

Dieselhenkilöautojen ympäristöystävällisyys

Juhani Laurikko

Dieselhenkilöautojen ympäristöystävällisyys

Juhani Laurikko, VTT

ISBN 978-952-5324-59-4
ISSN 1456-4181
Edita Prima Oy
Helsinki 2008

ALKUSANAT

Dieselajoneuvot ovat polttoainetaloudeltaan tehokkaita, ja niiden yleistyminen auttaa meitä ilmastokaasujen vähentämistavoitteiden saavuttamisessa. Dieselmoottorit tuottavat kuitenkin enemmän typen oksideja ja pienhiukkasia kuin bensiinikäyttöiset, tehokkailla kolmitoimikatalysaattoreilla varustetut autot.

Tässä raportissa selvitetään pienhiukkasten vaikutuksia terveyteen ja sitä, missä määrin dieselkäyttöiset ajoneuvot aiheuttavat tätä altistusta. Lisäksi käsitellään hiukkassuodattimen vaikutusta päästötasoihin ja jälkiasennettavien suodattimien mahdollisuuksia.

Raportti on tuotettu osana Turvake-projektia (kesäkuu-joulukuu 2008), jossa VTT selvitti kolmea aihepiiriä:

1. Uuden teknologian ja elektronisten toimilaitteiden odotettavissa olevien turvallisuusvaikutusten ennakointi
2. Dieselhenkilöautojen todellisen ympäristöystävällisyyden selvittäminen
3. EU-tutkimuksen seurannan järjestäminen.

Projektin ohjausryhmään kuuluivat Keijo Kuikka, Juhani Intosalmi, Marko Silanpää, Sami Mynttinen, Henriika Weiste ja Jouko Kunnas, sekä VTT:n edustajana Sami Koskinen. Raportin on kirjoittanut erikoistutkija, TKT Juhani Laurikko VTT:ltä.

Helsingissä, 11. helmikuuta 2009

Juhani Intosalmi

tutkimusjohtaja
Ajoneuvohallintokeskus AKE

FÖRORD

Dieseldrivna fordon är bränslesnåla och den allt större andelen dieselfordon hjälper oss att nå målen för minskade växthusgasutsläpp. Dieselmotorerna ger emellertid upphov till mer kväveoxider och partiklar än effektiva bensindrivna bilar försedda med trevägskatalysator.

I denna rapport beskrivs partiklarnas effekter på hälsan och i vilken omfattning dieseldrivna fordon orsakar denna exponering. Dessutom behandlas partikel-filtrens effekt på utsläppsnivåerna och möjligheterna till eftermonterade filter.

Rapporten är utarbetad som en del i projektet Turvake (juni-december 2008) i vilket VTT undersökte tre ämnesområden:

4. Prognostisering av förväntade säkerhetseffekter till följd av ny teknologi och elektroniska funktionsenheter
5. Utredning av dieselpersonbilarnas faktiska miljövänlighet
6. Organisering av EU-forskningens uppföljning.

I projektets styrgrupp ingick Keijo Kuikka, Juhani Intosalmi, Marko Sillanpää, Sami Mynttinen, Henriika Weiste och Jouko Kunnas, samt VTT:s representant Sami Koskinen. Rapporten har skrivits av specialforskare TkD Juhani Laurikko vid VTT.

Helsingfors, den 11 februari 2009

Juhani Intosalmi

forskningschef
Fordonsförvaltningscentralen AKE

FOREWORD

Diesel-powered vehicles feature efficient fuel economies, and the increasing use of such vehicles helps achieve the goals set for reducing climatic gas emissions. However, diesel engines generate more nitrogen oxides and particulates than petrol engines with efficient three-way catalysts.

This report analyses the health effects of particulates and the contribution of diesel-powered vehicles to people's exposure to them. In addition, we address the impact of particle filters on emission levels, as well as possibilities offered by additional filters.

This report has been created as part of the Turvake project (June – December 2008) by the Technical Research Centre of Finland, VTT, which dealt with the following three topics:

7. Predicting the expected safety impacts of new technologies and electronic actuators
8. Analysing the actual level of environmental friendliness of diesel-powered passenger cars
9. Organising follow-up for EU research.

The project steering group comprised Keijo Kuikka, Juhani Intosalmi, Marko Sillanpää, Sami Mynttinen, Henriika Weiste and Jouko Kunnas, as well as Sami Koskinen as VTT's representative. This report is written by Juhani Laurikko (D.Sc), Senior Research Scientist from VTT.

Helsinki, 11 February 2009

Juhani Intosalmi

Director of research
Vehicle Administration AKE

Sisällysluettelo

Index

Tiivistelmä

Sammanfattning

Abstract

Sisällysluettelo	9
1 Johdanto	17
2 Yleiskatsaus dieselien pienhiukkaspäästöihin ja niiden aiheuttamiin terveysriskeihin.....	20
2.1 Dieselpakokaasun koostumus ja erot bensiinimoottoriin.....	20
2.2 Dieselpakokaasujen merkitys terveysriskien lähteenä	21
2.3 Yhdyskuntailman epäpuhtaudet ja niiden aiheuttamat terveysriskit	21
2.4 Pienhiukkaset – koostumus, lähteet vaikutukset	22
2.5 Tutkimusmetodiikkaa	24
2.5.1 Yleistä	24
2.5.2 Päästöt – leviäminen – ilmanlaatu – altistus	25
2.5.3 Vaikutusten tutkiminen.....	26
2.6 Kotimainen tutkimus	27
2.7 Viimeaikaisia tutkimuksia ja havaintoja.....	27
2.7.1 Sydän- ja verisuonitaudit	28
2.7.2 Aivotoiminta, neurotoksisuus.....	28
2.7.3 Hengitysteiden sairaudet, astma.....	29
2.7.4 Keuhkojen toiminnan heikkeneminen, kehityshäiriöt	29
2.7.5 Keuhkosityöpä, muut syövät	30
2.7.6 Immunipuolustusjärjestelmän aktivoituminen	31
2.7.7 Uusimpia tutkimuksia dieselpakokaasukoostumuksesta	33
2.8 Yhteenveto ja johtopäätökset terveysvaikutustutkimuksista	33
3 Dieselmoottoristen henkilöautojen hiukkassuodattimet	35
3.1 Tehdasasenteiset hiukkassuodattimet	35
3.1.1 Tehdasasenteisten hiukkassuodattimien rakenteesta.....	35
3.1.2 Tehdasasenteisten hiukkassuodattimien tarjonta	37
3.1.3 Tehdasasenteisten hiukkassuodattimien vaikutukset pakokaasupäästöihin	38
3.2 Keskimääräiset hiukkas- ja typenoksidipäästöt ja niiden kehitys tulevina vuosina	42
3.2.1 Hiukkas-päästöt	42
3.2.2 Typenoksidipäästöt.....	44
3.3 Jälkiasennettavat hiukkassuodattimet	45
3.3.1 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien rakenteesta	45
3.3.2 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien tarjonta.....	45
3.3.3 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien asennusten tukiohjelmia	46
3.4 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien sopivuus Suomessa rekisteröityihin dieselhenkilöautoihin	47
3.5 Hiukkassuodattimien käytössä esiintyviä ongelmia	47
3.6 Low Emission Zones – suoja-alueet.....	48
Lähdeluettelo	50
Liite: Parivertailuja hiukkassuodattimella varustetun ja normaalimallin välillä.....	55

TIIVISTELMÄ

Tässä raportissa käsitellään dieselmoottorisen henkilöauton tuottamia ympäristöhaittoja, joista pienhiukkasten aiheuttamat terveyshaitat ovat merkittävimmät. Dieselmoottorin suosion viimeaikainen lisääntyminen uusien henkilöautojen voimanlähteenä on tehnyt aiheesta entistäkin tärkeämmän.

Aluksi tarkastellaan eroja diesel- ja bensiinimoottorien pakokaasupäästöissä. Dieselmoottorin hyvä hyötysuhde tekee siitä hiilidioksidipäästöjen suhteen edullisen. Toisessa vaakakupissa painavat verrattain runsaat typenoksidi- ja pienhiukkaspäästöt, joiden hallitsemiseksi tarvitaan varsin monimutkaista ja kallista jälkikäsittelytekniikkaa, jota vasta ollaan tuomassa markkinoille. Pakokaasulainsäädäntö kiristyy kuitenkin EURO5- ja EURO6-tasolle jo seuraavien viiden vuoden kuluessa.

Toisessa luvussa luodaan katsaus menetelmiin, joilla yhdyskuntailman epäpuhtauksien, ml. pakokaasupäästöjen sisältämien haitta-aineiden, terveysvaikutuksia on tutkittu, ja miten menetelmät ovat viime aikoina kehittyneet. Perinteistä ns. epidemiologisista tutkimuksista, joissa havainnoidaan vain ilmanlaadun ja oireilun tai sairastuvuuden tilastollista yhteyttä, onkin edetty jo suorempaan altistus–annos–vaste-tutkimuksiin. Niissä seurataan valittujen koehenkilöiden fysiologisia ja toiminnallisia muutoksia altistettaessa heidät ilmassa oleville epäpuhtauksille. Tämä on tullut mahdolliseksi, koska fysiologisten ja toiminnallisten muutosten havainnointi on nopeudeltaan ja tarkkuudeltaan kehittynyt, jolloin jo varsin vähäiset vaikutukset kyetään havaitsemaan.

Toinen luku sisältää myös katsauksen uusimpaan kotimassa ja ulkomailla julkaistuun tutkimustietoon dieselpakokaasujen ja pienhiukkasten vaikutuksista terveyteen.

Kolmannessa luvussa esitellään dieselmoottoriautojen hiukkaspuhdistimien tekniikkaa sekä tarkastellaan niiden yleistymistä markkinoilla. Sen perusteella arvioituna on Suomessa vuosina 2000–2007 todennäköisesti myyty noin 15 000 autoa suodattimella. Tämä on vajaa kymmenesosa samana aikana myydyistä uusista dieselmoottorisista henkilöautoista. Näin pienellä osuudella on kuitenkin vielä varsin vähäinen merkitys kokonaishiukkaspäästöille. Liikenteessä on vielä suuri osa vanhoja, ennen vuotta 2000 rekisteröityjä dieselautoja, joilla hiukkaspäästöaso on merkittävästi korkeampi kuin uudemmilla autoilla.

Tutkimuksen viimeisessä osiossa selvitetään jälkiasennettavaksi sopivien hiukkassuodattimien mahdollisuuksia ja käytännön ongelmia. Tähän liittyy myös selvitys tunnetuista riskeistä hiukkaspuhdistimien toiminnassa, sekä jälkiasennusten tukemiseksi käynnistettyjen toimenpideohjelmien ja niiden tulosten kartoitus.

SAMMANFATTNING

I denna rapport beskrivs de miljöolägenheter en dieseldriven personbil ger upphov till. De viktigaste bland dessa är de hälsoolägenheter som orsakas av partiklar. Till följd av dieselmotorns ökade popularitet som kraftkälla i personbilar under den senaste tiden har detta ämne blivit allt viktigare.

Till att börja med undersöks differenserna mellan avgasutsläppen från diesel- respektive från bensinmotorer. Dieselmotorns goda verkningsgrad medför att den är relativt fördelaktig med avseende på koldioxidutsläpp. I den andra vågskålen tynger de rätt rikliga utsläppen av kväveoxid och partiklar. Utsläppen kan endast hanteras med komplex och dyrbar efterbehandlingsteknik som först nu håller på att komma ut på marknaden. Avgaslagstiftningen stramas emellertid åt till nivåerna EURO5 och EURO6 redan inom de närmaste fem åren.

I kapitel två visas en översikt över de metoder som har använts för att undersöka föroreningarnas hälsoeffekter i samhällsluften, inklusive de skadliga ämnen som finns i avgasutsläppen. Man har även undersökt, hur metoderna har utvecklats under den senaste tiden. Från de traditionella s.k. epidemiologiska undersökningarna, där man endast observerade det statistiska sambandet mellan luftkvalitet och symptom eller sjuklighet, har man avancerat till mer direkta undersökningar av exponering–dos–reaktion. I undersökningarna följer man utvalda försökspersoners fysiologiska och funktionella förändringar när de utsätts för föroreningar i luften. Detta har blivit möjligt eftersom både snabbheten och noggrannheten i observationerna av funktionella förändringar har utvecklats samtidigt som det har blivit möjligt att observera rätt små effekter.

Det andra kapitlet innehåller även den senaste publicerade inhemska och utländska forskningsinformationen om dieselavgasens och partiklars hälsoeffekter.

I det tredje kapitlet beskrivs tekniken hos dieseldrivna bils partikelrenare och dessutom undersöker man i vilken takt de blir vanligare på marknaden. Enligt undersökningen har sannolikt cirka 15 000 filterförsedda bilar sålts i Finland under perioden 2000–2007. Detta är knappt en tiondel av det totala antalet nya dieseldrivna personbilar som sålts under samma tid. En så liten andel har fortfarande en ganska begränsad inverkan på det totala partikelutsläppet. I trafiken finns ännu en stor andel dieslbilar som registrerades före år 2000. Dessa bils partikelutsläppsnivå är påtagligt högre än nyare bils utsläpp.

I undersökningens sista del utreds möjligheterna att eftermontera lämpliga partikelfilter och vidare behandlas de praktiska problem som man då möter. I detta ingår även en utredning om kända risker i partikelfiltrens funktion och dessutom beskrivs de åtgärdsprogram som har startat för att stödja eftermontering och programmens resultat.

ABSTRACT

This report addresses the negative environmental impacts of diesel-fuelled passenger cars, especially the health impacts of particulates, which are the most significant consequences. This is an increasingly important topic now that new diesel-fuelled passenger cars are growing in popularity.

First, we review the differences between diesel and petrol engines' exhaust fume emissions. Thanks to the high degree of efficiency, diesel engines are favourable in terms of carbon dioxide emissions. On the other hand, diesel engines generate rather large emissions of nitrogen oxide and particulates. Complex and expensive processing technology is needed to control these emissions, and such technology is only now being introduced to the market. However, legislative exhaust fume regulations will become tighter with the EURO5 and EURO6 levels that will be implemented within the next five years.

The second chapter is an overview of the methods used in researching the health effects of the impurities in municipal air, such as the hazardous elements of exhaust fumes, as well as the latest developments in these methods. The focus is already shifting from the traditional so-called epidemiological studies that only observe the statistical connection between air quality and symptoms or illnesses towards more straightforward exposure–dose–response studies. These studies monitor physiological and functional changes in the test group members upon exposure to air impurities. This has been enabled by the enhanced speed and precision of observing physiological and functional changes up to a level at which even minor effects can be detected.

The second chapter also contains a review of the latest Finnish and international research information on the health effects of diesel exhaust fumes and particulates.

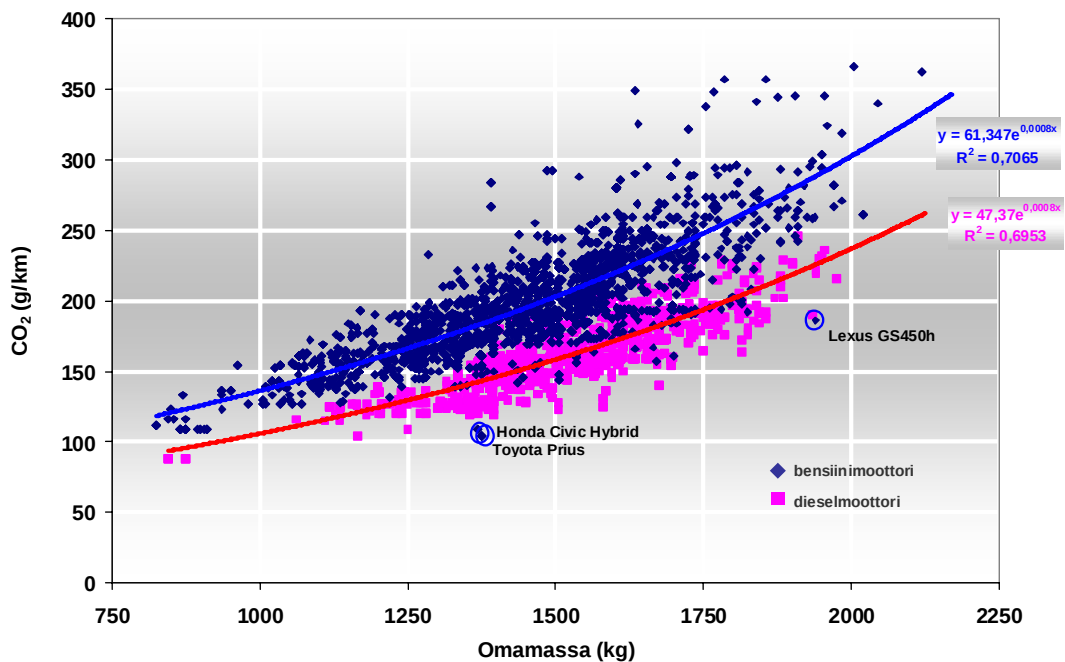
The third chapter describes diesel-powered cars' particle filter technology and its spreading on the market. Based on this information, it can be estimated that approximately 15,000 diesel-fuelled cars equipped with filters have been sold in Finland in 2000–2007. This represents a little less than one-tenth of all new diesel-fuelled passenger cars sold in Finland during the given period. This is a rather small proportion with a minor impact on the total particulate emission level. A large number of the diesel-powered cars in traffic today have been registered before the year 2000 and feature significantly higher particulate emissions than later car models.

The final section of the study addresses the opportunities and practical problems related to additional particulate filters. It also features an analysis of the known risks in particulate filter functionalities, as well as a survey of the action programmes initiated in support of additional filter installations and any achieved results.

1 Johdanto

Dieselmoottori on kasvattanut suosiotaan henkilöautojen voimanlähteenä jo 1990-luvun loppuvuosista lähtien. Pääasiallisimpana syynä ovat tekniikan kehittyminen, joka on tehnyt moottorista suorituskypyisemmän, "hienostuneemman" ja käyttäjäystävällisemmän. Myös tarjonta on lisääntynyt, sillä autonvalmistajat ovat EU:n komission kanssa tekemänsä sopimuksen mukaan pyrkineet määrätietoisesti vähentämään uusien autojen hiilidioksidipäästöjä, ja siksi lisänneet dieselmoottoristen mallien tarjontaa. Dieselmoottori tuottaa samassa moottoriteho- ja auton omamassaluokassa keskimäärin noin 20 prosenttia vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin bensiinimoottori. Pääasiallinen syy tähän on dieselprosessin ottomoottoriprosessia parempi termien hyötysuhde.

