



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Auto- ja kuljetustekniikka

Autosähkötekniikka

INSINÖÖRITYÖ

RETROEM – JÄLKIASENNETTAVA HIUKKASSUODATIN

Työn tekijä: Jukka Lehtinen
Työn valvoja: Liisa Pirjola

Työ hyväksytty: __. __. 2008

Liisa Pirjola
yliopettaja

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Jukka Lehtinen	
Työn nimi: RetroEm – Jälkiasennettava hiukkassuodatin	
Päivämäärä: 13.5.2008	Sivumäärä: 48 s. + 8 liitettä
Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Autosähkötekniikka
Työn valvoja: Liisa Pirjola	
<p>RetroEm-tutkimuksen tarkoituksena on saada tietoa jälkiasennettavista hiukkassuodattimista. Suomen autovero uudistui vuoden 2008 alussa, siten että uusien autojen autovero lasketaan niiden CO₂-päästöistä. Dieselautoissa on pienempi kulutus kuin bensiiniautoissa. Tästä johtuen CO₂-päästöt ovat pienemmät dieselautoissa. Tämä on laskenut dieselautojen hintaa. Dieselautojen halvemmasta hinnasta johtuen uusien dieselautojen määrä on kasvussa eli dieselautojen päästöjen määrä lisääntyy. Dieselautojen pakokaasupäästöistä terveydelle haitallisten pienhiukkasten määrä kasvaa. Pienhiukkasia pystytään suodattamaan uusista ja vanhoista jälkiasennettavan hiukkassuodattimen avulla.</p> <p>Jälkiasennettavalla hiukkassuodattimella pitäisi saada valmistajan mukaan 30 – 70 %:n hyötysuhde. Jälkiasennettavat hiukkassuodattimet hankittiin Diagno Finland Oy:n kautta saksasta Twintec-yrityksestä. Testiautoina oli vuoden 2007 VW Passat 1.9 TDI ja vuoden 2001 BMW 530dA. Mittaukset suoritettiin joulukuussa 2007.</p> <p>Mittaukset onnistuivat hyvin. Lämpötilamittauksista selvisi, että hiukkassuodattimessa on tarpeeksi kuuma, että regenerointi toimii. Passatissa hiukkassuodattimen hyötysuhde jäi hieman heikommaksi kuin BMW:llä, mutta saavutettiin valmistajan lupailtu arvo 30 - 70 %:ia. Passatissa hiukkasia oli noin 28 % vähemmän kun ilman hiukkassuodatinta. BMW:llä hiukkassuodattimen kanssa hiukkaset vähenivät noin 58 %. Jälkiasennettavat hiukkassuodattimet toimivat oikein ja saivat puhdistettua hiukkaspäästöjä. RetroEm-tutkimusta on tarkoitus jatkaa BMW:llä ja Passatilla. Tarkoituksena on myös saada 5 - 8 uutta dieselautoa, joihin asennetaan eri valmistajan jälkiasennettava hiukkassuodatin.</p>	
Avainsanat: jälkiasennettava hiukkassuodatin, diesel, Nuuskija-auto	



ABSTRACT

Name: Jukka Lehtinen	
Title: RetroEm – Retrofit particulate filter	
Date: 13.5.2008	Number of pages: 48 + 8
Department: Automotive and Transport Engineering	Study Programme: Automotive Electronics Engineering
Instructor: Liisa Pirjola	
<p>The purpose of the present RetroEm research was to gain more information on retrofit particulate filters. At the beginning of 2008 the Finnish car taxation changed. Now the taxation of new cars is calculated based on the CO2 emission of the vehicle. The consumption of diesel cars is smaller than that of gasoline cars. This is why CO2 emissions are smaller in diesel cars, which has lowered the price of diesel cars. Because of the cheaper prices there has been an increase in the number of diesel cars. This is also a reason for the increase in diesel emission gases. The harmful small particles from diesel cars are increasing in the urban area. The small particles from old and new cars can be filtered by using retrofit particulate filters.</p> <p>Manufacturers say that one can get 30 to 70 percent filtering with a retrofit particulate filter. The retrofit particulate filter was ordered through Diagno Finland Oy from a German company called Twintec. The test cars in the research were a 2007 VW Passat 1.9 TDI and a 2001 BMW 530dA. The measurements were conducted in December 2007.</p> <p>The measurements succeeded well. The results in temperature measurements showed that the retrofit particulate filter was hot enough for the regeneration to work. In the Passat, the efficiency of the particulate filters was weaker than in the BMW, but in both cases the decrease of approximately 30 - 70 percent promised by the manufacturer was achieved. In Passat the measurements showed that with the filter there were 28 percent less small particles than without the filter. In the case of BMW the tests showed 58 percent less particles. Particulate filters worked well and did in fact clean the particle emissions. RetroEm research is supposed to continue with the BMW and Passat. Also there is a plan to get 5 to 8 more diesel cars and to equip them with retrofit particulate filters of different manufacturers.</p>	
Keywords: retrofit particulate filter, diesel, mobile laboratory “Sniffer”	

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
2	UUSI AUTOVEROLAKI JA EU:N PÄÄSTÖRAJAT	3
3	AUTOKANTA JA SUODATTIMIEN SAATAVUUS	5
4	DIESEL-PAKOKAASUPÄÄSTÖT	6
4.1	Kaasumaiset päästöt.....	6
4.2	Hiukkaspäästöt.....	7
4.3	Terveysvaikutukset	8
5	PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYLAITTEET	9
5.1	Hapetuskatalysaattori	9
5.2	Hiukkassuodatin.....	9
5.2.1	Passiivinen regenerointi.....	11
5.2.2	Aktiivinen regenerointi	11
5.3	SCR –katalysaattori.....	12
5.4	Varaava NOx -katalysaattori	13
6	TWINTECIN HIUKKASSUODATIN	14
7	TESTIAUTOT	15
7.1	Hiukkassuodattimen asennus autoihin	17
7.2	Lämpötila- ja paineanturit.....	18
8	MITTAUSMENETELMÄT JA MITTALAITTEISTO	20
8.1	ELPI-pienhiukkasmittauslaite.....	23
8.2	SMPS-mittalaite	24
8.3	CO ₂ mittaukset dynamometrissä.....	24
8.4	Muut käytetyt mittalaitteet	25
9	ELPIN ALGORITMIN KÄSITTELY	26
10	MITTAUSTULOKSET	37
10.1	Laimennussuhteet.....	37
10.2	ELPIN kokojakauma.....	37

10.3	Lämpötilamittauksien tulokset	42
11	PÄÄTELMÄT JA TULEVAISUUS	46
	LÄHDELUETTELO	47
	LIITTEET	
	Liite 1. Passatin ELPI:n virrat	
	Liite 2. Passatin kokonaismääräpitoisuus	
	Liite 3. Passatin hiukkasten lukumäärä	
	Liite 4. Passatin tilavuuskokojakauma	
	Liite 5. BMW:n ELPI:n virrat	
	Liite 6. BMW:n kokonaismääräpitoisuus	
	Liite 7. BMW:n hiukkasten lukumäärä	
	Liite 8. BMW:n tilavuuskokojakauma	

1 JOHDANTO

RetroEm-tutkimus aloitettiin, kun haluttiin lisää tietoa dieselautojen jälkiasennettavista hiukkassuodattimista ja siitä kuinka hyvin ne toimivat. Saksassa jälkiasennettavat hiukkassuodattimet ovat yleistyneet suuresti, koska suurkaupungeissa pitää olla vähäpäästöinen auto ja lisäksi hiukkassuodattimen asennuksesta saa autoverohelpotusta. Myös EU:n päästörajoitukset tiukkenevat EURO5-päästönormien myötä ja dieselien partikkelipäästöraja nykyisestä 0,025 g/km laskee 0,005 g/km. Partikkelien rajoittamiseen on erilaisia keinoja, joista pääratkaisu on hiukkassuodattimet. EURO6-päästönormi tulee voimaan 2014 ja tähän voidaan päästä vain kun autoissa on hiukkassuodattimet.

Suomen uusien autojen autoverolaki muuttui vuoden 2008 alusta. Veromuutoksella haluttiin ohjata kuluttaja valitsemaan automalleja, joiden polttoaineenkulutus ja siten myös hiilidioksidipäästöt ovat alhaisempia. Samalla nopeutettaisiin autokannan uusiutumista, joka vähäntäisi autojen haitallisia pakokaasupäästöjä, kuten typen oksideja ja hiukkaspäästöjä. Muutoksesta johtuen dieselautojen hintojen putoaminen ja dieseltekniikan kehitys ovat tehneet dieselautojen valinnan kannattavaksi. Suomessa ei anneta verohelpotusta jälkiasennettaviin hiukkassuodattimiin. Suomen autokanta uudistuu hitaasti, joten jälkiasennettaville hiukkassuodattimille olisi käyttöä. Dieselautossa 1 litra dieseliä palaessaan tuottaa 2660 g CO₂ ja bensiiniautossa 1 litra bensiiniä 2350 g. Dieselautosta tulee siis enemmän CO₂-päästöjä, mutta dieselien kulutus on pienempi kuin bensiiniautoissa. Dieselpolttoaineen kulutus per ajokilometri on noin 25 % pienempi kuin bensiinin kulutus per kilometri. [5; 17.]

Dieselautojen päästöjä pystytään vähentämään erilaisin tekniikoin, kuten moottorien kehittämisellä, polttoaineen, öljyn ja lisäaineiden avulla sekä pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteilla eli suodattimilla. Hapetuskatalysaattorin avulla saadaan puhdistettua HC- ja CO-päästöjä ja myös hieman pienhiukkasia ja NO_x-päästöjä, mutta pienhiukkasia tulee silti liikaa. Siksi on kehitetty jälkiasennettava hiukkassuodatin, josta luvataan yleisesti että se puhdistaa noin 30 - 70 % hiukkaspäästöistä. [6.]

Uusille autoilla alkaa olla hiukkassuodattimia vakiona tai vähintään lisävarusteena. Esimerkiksi Audilla on hiukkassuodatin vakiona A4-, A5-, A8-, Q7-malleissa ja lisävarusteena sen saa A3- ja A6-malliin. BMW:n kaikissa dieselmalleissa on hiukkassuodatin. Mercedes-Benz -autoissa hiukkassuodatin on joko vakiona tai sen saa lisävarusteena. Toyota tarjoaa hiukkassuodattinta ja typenpoistoa vain suurimmissa 2.2 litran ja 177 hv:n Clean Power -dieselmootoreissa. Muihin Toyotan tehottomampiin moottoreihin ei ole mahdollista saada suodatinta. Volkswagenilla suodatinta löytyy joistain Golf-, Passat- ja Touran-malleista. VW Touareg-, Tiguan- ja Phaeton-malleissa on hiukkassuodatin vakiona. [2.]

Tämän työn tavoitteena oli saada tietoa jälkiasennettavan hiukkassuodattimen toiminnasta ja tehokkuudesta. Mittaukset suoritettiin joulukuussa 2007 kahdella autolla. Hiukkassuodattimena käytettiin saksalaisen yrityksen Twintecin hiukkassuodattimia.

2 UUSI AUTOVEROLAKI JA EU:N PÄÄSTÖRAJAT

Dieselläkäyttöiset henkilöautot hyötyivät päästöperusteisesta verosta vastaan bensiinimalliin verrattuna. Suomen uusi autoverolaki aiheuttaa dieselautojen suuren kasvun. Tähän vaikuttavia syitä ovat dieselpolttoaineen hinta ja autojen hintojen pudotukset.

Liikenteessä syntyy ilmanlaatua heikentäviä epäpuhtauksia ja haitallisia yhdisteitä, kuten typen oksideja, hiilimonoksidia eli häkää, hiilivetyjä ja hiukkasia, joista kooltaan pienimmät ovat terveydelle haitallisimpia. Liikenteen määrän kasvusta huolimatta henkilöautojen haitalliset pakokaasupäästöt ovat, toisin kuin hiilidioksidipäästöt, vähentyneet merkittävästi autokannan uudistumisen, sitovan EURO-päästönormituksen tiukentumisen, katalysaattoreiden yleistymisen sekä muun parantuneen moottori- ja polttoainetekniikan kehittymisen ansiosta. Vuonna 2009 osittain voimaan tulevan EURO5-päästönormin myötä typen oksidien ja dieselautojen hiukkasten päästörajat tiukentuvat, mikä tulee vähentämään merkittävästi dieselautojen ympäristövaikutuksista ongelmallisimpina pidettyjä terveydelle haitallisia päästöjä. [5.]

Taulukosta 1 näkyy, kuinka EURO-päästönormit ovat tiukentuneet paljon vuosien saatossa. Esimerkiksi EURO3-päästönormeista EURO4-päästönormeihin CO-päästöt ovat laskeneet hiukan 0,64 g/km:stä 0,5 g/km:iin, HC + NO_x-päästöt melkein puolella 0,56 g/km:stä 0,3 g/km:iin, NO_x-päästöt puolella 0,5 g/km:stä 0,25 g/km:iin ja PM (particulate matter) eli hiukkaspäästöt ovat myös laskeneet puolella 0,05 g/km:stä 0,025 g/km:iin. EURO4-päästönormeista EURO5-päästönormeihin siirryttäessä vuonna 2005 CO-arvot pysyvät samassa, HC+NO_x laskevat noin 30 % 0,30 g/km:stä 0,23 g/km:iin ja NO_x arvot 0,25 g/km:stä 0,18 g/km:iin ja hiukkaspäästöt laskivat 0,025 g/km:stä 0,005 g/km:iin. EURO6-päästönormit tulevat osittain voimaan 2014 ja ne kiristävät entisestään tiukkoja EURO-päästönormeja. CO-arvot pysyvät samassa 0,5 g/km, mutta muut arvot kiristyvät entisestään. HC+NO_x-arvot putoavat 0,23 g/km:stä 0,17 g/km:iin, NO_x-päästöt kiristyvät 0,18 g/km:stä 0,08 g/km:iin ja hiukkaspäästöt pysyvät samassa kuin EURO5-päästönormeissa. [1.]

Taulukko 1. EURO-päästönormit [1]

Table 1 EU Emission Standards for Passenger Cars (Category M ₁ *), g/km						
Tier	Date	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Diesel						
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro 2, DI	1996.01 ^a	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro 5	2009.09 ^b	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^e
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 ^e
Petrol (Gasoline)						
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-
Euro 5	2009.09 ^b	1.0	0.10 ^c	-	0.06	0.005 ^{d,e}
Euro 6	2014.09	1.0	0.10 ^c	-	0.06	0.005 ^{d,e}
<p>* At the Euro 1..4 stages, passenger vehicles > 2,500 kg were type approved as Category N₁ vehicles † Values in brackets are conformity of production (COP) limits a - until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits) b - 2011.01 for all models c - and NMHC = 0.068 g/km d - applicable only to vehicles using DI engines e - proposed to be changed to 0.003 g/km using the PMP measurement procedure</p>						

3 AUTOKANTA JA SUODATTIMIEN SAATAVUUS

Suomen autokanta uusiutuu hitaasti noin 18 vuodessa. Yleisimpiä automerkkejä ovat olleet Toyota, VW ja Ford. 2008 tammi-helmikuussa rekisteröitiin 33 500 autoa, joista yli 50 % oli dieselautoja [17.]. Twintecin jälkikäteen asennettavia hiukkassuodattimia saa vanhoihinkin autoihin. Muun muassa VW-merkkisiin autoihin Twintecillä on erittäin kattava valikoima. Passattiin löytyy vuoden 1993 autoon tai vuoden 2007 autoon. VW Golfiin löytyy myös sarjan kolmannen sukupolven autoihin eli Golf III dieselautoihin. VW Transportteriin löytyy vuosimallista 91- lähtien jälkiasennettava hiukkassuodatin. Toyotaan Twintec:iltä on saatavilla suodatin uudempiin autoihin eli 2000-luvun puolella oleviin. Alfa Romeoon, Citroeniin, Fiatiin, Renaultiin, Skodaan, Mazdaan, Peugeotiin ja Saabiin on hiukkassuodattimia saatavilla vain vuoden 2000 tai uudempiin autoihin. Seatiin, Toledoan ja Ibizaan löytyy vuoden 1991 tai uudempiin autoihin hiukkassuodattimia. Volvoon on saatavilla muutamia hiukkassuodattimia, mutta myös vanhempaan vuoden 1995 Volvo 850 TDI:hin. Mercedes Benzille löytyy hyvä valikoima aina vuodesta 1995 lähtien. BMW:hen löytyy rajoitetusti vanhempiin autoihin kuten esimerkiksi 1998 vuoden BMW 320d:lle löytyy hiukkassuodatin. BMW:en uudempiin 2000 vuoden puolelta löytyy sitten suurempi valikoima. Fordille saa Galaxyyn ja Transitiin 1995 vuoden malleihin ja muihin autoihin 1999 tai 2000 vuoden malleista ylöspäin. Audiin löytyy muun muassa 1996 vuoden A3:seen. Myös muihin Audin malleihin löytyy 90-luvun puolelta jo jälkiasennettava hiukkassuodatin. [4]

Jälkiasennettavia hiukkassuodattimia valmistaa myös moni muu yritys. On kuitenkin selvää, että yleisimpiin automerkkeihin ja malleihin, varsinkin pakettiautoihin, on saatavilla jälkiasennettava hiukkassuodatin. Myös Suomen autokantaan soveltuvia jälkiasennettavia hiukkassuodattimia on saatavilla, mutta ongelmana on se, että koska sitä ei valtiovallan taholla tueta eikä vaadita, niin kuluttajat eivät halua pelkästään ympäristönäkökulman takia maksaa ylimääräistä. Tämän takia Suomessa ei ole saatavilla suuria määriä jälkiasennettavia hiukkassuodattimia, vaan ne joudutaan tilaamaan Saksasta.

4 DIESEL-PAKOKAASUPÄÄSTÖT

4.1 Kaasumaiset päästöt

Dieselmoottorissa polttoaine sekoittuu ilmaan vasta sylinterin sisällä, kun polttoaine ruiskutetaan korkeapaineisena suoraan palotilaan. Venttiilien kautta virtaa dieselmoottorin sylinteriin siis pelkkää ilmaa. Kipinää ei ole vaan polttoaine syttyy itsestään, kun lämpötila puristustahdin loppuvaiheessa kohoaa riittävän korkealle. Palaminen sylinterissä voi saada silloin alkunsa monessa eri kohdassa lähes yhtäaikaisesti, koska polttoainesuihkuja on useita ja polttoaine jakaantuu sylinteriin ruiskutettaessa hienojakoiseksi, herkästi syttyväksi sumuksi. [6.]

Dieselmoottorissa palaminen tapahtuu ilmaylimäärän vallitessa, joten dieselpakokaasut sisältävät yleensä vain hyvin vähän epätäydellisen palamisen tuotteita, kuten hiilimonoksidia eli häkää (CO). Palamattomia hiilivetyjä (HC) syntyy hieman (taulukko 2), esimerkiksi ruiskutuslaitteen kärkeen jäävän polttoaineen höyrystyessä pakotahdin aikana palamisen jo loputtua. Koska dieselpolttoaineen sisältämät hiilivedyt ovat bensiinin vastaavia aineosia raskaampia ja pitkäketjuisempia, ne ovat myös vaikeammin palavia. Siksi dieselmoottorin pakokaasuihin muodostuu helpommin vaaralliseksi luokiteltuja hiilivety-yhdisteitä. [6.]

