paineilmassa olevien hiukkasten määrä on luokkaa miljoonasosa mitatuista hiukkasista. Taustailman hiilidioksidi on myös mitattavissa ja mittaustilan lämpötila

pystytään pitämään hyväksyttävällä välillä. Moottoria hallitseva moottorinohjainyksikkö ja sen pyrkimykset vaikuttavat myös tuloksiin. Tällöin sen tarkka toimintaperiaatteen tunteminen on hyödyksi. Meillä oli käytössä yleistesteriin verrattavissa oleva ohjelmisto, jolla saatiin hyödyllistä dataa obd-liitännän kautta. Esimerkiksi lambda-arvo, kuorma-arvo, EGR:n käyttöaste olivat hyödyllisiä kun tutkittiin moottoritoimintaa eri tilanteissa. Tulevaisuutta ajatellen olisi kuitenkin hyvä, jos joitain muita tiettyjä arvoja pystyttäisiin tallentamaan myös. Hyviä arvoja tallennettavaksi voisivat olla polttoaineen ruiskutushetken pituus, ruiskutushetken ajoitus ja ruiskutusten määrät.

Nyt nähtiin, että hiukkasia alkoi ilmaantua mitattavia määriä myös DPF:n takaa, steady-ajojen loppupuolella. Näitä testejä olisi myös hyvä tehdä lisää.

Tuloksista nähdään myös, että EGR:n vaikutus hiukkasiin on erittäin merkittävä. Jotta voitaisiin nähdä eri asioiden vaikutus hiukkaspäästöihin täytyisi EGR:n hallinta ottaa pois moottorinohjaimelta tai tallentaa sen käyttöastetta paljon useammin kuin kerran sekunnissa. EGR:ää säädetään niin nopeasti että kerran sekunnissa sen tilan tietämisestä saa luultavasti vain suuntaa antavia arvoja. Mittausten yhteydessä olisi hyvä myös tietää DPF:n tila, sillä sen regeneraatio vaikuttaa suuresti moottorin toimintaan. Jos DPF:n tila ei ole tiedossa, voitaisiin sen vaikutus mittauksiin eliminoida regeneroimalla se jokaisen mittauspäivän aluksi erillisellä ohjelmistolla.

## Lähteet

- 1 Philip J.G. Dingle ja Ming-Chia D. Lai. 2005. Diesel Common Rail and Advanced Fuel Injection Systems. SAE International.
- 2 Norbert Breuer, Johannes K. Schaller, Thomas Hauber, Ralf Wirth ja Stefan Stein. 2005. Bosch Diesel Engine Management. Robert Bosch GmbH.
- 3 Richard van Basshuysen ja Fred Schäfer. 2002. Internal Combustion Engine Handbook. SAE International.
- 4 Gary L. Borman ja Kenneth W. Ragland. 1998. Combustion Engineering. McGraw-Hill.
- 5 ECE 15 + EUDC / NEDC. 2013. Verkkodokumentti. ECOpoint Inc. <[http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece\\_eudc.php](http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php)> Luettu 3.5.2013.
- 6 Dekati. 2013. Elpi User manual.
- 7 Neste City Pro W Longlife III 5W-30. 2013. Verkkodokumentti. Neste Markkinointi Oy. <[http://www.neste.fi/tp\\_tiedote.aspx?productid=013800&lang=&type=tt](http://www.neste.fi/tp_tiedote.aspx?productid=013800&lang=&type=tt)> Luettu 2.5.2013.
- 8 Tero Lähde, Topi Rönkkö, Annele Virtanen, Anu Solla, Matti Kytö, Christer Söderström ja Jorma Keskinen. 2010. Dependence between Nonvolatile Nucleation Mode Particle and Soot Number Concentrations in an EGR Equipped Heavy-Duty Diesel Engine Exhaust. Environmental Science & Technology, 44, s. 3175-3180.