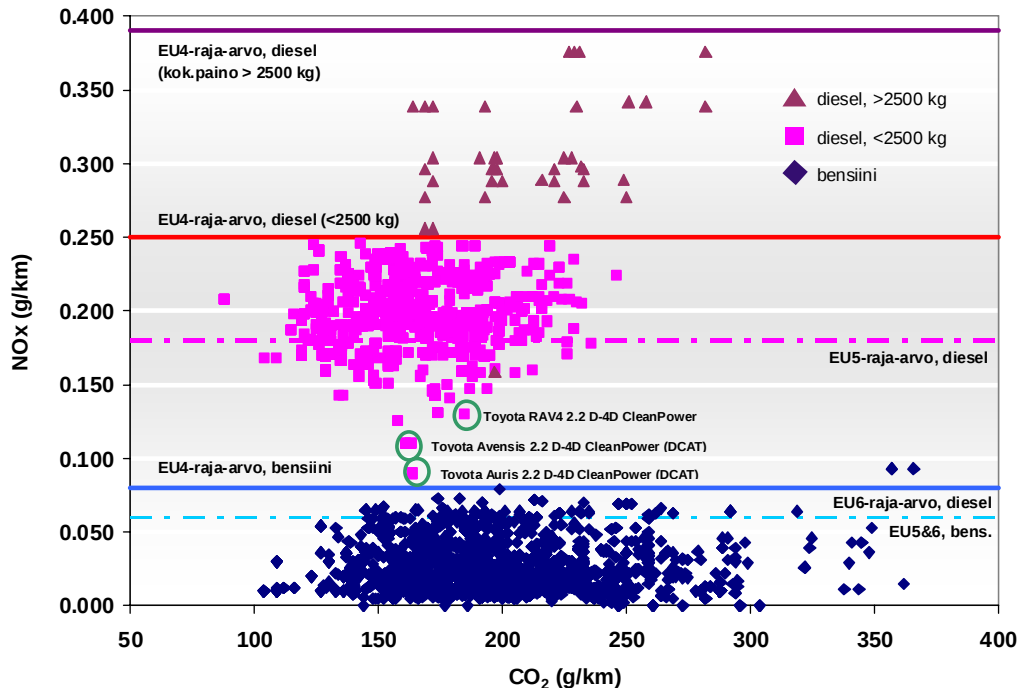
Ero käy selvästi ilmi kuvasta 1, jossa on esitetty Suomessa vuoden 2008 alussa myynnissä olleiden henkilöautojen hiilidioksidipäästöt auton omamassan funktiona erikseen diesel- ja bensiinikäyttöisille. Kuten kuvasta nähdään, vain hybriditekniikkaan nojaavat bensiinimoottoriset autot kykenevät kilpailemaan dieselmoottoristen kanssa.



Kuva 1. Suomessa vuoden 2008 alussa myynnissä olleiden henkilöautojen hiilidioksidipäästöt auton omamassan funktiona. Lähde: valmistajien ilmoitukset www.autotieto.fi-tietokantaan.

Dieselmoottori ei kuitenkaan ole aivan ongelmaton, vaikka se onkin energiatehokkaampi kuin bensiinikäyttöinen moottori. Dieselmoottoriautoja on Euroopassa kuitenkin niiden hyvän polttoainetalouden takia "suosittu", ja siksi näille ei EU-lainsäädännössä ole vielä asetettu tiukkoja typen oksidien ja hiukkaspäästöjen raja-arvoja. Yhdysvalloissa raja-arvot ovat olleet aina samat riippumatta käyttövoimavaihtoehdosta tai polttoaineesta. Siksi Euroopan markkinoilla olevat dieselmoottorit tuottavat huomattavasti enemmän näitä päästöjä kuin bensiinikäyttöiset kolmitoimikatalysaattoreilla varustetut autot. Vasta EURO6-määräykset vuonna 2014 kiristävät raja-arvot likimain samoiksi molemmille moottorivaihtoehdoille.

Kuvassa 2 on esitetty vuoden 2008 alussa Suomen markkinoilla olleiden henkilöautojen typenoksidipäästöt hiilidioksidipäästöjen funktiona. Samaan kuvaan on piirretty myös EURO4-raja-arvot eri moottorityypeille ja painoluokille, sekä tulossa olevat EU-R05 ja EURO6-rajarvot.

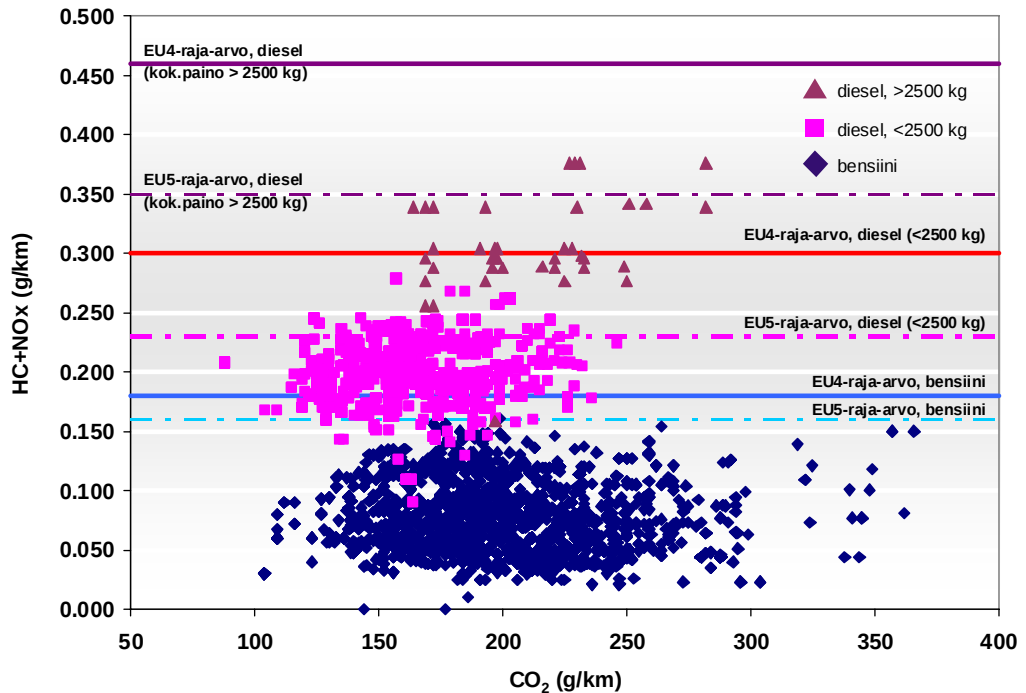


Kuva 2 Suomessa vuoden 2008 alussa myynnissä olleiden henkilöautojen typenoksidipäästöt hiilidioksidipäästöjen funktiona. Lähde: valmistajien ilmoitukset www.autotieto.fi-tietokantaan.

Kuten kuva osoittaa, dieselmoottoristen henkilöautojen typenoksidipäästöt ovat keskimäärin seitsenkertaiset verrattuna bensiinimoottorisiin. Tätä arvioitaessa on kuitenkin hyvä muistaa, että EU-pakokaasulainsäädännöllä on pääasiassa haluttu vaikuttaa etenkin Keski-Euroopassa yleiseen otsoniongelmaan. Siksi säädöksissä on jo pitkään asetettu raja-arvoja myös HC+NOx-summalle, koska nämä päästöt yhdessä osallistuvat ilmakemiallisten reaktioiden kautta otsoninmuodostukseen. (EURO1- ja EURO2-tasoilla molemmilla moottorityypeillä oli summaraja-arvo, myöhemmissä EURO-säädöksissä summaraja-arvo on annettu vain dieselmoottorisille autoille.

Jos siis vertaammekin hiilivety- (HC) ja typenoksidipäästöjen (NOx) yhteissummia, havaitaan, että keskimäärin ero näiden välillä on paljon äskeistä pienempi, vain noin puoli- tai kaksikertainen. Tämä nähdään myös kuvasta 3, jossa on kuvan 2 tapaan esitetty bensiini- ja dieselmoottoristen henkilöautojen HC+NOx-summapäästöt.

Vaikka typen oksidit, jotka pääosin ovat peräisin liikenteen pakokaasuista, osaltaan heikentävät ilmanlaatua ja happamoittavat ympäristöä, lienevät pienhiukkaset kuitenkin terveysvaikutustensa kautta suurempi riski päästöille altistuvalla väestöllä ja siksi merkittävä tekijä arvioitaessa dieselautojen ympäristöystävällisyyttä. Tähän viittaa tuore YTV:n ja Ilmatieteen laitoksen yhteistyönä laatima mallilaskelma hyödyntämä arvio kaupunki-ilman eri epäpuhtauspitoisuuksien nykytasosta suur-Helsingin alueella. Laskelmissa pienhiukkaspitoisuudet (PM_{2.5}) näyttäisivät olevan laajoilla alueilla lähellä rajatai ohjearvoja. Erityisen korkeita pitoisuuksia on ennustettu liikenneväylien läheisyyteen.



Kuva 3 Suomessa vuoden 2008 alussa myynnissä olleiden henkilöautojen HC+NO_x-päästöt hiilidioksidipäästöjen funktiona. Lähde: valmistajien ilmoitukset www.autotieto.fi-tietokantaan.

Hiukkaspitoisuuteen vaikuttavat toki muutkin lähteet kuin pakokaasuista peräisin olevat hiukkaset, kuten tien pinnan ja ajoneuvojen kitkapinnoitteiden kulumisesta peräisin olevat, ja niihin auton käyttövoimalla tai moottorityypillä ei ole mitään vaikutusta.

Koska siis pienhiukkasia pidetään haitallisimpana hengitysilman epäpuhtauksista, ja dieselajoneuvojen osuus ajoneuvojen tuottamista hiukkaspäästöistä on hallitseva, käsitettiin dieselajoneuvojen todellisen ympäristöystävällisyyden selvittäminen myös uusimman tutkimustiedon kokoamisen pienhiukkasten vaikutuksista terveyteen. Erityinen painopiste oli selvittää, missä määrin dieselkäyttöiset ajoneuvot aiheuttavat tätä altistusta, ja mitkä ovat merkittävimmät ennakoitavissa olevat kehityssuunnat ja tulevaisuuden riskit.

Lisäksi tutkimuksen toisessa vaiheessa selvitettiin, minkä verran hiukkassuodattimella varustetut ja varustamattomat autot tuottavat pienhiukkaspäästöjä. Tämän tiedon avulla voidaan tehdä arvioita mahdollisista muutoksista päästöjen ja altistusten suuruudessa. Tutkimuksen viimeisessä osiossa selvitettiin jälkiasennettavaksi sopivien hiukkassuodattimien mahdollisuuksia ja käytännön ongelmia. Tähän liittyi myös selvitys tunnetuista riskeistä hiukkaspuhdistimien toiminnassa, sekä jälkiasennusten tukemiseksi käynnistettyjen toimenpideohjelmien ja niiden tulosten kartoitus.

2 Yleiskatsaus dieselien pienhiukkaspäästöihin ja niiden aiheuttamiin terveysriskeihin

2.1 Dieselpakokaasun koostumus ja erot bensiinimoottoriin

Dieselmoottorin pakokaasut ovat polttoaineen ja palamisprosessin ominaisuuksien vuoksi koostumukseltaan hyvin erilaisia verrattuna bensiinikäyttöiseen ottomoottoriin, joka on varustettu katalyyttisellä pakokaasun puhdistuksella. Dieselpakokaasujen merkittävin erityispiirre on typen oksidien (NO, NO₂) runsaus, koska pakokaasun suuren jäännöshappipitoisuuden vuoksi ottomoottoreille kehitettyä tehokasta kolmitoimikatalyysaattoritekniikkaa ei voida käyttää oksidien poistamiseen. Lisäksi dieselpakokaasulle ovat ominaista kiintoaineet (hiukkaset, PM), jotka ovat peräisin poltto- tai voiteluaineen palamisprosesseista. Typen oksidien lisäksi dieselin kaasumaisiin päästöihin kuuluu pieni määrä häkää (CO) ja palamattomia hiilivetyjä (HC), sekä tietysti palamisen lopputuotteena syntyvää hiilidioksidia (CO₂) ja vettä (vesihöyryä, H₂O).

Kiintoaines ja muu hiukkaspäästöksi luettava osa on fysikaalis-kemialliselta koostumukseltaan hyvin monimutkainen ja epähomogeeninen kokonaisuus. Se sisältää sekä orgaanisia että epäorgaanisia, olomuodoltaan kiinteitä, puolihaihtuvia ja haihtuvia yhdisteitä. Niiden keskinäiset määräsuhteet myös vaihtelevat melko voimakkaasti moottorin ja pakokaasun puhdistusjärjestelmän tekniikan, polttoaineen (ja voiteluaineen) ominaisuuksien ja ajotilanteen (so. moottorin kuormituksen) mukaan.

Pakokaasujen koostumus on myös "aikariippuva", sillä höyrystyneet hiilivedyt tiivistyvät kiinteiden hiukkasten pintaan pakokaasun lämpötilan laskiessa. Tämä tapahtuu osin jo pakoputkistossa mutta etenkin ilmassa. Samoin kaasumaiset komponentit reagoivat ilmassa keskenään ja ilmassa esiintyvien ns. taustapitoisuuksien kanssa muodostaen erilaisia johdannaisyhdisteitä. Itse asiassa suurin osa ultrapienistä hiukkasista muodostuu vasta pakoputkessa ja/tai ulkoilmassa, kun pakokaasujen lämpötila laskee. Silloin kaasumaisista hiilivedyistä alkaa tiivistyä pieniä pisaramaisia hiukkasia.

Oman lisänsä pakokaasukoostumuksen moninaisuuteen tuo kehittyvä puhdistustekniikka. Vaikka säädeltyjen päästöjen osalta lopputulos olisi samaa tasoa, erilaiset teknologiset ratkaisut tuottavat hyvinkin erilaisia muita päästöjä. Esimerkkinä raskaan kuorma-auton moottorissa typen oksidien ja hiukkasten rajoittamiseksi tavoitetasolle voidaan valita kaksi eri peruslinjaa:

1. Tehokas typen oksidien jälkipoisto SCR-tekniikalla (Selective Catalytic Reduction), jolloin hiukkaspäästöt vältetään moottorin palamista säätämällä
2. Typen oksidien syntymisen rajoittaminen moottoriteknisesti (mm. EGR, Exhaust gas recirculation, pakokaasujen kierrätys takaisin moottorin sylintereihin), jolloin moottorin runsaaksikin kasvavat hiukkaspäästöt poistetaan hiukkassuodattimen ja hapettavan katalyysaattorin avulla.

Kummallakin tavalla on mahdollista alittaa säädösten mukaiset raja-arvot, mutta esim. hiukkasten kokojakautuma ja kemiallinen koostumus sekä typpidioksidin osuus kokonaistypenoksideista voivat olla hyvinkin erilaiset. Tähän viittaavia tutkimuksia on viime aikoina julkaistu useita [Geivanidis 2006], [Hörmandinger 2006], [Ricardo 2003], [Gense 2006], [Latham 2004], ja myös kotimaassa VTT tekee parhaillaan eri tekniikoiden päästöjen karakterisointia (mm. UUSIPÄÄSTÖ-hanke).

Lisää pakokaasujen koostumuksen viimeaikaisista tutkimuksista esitetään luvussa 2.7.7.

2.2 Dieselpakokaasujen merkitys terveysriskien lähteenä

Koska dieselmoottorin pakokaasut ovat monimutkainen ja vaikeasti karakterisoitava kokonaisuus, ei niiden vaikutuksia ympäristöön ja ihmisen terveyteen ole helppo tutkia ja yksilöidä. Yleisesti on kuitenkin päädytty siihen tulokseen, että altistuminen dieselpakokaasuille lisää riskiä sydän- ja verisuonitautien sairastumiseen ja lyhentää näitä sairauksia jo potevien elinaikaa, sekä lisää riskiä sairastua keuhkosyöpään. Siksi dieselpakokaasut on yleisesti luokiteltu syöpävaaralliseksi (ryhmä 2a. "probably carcinogenic to humans").

Edellä mainittu arvio koski siis "dieselpakokaasua", mutta koska pakokaasun koostumus vaihtelee useiden eri tekijöiden vaikutuksesta, on myös tarkasteltu mitä tunnettuja karsinogeenisiä yhdisteitä dieselpakokaasuista on löydetty. Lähteen [Stewart 2003] mukaan niitä ovat ainakin kaasu/höyryfaasissa esiintyvät bentseeni, formaldehydi, 1,3-butadieni ja etyleenidibromidi. Lisäksi hiukkasiin adsorboituneena (kiinnittyneenä) on löydetty lukuisia hiilivety-yhdisteitä ja niiden johdannaisia, joilla todennäköisesti on karsinogeenisiä ominaisuuksia.

Tarkkaa syy-yhteyttä mihinkään pakokaasujen osaan ei kuitenkaan vielä ole pystytty tieteellisellä tarkkuudella osoittamaan. Siksi pakokaasupäästöjen rajoittaminen haittojen pienentämiseksi on hankalaa, kun tarkkaan ottaen ei vielä tiedetä, mikä osa pakokaasuissa on kaikkein haitallisinta. Tehokkainta olisi luonnollisesti kohdistaa rajoitukset erityisesti juuri tähän haitallisimpaan osaan (tai ominaisuuteen), mutta toistaiseksi on jouduttu tyytymään kokonaisvaltaisempaan lähestymistapaan, jossa päästöjen kokonaismäärää on rajoitettu puuttumatta niinkään laatuun. Näin toimitaan etenkin hiukkaspäästöjen kohdalla, joissa toistaiseksi säädellään ainoastaan hiukkasten kokonaismäärää ottamatta kantaa hiukkasten kokojakautumaan, kemialliseen koostumukseen tai yksittäisten hiukkasten morfologiaan.

Kokonaisvaltaisuuteen pakokaasupäästöjen rajoituksessa on myös vaikuttanut se, ettei päästöjä ole kyetty karakterisoida riittävällä tarkkuudella. Tekniikka kuitenkin kehittyy, ja jo lähivuosina voidaan ainakin hiukkasten lukumäärä mitata niin luotettavasti, että sitä voidaan alkaa säädellä. Tämä on selvä edistysaskel etenkin pienten, juuri kaikkein haitallisimmiksi todettujen hiukkasten päästöjen rajoittamisessa.