Dieselmoottorin pakokaasut sisältävät yleensä verrattain paljon typen oksideja (NO_x). Palaminen tapahtuu polttoainepisaroiden ulkopinnoilla, jotka paikallisesti vallitseva ilmakerroin on lähellä ykköstä, eli NO_x-tuotolle otollisimpia seossuhteita esiintyy. Lisäksi samoilla alueilla palotilaa esiintyy myös paikallisia lämpötilahuippuja, vaikka dieselmoottorissa syntyvät lämpötilat ovat keskimääräin alhaisemmat kuin ottomoottorissa. Korkea lämpötila edistää typen oksidien muodostusta. [6.]

Dieselkäyttöiset ajoneuvot muodostavat suuren osan kaupunkien hengitysilmän saasteista ja hengitettävistä pienhiukkasista. Autoista syntyvä pienhiukkaset eli alle 2,5 mikronia pienemmät hiukkaset ovat kaikista vaarallisimpia terveydelle, koska ne pääsevät helposti keuhkoihin ja sieltä muualle elimistöön. [7.]

Dieselpakokaasujen koostumus joutokäynnillä ja kuormalla on taulukon 2 mukainen.

Taulukko 2. Dieselpakokaasujen koostumus [3, s. 603]

	NOx	HC	CO
Joutokäynnillä	50 – 200 ppm	50 – 500 ppm	100 – 450 ppm
Kuormituksella	600 – 2500 ppm	< 50 ppm	350 – 2000 ppm

4.2 Hiukkaspäästöt

Puhutaan primääreistä ja sekundäärihiukkasista. Primäärihiukkaset emittoituvat ilmakehään hiukkasina. Primäärihiukkasia syntyy seuraavista aineista: maaperän pöly, katupöly, biogeeniset hiukkaset, liikenteen päästöt hiukkasina (noki), energian tuotanto ja puun pienpoltto. Sekundäärihiukkaset syntyvät ilmakehässä kaasu-hiukkas-muuntumalla (nukleaatiomoodi) ja koostuvat hiilivedyn ja rikin yhdisteistä sekä metalleista. Hiukkaset ovat erittäin pieniä kooltaan, noin 1 nm - 100 µm. Sekundäärihiukkasia dieselmootorin pakokaasupäästöistä on jopa 90 % koko hiukkasmäärästä. [8.]

Hiukkaseen voi tapahtua kondensaatiota eli tiivistyä höyryä tai muuta ainetta, jolloin hiukkasten massapitoisuus ja koko muuttuu, mutta lukumäärä pysyy samana. Hiukkaset voivat myös törmätä toisiinsa eli tapahtuu koagulaatio, jolloin hiukkasten lukumääräpitoisuus pienenee ja massa muuttuu. Voi tapahtua myös depositio, jolla tarkoitetaan sitä, että hiukkanen törmää johonkin pintaan. [8.]

Hiukkasista voidaan mitata massa- tai lukumääräpitoisuus sekä massa- tai lukumääräkokojakaumat. Pienimmillä hiukkasilla ei ole paljon massaa, joten niiden osuus tilavuus- tai massakokojakaumassa ei näy, mutta saattaa näkyä lukumääräkokojakaumassa. Esimerkiksi pakokaasussa nokihiukkaset näkyvät massakokojakaumassa, mutta nukleaatiomoodin hiukkaset näkyvät selvemmin lukumääräkokojakaumassa.

4.3 Terveysvaikutukset

Ilmassa olevat pakokaasupäästöt vaikuttavat ihmiseen pääasiassa hengityselimien kautta. Liikenteen päästöt ovat vaarallisempia kuin teollisuuden päästöt, koska pakokaasut vapautuvat katutasossa, jossa haitalliset päästöt ovat lähellä ihmisiä ja altistuminen on helppoa. [10.]

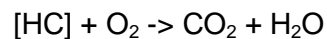
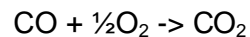
Hiukkaspäästöt ovat erityisen vaarallisia, koska ne ovat hyvin pienikokoisia. Kun hiukkaset ovat alle 10 μm , ne pystyvät läpäisemään ihmisen hengityselinten suoja- ja puhdistusmekanismit. Hiukkaset pääsevät hengitysilman kautta keuhkoihin saakka. Vielä pienemmät alle 2 μm olevat hiukkaset pääsevät keuhkoihin ja keuhkorakkuloihin saakka. Hiukkaset ovat kuitenkin riittävän suuria, etteivät ne poistu uloshengittäessä vaan kerääntyvät hengitysteihin. [10.]

Riskiryhmässä ovat erityisesti lapset. Lapset ovat pienempikokoisia ja näin lähempänä autojen pakokaasupäästöjä kuin aikuiset ihmiset. Myös lapsen elimistö ja sen puolustusmekanismit eivät ole täysin kehittyneet. Riskiryhmään kuuluvat myös astmaatikot ja muita keuhko- ja hengitystiesairauksia potevat. [10.]

5 PAKOKAASUJEN JÄLKIÄSITTELYLAITTEET

5.1 Hapetuskatalysaattori

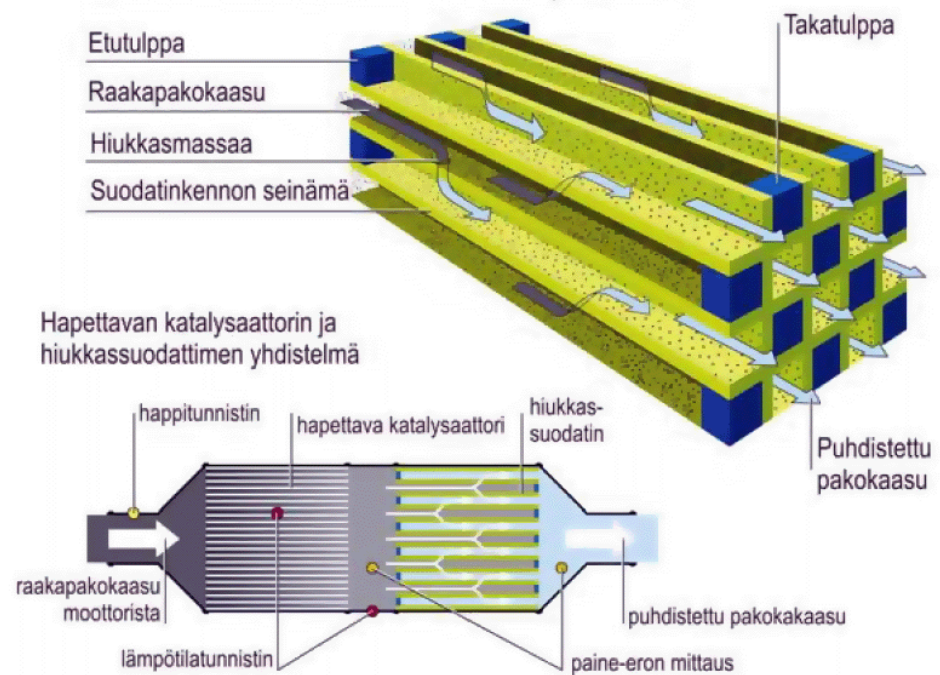
Hapetuskatalysaattorilla ei voida vähentää typen oksideja, mutta moottoriteknisesti voidaan vähentää typen oksideja ja lisääntynyt HC- ja CO-tuotto voidaan tämän jälkeen vähentää hapetuskatalysaattorin avulla. Hapetuskatalysaattorin rakenne on tunnelikennosto, jossa on katalyyttisesti aktiivinen kerros palladiumia tai platinaa. Pakokaasu saapuu katalysaattoriin, jolloin katalyytti aikaansaa hapetusreaktion. Hiilimonoksidi ja palamattomat hiilivedyt hapettuvat hiilidioksidiksi ja typen oksidit pelkistyvät typeksi. Myös hiukkasten koko pienenee hieman, kun nokihiukkasten hiilivety hapettuu. [3.] Kemiallinen reaktio on seuraavanlainen:



5.2 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodattimella saadaan yleisesti puhdistettua nokihiukkasia 30 - 70 %. Hiukkassuodattimia on erilaisia rakenteita (kuva 1), joista yleisin on kanavasuodatin. Kanavarakenteisessa hiukkassuodattimessa on kanavia, joissa ohjataan pakokaasu tukkimalla toinen pää kanavasta tai annetaan virrata vapaasti läpi, jolloin pakokaasua ohjataan ilmanohjaimilla (kuva 5, s. 15) huokoisen hiukkasseinämän läpi. Hiukkasseinämään hiukkaset tarttuvat diffuusion avulla. [3.]

Hiukkassuodattimen rakenneperiaate

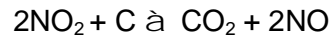


Kuva 1. Aktiivisen hiukkassuodattimen rakennekuva ja hapettavan katalysaattorin yhdistelmä (kuva lähde: Mercedes-Benz) [8, s. 33]

Hiukkassuodattimen suurin ongelma on, että sen seinämiin tarttunut noki täytyy saada poltettua pois, koska muuten hiukkassuodatin aiheuttaisi suuren vastapaineen pakopuolelle ja pahimmassa tapauksessa voisi rikkoa moottorin. Hiukkasen sisältämä hiili hapettuu hiilidioksidiksi lämpötilan noustessa noin 600 °C:seen. Lämpötila ei nouse tähän lämpötilaan tavanomaisessa käytössä vaan tarvitaan erilaisia menetelmiä, joilla hapettuminen saadaan tapahtumaan aikaisemmin. Hiukkassuodattimia on passiivisia ja aktiivisia järjestelmiä. Passiivisissa järjestelmissä ei tarvita minkäänlaista kontrollia hiukkassuodattimelle, kun taas aktiivisessa järjestelmässä tarvitaan elektroninen ohjainlaite. [8.]

5.2.1 *Passiivinen regenerointi*

CRT (Continuously Regenerating Trap) -menetelmä eli jatkuva regenerointi alkaa, kun pakokaasun lämpötila nousee 200 - 300 °C:seen. Toiminta perustuu siihen, että suodattimen seinämiin tarttunut noki hapettuu pakokaasussa olevaan typpidioksidiin jo 250 - 350 °C:ssa, joka aiheuttaa noen hapetuksen ja palamisen. Siinä aiheutuu kemiallinen reaktio



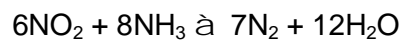
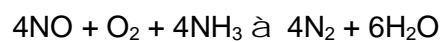
CRT-hiukkassuodatin vaatii hapettavan katalysaattorin toimiakseen. Yleensä hapettava katalysaattori on samassa paketissa kuin hiukkassuodatin. Hapettava katalysaattoriosi tehostaa toimintaa hapettamalla paitsi hiilimonoksidia myös hiilivetyjä, jotka muutoin kondensoituisivat hiukkasten pinnalle. Järjestelmä on varmatoiminen edellä mainitun lämpötila-alueen yläpuolella, kun NO₂ / noki –massasuhde on 8:1. [3; 8.]

5.2.2 *Aktiivinen regenerointi*

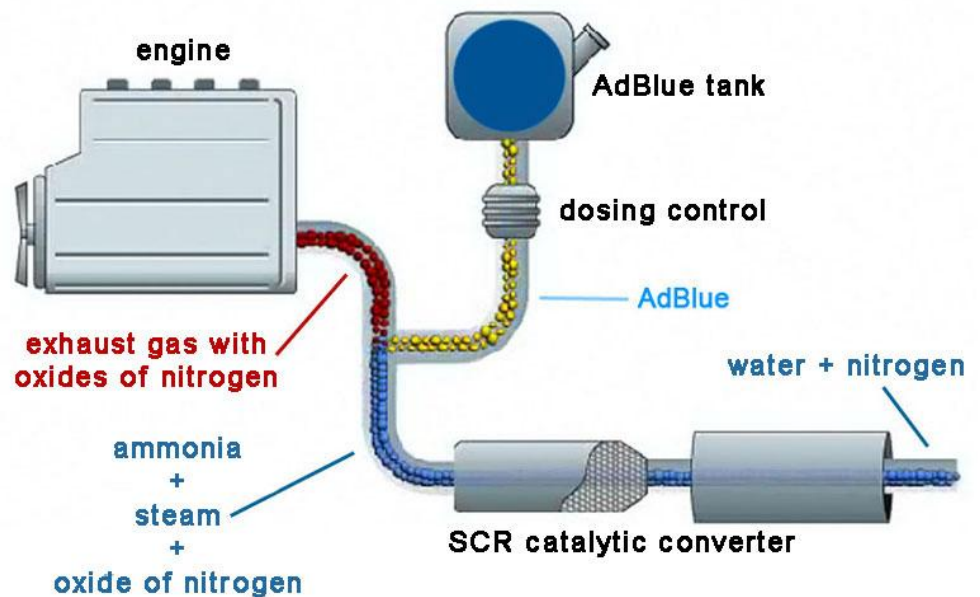
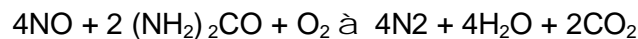
Toinen keino on käyttää lisäaineita polttoaineeseen, jolla saa laskettua hiukkasten oksidointilämpötilaa. Yleensä tämä aine on cerium-pitoista katalysoivaa lisäainetta. Tällä tavalla saadaan regenerointi toimimaan jo noin 450 °C:ssa. Tähän lämpötilaan ei kuitenkaan päästä normaaliolosuhteissa. Noen palaminen ei ole siis jatkuvaa. Suodattimen täyttymistä täytyy valvoa painerotunnistimella, jotta tietyn paine-eron ylittyessä käynnistetään aktiivinen regenerointimenetelmä. Tyypillisesti säädetään ruiskutusennakkoa myöhäisemmälle reilusti ja siten polttamalla palamatonta polttonestettä katalysaattorissa. Noki saavuttaa palamislämpötilansa ja hiukkassuodatin kuumenee noen palaessa. Hiukkassuodattimeen jää lisäaineesta muodostunutta tuhkaa, jota ei pystytä polttamaan, vaan suodatin pitää mekaanisesti irrottaa ja puhdistaa noin 100 000 km:n välein. [3.]

5.3 SCR-katalysaattori

Typpioksideja pelkistävä SCR-katalysaattori (Selective Catalytic Reduction) (kuva 2) eli valikoitu katalyyttinen pelkistäminen tarkoittaa, että ruiskutetaan ennen katalysaattoria lisäainetta, ureaa, joka reagoi typpioksidien kanssa ja pelkistää sen. Syöttömäärä pitäisi pystyä mitoittamaan oikein kaikissa, usein nopeastikin muuttuvissa kuormitusilanteissa. SCR-menetelmässä käytetään myös toista hapetuskatalysaattoria hapettamaan SCR:ssä käytettävää ammoniakkin N_2 :ksi ja H_2O :ksi. Katalysaattorissa syntyy seuraavanlaisia kemiallisia reaktioita: [3.]



Urean kemiallinen reaktio SCR-katalysaattorissa on

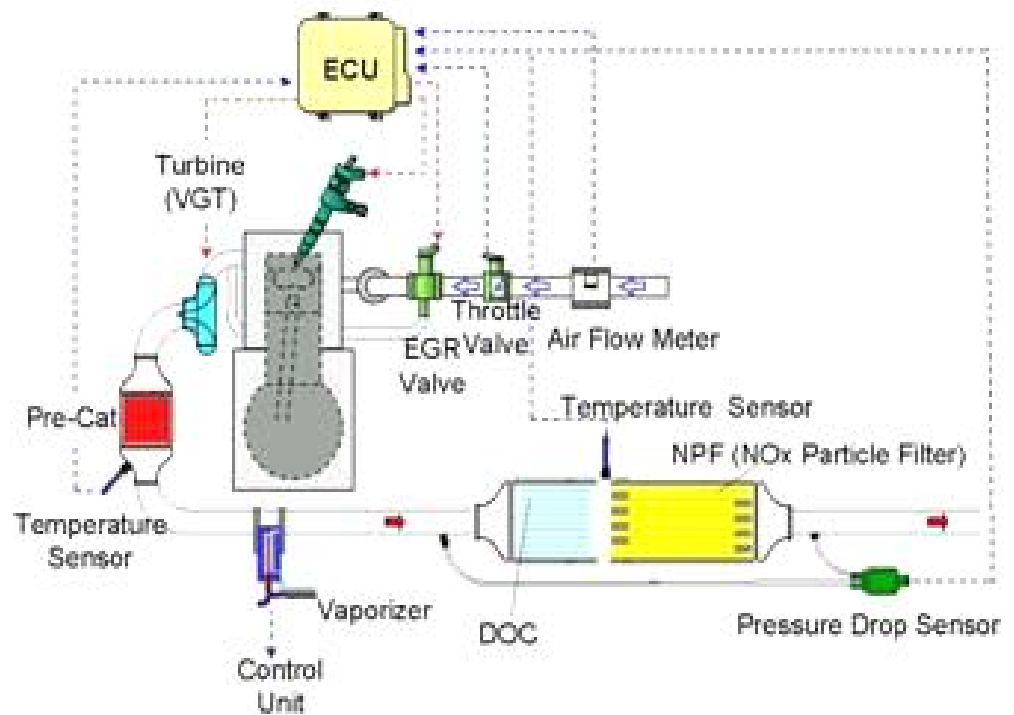


Kuva 2. SCR-katalysaattori [15]

Katalysaattori toimii hyvin yli 250 °C:ksen lämpötilassa. Pystytään saamaan NO_x pelkistettyä hiukkaspäästöistä jopa 90 %:n suhteella, jos saadaan pidettyä oikea annostelusuure eli ammoniakkin ollessa alle 20 ppm. [3.]