2.3 Yhdyskuntailman epäpuhtaudet ja niiden aiheuttamat terveysriskit

Yhdyskuntailman erilaiset saasteet ja epäpuhtaudet ovat nykyään merkittävä väestön sairastavuutta ja jopa kuolleisuutta aiheuttava ympäristötekijä. Suomessa suurimpia epäpuhtauspäästöjen lähteitä ovat liikenne, teollisuus, energiantuotanto ja pientalojen lämmitys, etenkin puun pienpoltto. Lisäksi kaukokulkeutumat maamme rajojen ulkopuolelta saattavat ajoittain merkittävästikin huonontaa paikallista ilmanlaatua. Yhdyskuntailmasta tavattavia, tunnettuja terveydelle haitallisia epäpuhtauksia ovat:

- hiilimonoksidi
- typpidioksidi
- otsoni
- rikkidioksidi ja haisevat rikkiyhdisteet
- haihtuvat hiilivedyt (VOC)
- polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH)
- raskasmetallit
- hengitettävät hiukkaset ja pienhiukkaset.

Ilman epäpuhtauksien aiheuttamat terveyshaitat koostuvat lukuisista eriasteisista vaikutuksista. Lievimmät ovat ohimeneviä, kuten hengenahdistus, pahoinvointi ja päänsärky, kun taas vakavimmat johtavat pysyvään sairastumiseen tai olemassa olevan sairauden pahenemiseen, jopa kuolemaan. Lieviä oireita saavien lukumäärä on suuri, vakavampia vaikutuksia kokevien määrä taas pienenee haitan vakavuustason kasvaessa. Voimakkaimmin ilmansaasteisiin reagoivat yleensä vanhukset ja hengityselinsairauksia potevat, kuten astmaatikot.

Tieteellisesti on pystytty osoittamaan, että jatkuva epäpuhtaalle ilmalle altistuminen lisää väestötasolla tarkastellen keuhkoinfektioita ja kuolleisuutta sekä lyhentää odotettavissa olevaa elinikää. Viimeaikaisten väestötutkimusten ja Maailman terveysjärjestön (WHO) ja Yhdysvaltojen ympäristöviraston (U.S. EPA) tekemien terveysvaikutusarvioiden mukaan yhdyskuntailman epäpuhtauspitoisuuksien lyhytaikaisvaihtelut vaikuttavat:

- ikääntyneiden keuhko- ja sydänsairaiden päivittäiseen kuolleisuuteen ja sairaalaan ottoihin
- astmaattikojen lääkkeenkäyttöön ja kohtauksiin
- väestön hengityselinoireisiin ja keuhkojen toiminnan muutoksiin.

Yhdyskuntailman epäpuhtauksien vakavimmat haitat liittyvät nykytiedon mukaan etenkin pienhiukkasiin.

STM:n ja YM:n vuonna 1997 yhdessä toteuttamassa kansallisessa ympäristöterveysohjelmassa on arvioitu yhdyskuntailman epäpuhtauksien, erityisesti hiukkasten, aiheuttaman Suomessa vuosittain 200–400 ennenaikaista kuolemaa, 30 000 astmaoireiden pahentumista ja 30 000–40 000 lasten hengitystieinfektiota.

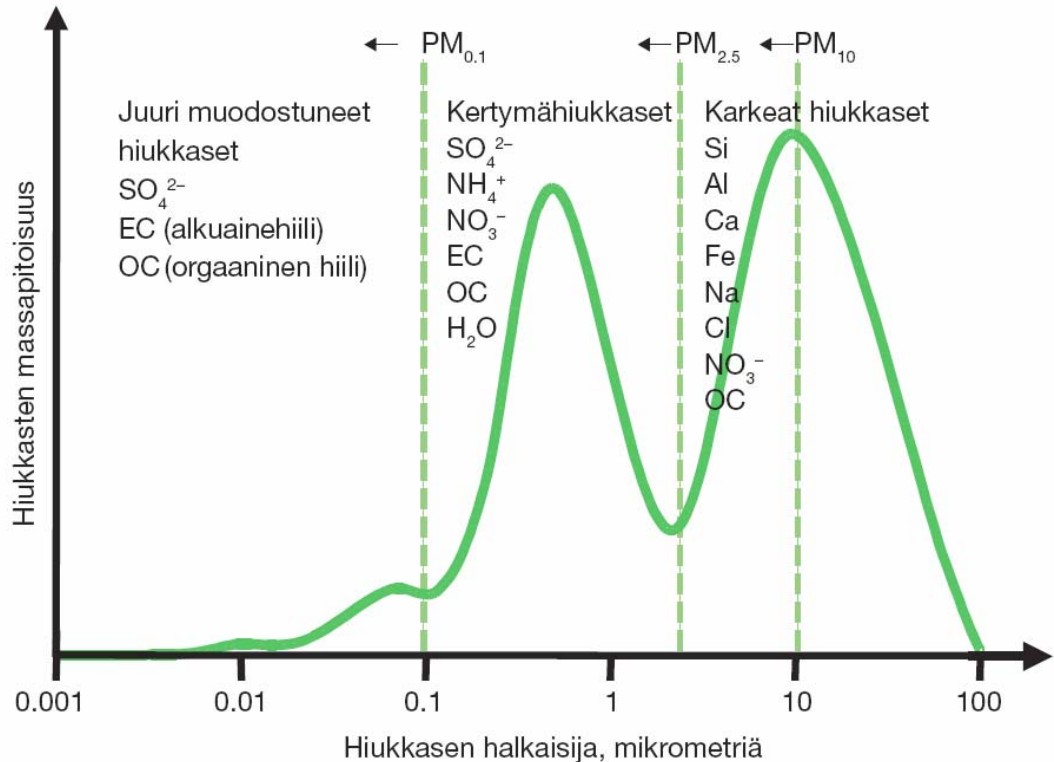
Lisäksi on arvioitu, että jatkuvasta pienhiukkasaltistumisesta aiheutuvat haitat ovat paljon tätäkin suurempia. Ne lyhentävät merkittävästi suomalaisen väestön odotettavissa olevaa elinikää. Pakkanen saattaa voimistaa ärsyttävien epäpuhtauksien kuten rikkidioksidin, typpidioksidin, hengitettävien hiukkasten ja pienhiukkasten vaikutuksia hengitysteihin. Vastaavasti otsoni ja typpidioksidi saattavat voimistaa siitepölyjen aiheuttamia haittoja allergisilla astmaattikoilla [KTL].

2.4 Pienhiukkaset – koostumus, lähteet vaikutukset

Yli 10 µm hiukkaset eivät enää läpäise hengitysteiden suoja mekanismeja eivätkä siten joudu elimistöön. Siksi alle 10 µm hiukkasia kutsutaan ”hengitettäviksi hiukkasiksi”. Pienhiukkasilla taas tarkoitetaan kooltaan alle 2,5 µm (PM_{2.5}) kiinteitä tai hiukkasia. Niiden pääasiallinen lähde ovat polttoprosessit (lämmitys ja liikenne), mutta myös kaukokulkeutuma.

Karkeammat ja suurempikokoiset, alle 10 µm (PM₁₀) hiukkaset ovat pääasiassa peräisin hiekoitushiekasta sekä tien pinnan ja autojen kitkapintojen (jarrut, kytin, renkaat) kulumisesta. Näin suuret hiukkaset eivät juuri kulkeudu pitkiä matkoja, joten vaikutukset rajoittuvat yleensä päästölähteen – kuten liikenneväylän – läheisyyteen. Nämäkin hiukkaset eivät ole aivan haitattomia, varsinkaan suurina pitoisuuksina, vaan saattavat pahentaa hengityssairauksia (astma, keuhkoahdistus).

Suomessa tyypilliset pitoisuustasot ovat kuitenkin sen verran matalia, ettei niiden merkitys ole kovin suuri. Ainoastaan keväisin saattaa esiintyä korkeita hiukkaspitoisuuksia. Silloinkin on enimmäkseen kyse liukkauden torjuntaan käytetyn hiekoitushiekan ja tien kulumaperäisten hiukkasten pölyämisestä, jossa katujen huolellinen kevätpesu on tehokas torjuntakeino.



Kuva 4 Yhdyskuntailman hiukkasten massapitoisuuden tyypillinen jakauma ja kolmen hiukkaskokoluokan (PM_{0.1}, PM_{2.5-0.1}, PM_{10-2.5}) tärkeimmät kemialliset osatekijät [FINE].

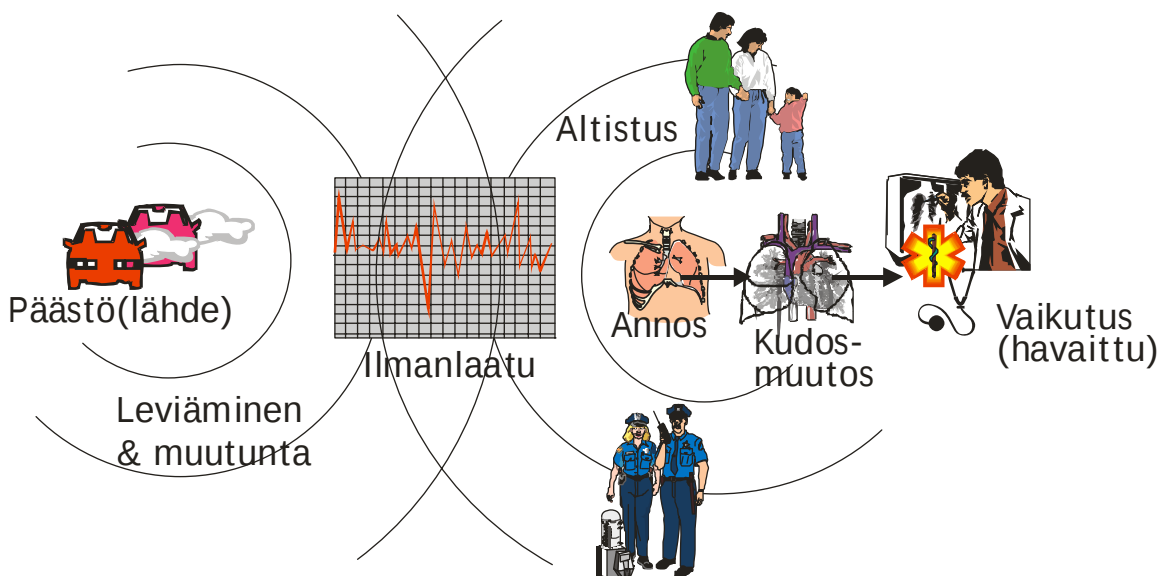
Yleisesti määritellään vielä ultrapienet hiukkaset, joiden läpimitta on 0,01–0,1 µm. Nämä ovat pääasiassa peräisin palamisprosesseista ja olomuodoltaan usein nestemäisiä, pisaroita. Lukumäärältään niitä on paljon ja niissä on paljon pinta-alaa, mutta hiukkasten kokonaismassasta ne edustavat vain muutamaa prosenttia. Näin pienet hiukkaset ovat yleensä hyvin lyhytikäisiä, eli niitä tavataan vain päästölähteiden läheisyydessä. Hiukkaset kasvavat mm. absorboimalla ilman kosteudesta vettä ja tarttuvat toisiinsa muodostaen suurempia akkumulaatio- eli kertymähiukkasia, joiden koko on tyypillisesti vähän alle 1 µm. Tämän kokoisina ne taas säilyvät ilmassa pitkiäkin aikoja kulkeutuen jopa tuhansien kilometrien matkoja.

Hiukkasten koko vaikuttaa paitsi niiden käyttäytymiseen ilmassa, myös niiden pääsyyn ihmisen elimistöön. Kuten jo todettiin, ihmiskehon torjuntamekanismit kykenevät estämään yli 10 µm kokoisten hiukkasten pääsyn hengitysteihin. Tätä pienemmät hiukkaset pääsevät läpi hengitysteiden ja etenevät keuhkoihin. Pienhiukkaset, eli alle 2,5 µm, pääsevät jo hyvin syvälle, aina keuhkorakkuloiden pohjalle, jossa on runsaasti verisuonia. Kudokset ovat siellä hyvin ohuita, jotta hapen pääsy vereen on tehokasta. Ultrapienet, alle 0,1 µm ns. nanohiukkaset ovat jo niin pieniä, että ne saattavat päästä verenkiertoon. Samoin käy isompien hiukkasten pinnalla oleville, etenkin rasvaliukoisille yhdisteille. Näiden erittäin pienten hiukkasten kokonaismäärästä ”teknologisesti” tuotetujen osuus on huomattava.

2.5 Tutkimusmetodiikkaa

2.5.1 Yleistä

Tutkimusongelmana ilman epäpuhtauksien ja niistä peräisin olevien terveysvaikutusten selvittäminen on erittäin haasteellinen. Periaatteellisella tasolla epäpuhtauksien ja terveysvaikutusten välillä vaikuttavaa kausaalista ketjua voidaan havainnollistaa kuvan 5 tapaisella esityksellä.



Kuva 5. Kausaalinen ketju liikenneperäisen ilman epäpuhtauspitoisuuksien, terveysvaikutuksien ja niiden tutkimisen välillä.

Jo ketjun ensimmäinen vaihe, päästölähteet ja niiden tuottamat pakokaasupäästöt ovat vaikeasti määriteltävä ja luonnehdittava kokonaisuus. Ajoneuvojen suuri määrä, paikallisesti muuttuva ikäjakautuma¹ ja ylipäättään teknologiset erot autojen välillä vaikeuttavat päästöjen arviointia. Lisäksi ilman laatuun eli epäpuhtauksien pitoisuuksiin vaikuttaa ilmassa tapahtuva leviäminen ja päästöjen muuntuminen. Näissä merkittävimpiä tekijöitä ovat meteorologia ja päästöjen keskinäiset määräsuhteet, joissa edelleen esiintyy runsasta ajallista ja paikallista vaihtelua. Siksi ilman laadussa esiintyy ajan ja paikan mukaan voimakastakin vaihtelua, eivätkä harvalukuisten havaintoasemien antamat tulokset eivät aina riitä kattavan kuvan muodostamiseen, vaikka mallilaskelmilla tilannetta voidaan parantaa.

Jotta terveysvaikutuksia voitaisiin tutkia ja ne kyettäisiin liittämään joihinkin pakokaasupäästöissä (tai ylipäättään yhdyskuntailmassa) tavattaviin yhdisteisiin, tulisi edelleen voida mahdollisimman hyvin arvioida kuinka suuria annoksia eri vierasaineita ihmisen elimistöön on joutunut. Tämä taas edellyttää paitsi tietoa ilman laadusta, myös ns. altituksen tuntemista, jolloin tieto haitta-aineen konsentraatiosta hengitysilmassa yhdistetään oleskeluaikaan. Näin saadaan laskennallinen arvio ainemäärästä, joiden oletetaan aiheuttavan esim. kudostenmuutoksia tai muita ei-toivottuja oireita. Muutokset ja oireet taas voidaan havaita tutkimalla joko kudostenmuutoksia, sairauksien esiintymistä tai pahenemista tai ihmisen fysiologisia toimintoja (mm. syketaajuus, EKG, EEG, verenpaine, keuhkofunktio) ja niiden muutoksia.

¹ Tutkimuksissa on mm. havaittu, että pääkaupunkiseudulla liikkuvat autot ovat paljon keskimääräistä uudempia.

Ihmisyksilöiden väliset eroavuudet perusfysiologiassa ja mm. immunologian toiminnassa vaikeuttavat tätä annos-vastemäärittystä, koska toiset yksilöt sietävät vierasaineita paljon paremmin kuin toiset. Siksi tutkittavien otosten määrä pyritään yleensä pitämään varsin korkeana ja tuloksia käsitellään tilastotieteen menetelmin.

2.5.2 Päästöt – leviäminen – ilmanlaatu – altistus

Päästölähteistä, niin kiinteistä kuin liikkuvistakin, vapautuu ilmaan epäpuhtauksia. Varsinkin moottoripakokaasujen, mutta myös useiden muiden palamisperäisten päästöt vaihtelevat määrältään voimakkaastikin. Päästöjen kemiallinen ja fysikaalinen koostumus vaihtelee riippuen moottorin tyypistä ja tekniikasta (iästä), polttoaineesta, ajotilanteesta (eli moottorin kuormituksesta) ja lukuisista muista tekijöistä. Päästöt lisäksi muuntuvat levitessään ympäristöön, jolloin varsinainen epäpuhtauspitoisuuksien kulloinenkin määrä ilmassa ja sen vaihtelu eli ns. ilman laatu, vaihtelee mm. liikennemäärin, vuorokauden ajan ja sääolosuhteiden vaikutuksesta.

Vaikka tätä ilmanlaadun vaihtelua seurataan ja rekisteröidään jatkuvasti, on havainto-asemien määrä varsin pieni (esim. YTV alueella on kuusi kiinteää ja kolme siirreltävää asemaa [YTV 2007]) eikä niissä kyetä vielä kovin yksityiskohtaiseen karakterisointiin. Mitattavat suureet ovat hiilimonoksidi (CO), typpidioksidi (NO₂), otsoni (O₃) sekä hiukkaset (PM₁₀ ja PM_{2.5}). Eräillä asemilla mitataan nykyisin myös bentseeniä. Lisäksi etenkin menneinä vuosina on mitattu rikkidioksidia (SO_x), mutta rikkipäästöjen määrän väheneminen on alentanut sen pitoisuuksia voimakkaasti eikä seuraaminen siksi ole enää niin välttämätöntä. Samoin on käynyt lyijyn, jonka poistuminen bensiinistä on tehnyt lyijypitoisuuden analysoinnin hiukkasnäytteistä miltei tarpeettomaksi. Hiukkasma-sasta analysoidaan myös erilaisia muita kemiallisia yhdisteitä, kuten PAH-yhdisteitä ja raskasmetalleja, mutta niille määritetään vain vuosikeskiarvoja.

Verrattuna siihen yhdisteiden koko kirjoon, joka laboratoriokokeissa on pakokaasuista analysoitu (lähes 500 erilaista yhdistettä), on ilmanlaadun seuranta ja analyysi varsin niukkaa. Se onkin kohdennettu pääasiassa niihin epäpuhtauksiin, joissa päästöjen määrät nostavat tyypilliset pitoisuudet sille tasolle, että terveysvaikutuksien syntyminen on todennäköistä ja ohjearvojen ylitykset mahdollisia. Tällöin viranomaisten tulee nykyisten säädösten mukaan ryhtyä toimenpiteisiin.

Näistä paikan ja ajankohdan mukaan muuttuvista ilman epäpuhtauspitoisuuksista eri ihmiset hengittävät erilaisia annoksia riippuen altistusajasta ja epäpuhtauksien pitoisuuksista (vaihtelee mm. päästölähteen etäisyyden mukaan). Koska yksittäisten ihmisten altistuksen mittaaminen ei ole mahdollista, altistusta arvioidaan mallilaskennalla. Mallilaskennassa yhdistetään eri päästölähteiden tuottamien päästöjen laskennallinen muutonta ja leviäminen. Tämä tuottaa estimaatin ilman laadusta (epäpuhtauspitoisuuksista) alueellisesti ja aikasidonnaisesti. Altistuksen arviointiosassa väestö sijoitetaan tähän ”pitoisuuskarttaan” oletettujen asuin- ja työpaikkojen sekä paikka/aika -koordinaattivaihteluiden mukaisesti. Näin syntyy estimaatti koko alueellisen väestön tai jonkin sen osan saamasta (hengittämästä) päästöannoksesta.

Mallilaskelmien tuloksia voidaan verrata havaintoasemien antamiin mittaustuloksiin ja altistusta mittaavien tutkimusten tuloksiin, joissa koehenkilöillä on ollut mukanaan keräimiä. Keräimet mittaavat hengitettävän ilman epäpuhtauksien kertymää koeaikana. Tämän tyyppisistä tutkimuksista lisää esim. lähteessä [Mukala 1999].

Verrattaessa mallilaskelmien tuloksia mitattuihin arvoihin on havaittu, että kiinteän havaintoaseman mittaustuloksen käyttö henkilökohtaisen altistuksen estimointiin sopii paremmin pienhiukkasille (PM_{2.5}) kuin typpidioksidille (NO₂) [Kousa 2002]. Pienhiukkasten pitoisuudessa vuorokautinen ja alueellinen vaihtelu on vähäisempää kuin typpidiok-

sidissa. Tämä selittyy sillä, että hetkellisestä ja paikallisesta hiukkaskonsentraatiosta huomattava osa on kaukokulkeutumaa, jossa vaihtelu on vähäisempää kuin tyypidioksidin kohdalla. Typpipitoisuuksissa taas paikallisten, etenkin liikennelähteiden osuus on huomattava, ja liikenteessä esiintyy melko voimakasta alueellista ja ajallista vaihtelua. Tätä päätelmää tukee myös amerikkalainen tutkimus [Kim 2005].

2.5.3 Vaikutusten tutkiminen

Koska edellä luetelluista syistä varsinaiseen annos-vastetutkimukseen ilman epäpuhauksien terveysvaikutuksista vaikutuksista ei ole ollut mahdollisuuksia, on jouduttu turvautumaan epäsuorempiin menetelmiin.

Elinympäristön altisteiden tuottamia terveysvaikutuksia on perinteisesti tutkittu epidemiologisesti² erilaisten otanta- ja seuranta tutkimusten avulla. Tällainen tutkimus voi olla ns. poikittaistutkimus, jolloin esim. tutkitaan sairauden esiintymistä (vallitsevuutta) tietynä ajankohtana, tai pitkittäistutkimus, jolloin mitataan oireiden tai sairauden ilmenevyyttä tai ilmaantuvuustiheyttä (kuinka paljon sairaustapauksia havaitaan suhteessa seurattavaan henkilömäärään ja aikaan).

Pitkittäisissä epidemiologisissa tutkimuksissa on kartoitettu lähinnä pitkäaikaisvaikutuksia, kuten syöpäriskiä tai kehityshäiriöitä. Vaikka nykyisin jo osataan sulkea pois lukuisia tuloksien tulkintaa häiritseviä ja sekoittavia tekijöitä – merkittävin niistä tupakointi tai ylipäättään altistuminen tupakansavulle – ja käyttää useita samanaikaisia rinnakkaisia vaikuttavia tekijöitä käsitteleviä ns. monimuuttuja-analyyseihin kehitettyjä tietokoneohjelmia, vieläkin ei näissä puhtaasti tilastollisissa analyyseissä päästä kovin suureen tarkkuuteen. Tämän tyyppisiä tutkimuksia vaikeuttaa suuri yhtäikainen kemiallinen kuormitus, jota nykyihminen kokee. Erilaisia vierasaineita tulee elimistöön paitsi hengitysilman mukana, myös mm. ravinnossa. Siksi on mahdollista, että havaittu sairaus on joko kokonaan tai ainakin osaksi voinut aiheutua myös muun tekijän johdosta kuin altistumisesta epäpuhtaalle hengitysilmalle. Ympäristöolosuhteiden ja altisteiden määrittäminen ja tilastointi on myös osin puutteellista perustuen vain harvan havainto- ja mittausverkon tuloksiin ja altistuksen laskennalliseen arviointiin.

Nopeasti ilmeneviä vaikutuksia tutkitaan nykyisin ns. aikasarjatutkimuksina. Niissä tarkastellaan rinnakkain useita sellaisia muuttujia, joilla epäillään olevan kausaalisia syy-yhteyksiä. Tällä tavoin on havaittu voimakasta korrelaatiota mm. pienhiukkaspitoisuuksien ja sairaalaan sisäänottojen, veritulppien, sydäninfarktien ja muiden vakavien sydänoireiden sekä keuhko- ja rakkosyövän esiintymisen välillä. Tällaisia tutkimuksia on tehty runsaasti sekä ulkomailla että kotimaassa, esim. [Parent et.al. 2006] ja [Salonen et. al. 2007]. Tilastollinen yhteys ei kuitenkaan ole vielä riittävä tieteellinen näyttö kausaalisuuden olemassaolosta, ellei vaikutusmekanismeja pystytä identifioimaan. Toki se vie tutkimusta useimmiten oikeaan suuntaan sulkien pois sellaiset tekijät, joiden välillä ei ole yhteyttä tai se on niin heikko, ettei tilastollinen analyysi sitä paljasta.

Aikasarjatutkimuksessakin on useita ongelmia. Muuttujissa voi esiintyä erilaisia kausivaihteluita ja trendejä, joiden sekoittava vaikutus pitää sulkea pois oikeilla tilasto-analyysimenetelmillä. Kausivaihtelutekijöitä, jotka ovat mahdollisia häiriölähteitä yhdyskuntailman epäpuhtauksien seurausten tutkimisessa, ovat sääolosuhteiden vuosittainen kausivaihtelu, joka vaikuttaa sekä ilman laatuun että samanaikaisesti ihmisten altistukseen. Kesäaikana oleskellaan ulkona enemmän kuin talvella, jolloin suora altistus

² Epidemiologia on lääketieteen ala joka tutkii tautien esiintyvyyden ja niiden vaaratekijöiden suhdetta. Se tutkii tartuntatauteja muita niin yleisiä sairauksia, että niistä on mahdollista saada tilastollista aineistoa. Siksi epidemiologiassa ei tutkita pelkästään tartuntatauteja, vaan myös esimerkiksi diabetesta, sydäntauteja ja korkeaa verenpainetta.
[<http://fi.wikipedia.org/wiki/Epidemiologia>]

ulkoilmalle ja siinä mukana oleville pakokaasuperäisille yhdisteille lisääntyy. Mahdollisesti myös sisäilman laadussa esiintyy kausivaihtelua, sillä mm. ikkunoita pidetään tyypillisesti enemmän avoinna kesällä kuin talviaikaan, jolloin huonetiloja lämmitetään. Siksi mm. pienhiukkasia kulkeutuu sisätiloihin helpommin kesällä kuin talvella.

Oman lisänsä sekoittaviin tekijöihin tuo oireiden tunnistaminen ja diagnosointi, joka ei aina ole yhtenevää. Erityistä kriittisyyttä on harjoitettava ns. haastattelututkimuksissa, joissa altistusta ja oireilua arvioivat tavalliset ihmiset eivätkä ammattilaiset [mm. Kuehni 2006].

2.6 Kotimainen tutkimus

Suomalainen yhdyskuntailman epäpuhtauksien ja terveysvaikutusten välisen syy-yhteyksien tutkimus on keskittynyt Kansanterveyslaitokseen, etenkin sen Kuopion yksikköön. Se on osallistunut lukuisiin EU- ja muihin kansainvälisiin hankkeisiin ja kerryttänyt kansainvälisestäkin arvioiden merkittävää osaamista.

Tuoreimmat yhteenvetotyyppiset kotimaiset julkaisut pienhiukkasista ja niiden vaikutuksista ovat TEKESin FINE-hiukkasohjelman tausta-aineistoksi koottu raportti [TEKES, 2000] ja sekä varsinaisen ohjelman tuloksena koottu yhteenvetoraportti [TEKES, 2006]. Ilman epäpuhtauksien terveysvaikutuksia on käsitelty myös Sosiaali- ja terveysministeriön Kansanterveyslaitokselta tilaamassa selvityksessä pienhiukkasten ($PM_{2.5}$) kansanterveysvaikutusten nykytietämyksestä, johon sisältyi myös vertaileva riskinarviointi diesel- ja maakaasubussien pienhiukaspäästöjen terveysvaikutuksista [STM 2004]. Alueellinen ilmanlaadun ja sarastavuuden korrelaatiotutkimus julkaistiin viime vuonna [ILSU 2007]. Myös aivan tuoreessa Lääkärilehden katsausartikkelissa [Lääkäri 2008] on kattava katsaus hiukkasten ja sydänsairauksien välisistä yhteyksistä. Siinä on mukana uusimpien koti- ja ulkomaisten tutkimusjulkaisujen havainnot ja johtopäätökset.

2.7 Viimeaikaisia tutkimuksia ja havaintoja

Tilastollisen korrelaation löytäminen ei vielä riitä tieteelliseen näyttöön kausaalisesta yhteydestä, vaan tulisi kyetä selvemmin eristämään myös vaikutusmekanismit. Tarvitaan kokeita, joissa tutkittavia muuttujia voidaan varioida hallitusti ja mitata riippuvan muuttujan muutoksia.

Kehitys onkin kulkemassa tähän suuntaan, sillä perinteisten otanta-, seuranta- ja aikasarjatutkimusten lisäksi metodiikkaan on tullut viime vuosina mukaan entistä selkeämmät annos-vastetutkimukset. Niissä koehenkilöitä on vain pienehkö määrä (yleensä muutamia kymmeniä), ja altistus on voimakkuudeltaan ja kestoajaltaan tunnettua. Tämä on tullut mahdolliseksi, koska fysiologisten ja toiminnallisten muutosten havainnointi on nopeudeltaan ja tarkkuudeltaan kehittynyt havaitsemaan jo varsin vähäiset vaikutukset. Vielä jos terveiden henkilöiden sijasta tutkitaan jo sellaisia sairauksia sairastavia, joiden on havaittu oireilevan ilman epäpuhtauspitoisuuksiin, vasteet ovat voimakkaampia ja helpommin todettavia. Tällaiset tutkimukset lisäävät tietoa myös mekanismeista, joiden seurauksena oireet ja vaikutukset syntyvät, ja mahdollistavat vähitellen kokonaiskuvan syntymisen eri altisteiden osuudesta. Näin saadaan viitteitä siitä, mitä päästöjä tulisi erityisesti seurata ja vähentää.

Seuraavassa on esitetty esimerkkeinä tällaisesta tutkimustyöstä katsaus viime aikoina julkaistuihin tutkimuksiin, joista on uutisoitu ja viitattu runsaasti, jaoteltuna tutkimuksen kohteena olevan elintoiminnon, terveyshaitan tai oireen mukaan.

2.7.1 Sydän- ja verisuonitaudit

Sydän- ja verisuonitauteihin liittyvässä tutkimuksessa [Mills 2007] 20 sydäntautia sairastavaa miespuolista koehenkilöä altistettiin dieselpakokaasuille. Kaikilla oli ollut sydänkohtaus vähintään puoli vuotta aiemmin, mutta he olivat saaneet siihen normaalia hoitoa ja olleet täysin oireettomia pitkään, ja vähintään 24 tuntia ennen koetta. Koehenkilöt polkivat kuntopyörää koekammiossa, jossa oli joko puhdasta tai pakokaasulla "liattua" ilmaa, jossa hiukkaspitoisuus vastasi vilkkaan liikenneväylän läheisyydessä esiintyviä pitoisuuksia ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Koehenkilöiltä mitattiin sydämen ja keuhkojen toimintaa, hengitysteiden ärsytystä ja veren hyytymistekijöiden muutoksia.

Tulosten mukaan kuntoilu aiheutti kummallakin kerralla oireetonta sydänlihaksen hapenpuutetta, mutta hapenpuute oli selvästi suurempaa, kun huoneen ilmassa oli pakokaasua. Verikokeissa pakokaasualtistus näkyi myös verihyytymiä liottavan prosessin heikentymisenä, mikä saattaa edistää verisuonitukosten muodostumista.

Eräs edellä mainitun tutkimuksen suorittajista tutki lisäksi väitöskirjatyössään [Törnqvist 2008] sekä terveitä että kroonista keuhko- ja sydäntautia, sydäntautia ja erilaisia verenkierron häiriöitä (mm. verisuonten kalkkeutuma, atherosclerosis)) sairastavia miehiä samoilla altisteilla ja menetelmillä. Myös terveillä koehenkilöillä havaittiin esiintyvän 2–6 tuntia hiukkassaltistuksen jälkeen verisuonten toiminnallisuuteen liittyviä oireita, jotka liittyvät laskimotukoksien ja veritulppien syntymiseen. Nämä olivat verisuonten poikkipinta-alan säätelyn heikkeneminen ja verihyytymiä luottavien entsyymien väheneminen. Oireet hävisivät kaikilta koehenkilöiltä kokonaan vasta 24 tunnin kuluttua.

Tämän tutkimuksen vahvuutena voidaan pitää selkeää ja kontrolloitua altistus/vaikutus-tilannetta. Sen merkittävin heikkous taas on, että altistukseen käytetty pakokaasu tuotettiin 4.5 litran dieselmoottorilla, joka kävi joutokäyntiä. Tällöin hiukkasten koostumus todennäköisesti poikkeaa normaalista käyntitilanteesta. Moottori oli lisäksi ns. teollisuusmoottori, eikä ajoneuvoissa käytettyä tyyppiä, mikä myös voi vaikuttaa hiukkasten koostumukseen.

2.7.2 Aivotoiminta, neurotoksisuus

Osin saman tutkijaryhmän toisessa hyvin tuoreessa työssä tutkittiin aivotoiminnan ja dieselpakokaasualtistuksen yhteyttä [Cruts 2008]. Siinä altistettiin 10 tervettä, miespuolista koehenkilöä dieselpakokaasulle (hiukkaskonsentraatio $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tunnin ajan mitaten samalla heidän aivotoimintaansa sähköisellä QEEG (quantitative electroencephalography) -menetelmällä kahdeksasta eri kohdasta. Subjektiivista virhettä pyrittiin vähentämään satunnaistamalla järjestys, jossa altistus ja puhtaassa ilmassa oleskelu tapahtuivat. Lisäksi dieselpakokaasuille ominainen haju oli vallitseva myös puhtaassa ilman jaksojen aikana, jonka toivottiin osaltaan heikentävän psykosomaattista oireilua.

Aivosähkötoiminnoissa havaittiin muutoksia aivojen etulohkossa noin puolen tunnin kuluessa altistuksen alkamisesta. Tämän arvellaan olevan dieselpakokaasuperäisten nanohiukkasten aiheuttamaa. Epäillään, että nämä ultrapienet hiukkaset voivat kulkeutua ilmasta jopa suoraan aivoihin; Yhdysvalloissa tutkijat ovat eläinkokeissa havainneet, että rasvaliukoiset nanohiukkaset voivat kulkeutua hajuaistimuksia välittävien neuroniratojen kautta nenäontelon hajuepiteelistä aivoihin. [Oberdörster 2004, Campbell 2005]

Kuten edellä, tässäkin osatutkimuksessa luotiin selkeä ja kontrolloitu altistus-vaikutustilanne. Myös sen heikkous on sama kuin edellisessä, eli altistukseen käytetty pakokaasu tuotettiin sellaisella moottorilla ja käyttötavalla, että hiukkasten koostumus

todennäköisesti poikkeaa normaalin ajoneuvomoottorin liikenteessä tuottamista hiukkasista. Siksi tuloksia ei voi pitää täysin yleispätevinä.

Pitkäaikaisen pienhiukkasaltistuksen on epäilty vaikuttavan jopa lasten oppimiskykyjen kehittymiseen [Margai 2003], [Suglia 2007] ja Parkinsonin taudin kehittymiseen, koska nanokokoluokan hiukkasten on havaittu olevan toksisia aivojen dopamiinia tuottaville neuroneille [Block 2004].

2.7.3 Hengitysteiden sairaudet, astma

Hengitysteiden sairauksien ja ilman epäpuhtauksien välistä yhteyttä tukittiin lievää tai keskivahvaa astmaa potevilla koehenkilöillä suoritetussa tutkimuksessa [McCreanor 2007], jossa 60 koehenkilöä käveli kahden tunnin ajan (6 km) joko vilkkaasti liikennöidyssä katukuilussa (Oxford Street Lontoossa) tai eri ajankohtana läheisessä puistossa (Hyde Park). Koehenkilöille tehtiin altistuksen aikana fysiologisia kokeita ja immunologisia mittauksia, ja katukuilun ilmasta otettiin samaan aikaan näytteitä hiukkaspitoisuuden ($PM_{2.5}$) ja typpidioksidipitoisuuden (NO_2) toteamiseksi. Kuten odotettua, pienhiukkaskonsentraatio oli liikenneväylän läheisyydessä moninkertainen verrattuna puiston ilmaan (65 vs. $18 \text{ \#}/\text{cm}^3$)³, ja myös typpidioksiditaso oli katukuilussa huomattavasti korkeampi kuin puistossa (142 vs. $21,7 \text{ \mu g}/\text{m}^3$).

Koehenkilöissä havaitut oireet eivät olleet kovin voimakkaita, mutta tehdyissä mittauksissa oli havaittavissa tilastollisesti merkittävä ero katukuilussa ja puistossa kävelyn välillä. Oireiden todettiin häviävän vasta usean tunnin kuluttua.

Tämän tutkimuksen heikkoudet liittyvät liikennemelun aiheuttamaan häiriövaikutukseen ja terveiden verrokkien puuttumiseen. Vahvuutena taas voidaan pitää sitä, että latistukseen käytettiin ”oikeata” kaupunki-ilmaa, eikä edellisten tutkimusten tapaan keinotekoisesti tuotettua pakokaasua.

2.7.4 Keuhkojen toiminnan heikkeneminen, kehityshäiriöt

Hiukkasperäisen hiilien osuutta lasten keuhkojen toiminnan heikkenemisessä on tutkittu Iso-Britanniassa [Kulkarni 2006]. Siinä tutkittiin sekä terveitä että astmaa sairastavia 8–15-vuotiaita lapsia. Aluksi mallinnettiin heidän altistuksensa hengitettävälle hiukkasille (PM_{10}) valikoiden koehenkilöt siten, että mahdollisimman monet tekijät, jotka heikensivät mallilaskelman tuloksia, otettiin huomioon, kuten esimerkiksi asuminen 2. kerrosta korkeammalla.