5.4 Varaava NO_x -katalysaattori

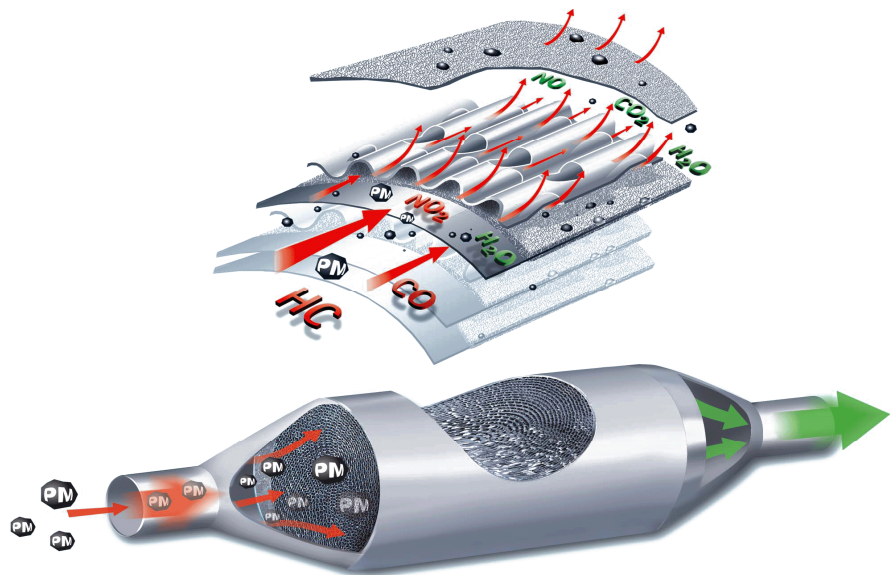
Käytetään jatkuvan pelkistykseen sijasta varastoivaa katalysaattoria (kuva 3), saavutetaan parempi muuntosuhde ja tullaan toimeen pienemmällä määrällä pelkistävää hiilivetyä. Laihaseoskäytössä NO hapettuu ensin NO₂:ksi ja varastoituu katalysaattorin metallioksiidiin (esimerkiksi bariumoksiidiin) nitraattimuodostumana (NO₃). Lämpötilan pitää olla 250 – 450 °C, jotta katalysaattori toimii kunnolla. Toinen vaihe on regenerointivaihe. Pakokaasun muodostus täytyy saada muutettua rikkaaksi. Tällöin muodostuu runsaasti pelkistimiä, kuten hiilimonoksidia H₂ ja eri hiilivetyjä. Tällöin nitraattimuodostuma purkautuu ja pelkistyy jalometallipitoisessa katalysaattorissa N₂:ksi. Dieselmoottori saadaan toimimaan rikkaalla korottamalla takaisinkierätyssastetta tai myöhäistämällä ruiskutusennakkoa. Katalysaattorin ongelmana on sen herkkyys rikille, koska SO₂ on kemiallisesti samanmuotoinen kuin NO₂. Rikkiä ei saada regeneroitua vaan se alkaa tukkia katalysaattoria. [3; 8.]



Kuva 3. Varaava NO_x-katalysaattori [12]

6 TWINTECIN HIUKKASSUODATIN

Twintecin hiukkassuodatin perustuu Emitec-yhtiön suunnittelemaan PM-Metalit® hiukkassuodattimeen (kuva 4). Suodatin on CRT-suodatin eli jatkuvasti regeneroiva suodatin. Suodatin ei tarvitse puhdistusta vaan se puhdistuu automaattisesti. Ainoa edellytys on että moottori pysyy lämpimänä.



Kuva 4. Twintec hiukkassuodattimen rakenne [4]

Hiukkassuodattimen rakenne on tunnelimainen ja se on päällystetty katalyyttisellä aineella. Katalyyttinen aine parantaa suodattimen regenerointia. Hiukkassuodattimen voi hankkia oksidointikatalysaattorin kanssa tai ilman, mutta jos hankitaan ilman, niin autosta kuitenkin pitää löytyä oma hapetuskatalysaattori. Hapetuskatalysaattorin jälkeen pakokaasu virtaa hiukkassuodattimen läpi, jossa nokihiukkaset ohjataan pienten ohjaimien avulla suodattimen seinämien läpi, jolloin ne tarttuvat huokoiseen materiaaliin (kuva 5). Osa hiukkasista ei törmää seinämään vaan pääsee jatkamaan seuraavaan ohjaimiin. Tällä tavalla estetään, ettei hiukkassuodatin mene tukkoon helposti. Hapetuskatalysaattorissa syntyvä typpioksidi kulkee hiukkassuodattimen läpi ja hapettaa siellä olevat nokihiukkaset. [4.]

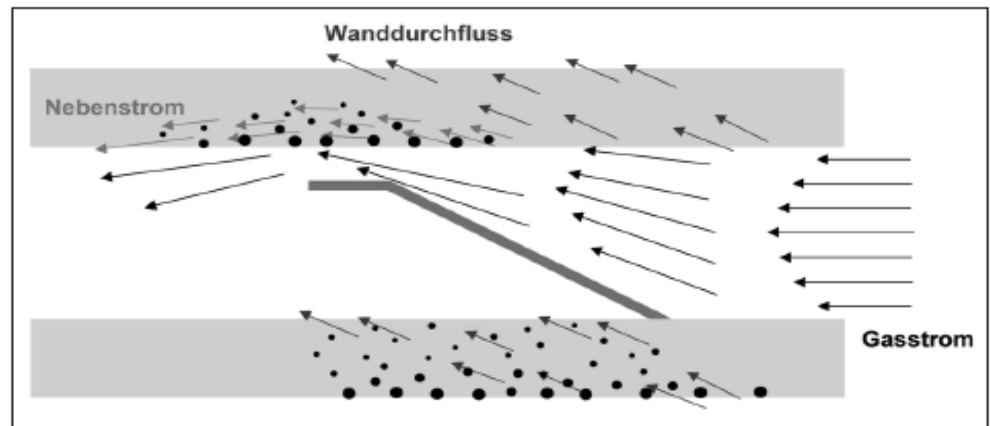


Figure 5:
Particle flow in the PM-Metalit™

Kuva 5. Hiukkasvirtaus suodattimessa [9]

7 TESTIAUTOT

Testiautoina olivat vuoden 2007 Volkswagen Passat 1.9 TDi, jolla oli ajettu 16871 km ja vuoden 2002 BMW 530d, jolla oli ajettu 155058 km. Autoihin suoritettiin perushuollot ennen testiajoa. Perushuoltoon sisältyi ilmansuodattimen vaihto, polttoainesuodattimen vaihto, öljyn suodattimen vaihto ja öljyn vaihto. Suodattimissa ja öljyissä pyrittiin löytämään saman valmistajan tuotetta silloin kun mahdollista. Passatissa käytettiin Castrol SLX Professional Longlife 3 5W-30 -öljyä ja BMW:ssä käytettiin Castrolin SLX Professional 0W-30 -öljyä. Tällä tavalla eliminoitiin mahdolliset eri ikäisten mallien ja merkkien vaikutukset testituloksiin. Myös autojen dieselpolttoaine oli samaa talvierää. Taulukosta 3 näemme autojen perustietoja, esimerkiksi moottorityypin, tehon ja polttoainekulutuksen.

Taulukko 3. Testiautot

	2007 Passat 1.9 TDI	2001 BMW 530dA
Moottorityyppi	BKC	M57D30
Suurin teho	77 kW (105 hv)	142 kW (193 hv)
Suurin vääntömomentti	250 Nm	410 Nm
Polttoaineenkulutus		
- kaupunki	7,2 l / 100 km	11,6 l / 100 km
- maantie	4,7 l / 100 km	6,7 l / 100 km
- yhteiskulutus	5,6 l / 100 km	8,5 l / 100 km
CO ₂ -päästöt	148 g / km	noin 190 g / km
Päästötaso ilman suodatinta	Euro 4	Euro 3

Molemmissa autoissa on Common Rail eli yhteispaineruiskutus. Yhteispaineruiskutusjärjestelmässä korkeapaine tuotetaan erillisellä pumpulla, jolloin polttonesteen jakoputkessa on jatkuva paine. Suuttimet avataan sähköisesti ja ohjauksen avulla määritetään ruiskutusennakko ja ruiskutusainemäärä. BMW:ssä käytetään Boschin kehittämää DDE-järjestelmää (Digital Diesel Electronics), jolla ohjataan kaikkia moottorin toimintoja. DDE-järjestelmällä saadaan muun muassa parempi polttoainetalous, moottorin tasaisempi käynti ja pienemmät päästöt. [13.]

7.1 Hiukkassuodattimen asennus autoihin

Hiukkassuodattimet tilattiin saksasta Twintec-nimiseltä yritykseltä, jolla on suuri valikoima erilaisia jälkiasennettavia hiukkassuodattimia. Hiukkassuodattimet tilattiin Diagno Finland Oy:n kautta ja niiden toimitus kesti noin viikon. Hiukkassuodattimien ohjeet olivat saksaksi, mutta niissä oli asennuksesta kuvia, joista oli helppo katsoa miten asennus tehdään. BMW:n hiukkassuodattimen paketissa tuli mukana kiinnike, joka piti vaihtaa.

BMW:ssä hiukkassuodatin (kuva 6) oli yksinkertaista asentaa suoraan auton omiin laippoihin ja vaihtaa mukana tullut kiinnike auton pohjaan. BMW:ssä oli turboahtimesta alkaen tupla ulostulo ja kummallakin putkella oli oma hapetuskatalysaattori. Twintecin hiukkassuodattimessa oli hapetuskatalysaattori yhdessä putkessa, joka sitten hiukkassuodattimen jälkeen haaroittui taas kahdeksi putkeksi. BMW:n hiukkassuodatin tuli suoraan kiinni auton pako-kaasuturboahtimeen ja toinen pää suoraan vanhoihin laippapaikkoihin auton alle. Ongelmia asennuksessa oli hiukkassuodattimen koko ja asennettavan paikan pieni tila.



Kuva 6. BMW:hen asennettu hiukkassuodatin

Passatin hiukkassuodattimen asennus oli yksinkertainen. Passatin (kuva 7) hiukkassuodatinasennuksessa jouduttiin katkaisemaan alkuperäistä pakoputkea ohjeiden näyttämästä kohdasta, jotta hiukkassuodatin saatiin paikoilleen. Hiukkassuodattimen paikka on hieman eri kuin BMW:ssä, joka oli suoraan kiinni auton moottorin pakopuolella. Passatissa hiukkassuodatin on noin metrin päässä auton moottorista.

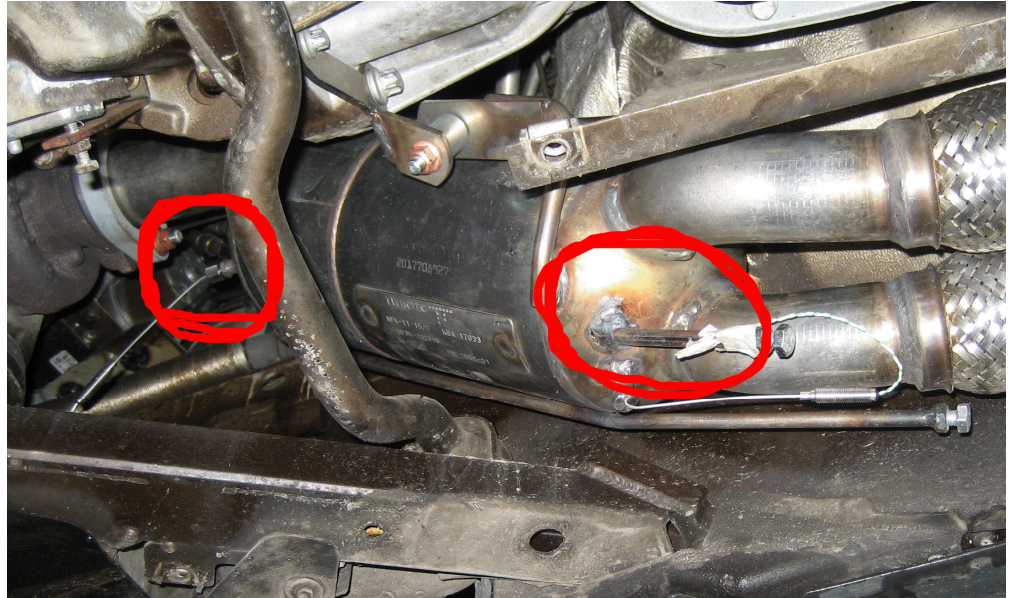


Kuva 7. Passatin hiukkassuodatin asennettuna

7.2 Lämpötila- ja paineanturit

Mittaukset suoritettiin ennen ja jälkeen hiukkassuodatinta. Paineantureilla oli tarkoitus saada mitattua, aiheuttaako jälkiasennettava hiukkassuodatin ylimääräistä takaisinvirtauspainetta pakoputkistossa. Tämä aiheuttaisi suuremman kulutuksen kasvavan vastuksen takia. Mittaukset eivät kuitenkaan onnistuneet. Mitatut arvot vaihtelivat liian paljon, että niistä voisi päätellä aiheutuiko jälkiasennettavasta hiukkassuodattimesta takaisinvirtausvastusta vai ei. On todennäköistä, että pakoputkistossa syntyy hieman lisäpainetta, joten kulutus hieman kasvaisi. Tämä voidaan nähdä esimerkiksi CO₂-mittauksista, joissa jälkiasennettavan hiukkassuodattimen kanssa CO₂-arvo on noin 5 % korkeampi kuin ilman.

BMW:ssä lämpötila-anturit (kuva 8) asennettiin suoraan hiukkassuodattimen etu- ja takaosaan. Passatissa lämpötila-anturit asennettiin kiinnityslaippoihin kiinni noin 5 cm päähän hiukkassuodattimesta. Twintec-hiukkassuodattimen lämpötilan pitäisi olla 200 – 300 celsiusastetta, jotta se regeneroituu kunnolla. Kummallakin autolla oli ajettu reilusti ja moottorit olivat lämpimiä.



Kuva 8. Lämpötila-anturin paikat BMW:ssä

8 MITTAUSMENETELMÄT JA MITTALAITTEISTO

Mittaukset suoritettiin Nuuskija-autolla ja siihen asennettavilla mittalaitteilla. Näytteet otettiin talteen Nuuskija-auton neljää alanäytteenottoputkea käyttämällä. Tampereen teknilliseltä yliopistolta oli myös lainassa hieman muuteltua laitteistoa kuten ELPIn impaktorin lisäaste ja SMPS-mittalaite.

Mittaukset suoritettiin Alastaron moottoriradan vieressä olevalla tiellä Jarno Saarisen tiellä. Jarno Saarisen tietä ajettiin noin 2 kilometriä pohjoiseen ja sitten tehtiin u-käännös ja 2 kilometriä etelään ja taas pohjoiseen. Autot valmisteltiin Stadian tiloissa edeltävänä viikkona valmiiksi ja ajettiin mittauspäivänä Alastarolle. Nuuskija-autoon asennettiin myös Tampereen teknillisen yliopiston SMPS-mittalaite, ELPIn lisäaste ja denuder. Autoilla ajettiin ensin hiukkassuodattimen kanssa 7 - 9 kertaa Jarno Saarisen tietä edestakaisin. Näin saatiin 7 - 9 testisykliä mitattua auton pakokaasupäästöt kuormalla pohjoiseen ajettaessa ja 7 - 9 testisykliä ilman kuormaa etelään ajettaessa. Tämän jälkeen autoista otettiin hiukkassuodatin pois ja mitattiin uudelleen 7 - 9 testisykliä. Mittauksia tehtiin siis 28 - 36 kertaa per auto.

Testisykliin kuuluu kaksi eri tilannetta. Kevyt sykli eli ilman kuormaa, jolloin hinattiin Nuuskija-autoa käyttämättä jarruja, ja kuormitus sykli eli kuorman kanssa, jolloin Nuuskija-autolla jarrutettiin aiheuttaen lisäkuormitusta testiautolle. Testisyklin kesto oli noin 2 - 4 minuuttia suunta. Testisyklin keston vaikutti, jos jouduttiin pysähtymään välillä tai odottamaan, että saatiin nopeus ja kuormitus tasaiseksi. Mittauksien aikana jouduttiin tekemään muutoksia eri mittalaitteille ja tarkistamaan niiden toimivuuksia. Mittaukset tehtiin vääntämällä testiautoilla Nuuskija-autoa 40 km/h vauhdilla (kuva 9). Nuuskija-autolla pystyttiin jarruttamaan testiautoa. Näin saatiin mitattua autoja eri kuormalla.



Kuva 9. Passatin mittaus Alastarolla

Alastarolla autot viimeisteltiin mittauskuntoon. Auton lämpötila-anturien ja paineanturin johdot kytkettiin auton sisälle oleviin kannettaviin tietokoneisiin, joilla tallennettiin tiedot. Lämpötila-antureina käytettiin K-tyypin lanka-anturia, joka pystyy kestävään jatkuvasti 1000 °C:n lämpötilan. Anturilta saatiin suoraan lämpötila-arvo. Pakoputken päähän asennettiin lämpötila-anturiritilä, joka oli noin 50 cm:n pituinen tanko ja johon oli asennettu lämpötila-anturit noin 15 cm:n välein. Tällä saatiin mitattua pakokaasun lämpötiloja sen tullessa pakoputkesta ulos. Jatkojohto vedettiin Nuuskija-autosta mitattavaan autoon, jolla saatiin pidettyä kannettavat tietokoneet ladattuina.

Kuormapisteet määriteltiin autojen ahtopaineiden, ilmamäärän ja ruiskutusmäärän perusteella. Autojen kuormat mitattiin KTS 550 – moottoridiagnostiikkamittalaitteen avulla OBD (On Board Diagnostic) -pistokkeen kautta, josta saatiin auton ahtopaine, ilmamäärää ja ruiskutusmäärä. Tiedot näistä kirjoitettiin käsin noin 20 sekunnin väliajoin.

Taulukosta 4 näemme Passatin kuormapisteet hiukkassuodattimen kanssa ja ilman. Myös kevyellä ja kuormitusykyllä. Taulukosta näkee, että ruiskutusmäärä on kaksinkertainen ja ilmamassa on myös kasvanut noin 50 % verrattaessa ilman kuormaa ja kuorman kanssa.

Taulukko 4. Passatin kuormapisteet

Passatin kuormapisteet	Ilmamassa [kg/h]	Ahtopaine [bar]	Ruiskutusmäärä [mg]
Hiukkassuodatin, kuormalla	160,58	1,68	21,00
Hiukkassuodatin, ilman kuormaa	108,81	1,25	10,44
Ilman hiukkassuodatinta, kuormalla	166,08	1,69	20,90
Ilman hiukkassuodatinta, ilman kuormaa	108,06	1,26	10,42

Taulukosta 5 näemme BMW:n kuormapisteet kuormalla ja ilman kuormaa hiukkassuodattimen kanssa ja ilman hiukkassuodatinta.

Taulukko 5. BMW:n kuormapisteet

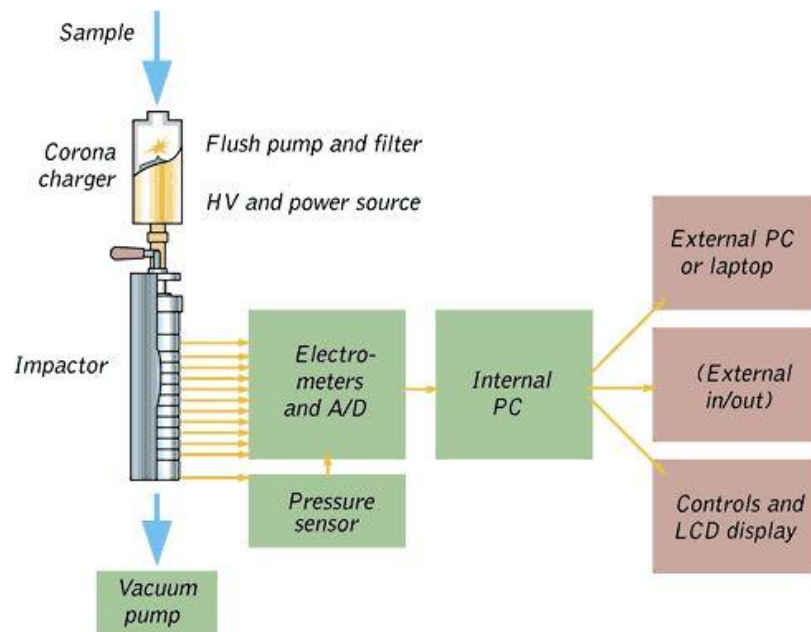
BMW:n kuormapisteet	Ilmamassa [kg/h]	Ahtopaine [bar]	Ruiskutusmäärä [mg] (pää- + esiruiskutus)
Hiukkassuodatin, kuormalla	725	1,60	29,5 + 2,3
Hiukkassuodatin, ilman kuormaa	608	1,10	9,8 + 1,9
Ilman hiukkassuodatinta, kuormalla	717	1,60	25,4 + 2,2
Ilman hiukkassuodatinta, ilman kuormaa	605	1,10	11,1 + 1,9

Autoille tehtiin myös dynamometrimittaukset, joissa pyrittiin rekonstruoimaan Alastarolla tehtyjä ajosyklejä ja mittaamaan CO₂:sta. Tässä tarvittiin Alastarolla tallennettuja ahtopaine-, ilmamäärä- ja ruiskutusmääräarvoja. Vertaamalla dynamometrissä mitattuja CO₂-päästöjä Alastarolla mitattuihin arvoihin

saatiin laskettua laimennussuhde, jonka avulla saatiin sovitettua mittatulokset sopimaan paremmin eri vetojen kanssa.