Koehenkilöiltä mitattiin keuhkojen toimintaa ja sen jälkeen hengitysteistä otettiin näytteet, joista määritettiin valomikroskopialla makrofagisolujen hiilipitoisuus. Sen oletettiin korreloivan vahvasti hiilihiukkasaltistuksen kanssa ja antavan viitteitä siitä, miten onnistunut mallilla laskettu altistus oli. Hiilipitoisuuden ja mitatun keuhkofunktion välillä havaittiin käänteinen korrelaatio: hiilen pitoisuuden kasvaessa keuhkojen toiminta heikkeni sekä terveillä että astmaa sairastavilla, mutta astmaatikoilla jo huomattavasti pienemmät hiilipitoisuudet aiheuttivat muutoksia keuhkofunktiossa viitaten suurempaan herkkyteen. Toisaalta se osoitti vääräksi olettamuksen, että keuhkojen heikko toiminta saattaisi lisätä hiukkasten määrää hengitysteissä. Selitykseksi tähän lisääntyneeseen herkkyteen astmaatikoilla esitettiin heikentyntä immuunipuolustusta {”impairment of phagocytosis of IgG-opsonized yeast by airway macrophages”}, jota oli havaittu toisessa, aikuisilla astmaatikoilla suoritetussa tutkimuksessa.

³ Hiukkaskonsentraation yksikkönä käytetään tavallisesti hiukkasten lukumäärää tilavuusyksikössä, jota merkitään [$\text{\#}/\text{m}^3$].

Ilmansaasteiden on tutkimusten mukaan todettu aiheuttavan jopa hengityselimistön kehityshäiriöitä nuorilla henkilöillä [Gauderman 2004]. Tutkimuksessa kohteena oli alun alkaen runsaat 1700 noin kymmenvuotiaasta koululasta 12 paikkakunnalta Etelä-Kaliforniassa, joiden ilmanlaatu vaihteli mm. otsonin, alkuainehiilen, hiukkasten (PM_{10} , $PM_{2.5}$) ja typpidioksidin osalta. Koehenkilöt ryhmiteltiin lisäksi alaryhmiin passiivisen tupakoinnin, etnisen taustan ja vanhempien koulutustason mukaan.

Lasten kehitystä seurattiin kahdeksan vuoden ajan, ja heidän hengityselimistönsä toiminnallisuuden kehittymistä mitattiin kahden vuoden välein spirometrillä seuraten ns. sekuntitilavuuden⁴ (FEV_1) muutoksia. Koko tutkimusajan loppuun asti kyettiin seuraamaan runsasta 700 lasta, sillä niitä, jotka jakson aikana muuttivat toiselle paikkakunnalle, ei enää seurattu.

Tutkijat löysivät yhteyden heikommin kehittyvien lasten asuinpaikan korkeisiin alkuainehiilen ja $PM_{2.5}$ -pitoisuuksiin ($P=0.007$ alkuainehiilelle, $P=0.04$ $PM_{2.5}$:lle), mutta myös kohonnut typpidioksidikonsentraatio vaikutti samansuuntaisesti, joskin hieman heikommin ($P=0,005$). Lapsien, joilla mitattu hengitysfunktio jäi seurantajakson lopussa alle 80 prosenttiin oletetusta normaalista, lukumäärä oli melkein viisinkertainen korkeimpien keskimääräisten $PM_{2.5}$ -pitoisuuksien alueilla verrattuna puhtaimpiin alueisiin.

Suomessakin on tutkittu pienhiukkasaltistusten ja keuhkojen toiminnan välistä yhteyttä astmaatikoilla, esim. [Penttinen 2001], mutta vastaavaa toiminnallisuuden kehittymisen seurantaa ei ole tehty.

2.7.5 Keuhkosityöpä, muut syövät

Pakokaasujen (sekä bensiini- että dieselmoottorien) osuutta keuhkosityövän synnyn lisääjänä on tutkittu laajalti. Suurin osa tutkimuksista on toteutettu luokittelemalla koehenkilöt esim. ammatin ja työnkuvan mukaan erilaisiin altistusryhmiin, ja tutkittu epidemiologisesti eri ryhmien eroja sairastuvuudessa. Tällöin sekoittavien tekijöiden, kuten rinnakkaisten altistusten, osuus on voinut olla huomattava. Viime aikoina on yritetty tehdä tarkempaa analyysiä: Kanadalaisessa tutkimuksessa [Parent 2006] koehenkilöiden elinikäinen altistusprofiili pyrittiin haastattelulla ja muilla tavoin kartoittamaan tarkasti, ja siten poistamaan sekoittavien tekijöiden vaikutusta. Koehenkilöt seulottiin vajaan 4000 syöpäsairaana (todettu vuosina 1979–1985) joukosta. He olivat kaikki miespuolisia, joista runsaat 800 sairasti keuhkosityöpää ja verrokkina oli runsaat 1300 muuta syöpäsairasta.

Tutkimuksessa haluttiin myös lisäselvitystä mahdollisiin eroihin dieselpakokaasualtistuksessa, jota on yleisemmin tutkittu, ja altistuksessa bensiinimoottorin pakokaasuille, mitä taas on tutkittu verrattain vähän. Aiemmissa tutkimuksissa oli todettu pakokaasualtistuksen ylipäättään lisäävän syöpäriskiä. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että dieselpakokaasualtistus lisäsi keuhkosityöpäriskiä huomattavasti enemmän kuin altistuminen bensiinimoottorien pakokaasuille. Bensiinimoottoreiden pakokaasujen todettiin nyt olevan vain erittäin vähäinen riskitekijä. Voimakas dieselpakokaasuille altistuminen näytti lisäävän riskiä sairastua syöpään jopa niin paljon, että se havaittiin sekä tupakoimattomilla että tupakoivilla koehenkilöillä, vaikka tupakointi on itsessään jo varsin vahva keuhkosityöpäriskiä kasvattava tekijä.

Elinikäistä kumulatiivista altistusta, joka siis tutkimuksen kohteena olleille henkilöille oli tapahtunut 1940-luvun ja 1970-luvun välisenä aikana, pyrittiin ”hienosäätämään” jaka-

⁴ sekunnissa uloshengitettävä tilavuus

malla koehenkilöt ammatillisen historiansa perusteella tarkemmin. Tutkimuksessa otettiin huomioon dieselmoottorin yleistyminen eri käyttökohteissa eri ajankohtina, millä oletettiin olevan vaikutusta elinikäisen altistuksen määrään. Alun alkaenhan pohjois-amerikkalaisessa ympäristössä ajoneuvot ja moottorikäyttöiset työkonet olivat bensinikäyttöisiä, toisin kuin Euroopassa, jossa dieselmoottorin käyttö on historiallisesti aina ollut yleisempää. Näin on ollut varsinkin henkilöautoissa, joissa dieselmoottori edelleen on harvinaisuus Pohjois-Amerikassa. Tällä tavoin pyrittiin parantamaan bensiini- ja dieselpakokaasujen vaikuttavuuden arviointitarkkuutta.

Kotimaisessa tutkimuksessa [Guo 2004] käytettiin pitkälti samantapaista lähestymistapaa ja metodologiaa kuin edellisessä, mutta siinä seurattiin syöpäsairauksia laajasti; ei vain keuhkosityöpää. Aineisto koottiin suomalaisesta aktiiviväestöstä vuoden 1970 väestölaskennan perusteella. Mukana olleiden syntymävuodet olivat välillä 1906–1945, ja altistumista arvioitiin vuosien 1971–1995 väliseltä ajalta siihen kehitetyllä mallilla (FIN-JEM, Finnish National Job Exposure Model), joka otti huomioon työn ja sitä kautta syntyvät altistukset. Syöpään sairastuneet identifioitiin syöpärekisterin kautta, ja mukana oli ruokatorven syöpä (n. 2200 tapausta), munasarjasyöpä (n. 5100), kivessyöpä (n. 400), munuaissyöpä (n. 7400), virtsarakon syöpä (n. 8000) ja leukemia (n. 4500).

Analyysissä ei voitu vahvistaa aiemmin esitettyjä korrelaatioita eri syöpälajien ja ammattiperäisen pakokaasu-altistuksen välillä. Useimpien korrelaatioiden tulkittiin aiheutuvan pääasiassa rinnakkaisista altistuksista, joita useisiin ammatteihin liittyy, jolloin pakokaasuista peräisin olevan vaikutuksen erottaminen on vaikeaa, ellei suorastaan mahdotonta. Sitä vastoin aineisto antoi viitteitä siitä, että munasarjasyövän syntyy pakokaasu-altistus saattaisi vaikuttaa. Koska altistuneiden henkilöiden joukossa oli vain hyvin vähän naispuolisia, ei havaintojen määrä ollut kuitenkaan tilastollisesti riittävän suuri. Kirjallisuudesta on löydettävissä viitteitä siitä, että dieselpakokaasu voi sisältää yhdisteitä (mm. nitrofenolit), joilla on estrogeenihormonin toimintaa jäljitteleviä ominaisuuksia. Silloin pakokaasu-altistus voisi johtaa ulkosyntyisen estrogeenin altistuksen kaltaiseen tilaan, jolla jo on todettu olevan munasarjasyöpäriskiä lisäävä vaikutus.

2.7.6 Immuunipuolustusjärjestelmän aktivoituminen

Ranskalaiset ovat tutkineet astmaa sairastavien herkkyyttä dieselpakokaasuille [Mamessier 2006] ja havainneet verisolukokeissa, että dieselpakokaasut aktivoivat tavanomaista ja laajalti tunnettua, kehon immuunipuolustukseen liittyvää IgE-synteesiä aiheuttaen astmaatikoilla oireilua. Lisäksi havaittiin runsaasti myös T-soluja, jotka liittyvät soluvälitteiseen immunitettiin ja synnyttävät aktiivisia lymfosyyttejä, jotka eri tavoin osallistuvat vieraiden mikrobien ja solurakenteiden tuhoamiseen. Tämä aktivointi oli voimakkaampaa vaikeaa astmaa sairastavilla kuin terveillä verrokeilla. Kehon "puolustusjärjestelmät" siis aktivoituivat varsin laaja-alaisesti.

Hiukkasten sisältämien antigeenien vuorovaikutusta hengitysteiden epiteelien ja solurakenteiden kanssa on tutkittu Sveitsissä [Blank 2007] *in vitro*⁵ -viljelmissä.

[Kendall 2007] on tutkinut keuhkoepiteelistä otetun näytteen ja pienhiukkasten (PM_{2.5}) välistä vuorovaikutusta (*in vitro*) ja tunnistanut useita (13) eri aineita, lähinnä aminohappoja, jotka adsorboituvat hiukkasiin. Voimakkain näistä, makrofagien toimintaa tehostaviksi eli opsoneiksi luokiteltavista yhdisteistä, oli fosfolipideihin kuuluva di-palmitoyl-fosfatidyylikoliini⁶. Tutkimus osaltaan lisää ymmärtämystä immuunipuolustus-

⁵ *In vitro* -tutkimus tapahtuu kasvattamalla soluja kasvatusaljoilla. Vrt. *in vivo*, jossa tutkitaan soluissa esiintyviä ilmiöitä, yleensä koe-eläimillä.

⁶ Engl. *di-palmitoyl-phosphatidylcholine* (DPPC).

<http://en.wikipedia.org/wiki/Dipalmitoylphosphatidylcholine>

järjestelmän toiminnasta hengitysilman mukana kehoon tulleiden vierasaineiden torjunnassa.

Tuoreessa saksalais-italialaisen tutkimusryhmän tutkimuksessa [Dang 2008] vertailtiin kahden vanhemman ja uuden, EURO4-tasoa edustavan, dieselmoottorin pakokaasujen sytotoksisuutta. Molemmat moottorit olivat samanmerkkisiä (MAN), mutta eri tyyppiä (DS2876, D0836LF). Molemmissa käytettiin samaa vähärikkistä EN590-standardin vaatimukset täyttävää polttoainetta.

Tavoitteena oli tuottaa ”perinteisiä”, runsaasti hiiltä sisältäviä hiukkasia, ja siksi vanhempaa moottoria vielä kuristettiin ja polttoaineen syöttöpainetta alennettiin, minkä seurauksena hiukkastuotto nousi huomattavan korkeaksi. Uusinta tekniikkaa edustavasta moottorista taas syntyi hiukkasia, joissa oli mukana mm. 10 % voiteluaineperäistä tuhkaa. Molempien moottorien pakokaasuista kerättiin hiukkasia kuumennetulla näytteenottimella, ja hiukaset steriloidtiin ennen solualtistuskokeita kuumentamalla niitä ja huuhtelemalla tislattulla vedellä.

In vitro -laboratoriokokeissa molempia hiukkastyyppejä levitettiin identtiset konsentraatiot (30 µg/mL) ihmisen verestä otettujen monosyyttisoluviljelmiin. Soluja oli ennen koetta käsitelty siten, että viljelmään syntyi runsaasti makrofageja, joihin vierasaineet (antigeenit) herkästi tarttuvat. Hiukkasilla altistettuja soluviljelmiä tutkittiin lasermikroskopialla (confocal laser scanning microscope, CLSM) pyrkien laskemaan apoptoottisten ja nekroottisten⁷ solujen määrät. Lisäksi soluja tutkittiin pyyhkäisyelektronimikroskopialla niiden morfologian ja makrofagiaktiiviatason määrittämiseksi.

Analyysit osoittivat, että EURO4-moottorin tuottamat hiukaset olivat huomattavasti ”aggressiivisempia” tuottaen suuremman määrän sekä apoptoottisia että nekroottisia soluja, mikä viittaa niiden vaurioittavan soluja voimakkaammin kuin vanhantyyppisen moottorin tuottamat hiukaset. EU4-moottorin hiukaset olivat lisäksi epätasaisemmin jakautuneita ja enemmän makrofagisolujen ”syömiä” kuin perinteisemmät hiukaset. Tämä viittaa niiden olevan sytotoksisempia kuin ”vanhanaikaiset” hiukaset.

Hiukkasten morfologinen analyysi puolestaan viittasi EURO4-moottorin hiukkasten olevan keskimäärin pienikokoisempia ja rakenteeltaan rikkonaisempia, jolloin niillä on suuri reaktiivinen pinta-ala. Alkuaineanalyysi taas paljasti, että EURO4-moottorin hiukkasi-en pintakerroksessa on mm. runsaammin happea (jopa 12 %) kuin ”vanhanaikaisen” moottorin hiukkasissa (7,4 %). Kaikki nämä tekijät viittaavat siihen suuntaan, että EU4-moottorin hiukaset ovat erittäin helposti veteen liukenevia toisin kuin runsashiiliset hiukaset.

⁷ Solun kykyä tappaa itse itsensä kutsutaan ohjelmoiduksi solukuolemaksi eli apoptoosiksi. Apoptoottinen solu voidaan erottaa sen rakenteesta ja toiminnassa tapahtuvien muutosten perusteella toisesta solukuoleman tavasta, nekroosista, jossa solun kalvot hajoavat ja solun sisältö vuotaa ympäristöön saaden aikaan tulehdusreaktion. Nekroosi saa alkunsa voimakkaasta ulkopuolisesta ärsykkeestä, myrkyistä tai kudolvauriosta. Myös voimakas paikallinen säteilyaltistus aiheuttaa nekroosia. Apoptoosissa sen sijaan solu kutistuu mutta säilyttää solukalvon eheyden, kromatiini pakkautuu ja tuma sekä sytoplasma pilkkoutuvat pieniksi solun osiksi sisältäviksi rakkuloiksi, kunnes naapurisolut tai makrofagit tunnistavat sen ja ottavat kuolevan solun sisäänsä. Tunnusomainen piirre apoptoosille on endonukleasientsyymien aiheuttama DNA:n pilkkoutuminen. Apoptoosi ei suinkaan ole sattumanvarainen tapahtuma, vaan tarkoin geneettisesti säädelty, aktiivinen energiaa vaativa prosessi. Apoptoosin voi laukaista hyvin monenlaiset stressitekijät, kuten esimerkiksi solulle myrkylliset lääkeaineet, virukset tai säteily. Apoptoosin merkitys säteilyn aiheuttamana solukuolemana vaihtelee solutyypin ja solun kypsyntäasteen mukaan. Apoptoottinen solukuolema on kuitenkin yhtä olennainen osa normaalia yksilönkehitystä kuin solun jakautuminen ja erilaistuminenkin. Ohjelmoitu solukuolema suojaa elimistöä myöhään kehittyviltä terveyshaitoilta eli syövältä, koska vaurioitunut solu hävitetään. Lähde: ”Säteilyn terveysvaikutukset”, luku 2. Julkaisija Säteilyturvakeskus, STUK.

Loppupäätelmänä esitetään, että EU4-kelpoisten matalaemissiomoottorien tuottamat hiukkaset ovat haitallisempia kuin vanhemman tyyppisten moottorien, joten alenema hiukkaspäästöjen kokonaismassassa ei suorassa suhteessa vähennä hiukkasista aiheutuvia haittoja.

Tämän tutkimuksen heikkoutena voidaan pitää vanhantyyppisen moottorin ajamista ”väärillä säädöillä”, eli matalalla polttoaineen paineella, jolloin savuluku nousi tasolle 5, ja hiukkasemission taso oli korkea, 200–600 mg/kWh. Tällainen mitä todennäköisimmin vaikuttaa myös hiukkasten koostumukseen ja laatuun. Lisäksi verrattiin samaa hiukkas”annosta”, vaikka uusissa moottoreissa hiukkastuotto (g/kWh) on paljon pienempi, ja ne siten tuottavat pienempiä hiukkaskonsentraatioita.

2.7.7 Uusimpia tutkimuksia dieselpakokaasukoostumuksesta

Kuten jo edellä todettiin, terveysvaikutusten täsmällinen tutkiminen on vaikeaa, kun altistusta ei ole voitu määrittää kovinkaan tarkasti. Tätä ongelmaa kasvattaa edelleen moottorien ja pakokaasunpuhdistuksen suhteellisen nopea kehitys ja monien uusien tekniikoiden markkinoille tulo. Päästö määräysten kiristyessä on etenkin dieselmootto-reiden tekniikka kehittynyt varsin kiivaasti, ja lukuisia uusia puhdistustekniikkasovelluksia on otettu käyttöön. Siten dieselmoottorin pakokaasupäästöjen koostumus on entisestään monipuolistunut. Käsite ”dieselpakokaasu” ei ole millään tavalla yksikäsitteinen, vaan pakokaasu saattaa sisältää eri epäpuhtauskomponentteja hyvin erilaisia määrasuhteita käytettävästä tekniikasta (ja polttoaineesta) riippuen, vaikka nimellisesti autot täyttäisivätkin kulloinkin voimassa olevat määräykset. Merkittävin ero tietysti syntyy nykyisissä EURO3- ja EURO4-autoissa siitä, onko autoissa hiukkassuodatin, mutta suodatintekniikoissakin on eroja, jotka heijastuvat mm. typpidioksidipäästöjen määrään ja hiukkaskokojakautumaan.

Lähteissä [Mohr 2006], [Heeb 2007], [Müller 2006], [Ban-Weiss 2008] on pohdittu pakokaasujen koostumuksen muutoksia ja sen mahdollisia heijastumia terveysvaikutuksiin.

2.8 Yhteenveto ja johtopäätökset terveysvaikutustutkimuksista

Kuten jo luvun alussa todettiin, pienhiukkaset ovat yhdyskuntailman epäpuhtauksista terveysvaikutusten kannalta ongelmallisin tekijä. Dieselmoottoriset autot tuottavat pienhiukkasia, jos niissä ei ole hiukkaspuhdistimia. Pakokaasujen ohella tien pinnasta nouseva pöly, teollisuuden ja energiantuotannon hiukkaspäästöt, paikallinen puun pienpoltto sekä ns. kaukokulkeutuma vaikuttavat hiukkaspitoisuuksiin. Yleensä ilmanlaatuun vaikuttavat eniten ns. lähipäästöt, mutta kaikkein pienimpien hiukkasten kohdalla merkittävää kaukokulkeutumaa voi tulla satojenkin kilometrien etäisyydeltä. Paikallisesti mitatuista hiukkaspitoisuuksista dieselmoottoreista peräisin olevien hiukkasten osuus siis vaihtelee mm. ajankohdan, paikan ja sääolosuhteiden mukaan. Siksi dieselmoottoriset autot eivät suinkaan ole yksinomainen syy kohonneisiin hiukkaspitoisuuksiin.

Pienhiukkasten koko (ns. aerodynaaminen halkaisija) on merkittävä fysikaalinen ominaisuus, joka vaikuttaa mm. siihen, miten hiukkanen käyttäytyy ilmassa, ja miten syväle se pääsee tunkeutumaan ihmisen hengityselimistöön. Kaikkien pienimmät, yleensä poltosta peräisin olevat hiukkaset, ovat niin pieniä, että niille ei juuri löydy vastinetta luonnon tuottamissa hiukkasissa. Siksi ihmisen evoluutiossa kehittynyt hengitysilman epäpuhtauksia suodattava puolustusjärjestelmä ei kykene niitä torjumaan, vaan ne pääsevät hyvin syväle keuhkoihin. Sieltä ne vuorostaan pääsevät edelleen verenkiertoon, koska keuhkorakkuloissa on runsaasti verisuonia. Kudokset ovat siellä myös hyvin ohuita, jotta hapen pääsy vereen on tehokasta.

Paitsi hiukkasen koko, myös sen pintarakenne ja kemiallinen koostumus vaihtelevat laajasti. Myös näillä tekijöillä on todettu olevan yhteyksiä terveysvaikutusten syntyyn. Suhteellisesti ottaen "vaarattomimpia" ovat sellaiset hiukkaset, joissa suuri osa on epäorgaanista hiiltä, ja ne ovat lisäksi "kuivia", so. niiden pinnalle ei ole kiinnittynyt mitään hiilivety-yhdisteitä. Jos hiukkaset taas ovat huokoisia ja niissä on runsaasti tiivistyneitä hiilivetyjä, etenkin monirenkaisia (PAH) yhdisteitä, niiden haitallisuus kasvaa moninkertaiseksi. Useimmat hiukkaspuhdistimet ovat tehokkaita paitsi poistamaan hiukkasten kokonaismäärää, myös "kuivattamaan" hiukkasia tehden niistäkin hiukkasista haitattomampia, jotka pääsevät puhdistimesta läpi.

Terveysvaikutusten tutkimus on kehittynyt viime vuosina aivan uudelle tasolle, jossa voidaan havainnoida koehenkilöiden oireita suorassa altistustilanteessa, ja saada entistä täsmällisempää tietoa eri altisteiden ja oireiden välisestä yhteydestä. Myös fysiologisten muutosten havainnointi ja tutkimus on nykyisin hyvin pitkälle vietyä. Siten ymmärrys kasvaa niistä kulkureiteistä, joita myöten ilman epäpuhtaudet, ml. pienhiukkaset, etenevät ihmisen elimistöön. Samalla vahvistuvat käsitykset mekanismeista, joilla po. vierasaineet tuottavat havaittuja oireita, ja mitä kehon prosesseja ne häiritsevät. Nämä kaikki edistysaskeleet yhdessä parantavat koko ajan mahdollisuuksia torjua dieselpakokaasun haittavaikutuksia, jolloin kyetään kehittämään puhdistustekniikkaa juuri niitä pakokaasun aineosasia varten, joihin suurimmat haitat liittyvät.

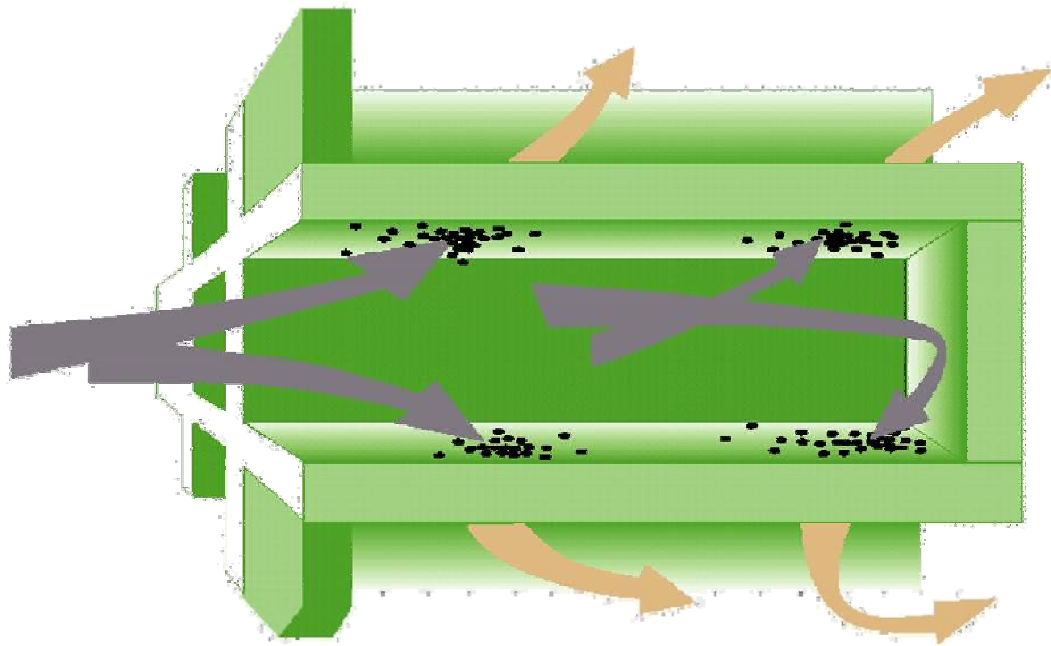
Suoralla altistuksellakin toteutettua annos-vastetutkimusta vaikeuttaa kuitenkin pakokaasujen koostumuksen monimuotoisuus. Käsite "dieselpakokaasu" kun on hyvin vaikeasti määriteltävä, ja samakin moottori tuottaa eri toimintatiloissa hyvin erilaisia päästöjä, ja mm. hiukkasten lukumäärä, koko ja kemiallinen koostumus vaihtelevat. Lisäksi on viitteitä siitä, että uudet pakokaasujen puhdistamisen käytettävät järjestelmät entisestään monimutkaistavat pakokaasupäästöjen kokonaiskuvaa. Siksi tulevaisuudessa tulisi tehdä mahdollisimman laaja-alaisia kartoituksia erilaisten puhdistuslaitteiden ja jälkikäsittelyjärjestelmien vaikutuksista pakokaasujen koostumukseen, jotta päästäisiin selville niiden mahdollisista sivuvaikutuksista.

3 Dieselmoottoristen henkilöautojen hiukkassuodattimet

3.1 Tehdasasenteiset hiukkassuodattimet

3.1.1 Tehdasasenteisten hiukkassuodattimien rakenteesta

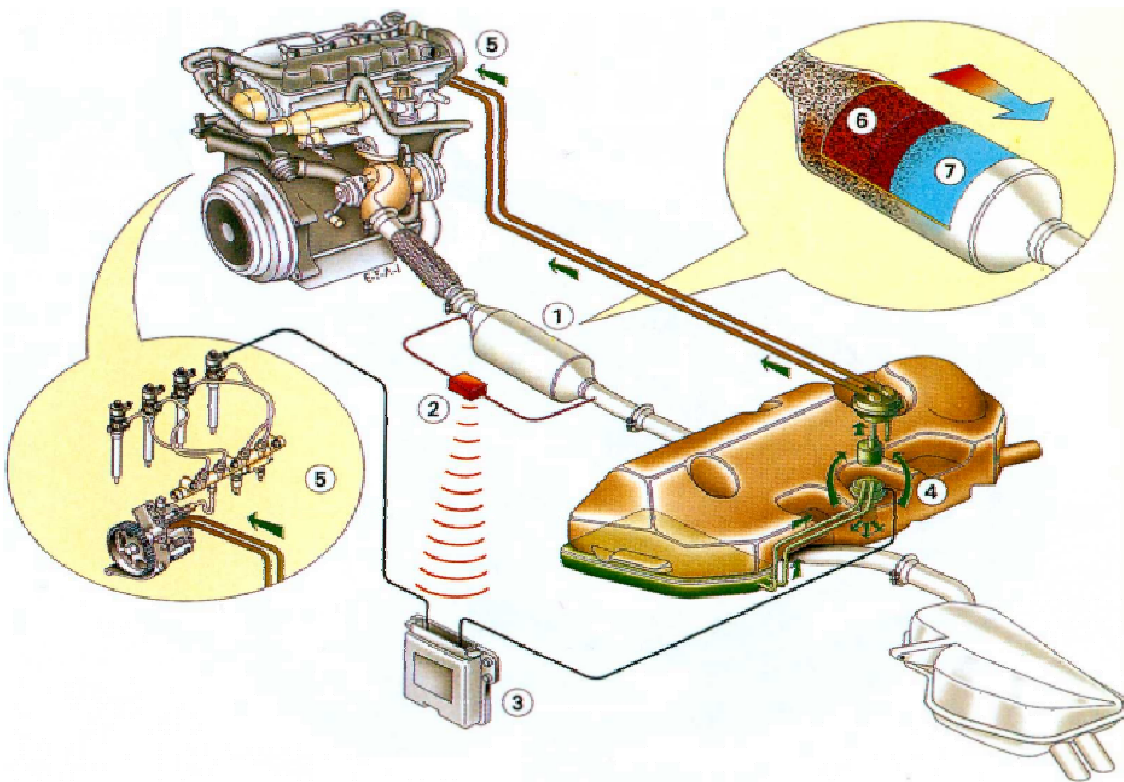
Kuten jo edellä on todettu, dieselmoottorin pakokaasuille on ominaista verrattain suuri hiukkaspitoisuus. Dieselmoottorisiin henkilöautoihin on ollut saatavana tehdasasenteisia hiukkassuodattimia vuodesta 2000, jolloin Peugeot ensimmäisenä esitteli 607 mallin 2.2 HDi -moottorin valinnaisella puhdistimella. Kyseessä oli keraamiseen kennoon perustuva, ns. wall flow -periaatteella toimiva suodatin, jossa pakokaasut joutuvat kulkemaan huokoisen, keraamisen kennomateriaalin seinämän lävitse. Silloin pakokaasussa olevat hiukkaset tarttuvat seinämän huokosiin, ja pakokaasu puhdistuu. Erotusasteet tällaisille suodattimille ovat yli 90 prosenttia.



Kuva 6. "Wall flow" -tyyppisen hiukkassuodattimen toimintaperiaate.

Suodattimeen jääneet nokihiukkaset tukkivat kuitenkin suodattimen varsin nopeasti, ellei niitä saada hapettumaan, jolloin suodatin puhdistuu eli "regeneroituu". Jos ajaminen kuitenkin tapahtuu niin hitaalla nopeudella ja pienellä moottorin kuormituksella, ettei pakokaasun lämpötila riitä nostamaan nokihiukkasten lämpötilaa hapettumistasolle, tarvitaan tukijärjestelmiä, joilla hapettuminen saadaan alkamaan.

Yleisesti järjestelmissä käytetään ns. jälkiruiskutusta, eli pieni määrä polttoainetta ruiskutetaan hyvin myöhään, pakovoventtiilin ollessa jo auki, jolloin pakokaasun lämpötila kasvaa ja auttaa hiukkassuodattimen regeneroinnin alkua. Nokihiukkasten syttymiseen tarvitaan noin 450–500 °C lämpötila. Kun hiukkaset alkavat hapettua, reaktio luo lämpöä ja siten edesauttaa hapettumisen leviämistä koko suodattimen alalle. Jälkiruiskutus kasvattaa polttoaineen kulutusta muutamalla prosentilla, jos ajo on pääasiassa hidastempoista kaupunkiajoa.



Kuva 7. PSA-yhtymän käyttämän hiukkassuodatusjärjestelmän kaaviokuva (PSA).

1 suodatin, 2 paine-erotunnistin, 3 ohjausyksikkö, 4 lisäainesäiliö ja automaattinen annostelujärjestelmä, 5 moottori & polttoaineen ruiskutuslaitteisto, 6 hapettava katalysaattoriosia, 7 hiukkassuodatinosa.

Suodattimen tukkeutumista ja jälkiruiskutuksen tarvetta seurataan tavallisesti mittamalla suodattimen vastapainetta eli paine-eroa suodattimen yli. Paine-eron noustua riittävän suureksi moottorinohjausyksikkö aktivoi jälkiruiskutuksen kunnes paine-ero laskee hyväksyttävälle tasolle.

Jotta jälkiruiskutus voidaan toteuttaa sopivan suuruisena, piti kehittää riittävän nopea-toimiset, pietsosähköiseen kiteeseen perustuvat polttoainesuuttimet. Pietsosuuttimien toiminta on kymmenen kertaa nopeampaa kuin perinteisten magneettikelaan perustuvien suuttimien, ja ruiskutuksen jakaminen useampaan osasuihkuun on mahdollista. Jälkiruiskutuksen lisäksi käytetään myös esiruiskutusta, jossa pieni määrä polttoainetta suihkutetaan ennen varsinaista suihkua. Tämä pehmentää moottorin käyntiä mm. joutokäynnillä.

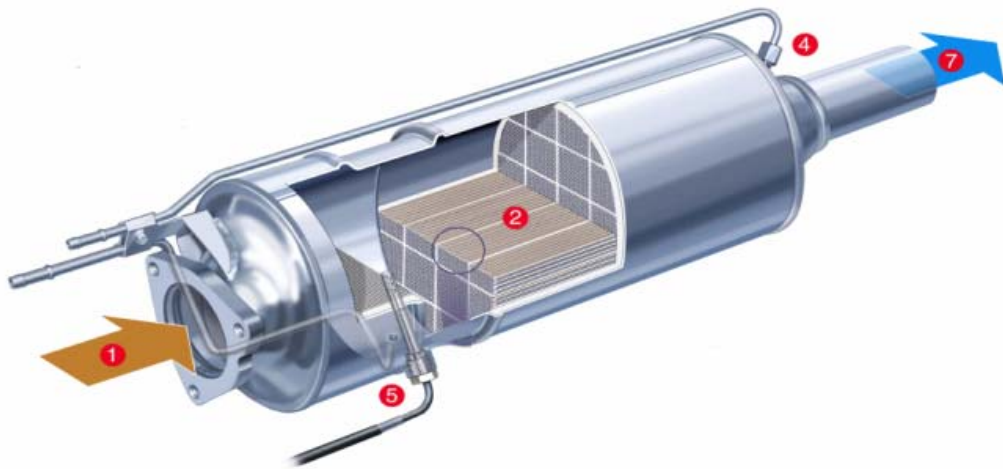
Jos suodattimeen on paikallisesti tarttunut hyvin runsaasti hiukkasia, saattaa jokin kohta kuumentua erityisen voimakkaasti. Tällöin on vaarana suodattimen sisärakenteiden murtuminen paikallisen lämpölaajenemisen ollessa voimakasta, sillä keraaminen materiaali johtaa huonosti lämpöä eikä lämpö ei ehdi levitä ympäröiviin rakenteisiin.

Hiukkasten hapettumista edesauttavat myös suodattimen pintaan seostetut hapettavat katalyytit. Tällöin jälkiruiskutuksen tarve vähenee, ja moottorin polttoainetalous paranee. Peugeotin järjestelmässä käytetään toisentyyppistä katalyyttiä: lisäainetta, jota seostuu polttoaineeseen aina tankattaessa. Tämä cerium-perustainen lisäaine, kaupanimeltään Eolys™, toimii katalyytin tavoin alentaen hiukkasten syttymislämpötilaa.

Sitä tankataan erilliseen säiliöön, kun valmis auto lähtee tehtaalta. Ensimmäinen täyttö riittää 120 000–150 000 km ajoon. Lisäaineen kehittyneempi nykyversio sallii hieman pienemmän pitoisuuden. Säiliön täyttö riittää siten pitempään, vaikka ainetta on nykyisissä versioissa vain 1,5 litraa, kun aluksi käytettiin 5 litran säiliötilavuutta.

Koska suodattimeen kuitenkin jää tuhkaa ja joitain muita kuona-aineita, tällaisessa ”isossa huollossa” (120 000 tai 150 000 km) lisäainesäiliön täytön lisäksi hiukkassuodatin irrotetaan ja vaihdetaan tehdaskunnostettuun, joka on valmiiksi pesty ja puhdistettu siihen tarttuneesta tuhkasta. Sitten PSA on ilmoittanut parannetusta suodatinrakenteesta, jolla huoltoväli voidaan pidentää jopa 250 000 kilometriin.

Muiden valmistajien tarjoamissa hiukkassuodattimissa, kuten kuvassa olevassa Opelin käyttämässä mallissa, on suodatinkeuhon pinnoilla katalyyttilisäaineita, jotka toimivat samaan tapaan kuin polttoaineeseen seostettava lisäaine alentaen noen syttymislämpötilaa ja edesauttaen regeneraatiota.