8.1 ELPI-pienhiukkasmittauslaite

Hiukkasten mittaukseen käytettiin Nuuskija-autossa sijaitsevaa ELPI-pienhiukkasmittauslaitetta (Electrical Low Pressure Impactor) (kuva 10). ELPIllä pystytään mittaamaan pienhiukkasten lukumääräkokojakauma 7 nm – 10 mikrometrin väliltä. Tuleva näyte saapuu ELPIiin, jossa hiukkaset saavat positiivisen varauksen. Sen jälkeen varatut hiukkaset tulevat impaktorille, jossa ne johdetaan keräilytasojen ohitse. Kun hiukkasella on suuri massa ja massahitaus se törmää keräystasoon, josta elektrometreillä mitataan varausta per sekunti eli virtaa [19]. ELPI:n keräilytasoja hiukkasille eri halkaisijan mukaan 12 kappaletta. Taulukosta 6 näemme mitkä ovat ELPI:n keräilytasojen hiukkasten ala- ja ylärajat. Isoimmat hiukkaset jäävät ylimmäiseen keräilytasoon eli 3,9900 μm :stä 9,9100 μm :iin hiukkaset. ELPI:n pienimmät hiukkaset ovat 0,0070 μm :stä 0,0167 μm :iin. [15.]



Kuva 10. ELPI:n toimintakuva [16]

Taulukko 6. ELPIn keräilytasojen ala- ja ylärajat

	Alaraja [μm]	Yläaraja [μm]
Taso 1	0,0070	0,0167
Taso 2	0,0167	0,0280
Taso 3	0,0280	0,0563
Taso 4	0,0563	0,0949
Taso 5	0,0949	0,1560
Taso 6	0,1560	0,2620
Taso 7	0,2620	0,3820
Taso 8	0,3820	0,6130
Taso 9	0,6130	0,6480
Taso 10	0,6480	1,6000
Taso 11	1,6000	3,9900
Taso 12	3,9900	9,9100

8.2 SMPS-mittalaite

Toinen käytettävä laite pienhiukkasten mittaamiseen on SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), jolla pystytään mittaamaan pienhiukkasia 3 nm:n ja 1 mm:n väliltä.

SMPS koostuu varaajasta, differentiaalisesta liikkuvuusanalysointilaitteesta (DMA) sekä detektorista, joka usein on kondensaatiodinlaskuri CPC. Kun varattu hiukkanen joutuu tunnettuun sähkökenttään, sen liikkumisnopeus riippuu vain hiukkasen koosta ja muodosta. Kun tiedetään hiukkasten varausjakauma koon funktiona, saadaan mitattua hiukkasten kokojakauma. Sähköiseen luokitteluun perustuvat menetelmät sopivat 3 nm – 1 mm kokoisille hiukkasille. [15.]

8.3 CO₂ mittaukset dynamometrissä

Dynamometrimittaukset tehtiin Stadian emissiolaboratoriossa. Mittauksissa käytettiin Nuuskija-auton Horiba CO₂ multi-gas unit VA-3000 -analysointilaitetta. Autojen pakoputken päihin asennettiin pieni lisäkappale, jotta se saatiin yhdistettyä laimentimeen. Laimentimella saadaan simuloitua realistista ajotilannetta, jossa pakokaasu laimentuu ilman kanssa ennen mittalaitetta. Tässä dynamometrimittauksessa laimennussuhde oli 84:1. Tarvittiin myös ilmankuivan, jolla saatiin nokihiukkasista nesteet haihdutettua pois. CO₂-arvoilla saatiin säädettyä kaavioiden pystyakselia vastaamaan niiden kuormaa paremmin

8.4 Muut käytetyt mittalaitteet

Denuder-laitetta käytettiin lämmittämään sisään otettava näyte 265 °C:seen, jotta siitä saadaan haihdutettua hiukkaseen tarttuva neste. Näin saadaan vertailukelpoinen arvo. Haihtuneet aineet absorboituvat denuderissa olevaan aktiiviseen hiileen.

Horiba CO₂ multi-gas unit VA-3000 -analyssaattorilla mitattiin CO₂-päästöjä. Mittausalue on 0 – 1000 ppm tai 0 – 5000 ppm. Analyssaattorin toiminta perustuu NDIR-toimintoon (non-dispersive infrared absorptiometry). Analyssaattoriin sisään otettavaan kaasuun kohdistetaan infrapunavalon, jota kaasumolekyylit absorboivat. Analyssaattorissa on vastaanotin, joka mittaa infrapunavalon sen osuttua näytekaasuun. Analyssaattorissa on vertailukaasu, joka ei absorboi infrapunaa. Infrapunaa lähetetään vertailukaasun läpi ja mitataan, kuinka paljon energiaa infrapunavalossa on. Näin pystytään mittaamaan näytekaasuun absorboitunut energia. Energiaero näytekaasun ja vertailukaasun välillä lasketaan ja muutetaan elektroniseksi signaaliksi. [14, s. 10.]

9 ELPIN ALGORITMIN KÄSITTELY

ELPillä mitattiin 1 sekunnin välein virrat elektrometreillä. Virrat elektrometreiltä ilmoitetaan femtoampeereina. Näistä virroista lasketaan lukumääräpitoisuus ja tilavuuskokojakauma seuraavanlaisten algoritmien mukaan. ELPI mittaa hiukkasten aerodynaamisen halkaisijan. ELPIn mitatuista arvoista käytetään vain denuderoituja arvoja, koska niistä on haihtunut nestemäinen aine pois. Passatissa hiukkassuodattimella ja kuorman kanssa denuderoituja arvoja on Load4 ja 8 eli kuormitus sykli. Passatissa hiukkassuodattimella ja ilman kuormaa denuderoituja syklejä olivat No_load4, 7 ja 8 eli kevyt sykli. Passatissa ilman hiukkassuodatinta ja kuormalla vain Load7 oli denuderoitu. Myös ilman kuormaa vain No_load7. BMW:ssä ilman hiukkassuodatinta ja kuormalla denuderoituja arvoja oli Load11, 14 ja 15. Ilman hiukkassuodatinta ja ilman kuormaa BMW:ssä denuderoituja syklejä olivat No_load12, 15 ja 16. Ilman denuderointia olevat mittaussyklit ovat liitteissä 1 - 8.

Dpa	Hiukkasen aerodynaaminen halkaisija. Hiukkanen oletetaan palloksi, jonka tiheys on 1000 kg/m^3 ja laskeutumisnopeus sama kuin todellisella hiukkasella
Dps	Hiukkasen stokes-halkaisija. Hiukkanen oletetaan palloksi, jolla on sama tiheys ja laskeutumisnopeus kuin todellisella hiukkasella. Stokesin lailla lasketaan hiukkaseen vaikuttava kitkavoima, kun hiukkanen liikkuu väliaineessa, esimerkiksi ilmassa. Stokesin lain johtamisessa on käytetty oletusta, että kaasumolekyylien nopeus hiukkasen pinnalla on nolla. Tämä oletus pätee hyvin $1 \mu\text{m}$ suuremmille hiukkasille. Todellisuudessa molekyylit liukuvat hiukkasen pinnalla sitä enemmän mitä pienempi hiukkasen halkaisija on verrattuna sen vapaaseen matkaan.
Dia	Aerodynaamisen halkaisijan geometrinen keskiarvo
Dis	Stokesin halkaisijan geometrinen keskiarvo
Cca	Cunninghamin liukukorjauskerroin aerodynaamiselle hiukkaselle. Cunningham liukukorjauskerroin korjaa stokesin lain oletusta, että kaasumolekyylien nopeus hiukkasen pinnalla on nolla.
Ccs	Cunninghamin liukukorjauskerroin stokes-hiukkaselle

ELPIn mittatiedoista saadaan eri kokoluokkien geometrinen ala- ja ylähalkaisija taulukon 7 mukaisesti.

Taulukko 7. ELPIn aerodynaamisten hiukkasten ala- ja ylähalkaisija

Vaihe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aerodynaaminen	Dpa [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91

Seuraava vaihe on laskea cunninghamin liukukorjauskerroin kaavalla (1) (taulukko 8):

$$Cca = 1 + \left(\frac{2}{76 * Dpa} \right) * (6,32 + 2,01 * e^{-0,1095 * 76 * Dpa}) \quad (1)$$

Taulukko 8. Cunninghamin liukukorjauskerroin Cca aerodynaamisille hiukkasille

Vaihe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aerodynaaminen	Dpa [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	Cca	31,882	13,715	8,436	4,54	3,01	2,159	1,658	1,441	1,272	1,176	1,104	1,042	1,017

Sitten lasketaan aerodynaamisen hiukkasen geometrinen keskiarvo (taulukko 9) jokaiselle kanavalle käyttäen seuraavanlaista kaavaa (2):

$$Di_a = \sqrt{Dp_n * Dp_{n+1}} \quad (2)$$

Taulukko 9 Aerodynaamisen hiukkasen geometrinen keskiarvo eri kokoluokille

Vaihe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aerodynaaminen	Dpa [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	Cca	31,882	13,715	8,436	4,54	3,01	2,159	1,658	1,441	1,272	1,176	1,104	1,042	1,017
	Dia	0,011	0,022	0,040	0,073	0,122	0,202	0,316	0,484	0,762	1,232	2,527	6,289	

Seuraavaksi lasketaan Stokesin halkaisija (Dps) kaavalla (4). Stokesin lailla lasketaan hiukkaseen vaikuttava kitkavoima, kun hiukkanen liikkuu väliaineessa. Tämä on vertailukelpoisempi arvo kuin aerodynaaminen halkaisija. Kaava iteroitiin Matlab-ohjelman avulla.

$$Dp_s = \frac{Dp_a}{\sqrt{\text{Density} * \frac{Cc_s}{Cc_a}}}, \text{Density} = 1 \frac{g}{cm^3} \quad (4, 5)$$

$$Cc_s = 1 + \left(\frac{2}{76 * Dp_s} \right) * (6,32 + 2,01 * e^{-0,1095 * 76 * Dp_s})$$

Tämän jälkeen lasketaan Cunningham liukukorjauskerroin ja geometrinen keskiarvo stokesille kaavalla (1 ja 2). Taulukosta 10 näkyy stokesin geometrinen keskiarvo, halkaisija ja cunninghamin liukukorjauskerroin.

Taulukko 10 Stokesin geometrinen keskiarvo, stokesin halkaisija ja stokesin cunninghamin liukukorjauskerroin

Vaihe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aerodynaaminen	Dpa [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	Cca	31,882	13,715	8,436	4,54	3,01	2,159	1,658	1,441	1,272	1,176	1,104	1,042	1,017
	Dia	0,011	0,022	0,040	0,073	0,122	0,202	0,316	0,484	0,762	1,232	2,527	6,289	
Stokes	Dps [µm]	0,0047	0,011	0,019	0,039	0,068	0,116	0,201	0,299	0,487	0,760	1,292	3,243	8,077
	Ccs	47,209	19,979	12,07	6,188	3,878	2,611	1,876	1,572	1,343	1,219	1,129	1,051	1,021
	Dis	0,007	0,148	0,027	0,052	0,089	0,153	0,245	0,381	0,608	0,991	2,047	5,118	

Piti päättää lasketaanko hiukkasten koko stokesin vai aerodynaamisen koon mukaan. Päätettiin laskea hiukkaskoon aerodynaamisessa halkaisijassa. Taulukkoon 11 laskettiin logaritmiset kerroin vektorit kaavalla 6.

$$d \log Dp = \log_{10} \frac{Dp_{n+1}}{Dp_n} \quad (6)$$

Taulukko 11. Logaritminen kerroin vektori dlogDp laskettuna

Vaihe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aerodynaaminen	Dpa [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	Cca	31,882	13,715	8,436	4,54	3,01	2,159	1,658	1,441	1,272	1,176	1,104	1,042	1,017
	Dia	0,011	0,022	0,040	0,073	0,122	0,202	0,316	0,484	0,762	1,232	2,527	6,289	
	Di [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	dlogDp	0,378	0,224	0,303	0,227	0,216	0,225	0,164	0,205	0,189	0,227	0,397	0,395	

Varaajan (Charger) tehokkuus laskettiin käyttämällä kaavaa 7.

$$X = \text{Kerroin} * Di_s^{\text{Exponentti}} * \frac{\text{Flowrate}}{\text{Calibrationflow}} \quad (7)$$

ELP:n virtausnopeus on 9,9 lpm ja kalibroitivirtaus on 10 lpm. Varaajan tehokkuuskäyrän (kaava 7) kerroin ja eksponentti termit riippuvat hiukkasten koosta. Hiukkasille, jotka ovat pienempiä kuin 0,023 µm laskettiin 222,49 kertoimella ja 1,637 eksponentin potenssilla ja suuremmat hiukkaset kuin 0,023 µm laskettiin 68,12 kertoimella ja 1,32 potenssilla. Saadaan seuraavanlaiset tehokkuuden kaavat:

Kun $Di < 0,023[\mu\text{m}]$, niin

$$X(Di) = 222,49 * Di^{1,637} * \frac{9,9}{10} \quad (8)$$

Kun $0,023[\mu\text{m}] < Di < 10[\mu\text{m}]$, niin

$$X(Di) = 68,12 * Di^{1,32} * \frac{9,9}{10}$$

Lasketut arvot tehokkuuskerroin nähdään taulukosta 12. Varaajan tehokkuuskertoimen avulla pystytään laskemaan ns. konversiovektori (ConV) (taulukko 12) kullekin kokoluokalle kaavalla (9):

$$\text{ConV} = \frac{1}{\text{dlogDp}} * \frac{1}{X} \quad (9)$$

Taulukko 12. Logaritminen kokonaislukumääräpitoisuus ja tehokkuuskertoimet

Vaihe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Aerodynaaminen	Dpa [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	Cca	31,882	13,715	8,436	4,54	3,01	2,159	1,658	1,441	1,272	1,176	1,104	1,042	1,017
	Dia	0,011	0,022	0,040	0,073	0,122	0,202	0,316	0,484	0,762	1,232	2,527	6,289	
	Di [µm]	0,007	0,0167	0,028	0,0563	0,0949	0,156	0,262	0,382	0,613	0,948	1,6	3,99	9,91
	dlogDp	0,378	0,224	0,303	0,227	0,216	0,225	0,164	0,205	0,189	0,227	0,397	0,395	
	X	0,0698	0,22	0,585	1,356	2,762	5,639	10,539	18,894	34,99	66,64	173,60	581,9	
	ConV [1/cm ³]	37,926	20,253	5,632	3,252	1,677	0,788	0,579	0,2577	0,151	0,066	0,0145	0,004	

Laimennetut hiukkaspitoisuudet halutaan muuttaa raakakaasupitoisuuksiin, jotta työssä voidaan verrata eri hiukkaskokojakaumia. Todellisessa mittauksissahan laimennussuhde muuttuu meteorologisista tekijöistä johtuen jatkuvasti. Tämä tekijä voidaan eliminoida kun siirrytään tutkimaan raakakaasupitoisuuksia.

BMW:ltä dynamometrissä mitatut CO₂-raakakaasupitoisuudet prosentteina näkyvät taulukosta 13.

Taulukko 13. Dynamometrillä mitatut raakakaasuarvot

BMW:n CO ₂ dynamometri mittaukset	Dynamometrissä mitattu CO ₂ raakakaasu [%]
Hiukkassuodattimella, kuormalla	4,5180
Hiukkassuodattimella, ilman kuormaa	2,2210
Ilman hiukkassuodatinta, kuormalla	4,5404
Ilman hiukkassuodatinta, ilman kuormaa	2,3897

Raakakaasun CO₂ pitoisuusprosentista ja Alastarolla mitatuista laimennetuista CO₂-arvoista [ppm] lasketaan laimennussuhde kaavan 10 mukaan.

$$\frac{\text{CO}_2 \text{ raakakaasu} * 10^4}{\text{CO}_2 \text{ laimennettu}} \quad (10)$$

Taulukossa 14 näkyy Passatin laimennussuhde. Taulukossa on käytetty dynamometrillä mitattuja BMW:n CO₂-raakakaasuaroja, koska Passatin dynametrimittaukset eivät onnistuneet CO₂-mittarin takia. Tämä ei kuitenkaan vaikuta mittaustulosten vertailuun, koska laimennussuhde vaikuttaa absoluuttisiin lukumääräpitoisuuksiin, mutta ei niiden suhteisiin.

Taulukosta näemme laimennussuhteet eri sykleillä, kuormalla eli load ja ilman kuormaa eli No_load. Vain denuderoidut mittaussykliit ovat näkyvissä. Muut mittaussykliit löytyvät liitteistä 1 - 8.

Taulukko 14. Passatin laimennussuhde

Passat	Laimentunut CO ₂ -arvo [ppm]	Raakakaasu CO ₂ -arvot [%]	Laimennussuhde (Kaava 10)
Hiukkassuodattimella			
Load4	473,7868	4,5180	95,36
Load8	459,8375	4,5180	98,25
No_load4	434,8352	2,2210	50,85
No_load7	422,6104	2,2210	52,32
No_load8	428,3710	2,2210	51,61
Ilman hiukkassuodatinta			
Load12	471,2519	4,5404	96,35
Load13	469,8700	4,5404	96,63
Load14	483,3374	4,5404	93,94
No_load12	427,5320	2,3897	51,95
No_load13	418,9364	2,3897	53,02
No_load14	451,7588	2,3897	49,16

BMW:n laimennussuhde näkyytaulukossa 15. Laimennussuhde laskettu kaavaa 10 käyttämällä.