Kuva 8. Opelin käyttämän hiukkassuodattimen rakennekuva (Opel).
[5 = lämpötilatunnistin, jolla valvotaan regeneraatiota.]

Jollain voiteluainevalmistajilta on tullut markkinoille myös ns. vähätuhkaisia moottoriöljyjä. Niitä suositellaan suodattimella varustettuihin autoihin, koska niistä muodostuu normaalia vähemmän jäämiä suodattimeen. Eräät autonvalmistajat myös suosittavat omistajan käsikirjoissa käyttämään nimenomaan tällaisia öljyjä suodattimien ongelmattoman toiminnan varmistamiseksi.

3.1.2 Tehdasasenteisten hiukkassuodattimien tarjonta

Tehdasvarusteena hiukkassuodattimia on siis ollut tarjolla vuodesta 2000, mutta silloin tarjonta rajoittui vain tuohon yhteen mainittuun automalliin ja moottorivaihtoehtoon. PSA laajensi kuitenkin tarjontaa jo seuraavana mallivuonna kattamaan 307-, 406- ja Citroën C5 -mallit. Vuonna 2003 tarjontaa laajennettiin tila-autoihin Peugeot 807, Citroën C8 ja Fiat Ulysse, jotka käytännössä ovat kuitenkin yksi ja sama auto eri markkinointinimillä.

Myös Ford on tarjonnut samanlaista suodatinjärjestelmää kuin PSA niihin malleihin (mm. Ford Focus ja C-MAX), joissa käytetään samoja PSA:n kanssa yhteistyössä suunniteltuja moottoreita kuin edellä mainituissa Peugeot- ja Citroën-malleissa [GreenCarCongress, 2005].

Muut valmistajat toivat suodattimia markkinoille vasta paljon myöhemmin. Kun EU-RO4-hyväksymisiä alkoi tulla 2005, lisääntyi myös suodattimien tarjonta, vaikka sitä ei vielä tarvittukaan. Jo 13 merkkiä tarjosi suodattimia, edellisten lisäksi mm. Audi, BMW, Opel, Mercedes-Benz, Toyota, VW ja Volvo. Useimmilla oli kuitenkin vain yksi tai pari mallia ja moottoria, johon suodatin oli tarjolla. Yhteensä malleja oli tyyppihyväksytty 28 kpl.

Vuonna 2006 tarjonta laajeni, ja mukana oli jo 23 eri merkkiä, yhteensä noin 80 mallia. Vuonna 2007 jo 30 merkkiä oli tyyppihyväksyttänyt hiukkassuodattimen, ja niitä löytyi jo yli 100 eri mallin varusteista. Kuluvin vuoden aikana tarjonnan lisääntyminen on ollut aivan konkreettisesti havaittavaa: kun helmikuussa 2008 Suomessa oli tarjolla suodattimia 28 eri merkkiin ja yhteensä yli 150 eri malliin, loppuvuodesta määrä oli lisääntynyt 33 merkkiin ja useaan sataan eri malliin.

Nykyhetken tarjonta Suomessa merkeittäin on esitetty taulukossa 1. Sen mukaan nyt tarjolla olevista autoista noin puoleen olisi ostettavissa hiukkassuodatin. Kaikkia näitä ei kuitenkaan varmuudella ole ostettu hiukkasuodattimella varustettuna, koska tilanne on kehittynyt näin hyväksi vasta vuoden toisella puoliskolla ja vain osassa malleissa suodatin on vielä vakiovaruste, muissa siitä joutuu maksamaan lisähintaa. Tyypillinen lisähinta tehdasasenteisesta hiukkassuodattimesta lisävarusteena vaihtelee noin 500 ja 1000 euron välillä.

Kumulatiivisesti dieselautojen mallikohtaisen myynnin ja hiukkassuodattimien tarjonnan perusteella arvioituna vuosina 2000–2007 on Suomessa todennäköisesti myyty noin 14 000 autoa suodattimella, mahdollisesti jopa 20 000. Tämä on noin 7–10 prosenttia samana aikana myydyistä uusista dieselmoottorisista henkilöautoista (runsaat 200 000 kpl). Näin pienellä osuudella on vielä varsin vähäinen merkitys kokonaishiukkaspäästöille. Liikenteessä on vielä myös lähes 200 000 kpl vanhoja, ennen vuotta 2000 rekisteröityjä dieselautoja, joilla hiukkaspäästötaso on paljon korkeampi kuin 2000-luvun EURO3- tai EURO4-autoilla.

3.1.3 Tehdasasenteisten hiukkassuodattimien vaikutukset pakokaasupäästöihin

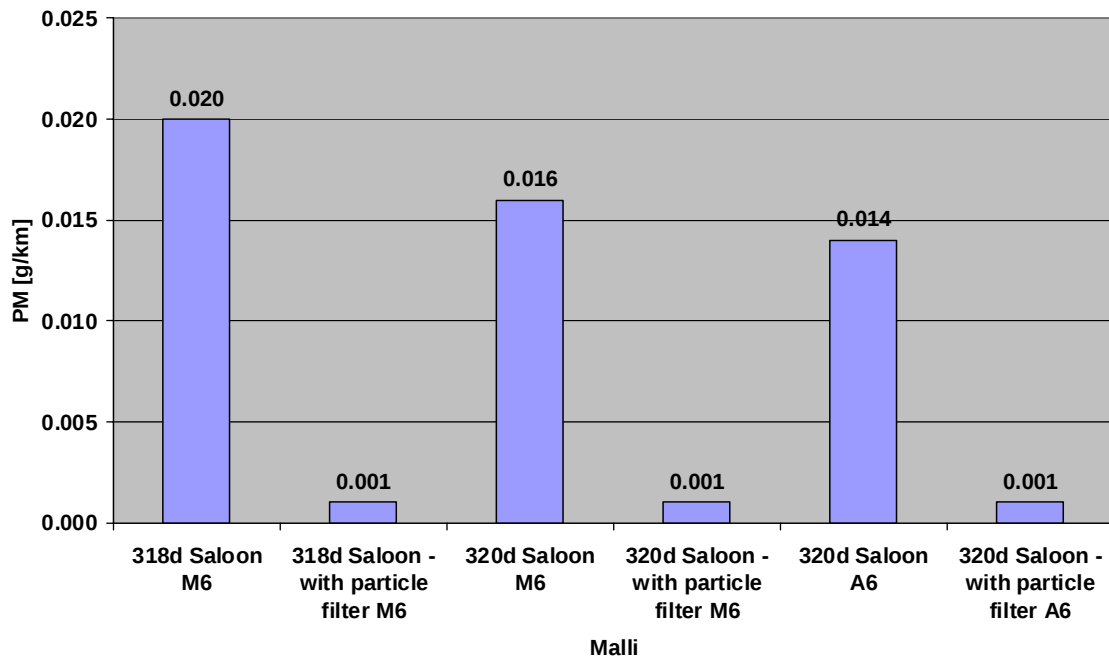
Vuoden 2007 autoissa on useita malleja, joissa hiukkassuodatin on valinnaisvaruste. Niille tyyppihyväksymistulokset ilmoitetaan sekä puhdistimelliselle että puhdistuslaitteettomalle versiolle. Näissä on periaatteessa sama moottori, mutta esimerkiksi polttoaineen syötön ohjelmaa on todennäköisesti muutettu. Tässä selvityksessä vertailtiin seuraavien merkkien ja mallein PM, HC+NO_x, NO_x, CO, CO₂ -päästöjä pareittain:

- BMW 318d ja 320d
- Opel Astra 1.9CDTi
- Opel Corsa 1.3CDTi (8v & 16 v moottorit)
- VW Golf 2.0TDI (GT)

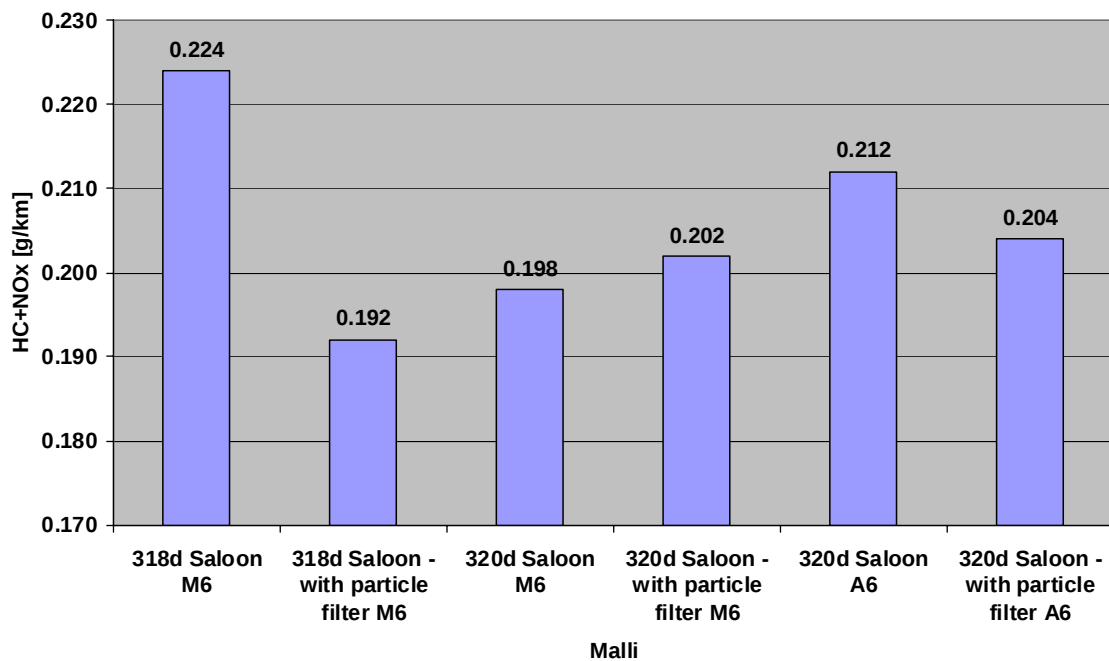
Seuraavissa kuvissa (9–13) on esimerkkinä BMW 318d ja 320d -mallien tulokset.

Taulukko 1. Hiukkassuodattimien markkinatarjonta Suomessa marraskuussa 2008. (Lähde: Autotieto.fi ja omat arviot)

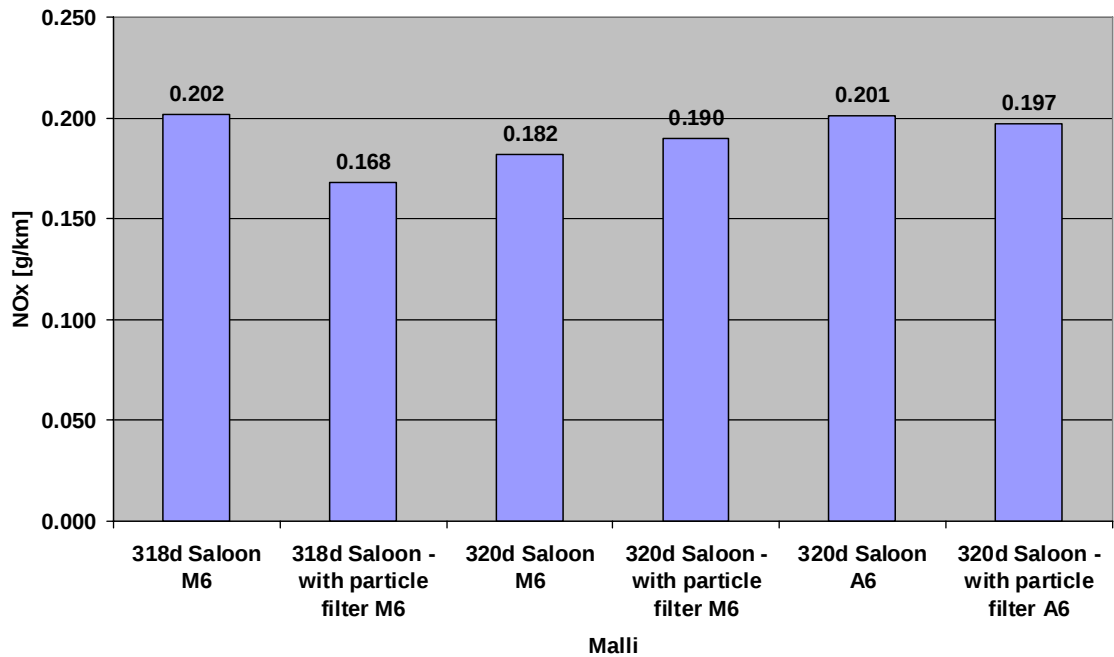
merkki	tarjonta 11/2008 huom		koko myynti 10/2008	dies-%	dies	dies+DPF
Audi	99 %	1 moottori TT:ssä ei	4731	50 %	2 366	2 342
BMW	90 %	tietopuutetta, voi olla 100%	3686	45 %	1 659	1 493
Chevrolet	100 %		756	30 %	227	227
Chrysler	90 %	1 malli ei, mutta suosittu	635	20 %	127	114
Citroën	80 %	voi olla korkeampikin, tiedot vähän epämäär.	4624	60 %	2 774	2 220
Dodge	25 %	vain yhdessä mallissa	996	40 %	398	100
Fiat	50 %	arvio, suostuissa 50/50	2303	30 %	691	345
Ford	50 %	voi olla pienempikin, vaikea hahmottaa	8036	45 %	3 616	1 808
Honda	30 %	CR-V ei, muissa 50%	4951	50 %	2 476	743
Hyundai	30 %	ei lainkaan pienissä, jossa volyymi	2600	35 %	910	273
Kia	20 %	vaihtelee malleittain, toisissa 100%, toisissa 0%, mutta ei suosituissa pienissä	5862	40 %	2 345	469
Mazda	85 %	vain mazda2 ilman	4259	30 %	1 278	1 086
Mercedes-Benz	40 %	vaihtelee malleittain, toisissa 100%, toisissa 20%	3795	75 %	2 846	1 139
Mitsubishi	15 %	vain yhdessä mallissa	1408	40 %	563	84
Nissan	30 %	vaihtelee malleittain, ihan uusissa malleissa enemmän	5587	40 %	2 235	670
Opel	60 %	vaihtelee malleittain	3798	45 %	1 709	1 025
Peugeot	90 %	vain harvoja moottorivaihtoehtoja ilman, 407&607 100%	4734	60 %	2 840	2 556
Renault	70 %	vaihtelee malleittain	1700	50 %	850	595
Saab	100 %		1093	30 %	328	328
Seat	70 %	vaihtelee malleittain	1596	60 %	958	670
Skoda	70 %	vaihtelee malleittain, Suberb 100%	6727	65 %	4 373	3 061
Toyota	10 %	vain yksi moottorivaihtoehto (2.2 D-4D)	16023	45 %	7 210	721
Volkswagen	15 %	tiedot vähän epämääräiset, voi olla enemmän	13927	75 %	10 445	1 567
Volvo	70 %	isommissa 100%	7830	45 %	3 524	2 466
	yhteensä (nämä merkit, kpl)		111657		56 747	26 103
	yhteensä (kaikki merkit, kpl)		122751		51 %	46 %



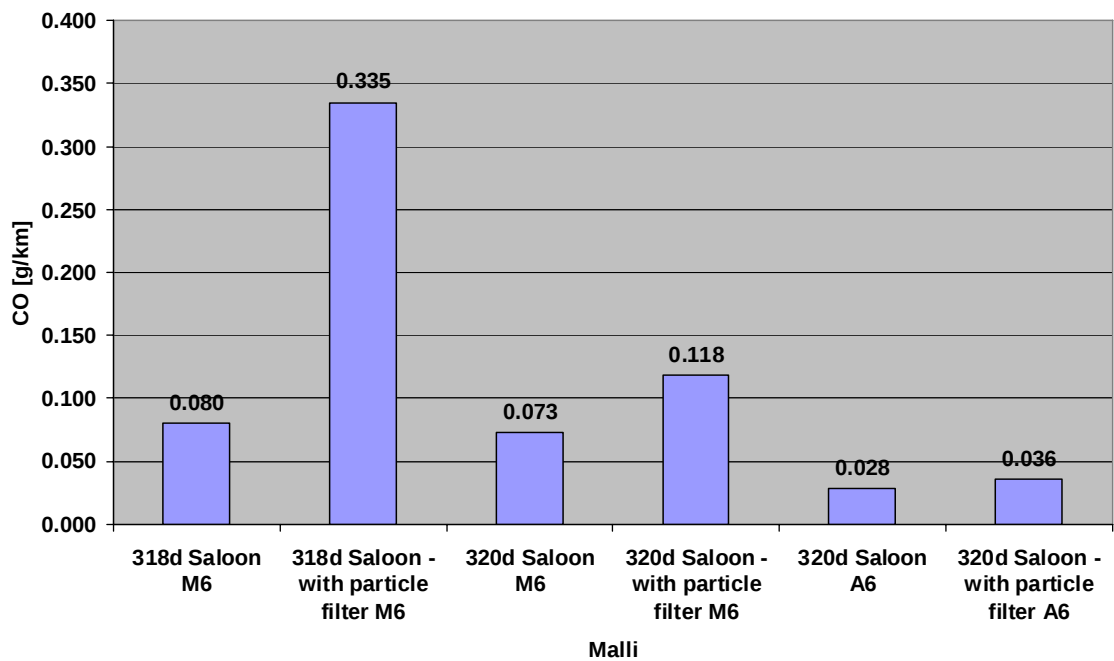
Kuva 9. Päästöjen vertailu – BMW 318d & 320d, PM-päästöt



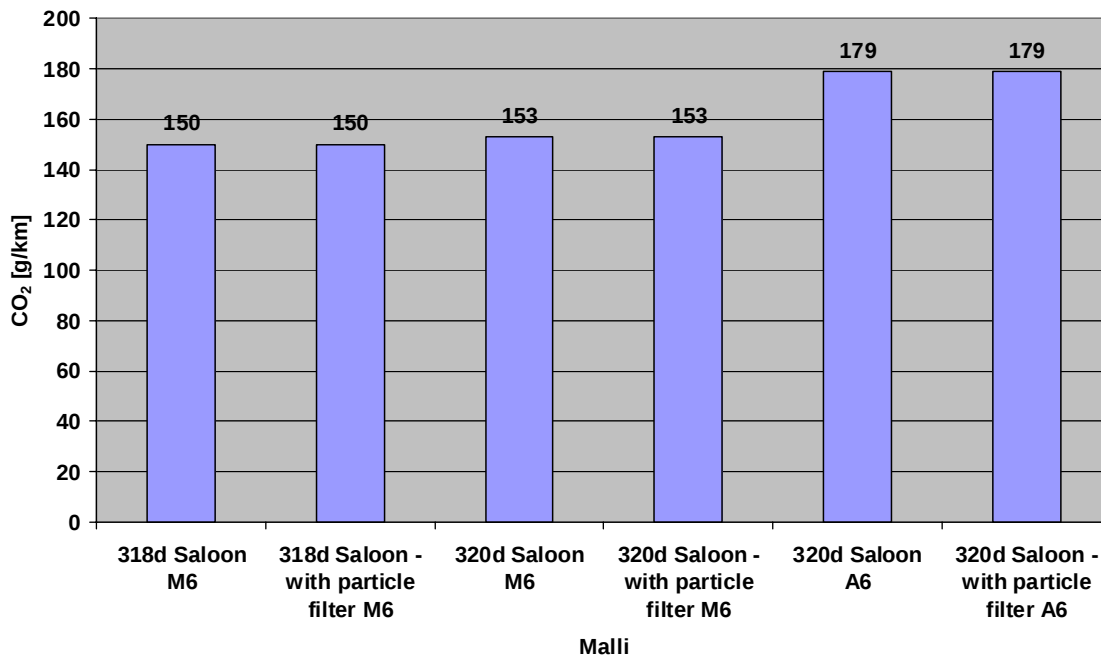
Kuva 10. Päästöjen vertailu – BMW 318d & 320d, HC+NOx -päästöt



Kuva 11. Päästöjen vertailu – BMW 318d & 320d, NOx-päästöt



Kuva 12. Päästöjen vertailu – BMW 318d & 320d, CO-päästöt



Kuva 13. Päästöjen vertailu – BMW 318d & 320d, CO₂ -päästöt

Näiden vertailujen perusteella hiukkaspuhdistimen vaikutuksesta voidaan todeta muun muassa, että hiukkaspäästö alenee tehokkaasti (odotusten mukaan), mutta vaikutukset CO-, HC- ja NO_x-päästöihin eivät noudata mitään yleisiä trendejä. CO₂-päästö on sama tai vähän korkeampi jossain malleissa. Käytännön tulokset osoittavat polttoaineen kulutuksen kasvavan suodattimellisissa autoissa normaalikäytössä 3–5 prosenttia, eräissä malleissa jopa 8 prosenttia verrattuna vastaavaan malliin ilman suodatinta.