Taulukko 15. BMW:n laimennussuhde

BMW	Laimentunut CO ₂ -arvot [ppm]	Raakakaasu CO ₂ -arvot [%]	Laimennussuhde (Kaava 10)
Hiukkassuodattimella, kuormalla			
Load7	627,3000	4,5180	72,0230
No_load7	416,6900	2,2210	53,0610
Ilman hiukkassuodatinta			
Load11	100,1699	4,5404	100,1699
Load14	80,2177	4,5404	80,2177
Load15	77,6761	4,5404	77,6761
No_load12	433,1200	2,3897	51,2791
No_load15	439,6100	2,3897	50,5221
No_load16	419,9200	2,3897	52,8910

Hiukkasten lukumääräpitoisuuden konversiovektori (ConV) ja ELPI:n mittamien virtojen avulla pystytään laskemaan hiukkasten lukumäärän kokoja-kauma ja kuinka monta hiukkasta törmäsi kullekin mittaustasolle.

Taulukosta 16 näemme BMW:itä mitatut ELPI:n virrat hiukkassuodattimella ja ilman hiukkassuodatinta ja kuormalla ja ilman kuormaa.

Taulukko 16. BMWstä mitatut ELPI:n keskimääräiset virrat kuormalla ja ilman kuormaa ja hiukkassuodattimen kanssa ja ilman hiukkassuodatinta, virran arvot on femtoampeereina

ELPI:n virrat [fA]	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load7	43	250	743	2123	1847	1128	474	150	84	67	58	48
No_load7	24	163	429	741	548	310	137	46	27	18	17	8
Ilman hiukkassuodatinta												
Load11	31	170	633	2781	2932	1536	576	197	95	82	63	57
Load14	64	333	984	3249	3319	1820	704	288	135	107	90	67
Load15	68	311	972	3584	3481	1904	735	309	145	117	98	84
Noload12	50	248	653	1350	926	449	213	94	47	40	29	30
Noload15	52	259	622	1212	800	390	187	95	51	38	34	31
Noload16	30	145	455	1312	985	473	213	106	51	37	29	26

Taulukosta 17 näemme Passatista ELPI:n mittaamat virta-arvot kuormalla ja ilman kuormaa ja hiukkassuodattimen kanssa ja ilman hiukkassuodatinta. Passatin ELPI:n virta arvoista näkee, etteivät arvot ole pysyneet koko ajan samantasoisina vaan joissakin sykleissä on suuria eroja.

Taulukko 17. Passatista mitatut ELPI:n virrat kuormalla ja ilman kuormaa ja hiukkassuodattimen kanssa ja ilman hiukkassuodatinta, virran arvot on femtoampeereina

ELPI:n virrat [fA]	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load4	59	305	970	2743	2104	1291	512	183	146	70	75	88
Load8	52	257	743	1626	1036	654	251	104	93	37	37	58
No_load4	112	326	654	1068	699	442	202	84	96	32	39	51
No_load7	63	289	690	1149	725	458	188	81	87	29	31	53
No_load8	27	131	469	1195	780	489	187	78	71	22	22	46
Ilman hiukkassuodatinta												
Load12	59	308	942	2318	1475	957	335	162	87	82	73	57
Load13	29	139	535	2291	2188	1457	451	193	91	82	73	49
Load14	42	152	601	2777	3390	2447	716	290	136	121	111	89
No_load12	27	139	507	1474	994	630	207	97	50	49	45	28
No_load13	13	85	353	1403	1281	819	243	105	52	49	47	29
No_load14	13	100	443	1830	1854	1215	349	150	76	70	68	52

Hiukkasten kokojakauma saadaan laskettua kaavasta 11. Siinä on käytetty ELPIn mittaamia virtoja taulukoista 16 ja 17 ja CO₂-laimennussuhteita taulukosta 14 ja 15. Näin laimennetut mittaustulokset on muutettu vastaamaan raakakaasun pitoisuuksia.

$$dN / d \log Dp = \text{ConV} * \text{ELPIn virta} * \text{laimennuss uhde} \quad (11)$$

Taulukossa 18 on laskettu kaavaa 11 käyttäen BMW:n hiukkasten lukumääräpitoisuus.

Taulukko 18. BMW:n lukumääräpitoisuus, yksikkö on 1 / cm³

dN/dlogDp	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load7	117685	683167	2029642	5799138	5045447	3080285	1294665	408854	229832	182196	158914	132359
No_load7	47896	328305	863293	1491208	1102426	623431	274725	92552	54211	36236	34831	16860
Ilman hiukkassuodatinta												
Load11	118109	646832	2404585	10566436	11139852	5837234	2189936	747971	360234	312829	239702	215194
Load14	195609	1013737	2994238	9883606	10097956	5535645	2141425	876899	411786	324080	272503	204345
Load15	199831	915594	2863110	10559746	10253747	5609474	2164289	910586	426818	343857	288850	248274
No_load12	97785	482026	1270378	2624705	1801245	872873	414952	183178	90563	76875	56302	58869
No_load15	98961	495461	1192005	2323080	1533229	746464	358825	182256	97396	73528	65667	59163
No_load16	59581	289896	912397	2632297	1975210	947890	427888	213310	101830	74227	58362	51218

Taulukossa 19 on Passatin kokonaismääräjakauma käyttäen kaavaa 11.

Taulukko 19. Passatin lukumääräpitoisuus, yksikkö on 1 / cm³

dN/dlogDp	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load4	215095	1103760	3506945	9919502	7608098	4667948	1851371	660071	526685	253593	270421	316994
Load8	192406	957547	2769252	6057611	3862194	2437278	934407	387314	345772	137107	138910	216447
No_load4	215845	629161	1261034	2059004	1347124	852939	388812	162305	184386	61726	74273	98880
No_load7	125419	574113	1368916	2279341	1438446	907865	372866	161291	172190	56673	60628	105592
No_load8	52267	256579	917951	2339273	1526190	957242	366062	153192	138329	42592	43265	90124
Ilman hiukkassuodatinta												
Load12	214081	1124702	3441599	8469439	5388282	3496813	1223564	592414	317735	298458	266437	209585
Load13	107030	507927	1961073	8394647	8018004	5340128	1651087	705780	334354	299200	268068	180003
Load14	150647	542050	2142344	9892148	12079348	8716657	2550676	1032465	485013	429701	394981	316456
No_load12	53424	273443	998117	2903680	1959052	1241535	407889	191750	99155	96137	88165	55955
No_load13	26968	171227	710281	2820650	2576268	1647250	488380	211485	103920	98450	93528	57758
No_load14	24995	186334	825830	3412305	3456662	2265658	650145	280115	141261	130982	126409	97552

Hiukkasten pitoisuus kullakin ELPIn asteella (i= 1...12) saadaan tulona kaavan 12 mukaan.

$$dN_i = \frac{dN_i}{d \log Dp_i} * \log_{10} \frac{Dp_{i+1}}{Dp_i} \quad (12)$$

Suure dN_i osoittaa, kuinka paljon hiukkasia on törmännyt mittatasolle i. Taulukoista 20 ja 21 nähdään, että suurella kuormalla hiukkasten lukumäärä on moninkertainen verrattuna määrään ilman kuormaa. Tämä johtuu siitä, että

kuormituksessa joudutaan ruiskuttamaan enemmän dieselpolttoainetta, joten myös hiukkasia syntyy enemmän. Hiukkasten lukumäärä saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 12.

Taulukko 20. BMW:n hiukkastenkokonaislukumäärä, $1 / \text{cm}^3$

dNi	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load7	44440	153331	615693	1315000	1089102	693608	212017	83977	43518	41415	63065	52295
No_load7	18086	73685	261880	338143	237968	140382	44990	19010	10265	8237	13823	6661
Ilman hiukkassuodatinta												
Load11	44600	145176	729432	2396022	2404630	1314409	358628	153631	68210	71110	95127	85023
Load14	73866	227525	908303	2241185	2179729	1246498	350684	180112	77971	73667	108144	80737
Load15	75460	205497	868525	2394505	2213357	1263123	354428	187032	80817	78163	114631	98093
No_load12	36925	108187	385370	595172	388814	196551	67953	37624	17148	17475	22344	23259
No_load15	37369	111202	361595	526777	330960	168086	58762	37435	18442	16714	26060	23376
No_load16	22499	65065	276776	596894	426366	213443	70072	43813	19281	16873	23161	20236

Taulukossa 21 nähdään hiukkasten kokonaislukumäärä eri mittatasoilla. BMW:ssä ja Passatissa kuormalla on moninkertaiset arvot verrattuna määrään ilman kuormaa.

Taulukko 21. Passatin hiukkastenkokonaislukumäärä, yksikkö $1 / \text{cm}^3$

dNi	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load4	7164190	81224	247730	1063833	2249325	1642272	1051113	303184	135577	99727	57645	107317
Load8	4353595	72656	214913	840054	1373611	833687	548818	153020	79553	65471	31166	55127
No_load4	1769494	81507	141210	382535	466895	290788	192062	63673	33337	34913	14031	29475
No_load7	1828722	47361	128855	415261	516858	310501	204430	61061	33129	32604	12883	24060
No_load8	1611287	19737	57587	278461	530448	329441	215549	59947	31465	26192	9682	17170
Ilman hiukkassuodatinta												
Load12	80841	252430	1044010	1920512	1163106	787401	200373	121680	60163	67843	105736	82807
Load13	40416	114000	594892	1903552	1730753	1202472	270385	144965	63309	68012	106384	71119
Load14	56887	121658	649881	2243122	2607428	1962788	417704	212065	91836	97676	156749	125032
No_load12	20174	61372	302779	658432	422878	279565	66797	39385	18775	21853	34989	22108
No_load13	10184	38431	215464	639605	556109	370922	79978	43438	19677	22379	37117	22820
No_load14	9439	41821	250516	773767	746150	510173	106469	57535	26747	29774	50166	38543

Hiukkasten kokonaislukumääräpitoisuus on N_{tot} eri mittatasojen pitoisuuksien summa.

Kun tiedetään hiukkasten lukumäärän kokojakauma pystytään laskemaan hiukkasten tilavuus- ja massakokojakauma. Hiukkaset oletetaan palloiksi, joiden tilavuus saadaan kertomalla lukumäärä pallon tilavuudella (kaava 13).

$$dV_i / d \log Dp_i = \frac{dN_i}{d \log Dp_i} * \frac{4\pi r_i^3}{3}, r_i = \frac{D_i}{2} \quad (13)$$

Taulukosta 22 nähdään miten tilavuuskoko kasvaa tasosta 1 suurempaan päin. Tämä johtuu tietenkin hiukkasten halkaisijasta D_i , joka kasvaa sitä mukaa mitä suurempi taso.

Taulukko 22. BMW:n hiukkasten tilavuuskokojakauma, yksikkö on $\mu\text{g} / \text{cm}^3$

dVi/dlogDpi	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load7	0	4	67	1186	4759	13327	21464	24258	53310	178209	1342145	17231466
No_load7	0	2	28	305	1040	2697	4555	5491	12574	35443	294173	2194959
Ilman hiukkassuodatinta												
Load11	0	3	79	2161	10507	25255	36306	44378	83558	305983	2024464	28015555
Load14	0	5	98	2021	9524	23950	35502	52028	95515	316988	2301493	26603155
Load15	0	5	94	2159	9671	24269	35881	54026	99002	336333	2439551	32322118
No_load12	0	3	42	537	1699	3776	6879	10868	21006	75193	475515	7664024
No_load15	0	3	39	475	1446	3230	5949	10814	22591	71919	554611	7702331
No_load16	0	2	30	538	1863	4101	7094	12656	23620	72602	492913	6667906

Taulukosta 23 nähdään myös sama mitä taulukosta 22 eli tilavuus- ja massapitoisuudet kasvavat hiukkasten koon kasvaessa.

Taulukko 23. Passatin hiukkasten tilavuuskokojakauma, yksikkö on $\mu\text{g} / \text{cm}^3$

dVi/dlogDpi	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load4	0	6	115	2028	7176	20196	30693	39163	122167	248043	2283908	41268627
Load8	0	5	91	1239	3643	10545	15491	22980	80203	134107	1173195	28178617
No_load4	0	3	41	421	1271	3690	6446	9630	42769	60375	627288	12872948
No_load7	0	3	45	466	1357	3928	6182	9570	39940	55433	512046	13746796
No_load8	0	1	30	478	1439	4142	6069	9089	32086	41660	365402	11733026
Ilman hiukkassuodatinta												
Load12	0	6	113	1732	5082	15129	20285	35149	73700	291927	2250262	27285300
Load13	0	3	64	1717	7562	23104	27373	41875	77555	292653	2264033	23434137
Load14	0	3	70	2023	11393	37713	42286	61258	112501	420298	3335907	41198532
No_load12	0	1	33	594	1848	5372	6762	11377	22999	94033	744620	7284652
No_load13	0	1	23	577	2430	7127	8097	12548	24105	96296	789911	7519379
No_load14	0	1	27	698	3260	9802	10778	16620	32766	128116	1067617	12700043

10 MITTAUSTULOKSET

10.1 Laimennussuhteet

CO₂-mittaukset tehtiin Stadian kylmälaboratoriossa. Käytössä oli Nuuskija-auton oma CO₂-mittalaite. Auton pakoputkeen kytkettiin laimennin, jolla saatiin simuloitua realistista ajotilannetta, jossa pakokaasu laimentuu ilman kanssa ennen mittalaitetta. Tässä dynamometri mittauksessa laimennussuhde oli 84:1. Tarvittiin myös ilmankuivain, jolla saatiin nokihiukkasista nesteet haihdutettua pois. CO₂-arvoilla saatiin säädettyä kaavioiden pysty akselia vastaamaan niiden kuormaa paremmin. Mittaukset eivät onnistuneet Passatin osalta, joten tarkkoja määriä ei vielä tiedetä. Tällä ei ole kuitenkaan vaikutusta hyötysuhteeseen vaan vain tilastojen y-akseliin eli hiukkasten lukumäärään. Taulukosta 24 näemme raakakaasun määrän, joka ilmoitetaan prosentin miljoonasosassa.

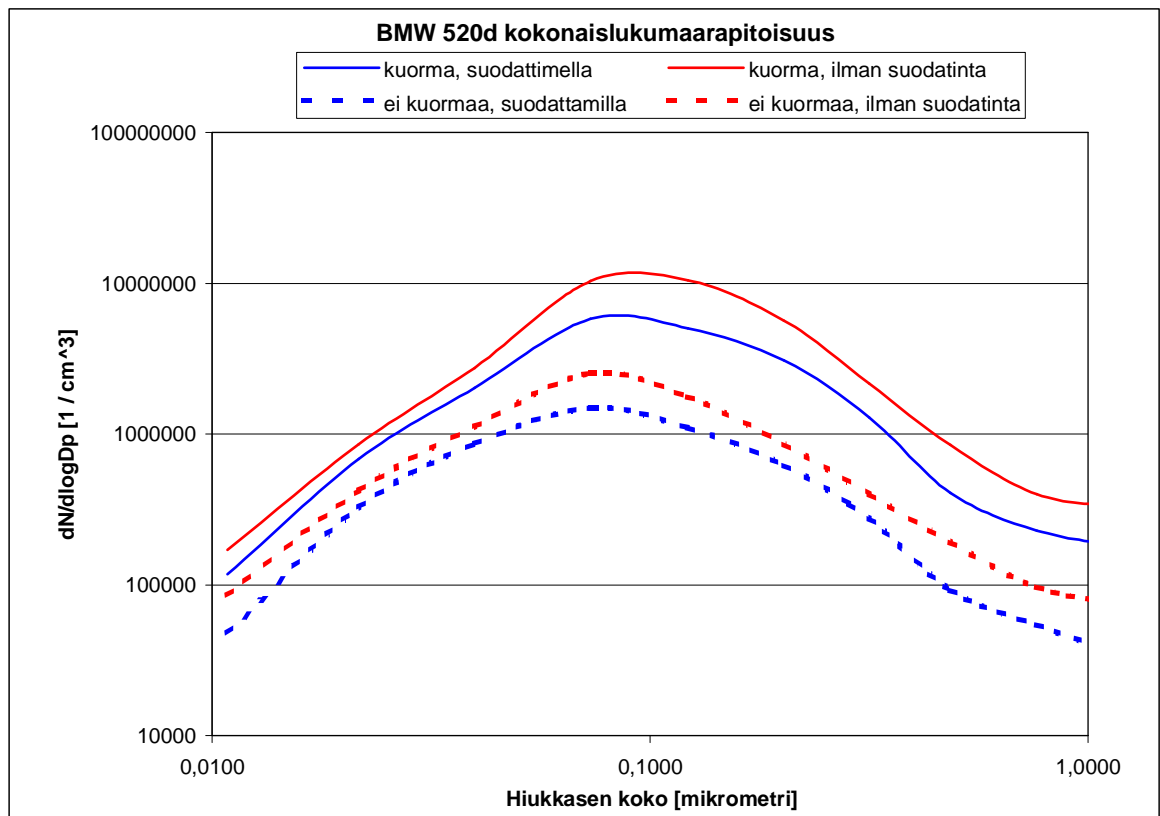
Taulukko 24. BMW:n dynametrimittauksesta mitatut raakaasut

BMW:n CO ₂ dynamometri mittaukset	Dynamometrissä mitattu CO ₂ raakakaasu [% ppm]
Hiukkassuodattimella, kuormalla	4,5180
Hiukkassuodattimella, ilman kuormaa	2,2210
Ilman hiukkassuodatinta, kuormalla	4,5404
Ilman hiukkassuodatinta, ilman kuormaa	2,3897

10.2 ELPIn kokojakauma

Mittauksissa katsottiin hiukkasten lukumäärä ja kokonaismassamäärää. BMW:n hiukkaslukumäärämittauksissa näkyy hyvin, että hiukkassuodattimen kanssa niitä on vähemmän kuin ilman suodatinta. Kaikkia ajosyklejä ei voi käyttää, koska tilanteet niissä vaihtelevat niin suuresti. Sovittiin, että käytetään vain denuderoituja ajosyklejä, koska niistä on haihtunut nestemäinen aines, siten se on parhaiten vertailtavissa. Muut ajosyklit löytyvät liitteistä 1 - 8.

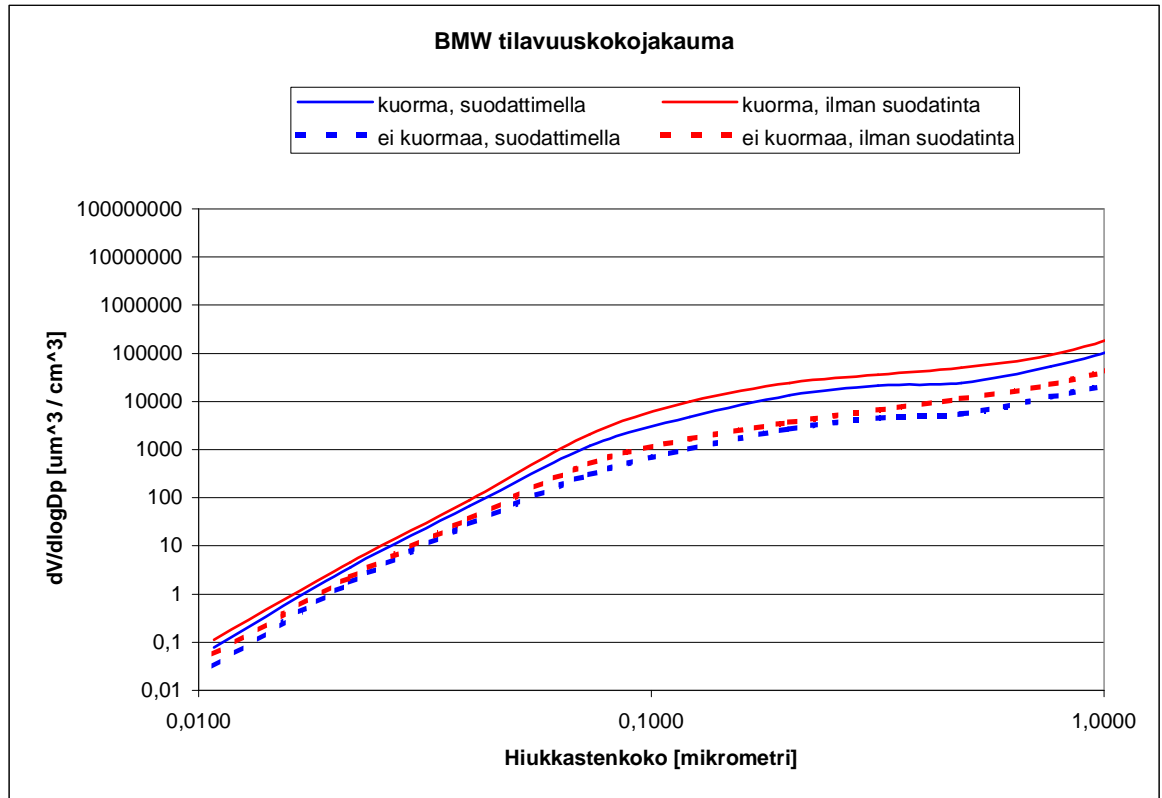
Kuvissa 11 ja 12 näemme eri autojen hiukkaslukumääräpitoisuus ja massa-kokojakauma mittauksien tulokset. Kuvat on piiretty käyttäen denuroitujen ajosyklien keskiarvoja. BMW:n mittauksissa suodattimen kanssa denuderointia käytettiin raskaissa ajosykleissä Load7 ja kevyessä ajosyklissä No_load7. Ilman hiukkassuodatinta ja denuderoinnilla ajettiin kuormitusykyllä Load11, 14 ja 15, ja kevyellä syklillä No_load12, 15 ja 16.



Kuva 11 BMW:n hiukkasten kokonaislukumääräpitoisuus

BMW:n hiukkaslukumääräpitoisuuskuvasa näkyy, että pitoisuus on pienempi hiukkassuodattimen kanssa. Suurimmat pitoisuudet ovat noin 0,1 μm kokoluokassa eli mittatasoilta 3 - 8. Alussa ja lopussa hiukkasten lukumääräpitoisuus on pienempi. BMW:n hiukkasmittaukset onnistuivat hyvin ja näyttää, että suodatin toimi hyvin. Nähdään 52 - 58 % hyötysuhde verrattuna tilanteeseen ilman suodatinta kummassakin tilanteessa.

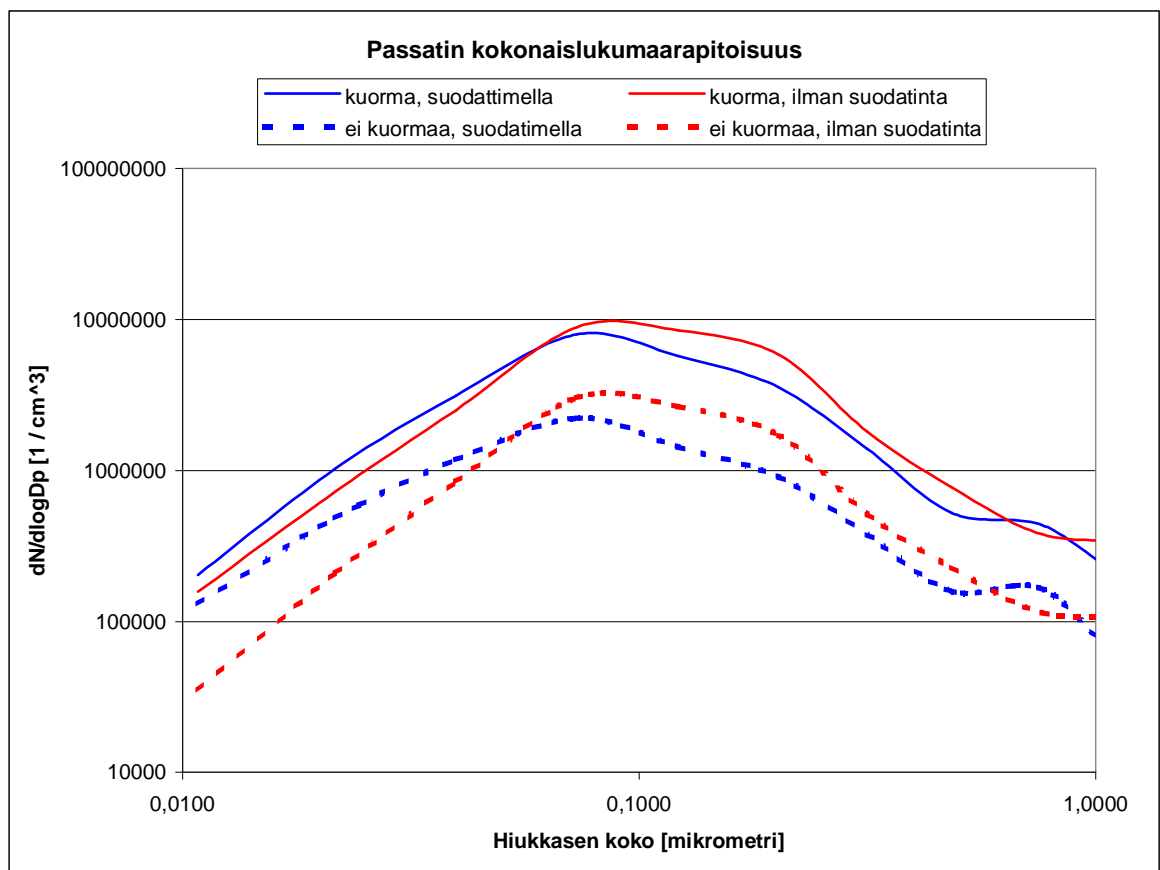
Kuvassa 12 nähdään BMW:n tilavuuskokojakauma. Nähdään, että kummasakin tilanteessa hiukkassuodatin on parempi. Tilavuuskoko on hyvin pieni alussa, johtuen hiukkasten pienestä halkaisijasta, mutta kasvaa mitä isompi hiukkaskoko on. Hiukkassuodattimen hyötysuhde on tilavuuskokojakaumassa noin 30 %.



Kuva 12. BMW hiukkasten tilavuuskokojakauma

Passatissa denuderoituja mittasyklejä oli hiukkassuodattimen kanssa kuormitusykeillä Load4 ja 8. Hiukkassuodattimen kanssa ja kevyillä ajosykeillä No_load4, 7 ja 8. Ilmanhiukkassuodatinta denuderoituja mittaussyklejä oli raskaalla syklillä Load12, 13 ja 14, ja kevyellä syklillä No_load12, 13 ja 14. Kuvassa 13 näkyy Passatin hiukkaslukumääräpitoisuus.

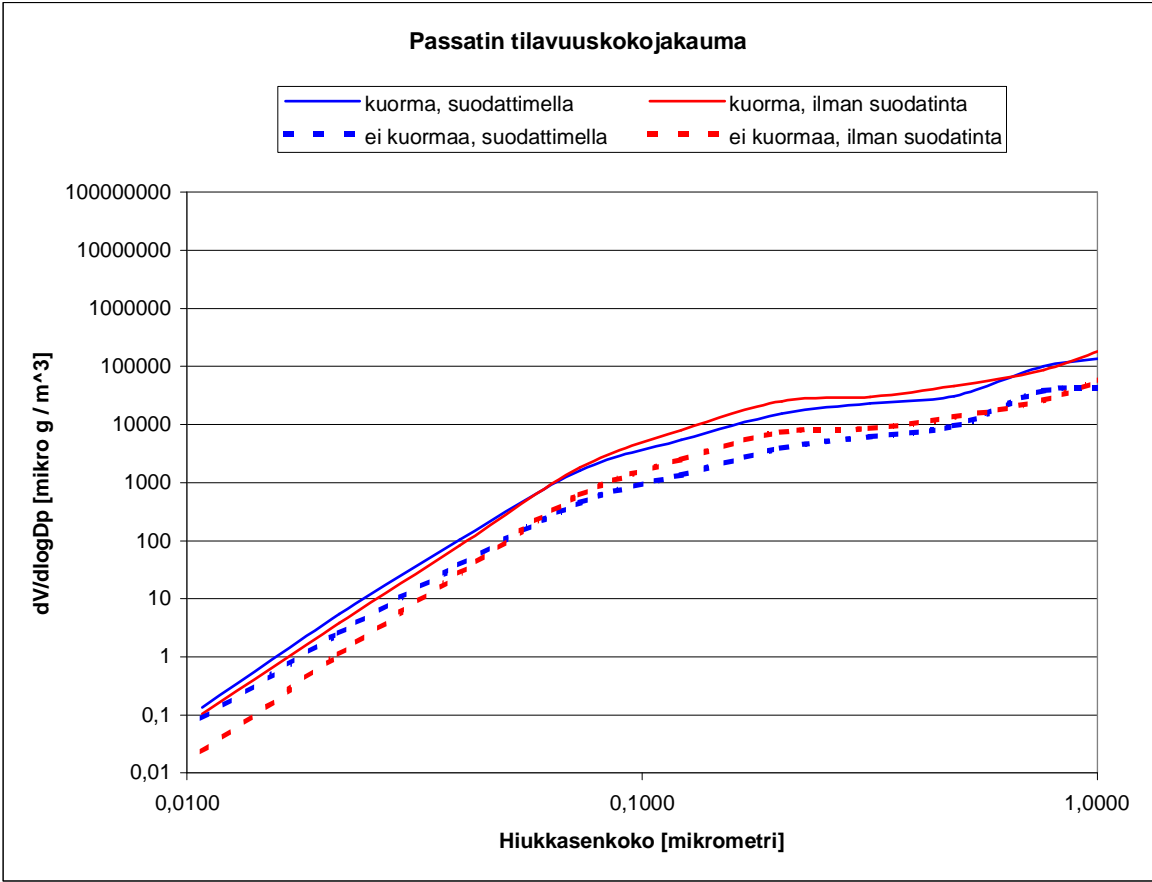
Kuvasta 13 nähdään, että Passatin hiukkaslukumääräpitoisuus on hieman epätasaisempi kuin BMW:n. Alussa näyttää, että hiukkaslukumääräpitoisuus on hiukkassuodattimen kanssa suurempi kuin ilman hiukkassuodatinta. Voi olla, että hiukkassuodatin ei toimi parhaimmalla hyötysuhteella pienissä hiukkasissa. 0,1 μm :n kokoluokassa hiukkassuodatin taas alkaa toimia paremmin. Passatissa hyötysuhde ei ole niin hyvä kuin vanhemmassa BMW:ssä. Passatin hyötysuhde hiukkaslukumääräpitoisuudessa on 24 - 28 %:n tasoa. Kuvassa 14 näkyy Passatin tilavuuskokojakauma.



Kuva 13. Passatin hiukkaslukumääräpitoisuus

Passatin tilavuuskokojakaumassakin alussa mittausravot ovat todella lähellä toisiaan. Alussa hiukkassuodattimella varustettuna arvot ovat huonommat kuin ilman suodatinta, mutta muuttuvat taas 100 nanometrini kohdalla. Passatin mittaukset onnistuivat myös hyvin. Hyötysuhde on pienempi kuin van-

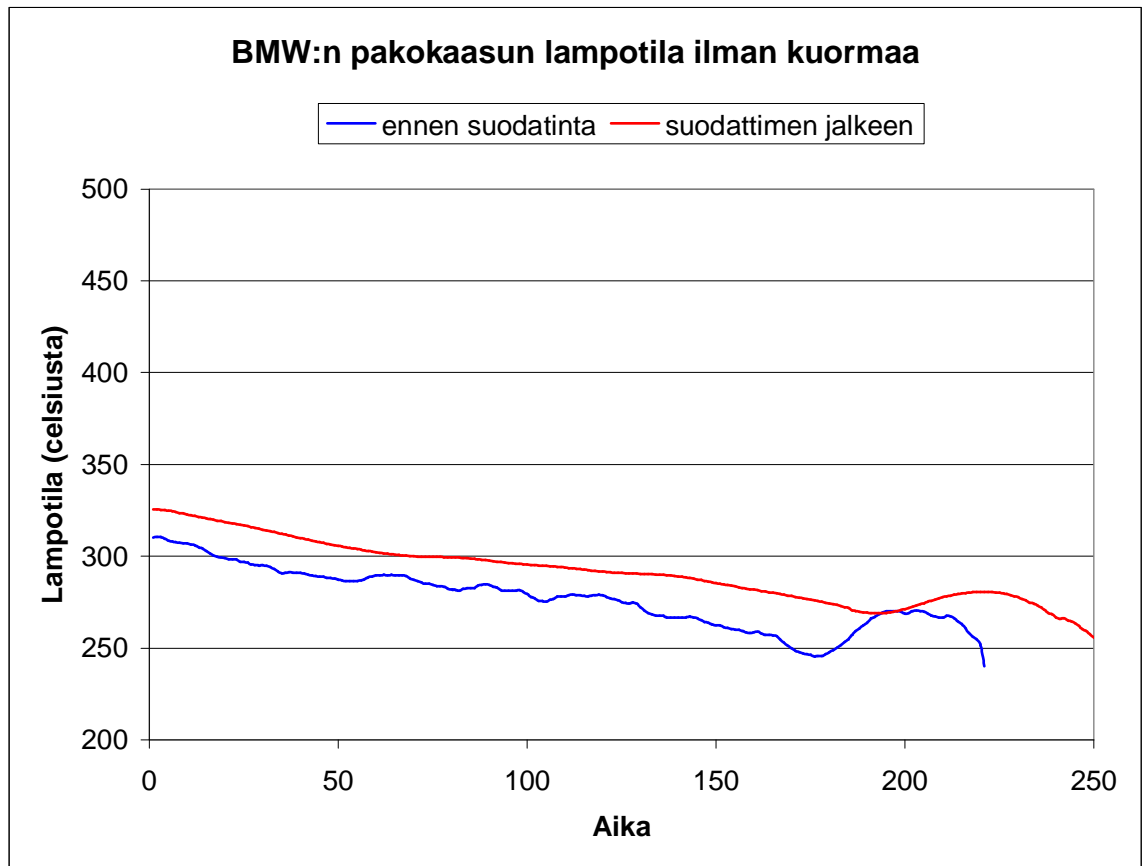
hemmassa BMW:ssä. Silti saadaan noin 28 %:n hyötysuhde tilavuuskokoja-
kaumaan.



Kuva 14. Passatin tilavuuskokojakauma

10.3 Lämpötilamittauksien tulokset

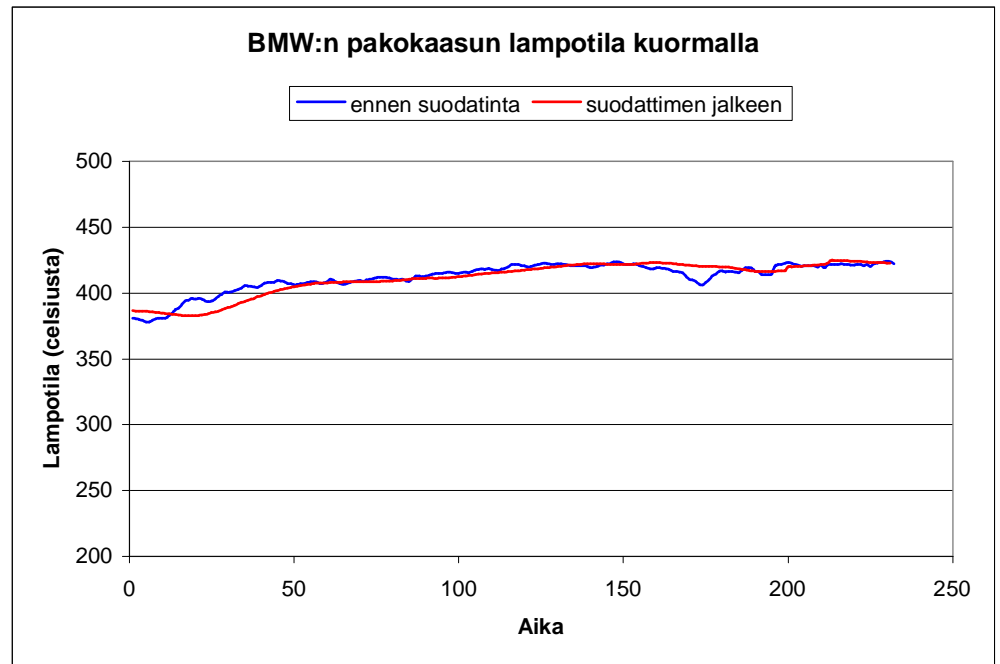
Lämpötilamittaukset saatiin suoraan lämpötila-anturista lämpötila-arvona. Lämpötilat eri ajosykleiltä laskettiin keskiarvoksi ajan mukaan. Kuvassa 15 näkyvät BMW:n pakokaasun lämpötilat ilman kuormaa.



Kuva 15. BMW:n pakokaasun lämpötilamittaukset ilman kuormaa

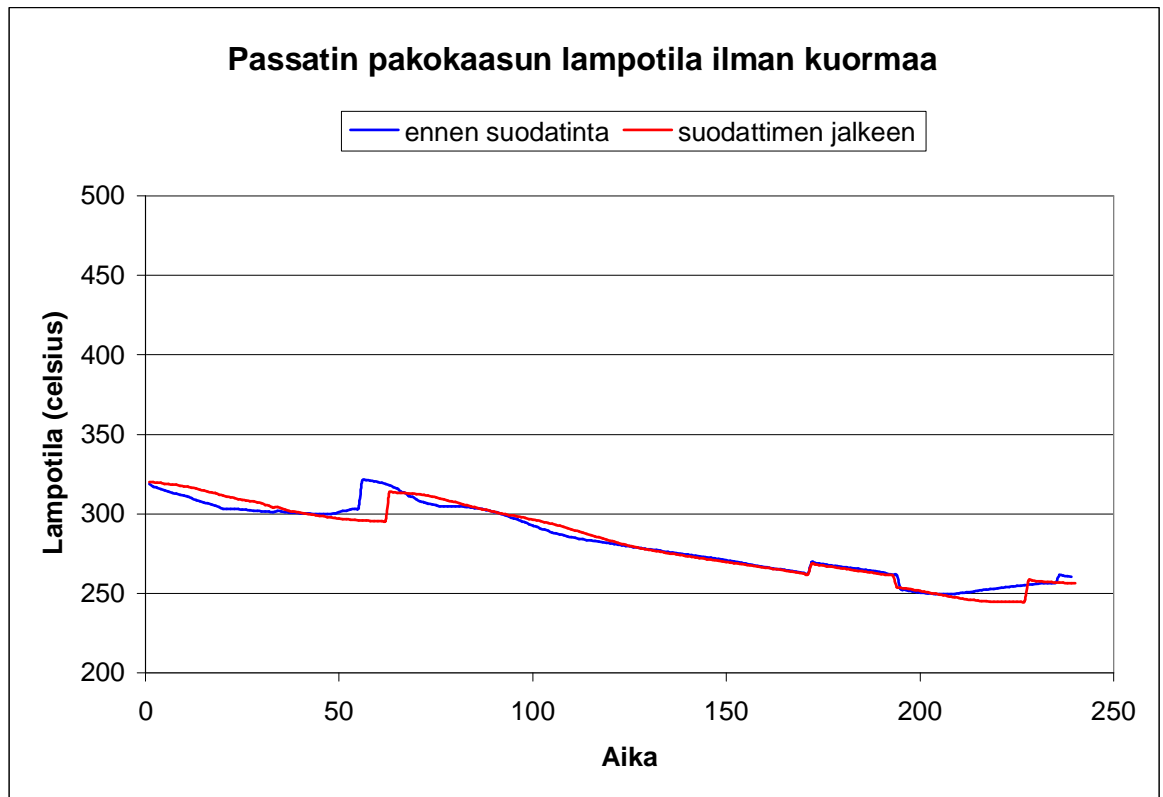
Ilman kuormaa BMW:n lämpötilojen keskiarvo on 280 °C. Kuvasta näkyy myös miten ajan mittaan käyrä laskee eli pakokaasu alkaa jäähtyä kuormitussyklin jälkeen. Lämpötila ennen suodatinta on hieman viileämpää kuin suodattimen jälkeen. Tämä voi johtua lämpötila-anturin kiinnityspaikasta. Kuvassa 16 näkyy BMW:n pakokaasun lämpötila kuormalla.

Kuvasta 16 nähdään, että lämpötila kasvaa hieman alussa, mutta alkaa sitten tasaantua hieman yli 400 °C:seen. Kevyen syklin jälkeen alkaa raskas-sykli, joten alussa tapahtuu hieman lämpötilan nousua. BMW:n pakokaasujen lämpötila ilman kuormaa on keskimäärin noin 280 celsius astetta ja kuorman kanssa noin 410 celsiusastetta. BMW:n tapauksessa lämpötilavaa-timukset täyttyvät.



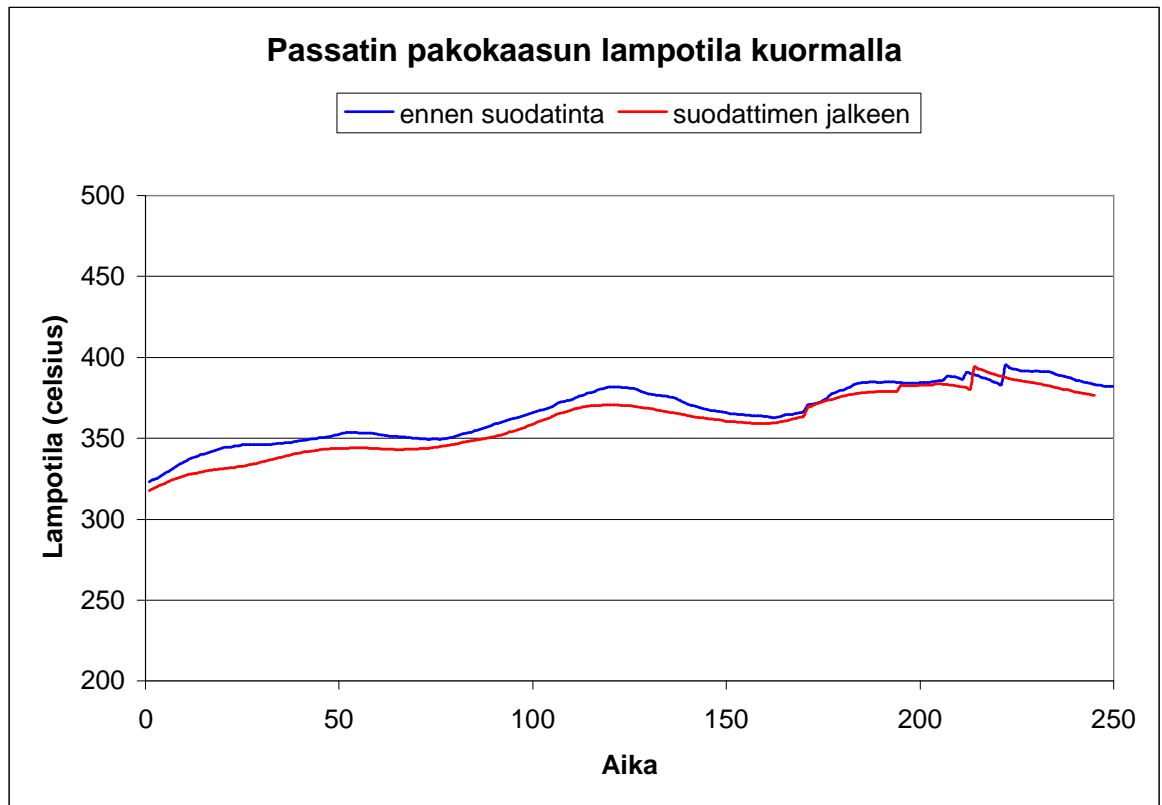
Kuva 16. BMW:n pakokaasun lämpötilamittaukset kuormalla

Kuvassa 17 näkee taas kuinka lämpötila laskee ajan mittaan ja alkaa tasoittua noin 250 °C:n yläpuolelle. Lämpötilat ennen ja jälkeen suodatinta ovat samat. Kuvassa 18 näkyy Passatin pakokaasujen lämpötila kuormalla ennen suodatinta ja sen jälkeen.



Kuva 17. Passatin pakokaasun lämpötila mittaukset ilman kuormaa

Kuvasta 18 näkyy Passatin pakokaasun lämpötila kuormitusyökin aikana.



Kuva 18. Passatin pakokaasun lämpötila mittaukset kuormalla

Lämpötila kuormalla tapahtuu samanlainen ilmiö kuin BMW:ssä eli lämpötila alkaa nousta ajan mittaan. Lämpötiloissa ennen ja jälkeen suodattimen ei ollut suuria eroja. Passatin ilman kuormaa pakokaasun lämpötila oli keskimäärin noin 280 celsiusastetta ja kuormalla noin 360 celsiusastetta. Passat täyttää hiukkassuodattimen vaatiman lämpötilavaatimuksen.

11 PÄÄTELMÄT JA TULEVAISUUS

Hiukkassuodatin poistaa haitallisia hiukkasia pakokaasusta. On tärkeää saada enemmän tietoa siitä, kuinka tehokkaasti se niitä puhdistaa. Joillakin automalleilla alkaa olla hiukkassuodatin vakiona autossa, kun taas osalle autoista sen saa lisävarusteena. Ei ole tietoa, minkälaisia hiukkassuodattimia eri valmistajat käyttävät autoissaan ja kuinka tehokkaita ne ovat. Suomen ajoneuvoverolakiin on tehty ehdotus, joka uudistaisi ajoneuvoveron siten, että se määräytyisi auton CO₂-päästöjen mukaan vuodesta 2010 lähtien. Verolakehdotuksista on kuitenkin jätetty täysin huomioimatta terveydelle haitalliset päästöt kuten pienhiukkaset ja typenoksidit. Järkevä vaihtoehto olisi tehdä kaava, jossa käsiteltäisiin kaikkien päästöjen arvot ja niistä laskettaisiin ajoneuvovero. Tällöin asentamalla hiukkassuodatin vanhaan autoon pitäisi saada auton ajoneuvovero pienemmäksi.

Alastarolla tehtyjen mittauksien perusteella jälkiasennettava hiukkassuodatin toimii hyvin. Varsinkin vanhemmassa autossa eli BMW:ssä sen hyötysuhde oli noin 52 - 58 %:n tasoa. Uudemmassa vuoden 2007 Passatissa sen hyötysuhde ei ollut suuri, mutta silti se suodatti noin 25 - 30 % hiukkasista. Mittaukset osoittavat, että jälkiasennettavasta hiukkassuodattimesta on hyötyä. Tämä on kuitenkin vain yhden valmistajan hiukkassuodatin ja hyötysuhde voi vaihdella eri valmistajien välillä.

Tulevaisuudessa olisi hyvä tutkia, miten hiukkassuodattimet toimivat pitemmän aikaa ja miten hyvin hiukkassuodattimet toimivat kylmissä sääolosuhteissa. RetroEm-tutkimusta on tarkoitus jatkaa suuremmalla valikoimalla autoja. Tarkoituksena olisi löytyä 5 – 8 dieselautoa, johon asennettaisiin Eco-cat-yritykseltä saatavat jälkiasennettavat hiukkassuodattimet.

LÄHDELUETTELO

- [1] *EURO-päästönormit* [verkkodokumentti, viitattu: 20.1.2008]. Saatavissa: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [2] Laitala, Marko, *Tarkista löytyykö dieselistäsi hiukkassuodatin. Hiukkaspäästöt* [verkkodokumentti, viitattu: 22.1.2008]. Tekniikka ja Talous, 13.12.2007. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article51385.ece>
- [3] *Autoteknillinen taskukirja 6. painos*. Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- [4] *Twintec-yrityksen kotisivut* [verkkodokumentti, viitattu: 20.1.2008]. Saatavissa: Twintec.de
- [5] Eduskunta, *VaVM 23/2007 vp - HE 147/2007 vp, Hallituksen esitys laiksi autoverolain muuttamisesta* [verkkodokumentti, viitattu: 20.1.2008]. Saatavissa: http://www.eduskunta.fi/faktatmp/utatmp/akxtmp/vavm_23_2007_p.shtml
- [6] *Motiva Oy:n verkkosivut* [verkkodokumentti, viitattu: 10.1.2008]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/yjay/kuljetusala/pakokaasupaastot/>
- [7] *Ikaalinen ympäristöterveysohjelma* [verkkodokumentti, viitattu: 20.4.2008]. Saatavissa: <http://ikaalinen.net/pdf/ymparistoterveysohjelma.pdf>
- [8] Laurikko, Juhani, *Vaihtoehtoisten polttoaineiden ja ajoneuvotekniikan kehitys sekä tulevaisuus liikenteen päästöjen vähentämiseksi osa 2* [verkkodokumentti, viitattu: 13.2.2008]. Saatavissa: http://www.ytv.fi/NR/rdonlyres/DAB10824-9B24-4B01-8237-B36F82B66D10/0/kehitys_netti_osall.pdf
- [9] R. Brück - P. Hirth - R. Konieczny, EMITEC GmbH, *The PM Metalit; Experience with the bypass-flow particulate trap with regard to the reduction of particulate number and mass for passenger car and truck applications* [verkkodokumentti, viitattu: 18.4.2008]. 03/2006. Saatavissa: <http://www.emitec.com/download/library/en/Endversion.pdf>
- [10] Laurikko, Juhani, *Dieselpäästöjen mittaukset ja päästöjen merkitys ympäristön ja terveyden kannalta*. Diesel tekniikka sekä poltto- ja voiteluaineet -seminaari 15-16.10.2003.
- [11] *What is AdBlue®?* [verkkodokumentti, viitattu: 5.2.2008]. Saatavissa: <http://www.vegora.hu/vegora/English/adblue.html>
- [12] Ranalli, Marco – Schmidt, Stefan – Watts, Lee, *Automotive Engineer PLUS – Powertrain case studies, NOx-Particulate Filter (NPF): Evaluation of an After-Treatment Concept to Meet Future Diesel Emission Standards* [verkkodokumentti, viitattu: 25.4.2008]. ArvinMeritor LVS, Air and Emission Technologies. Saatavissa: http://www.ae-plus.com/key%20topics/cs-powertrain_ArvinM1.htm

- [13] *BMW, BMW Technology Guide: Digital Diesel Electronics (DDE)* [verkkodokumentti, viitattu: 20.4.2008]. Saatavissa: http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/technology_guide/articles/digital_diesel_electronics.html
- [14] Heimlander, Aleks, *Dieselautojen hiukkaspäästömittaukset*. Insinööriyö. Helsingin ammattikorkeakoulu. Helsinki 2006.
- [15] *Stadia – Air Quality Research* [verkkodokumentti]. Helsingin ammattikorkeakoulu. 2003 [viitattu: 20.3.2008]. Saatavissa: <http://nuuskija.stadia.fi/auto.htm>
- [16] *Dekati – ELPI Operating principles* [verkkodokumentti, viitattu: 10.1.2008] Saatavissa: http://www.dekati.com/cms/elpi/operating_principle
- [17] Pirjola, Liisa - Parviainen, Heikki – Rönkkö, Topi – Virtanen, Annele – Keskinen, Jorma, *Real-world particle emissions of light duty diesel vehicles (Ret-roEm)*. Loppuraportti 31.3.2008. Helsingin ammattikorkeakoulu.

Liite 1. Passatin ELPIn virrat

ELP:n virrat (fA)	Denuderointi	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Huikkassuodattimella, load eli kuormitusykli ja No_load eli kevyt sykli													
Load1	ei	5788	9816	7599	9912	9676	6406	3600	1989	1509	1396	1269	1476
Load2	ei	7032	11136	7252	10045	11084	8320	4140	2348	1799	1658	1510	1750
Load3	ei	1907	1795	1351	2896	2981	2122	1039	606	488	406	375	444
Load4	on	59	305	970	2743	2104	1291	512	183	146	70	75	88
Load5	ei	52	413	1365	2773	1924	1169	496	241	162	84	87	103
Load6	ei	4004	8093	7173	8500	7904	6162	3019	1837	1407	1262	1172	1343
Load7	ei	1109	935	1291	3636	3634	2409	985	520	379	290	262	290
Load8	on	52	257	743	1626	1036	654	251	104	93	37	37	58
No_load1	ei	528	790	1306	2209	1467	827	444	222	170	113	97	109
No_load2	ei	1972	1893	1723	3485	3095	2029	976	526	403	323	261	244
No_load3	ei	56	307	661	970	598	377	181	92	87	21	33	56
No_load4	ei	112	326	654	1068	699	442	202	84	96	32	39	51
No_load5	ei	45	287	755	1267	818	513	239	132	100	32	39	52
No_load6	ei	365	514	849	1449	1018	676	317	187	152	77	71	80
No_load7	on	63	289	690	1149	725	458	188	81	87	29	31	53
No_load8	on	27	131	469	1195	780	489	187	78	71	22	22	46
Ilman huikkassuodatinta													
Load9	ei	93	230	807	2110	1569	1021	401	202	96	85	71	59
Load10	ei	1457	1061	1245	4022	4102	2934	1180	629	402	375	328	326
Load11	ei	1567	1647	1749	5116	5135	3726	1440	789	507	472	426	440
Load12	on	59	308	942	2318	1475	957	335	162	87	82	73	57
Load13	on	29	139	535	2291	2188	1457	451	193	91	82	73	49
Load14	on	42	152	601	2777	3390	2447	716	290	136	121	111	89
No_load9	ei	56	256	751	1433	911	596	256	135	63	58	48	39
No_load10	ei	59	301	861	1604	993	651	272	146	70	66	56	46
No_load11	ei	93	363	992	1928	1217	793	313	171	83	76	64	46
No_load12	ei	27	139	507	1474	994	630	207	97	50	49	45	28
No_load13	on	13	85	353	1403	1281	819	243	105	52	49	47	29
No_load14	on	13	100	443	1830	1854	1215	349	150	76	70	68	52

Liite 2. Passatin kokonaismääräpitoisuus, yksikkö on 1 / cm³

dN/dlogDp	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella												
Load1	17714039	30041280	23256185	30336678	29612566	19605496	10712518	6026047	4619496	4271415	3884820	4518099
Load2	20232846	32042357	20665650	28901326	31691204	23940127	11913285	6754743	5177532	4769361	4343842	5035335
Load3	7094098	6675296	5023843	10770591	11087216	7892525	3862566	2252915	1816478	1511578	1395216	1652985
Load4	215095	1103760	3506945	9919502	7608098	4667948	1851371	660071	526685	253593	270421	316994
Load5	180251	1442450	4766547	9680680	6718496	4080233	1733035	839855	564658	292523	304985	360015
Load6	14067667	28431444	25200231	29861007	27766588	21648015	10606409	6453330	4942464	4434938	4116993	4719327
Load7	3911254	3298407	4553552	12822125	12464006	8495676	3473249	1832834	1336127	1023844	924221	1022616
Load8	192406	957547	2769252	6057611	3862194	2437278	934407	387314	345772	137107	138910	216447
No_load1	949335	1420328	2348509	3972927	2638207	1487075	798395	400150	306408	202810	174485	195874
No_load2	3307735	3175064	2890075	5846417	5190839	3403106	1637958	882583	675548	541776	437858	409293
No_load3	109388	600823	1293565	1898898	1171353	737751	354738	180971	170405	41918	65197	110434
No_load4	215845	629161	1261034	2059004	1347124	852939	388812	162305	184386	61726	74273	98880
No_load5	90417	575252	1512756	2536782	1636535	1026467	477673	264410	201136	64217	77939	103583
No_load6	688862	997690	1648512	2815133	1977212	1312994	615732	363408	294839	149487	138825	155617
No_load7	125419	574113	1368916	2279341	1438446	907865	372866	161291	172190	56673	60628	105592
No_load8	52267	256579	917951	2339273	1526190	957242	366062	153192	138329	42592	43265	90124
Ilman hiukkassuodatinta												
Load9	357680	882273	3102841	8106208	6029955	3922920	1542157	777063	367271	326951	273602	227075
Load10	5192107	3782169	4437623	14332756	14616971	10454588	4206027	2242332	1434076	1335629	1167359	1163163
Load11	5400710	5676933	6028878	17635603	17701858	12845241	4965029	2718490	1749179	1625509	1468448	1517485
Load12	214081	1124702	3441599	6469439	5386782	3496813	1223564	592414	317735	298458	266437	209585
Load13	107030	507927	1961073	8394647	8018004	5340128	1651087	705780	334354	299200	268068	180003
Load14	150647	542050	2142344	9892148	12079348	8716657	2550676	1032465	485013	429701	394981	316456
No_load9	113170	515218	1514208	2887548	1837008	1201254	515304	272008	127483	117056	95964	78545
No_load10	117395	603223	1725052	3214186	1990218	1305400	545831	292769	141152	131511	112343	92296
No_load11	182392	709459	1941364	3772510	2382420	1552574	611949	334213	162526	148229	125797	90923
No_load12	53424	273443	998117	2903680	1959052	1241535	407889	191750	99155	96137	88165	55955
No_load13	26968	171227	710281	2820650	2576268	1647250	488380	211485	103920	98450	93528	57758
No_load14	24995	186334	825830	3412305	3456662	2265658	650145	280115	141261	130982	126409	97552

Liite 3. Passatin hiukkasten lukumäärä, yksikkö on 1 / cm³

dNI	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodattimella, loadt eli kuormitusvykylä ja No_loadt eli kevyt sy												
Load1	6689148	6742512	7054772	6879079	6392121	4414701	1754304	1237733	874692	970942	1541702	1785104
Load2	7640296	7191637	6329604	6553602	6883994	5390759	1950944	1387405	980555	1084131	1723866	1989465
Load3	2678862	1498214	1523985	2442316	2393269	1777213	632542	462742	343946	343599	553696	653096
Load4	81224	247730	1063833	2249325	1642272	1051113	303184	135577	99727	57645	107317	125245
Load5	68066	323746	1445934	2195170	1450244	918773	283805	172504	106917	66494	121034	142242
Load6	5312210	6381198	7644499	6771217	5994299	4874628	1736928	1325495	936945	1008113	1633841	1864610
Load7	1476962	740300	1381322	2907517	2690460	1913028	568786	376459	252993	232732	366780	404036
Load8	72656	214913	840054	1373611	833687	548818	153020	79553	65471	31166	55127	85518
No_load1	358486	318781	712421	900892	569479	334855	130747	82190	58018	46101	69245	77390
No_load2	1249062	712616	876705	1325721	1120486	766300	268235	181280	127913	123152	173765	161712
No_load3	41307	134850	392403	430590	252846	166124	58093	37171	32266	9528	25874	43633
No_load4	81507	141210	382535	466895	290788	192062	63673	33337	34913	14031	29475	39068
No_load5	34143	129110	458895	575235	353692	231136	78225	54309	38085	14597	30930	40926
No_load6	260127	223923	500077	638353	426798	295656	100833	74643	55827	33980	55093	61484
No_load7	47361	128855	415261	516858	310501	204430	61061	33129	32604	12883	24060	41720
No_load8	19737	57587	278461	530448	329441	215549	59947	31465	26192	9682	17170	35608
Ilman hiukkassuodattimia												
Load9	135067	198019	941248	1838146	1301616	883350	252547	159606	69542	74320	108580	89717
Load10	1960635	848876	1346154	3250065	3155196	2354130	688788	460568	271539	303604	463270	459567
Load11	2039408	1274140	1828662	3999011	3821095	2892449	813083	556370	331203	369497	582758	599560
Load12	80841	252430	1044010	1920512	1163106	787401	200373	121680	60163	67943	105736	82807
Load13	40416	114000	594892	1903552	1730753	1202472	270385	144965	63309	68012	106384	71119
Load14	56887	121658	648881	2243122	2607428	1962788	417704	212065	91636	97676	156749	125032
No_load9	42735	115636	459336	654774	396534	270494	84387	55870	24139	26608	38084	31033
No_load10	44330	135388	523295	728842	429605	293946	89386	60134	26727	29894	44584	36466
No_load11	68874	159232	588913	855446	514265	349604	100214	68646	30774	33694	49923	35924
No_load12	20174	61372	302779	658432	422878	279565	66797	39385	18775	21853	34989	22108
No_load13	10184	38431	215464	639605	556109	370922	79978	43438	19677	22379	37117	22820
No_load14	9439	41821	250516	773767	746150	510173	106469	57535	26747	29774	50166	38543

Liite 4. Passatin tilavuuskokojakauma, yksikkö on $\mu\text{g} / \text{m}^3$

dV/dlogDp	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Huikkassuodattimella, loadt eli kuormitusyksikkö ja No_loadt eli kevyt sy												
Load1	12	159	762	6203	27929	84823	177598	357534	1071511	4177946	32810199	588198855
Load2	13	170	684	5910	30078	103577	197505	400768	1200949	4664997	36686982	655536420
Load3	5	35	165	2202	10457	34147	64036	133669	421339	1478501	11783641	215197574
Load4	0	6	115	2028	7176	20196	30693	39163	122167	248043	2283908	41268627
Load5	0	8	156	1980	6337	17653	28731	49830	130975	286122	2575822	46669351
Load6	9	151	826	6106	26191	93660	175839	382885	1146424	4337891	34771074	614396180
Load7	3	17	149	2622	11756	36757	57581	108745	309920	1001440	7805738	133131510
Load8	0	5	91	1239	3643	10545	15491	22980	80203	134107	1173195	28178617
No_load1	1	8	77	812	2488	6434	13236	23741	71073	198372	1473653	25500328
No_load2	2	17	95	1196	4896	14724	27155	52365	156696	529920	3698035	53284697
No_load3	0	3	42	388	1105	3192	5881	10737	39526	41001	550639	14377131
No_load4	0	3	41	421	1271	3690	6446	9630	42769	60375	627288	12872948
No_load5	0	3	50	519	1545	4441	7919	15688	46654	62812	658251	13485160
No_load6	0	5	54	576	1865	5681	10208	21561	68389	146216	1172481	20259361
No_load7	0	3	45	466	1357	3928	6182	9570	39940	55433	512046	13746796
No_load8	0	1	30	478	1439	4142	6069	9089	32086	41660	365402	11733026
Ilman huikkassuodatinta												
Load9	0	5	102	1658	5687	16973	25667	46104	85190	319796	2310769	29662217
Load10	3	20	145	2931	13786	45232	69730	133041	332640	1306402	9859219	151428974
Load11	4	30	198	3606	16696	55575	82313	161292	405729	1589939	12402140	197557231
Load12	0	6	113	1732	5082	15129	20285	35149	73700	291927	2250262	27285300
Load13	0	3	64	1717	7562	23104	27373	41875	77555	292653	2264033	23434137
Load14	0	3	70	2023	11393	37713	42286	61258	112501	420298	3335907	41198532
No_load9	0	3	50	590	1733	5197	8543	16139	29570	114495	810487	10225508
No_load10	0	3	57	657	1877	5648	9049	17370	32741	128633	948822	12015767
No_load11	0	4	64	771	2247	6717	10145	19829	37699	144986	1062447	11836975
No_load12	0	1	33	594	1848	5372	6762	11377	22999	94033	744620	7284652
No_load13	0	1	23	577	2430	7127	8097	12548	24105	96296	789911	7519379
No_load14	0	1	27	698	3260	9802	10778	16620	32766	128116	1067617	12700043

Liite 5. BMW:n ELPIn virrat

ELPIn virrat (A)	Demontointi	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Huikkassuodattimella, load eli kuormitusyksiköitä No_load eli keuyt yksiköitä													
Load1	ei	2414	5987	8226	10035	9791	7297	2379	1074	781	738	671	750
Load2	ei	1887	3899	4878	6626	6073	4385	1485	704	535	444	428	480
Load3	ei	955	2278	3314	5261	4681	3327	1185	487	387	315	256	307
Load4	ei	688	1573	2304	3439	2994	2114	777	366	245	200	166	207
Load5	ei	715	1237	1344	2388	2594	2044	951	388	184	140	96	2
Load6	ei	459	951	1415	2805	2578	1634	714	284	172	147	128	120
Load7	on	43	250	743	2123	1847	1128	474	150	84	67	58	48
No_load1	ei	85	468	1136	1278	882	560	206	124	89	48	43	50
No_load2	ei	151	493	1049	1359	1037	701	242	133	98	44	41	53
No_load3	ei	101	433	975	1338	985	673	242	120	119	41	39	57
No_load4	ei	89	392	923	1372	1005	681	277	152	72	55	19	52
No_load5	ei	60	300	801	1217	905	556	257	127	58	44	18	54
No_load6	ei	33	222	576	844	590	380	193	97	47	31	28	26
No_load7	on	24	163	429	741	548	310	137	46	27	18	17	8
Ilman huikkassuodattimia													
Load8	ei	18277	30761	18721	15754	15874	11739	7026	4499	3806	3450	3417	419
Load9	ei	1161	1039	1480	3826	4456	2793	1216	578	389	352	324	340
Load10	ei	974	1013	1931	5584	6093	3534	1475	663	416	373	335	347
Load11	on	31	170	633	2781	2932	1536	576	197	95	82	63	57
Load12	ei	2125	2190	1746	4915	5967	3836	1647	669	352	296	240	162
Load13	ei	2869	2169	2411	6164	6969	4225	2022	1124	790	734	677	725
Load14	on	64	333	984	3249	3319	1820	704	288	135	107	90	67
Load15	on	68	311	972	2684	3481	1904	735	309	145	117	98	84
No_load8	ei	182	562	790	1566	1631	964	406	168	91	68	55	39
No_load9	ei	78	256	619	1192	839	499	247	126	63	41	36	27
No_load10	ei	57	277	726	1370	1020	523	264	136	67	47	39	35
No_load11	ei	101	312	740	1449	1100	555	277	146	70	51	38	34
No_load12	on	50	248	653	1350	926	449	213	94	47	40	29	30
No_load13	ei	58	274	781	1651	1249	621	312	158	76	52	43	25
No_load14	ei	47	274	853	2155	1814	907	406	197	93	66	54	37
No_load15	on	52	259	622	1212	800	390	187	95	51	38	34	31
No_load16	on	30	145	455	1312	985	473	213	106	51	37	29	26

Liite 6. BMW:n lukumääräpitoisuus, yksikkö on 1 / cm³

dM/dlogDp	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodatimella, load eli kuormitusyksikkö No. load eli keuyt sykki												
Load1	5600225	13889326	19083652	23280030	22715312	16929676	5519965	2491393	1812418	1711549	1558598	1739709
Load2	4520789	9343953	11689339	15876605	14552738	10507114	3557861	1686160	1281277	1064136	1024525	1151265
Load3	2482985	5926197	8621554	13685198	12177587	8654231	3031639	1267202	1006992	819232	666330	799417
Load4	1816363	4275042	6263080	9347005	8137952	5747351	2112403	966643	665589	544878	449903	563239
Load5	2378912	4118887	4473578	7948105	8663701	6805697	3166281	1291093	613471	485606	320509	7317
Load6	1702564	3312240	4928658	9772511	8981848	5691016	2485612	988382	598549	512484	447105	418102
Load7	117685	683167	2029642	5799138	5045447	3080285	1294665	408854	229832	182196	158914	132359
No_load1	152864	836554	2040923	2295038	1584184	1006025	370298	222993	159938	86299	77672	89935
No_load2	280320	914431	1947356	2522123	1923622	1301450	449386	245956	182420	81510	76834	98170
No_load3	184598	788052	1773829	2433640	1792680	1225355	440728	218994	217010	73923	70148	104323
No_load4	160567	708338	1666050	2477834	1814961	1229350	499836	273912	130132	98966	33717	93974
No_load5	107116	535814	1430518	2172965	1616632	993277	459825	226028	103331	79412	32117	96696
No_load6	67040	447198	1163448	1704152	1190058	726192	389544	196752	94241	62551	56939	51634
No_load7	47896	328305	863293	1491208	1102426	623431	274725	92552	54211	36236	34831	16860
Ilman hiukkassuodatinta												
Load8	57706715	92084533	56041926	47161230	47520453	35140837	21032192	13466677	10795761	10358314	10227841	12329075
Load9	38686766	34799900	4955024	13144008	14918127	9349649	4071754	1933649	1302069	1178744	1084680	1136749
Load10	2978696	3099760	5905102	17079688	18638298	10810984	4512563	2028620	1271799	1139790	1024309	1062795
Load11	1181109	646832	2404585	10566436	11139652	5837234	2189936	747971	360234	312829	239702	215194
Load12	6728002	6934816	5530176	15564749	18893267	12145583	5214337	2118678	1113880	938274	758619	513282
Load13	7996047	6043112	6719668	17176393	19420763	11772896	5634302	3131117	2201123	2044833	1887845	2020751
Load14	195609	1013737	2994238	9883606	10097956	5536645	2141425	876699	411786	324080	272503	204345
Load15	199831	915594	2863110	10559746	10253747	5609474	2164289	910586	426818	343657	288850	248274
No_load8	405632	1185836	1668576	3307119	3443200	2036084	857894	353879	192964	143540	116264	82247
No_load9	163980	538626	1303972	2508863	1891992	1049561	520229	265371	132810	85975	76692	56449
No_load10	115060	555301	1457100	2747583	2044988	1049662	529136	272669	134510	95212	78824	69914
No_load11	201094	621642	1472879	2885863	2191421	1105432	552398	289985	139151	101572	76283	68249
No_load12	97785	482026	1270378	2624705	1801245	872873	414952	183178	90563	76875	56302	58869
No_load13	113544	537837	1531194	3236108	2448173	1217868	612241	309337	148489	102039	83803	49917
No_load14	90032	526468	1639666	4140423	3484865	1742257	780402	377734	179548	126174	103718	70212
No_load15	98961	495461	1192005	2323080	1533229	746464	358825	182256	97396	73528	65667	59163
No_load16	59581	289896	912397	2632297	1975210	947890	427868	213310	101830	74227	58362	51218

Liite 7. BMW:n hiukkasten lukumäärä, yksikkö on 1 / cm³

dm1	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Hiukkassuodatimella, load eli kuormitussykliä No_load eli kevyt sykli												
Load1	2114748	3117342	5789033	5278929	4903291	3812166	903961	511725	343178	389055	617740	687360
Load2	1707133	2097171	3545365	3600144	3141330	2365957	582643	346332	242607	241891	406586	454866
Load3	937621	1330085	2615351	3103226	2628634	1948731	496467	260280	190672	186221	284515	315850
Load4	685892	959497	1899908	2119506	1756645	1294170	345931	198587	126028	123857	178545	222536
Load5	898321	924449	1357061	1802295	1863657	1532484	516517	265187	116159	105838	127195	2891
Load6	642920	743404	1495110	2215993	1938807	1281484	407049	203011	113334	116494	177435	165192
Load7	44440	153331	615693	1315000	1089102	693608	212017	83977	43518	41415	63065	52295
No_load1	57724	187757	619115	520418	341960	226533	60641	45802	30284	19617	30824	35533
No_load2	105854	205236	590731	571911	415230	293056	73592	50519	34541	18528	30492	38787
No_load3	69708	176872	538092	551847	386965	275921	72175	44981	41090	16804	27838	41218
No_load4	60633	158980	505397	561868	391775	276821	81854	56261	24640	22496	13381	37129
No_load5	40449	120259	433948	492737	348964	223663	75302	46426	19566	18051	12746	38205
No_load6	25316	100370	352932	386430	256884	163522	63793	40412	17844	14219	22596	20401
No_load7	18086	73685	261880	338143	237968	140362	44990	19010	10265	8237	13823	6661
Ilman hiukkassuodatinta												
Load8	21791119	20667596	177000339	10694178	10257688	7912897	3444275	2766017	2044154	2354565	4058948	4871227
Load9	1467715	781034	1503108	2960507	3220203	2105323	666799	397166	246544	267942	430458	449130
Load10	1124810	695715	1791315	3873021	4023233	2434382	738990	416673	240812	259087	406500	419911
Load11	44600	145176	729432	2396022	2404630	1314409	358628	153631	68210	71110	95127	85023
Load12	2540618	1556461	1677581	3529428	4078270	2734902	853811	435170	210911	213281	301060	202798
Load13	3019455	1356325	2038414	3894881	4192135	2650982	922685	643122	416778	464814	749197	798400
Load14	73666	227525	908303	2241185	2179729	1246498	350684	180112	77971	73667	108144	80737
Load15	75460	205497	868525	2394505	2213357	1263123	354428	187032	80817	78163	114631	98093
No_load8	153174	266151	506163	749915	743244	458479	140491	72686	36537	32628	46140	32496
No_load9	61922	120890	395560	568904	408402	236337	85194	54506	25147	19543	30436	22303
No_load10	43449	124633	442012	623036	441428	236359	86652	56005	25469	21643	31282	27623
No_load11	75937	139522	446798	654392	473037	248918	90462	59562	26348	23089	30273	26965
No_load12	36925	108187	385370	595172	388814	196551	67953	37624	17148	17475	22344	23259
No_load13	42876	120713	464488	733813	528459	274236	100262	63537	28116	23195	33257	19722
No_load14	33998	118161	497393	938873	752237	392316	127800	77565	33997	28681	41161	27741
No_load15	37369	111202	361595	526777	330960	168066	58762	37435	18442	16714	26060	23376
No_load16	22499	65065	276776	586894	426366	213443	70072	43813	19281	16873	23161	20236

Liite 8. BMW:n tilavuuskokojakauma, yksikkö on $\mu\text{g} / \text{m}^3$

DVIRilop	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Taso 4	Taso 5	Taso 6	Taso 7	Taso 8	Taso 9	Taso 10	Taso 11	Taso 12
Huikkassuodattimella load eli kuormitusyksikköä No_load eli keuyt sikkii												
Load1	4	74	625	4760	21424	73246	91513	147818	420398	1674096	13146627	226487972
Load2	3	49	383	3247	13726	45459	58984	100042	297197	1040851	8652878	149880058
Load3	2	31	283	2798	11485	37443	50260	75185	233576	801305	5629345	104073858
Load4	1	23	205	1911	7675	24866	35021	57364	154386	532955	3799763	73326587
Load5	2	22	147	1625	8143	29445	52492	76602	142297	455418	2706937	952532
Load6	1	18	162	1998	8471	24622	41208	58642	138836	501270	3776134	54431487
Load7	0	4	67	1186	4759	13327	21464	24258	53310	178209	1342145	17231466
No_load1	0	4	67	469	1494	4353	6139	13220	37098	84411	655994	11708356
No_load2	0	5	64	516	1814	5631	7450	14593	42313	79727	648920	12780463
No_load3	0	4	58	498	1691	5302	7307	12993	50336	72305	592451	13581508
No_load4	0	4	55	507	1712	5319	8287	16252	30185	96800	284767	12234179
No_load5	0	3	47	444	1525	4297	7623	13411	23968	77674	271251	12588541
No_load6	0	2	38	348	1122	3142	6458	11674	21860	61182	480893	6722078
No_load7	0	2	28	305	1040	2697	4555	5491	12574	35443	294173	2194959
Ilman huikkassuodattimta												
Load8	38	488	1837	9644	44819	152037	348682	798996	2504120	10131650	86381732	1605086377
Load9	3	18	162	2688	14070	40451	67504	114726	302020	1152951	9160927	147990214
Load10	2	16	194	3493	17579	46774	74812	120361	294999	1114848	8651055	138362393
Load11	0	3	79	2161	10507	25255	36306	44378	83558	305983	2024464	28015555
Load12	4	37	161	3183	17819	52548	86446	125704	258369	917743	6407105	66822795
Load13	5	32	220	3512	18317	50936	93408	185773	510559	2000088	15944259	263075981
Load14	0	5	98	2021	9524	23950	35502	52028	95515	316988	2301493	26603155
Load15	0	5	94	2159	9671	24269	35881	54026	99002	336333	2439551	32322118
No_load8	0	6	55	676	3247	8809	14223	20996	44759	140399	981933	10707568
No_load9	0	3	43	513	1784	4541	8625	15745	30806	84094	647725	7348940
No_load10	0	3	48	562	1929	4541	8772	16178	31200	93128	665728	9101859
No_load11	0	3	48	590	2067	4783	9158	17205	32277	99350	644266	8885213
No_load12	0	3	42	537	1699	3776	6879	10868	21006	75193	475515	7664024
No_load13	0	3	50	662	2309	5269	10150	18363	34443	99806	707775	6498544
No_load14	0	3	54	847	3287	7538	12938	22411	41647	123413	875976	9140722
No_load15	0	3	39	475	1446	3230	5949	10814	22591	71919	554611	7702331
No_load16	0	2	30	538	1863	4101	7094	12656	23620	72602	492913	6667906