3.2 Keskimääräiset hiukkas- ja typenoksidipäästöt ja niiden kehitys tulevana vuosina

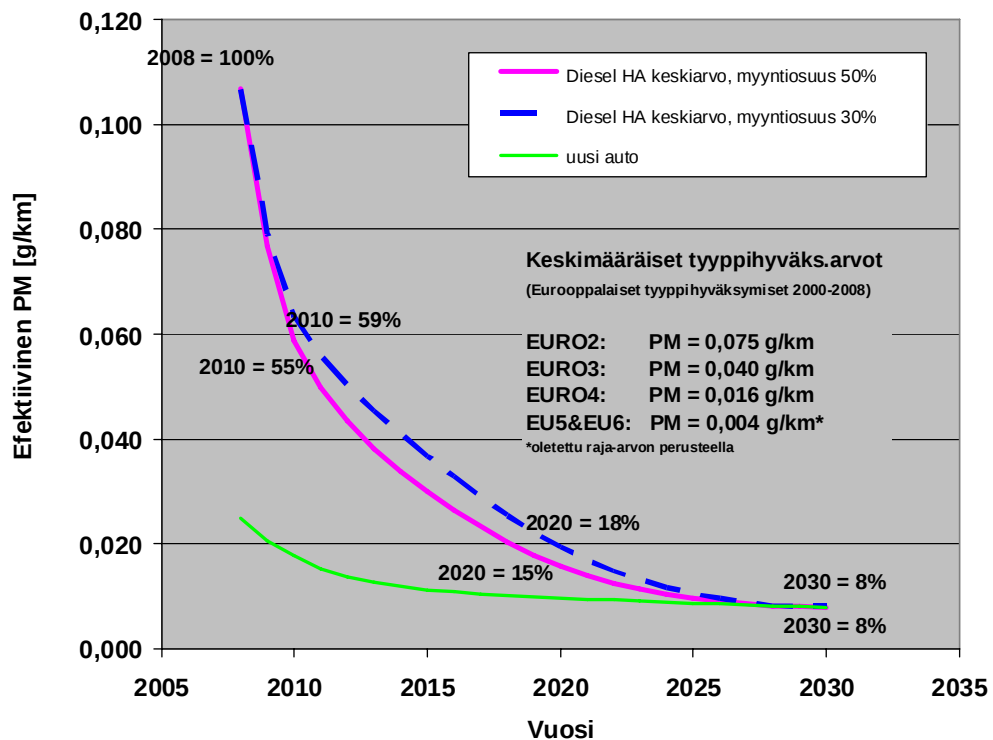
3.2.1 Hiukkas-päästöt

Tyyppihyväksymistietojen perusteella voidaan arvioida, että keskimääräiset tyyppihyväksymisarvot hiukkas-päästöille (PM) eri EURO-luokissa ovat:

EURO2: PM = 0,075 g/km
 EURO3: PM = 0,040 g/km
 EURO4: PM = 0,016 g/km (mukana jo joitakin hiukkas-suodattimellisia malleja)
 EU5&EU6: PM = 0,004 g/km (arvioitu raja-arvon 0,005 g/km mukaan)

Siten, jos EURO4-auton hankkii suodattimella, hiukkas-päästötaso vastaa EURO5-luokkaa, ja on keskimäärin ainakin noin 75 prosenttia pienempi kuin ilman suodatinta.

Mainitut lukuarvot viittaavat tyyppihyväksymistestissä saavutettavaan tulokseen. On kuitenkin tunnettua, että päästöjen keskimääräinen taso on todellisessa liikenteessä korkeampi. Tämä ns. efektiivinen päästötaso on hiukkasissa arviolta 2–2,3 kertaa tyyppihyväksymistuloksen taso. Sen mukaan arvioituna on kuvassa 14 havainnollistettu uuden auton ja koko dieselhenkilöautokannan ominaispäästön kehitystä sillä edellytyksellä, että uusista myydyistä henkilöautoista on tulevinakin vuosina puolet dieselaita.



Kuva 14. Dieselhenkilöautojen hiukkaspäästöjen ominaispäästön (g/km) kehittyminen tulevina vuosina.

Jos vuoden 2008 alusta voimaan tulleeseen veromuutokseen olisi sisällynyt vaatimus dieselauton hiukkassuodattimesta alemman verokannan saamiseksi, voidaan olettaa, että se olisi lisännyt suodattimellisten autojen myyntiä, koska ilman suodatinta auto olisi ollut korkeamman veron takia kalliimpi. Jos siis teoreettinen tarjonta on nyt noin 50 prosenttia, voidaan olettaa, että 35 prosenttia kaikista 2008 autoista olisi ostettu suodattimella, kun nyt todennäköinen taso on vain 15–25 prosenttia. Vastaavasti vuoden 2009 autoista arviolta 75 prosenttia, ja kaikki vuoden 2010 myydyt uudet dieselautot olisivat olleet suodattimella varustettuja. Tämä oletama olisi siis aikaistanut suodattimien yleistymistä, ja vähentänyt uusimman vuosiluokan (2008–2010) vuosittaisia pienhiukkaspäästöjä noin 2,5 prosenttia. Sen seurauksena vuosien 2008–2011 välisenä aikana dieselhenkilöautojen kokonaispäästöt olisivat vähentyneet noin kaksi prosenttia. Kun dieselhenkilöautojen osuus tieliikenteen kokonaishiukkaspäästöstä on LIISA-järjestelmän mukaan noin kolmannes, olisi tämä merkinnyt vajaan prosentin vähennemää tieliikenteen hiukkaspäästöissä mainitulla aikavälillä.

EURO5-hyväksyminen ja sen myötä hiukkassuodatin ovat rekisteröinnin edellytyksenä 1.10.2011 alkaen. Sen jälkeen kaikki uudet autot on siis varustettu suodattimella, ja päästötaso vakiintuu noin 0,004 g/km tasolle. Kestää kuitenkin vielä vuoteen 2018, ennen kuin koko dieselautokannan taso on laskenut alle 0,010 g/km ja vasta vuonna 2025 voidaan laskea koko kannan uusiutuneen EURO5/6 -tasoa vastaavaksi.

Jos dieselosuus vuodesta 2009 kuitenkin alenisi kolmannekseen, positiivinen kehitys tietysti hidastuisi vastaten 2–3 vuoden viivästymää keskimääräisen päästön alenemisessä, mikä näkyy myös kuvassa 14. Tällainen kehitys on hyvin mahdollista, sillä EURO5/EURO6-vaatimukseen mukautumisesta aiheutuva ennakoitu valmistuskustannusten nousu tekisi dieselautoista bensiinimoottorisia suhteellisesti kalliimpia ja alentaisi

niiden suosiota. Myös dieselpolttoaineen ylikysyntä voi nostaa sen maailmanmarkkina-hintaa suhteessa bensiiniin.

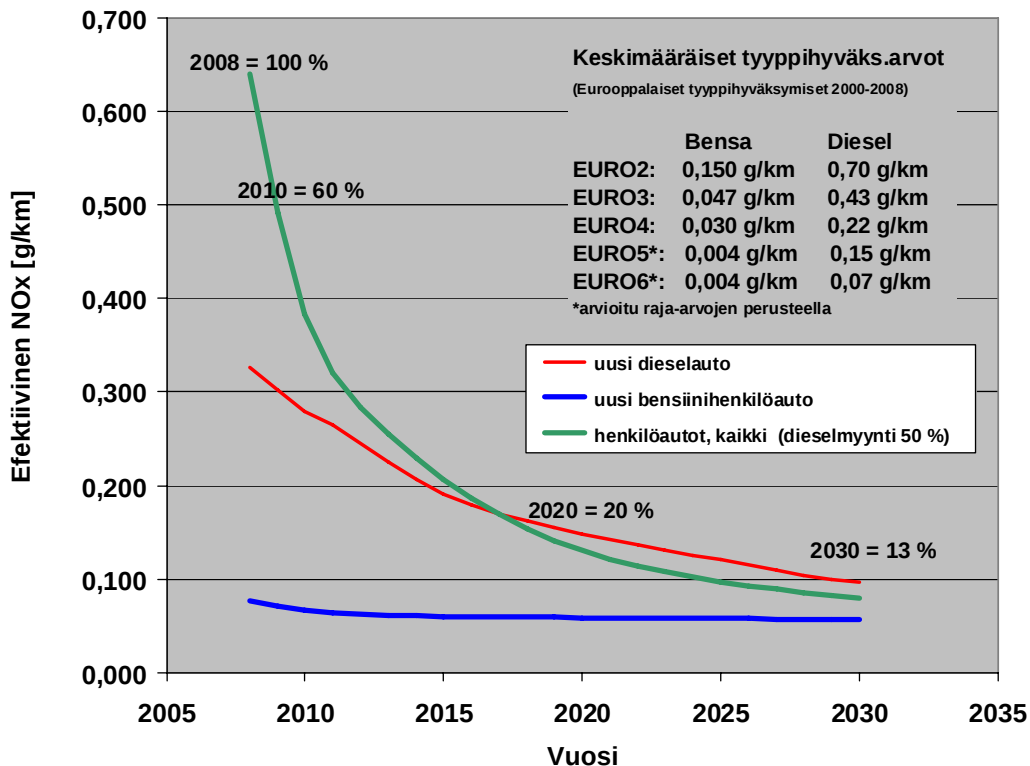
3.2.2 Typenoksidipäästöt

Tyyppihyväksymistietojen perusteella voidaan arvioida, että keskimääräiset tyyppihyväksymisarvot typenoksideille (NOx) eri EURO-luokissa ovat:

	Bensiini	Diesel
EURO2:	0,150 g/km	0,70 g/km
EURO3:	0,047 g/km	0,43 g/km
EURO4:	0,030 g/km	0,22 g/km
EURO5:	0,004 g/km	0,15 g/km
EURO6:	0,004 g/km	0,07 g/km

EURO5 ja EURO6 on arvioitu asetettujen raja-arvojen perusteella, koska näiden luokien mukaisia autoja ei vielä ole tuotannossa.

Kuva 15 esittää arvion siitä, miten henkilöautojen keskimääräiset typenoksidien ominaispäästöt kehittyvät dieselmoottoristen autojen osuuden noustua vuodesta 2008 puoleen kaikkien uusien henkilöautojen myynnistä. Oletuksena on myös, että dieselmoottorisilla autoilla ajetaan keskimäärin noin 50 prosenttia enemmän vuosittain kuin bensiinimoottorisilla. Tämä on kuitenkin menneeseen tilanteeseen nojaava luku, eikä enää tulevaisuudessa välttämättä pidä paikkaansa, kun keskimääräinen dieselauto on mm. entistä pienikokoisempi, ja polttoaineiden hintasuhteet saattavat muuttua pysyvästi niin, että litrahinnat ovat hyvin lähellä toisiaan.



Kuva 15. Henkilöautojen typenoksidipäästöjen ominaispäästön (g/km) kehittyminen tulevana vuosina.

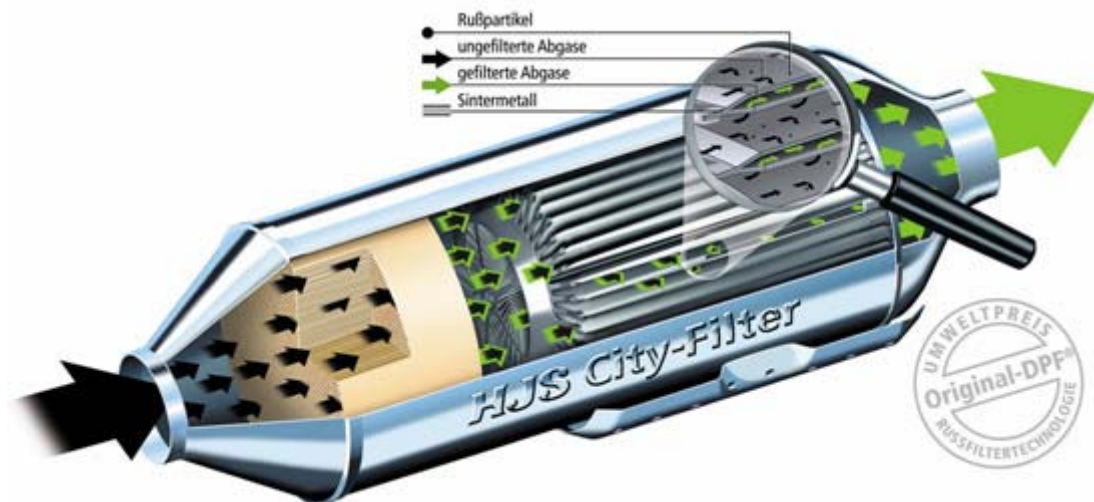
3.3 Jälkiasennettavat hiukkassuodattimet

3.3.1 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien rakenteesta

Jälkiasennettavat hiukkassuodattimet ovat tavallisesti ns. osavirtaus- eli "flow-thru"-rakenteisia, jossa pakokaasun virtaus suodattimen läpi on aina vapaa eikä suodatin periaatteessa pääse tukkeutumaan. Pakokaasu virtaa vain osittain suodattimen kanavien seinämien läpi, ja pääasiassa tällaisen suodattimen teho perustuu voimakkaaseen hapettamiseen, jolla tuhotaan erityisesti "kosteita", runsaasti hiilivety-yhdisteitä sisältäviä hiukkasia ja nesteaerosoleja.

Tällaisten suodattimien puhdistusvaikutus on luonnollisesti heikompi kuin "wall-flow"-tyyppisten, joiden parhaimmillaankin alle 60 prosentin erotusasteeseen (tyypillisesti 30–60 %). Pääsyy rakenne-eroon on siinä, että "wall-flow"-suodattimien yhteydessä tarvitaan aina jokin tukijärjestelmä, jolla regeneraatio saadaan käynnistettyä. Jälkiasennuksena sellaisen lisääminen on monimutkainen ja kallis toimenpide. Siksi "wall-flow"-suodatin ei yleensä sovellu jälkiasennuksiin, vaan niissä joudutaan tyytymään teholtaan vaatimattomampaan konstruktion. Nämä "flow-thru"-suodattimet ovat pääasiassa metallikennoja, kun taas "wall-flow"-kennot keraamisia.

Kuvat 16 ja 17 havainnollistavat tällaisen hiukkaspuhdistimen rakennetta.



Kuva 16. Jälkiasennukseen tarkoitettu HJS City-Filter® (HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co KG)

3.3.2 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien tarjonta

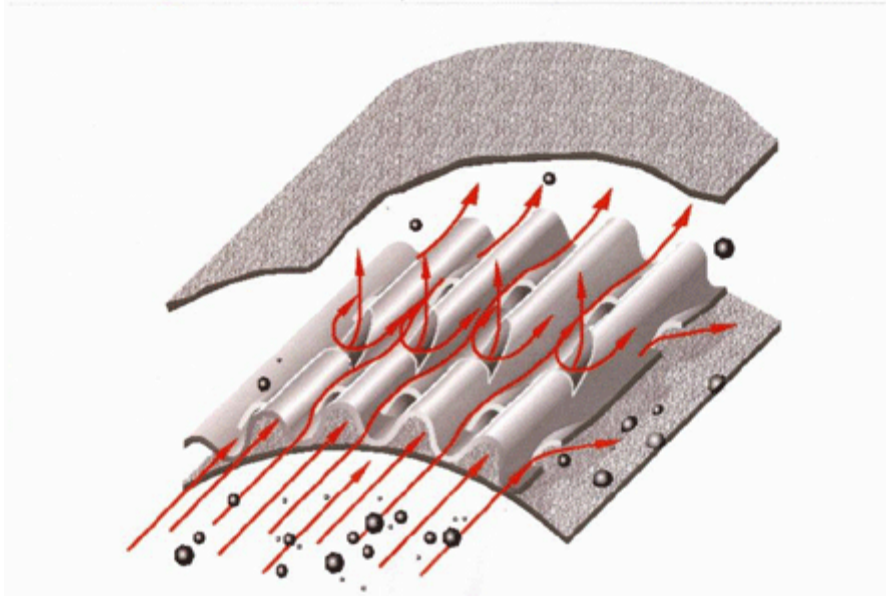
Jälkiasennukseen soveltuvia hiukkassuodattimia on tarjolla runsaimmin niihin auto-merkkeihin ja -malleihin, jotka ovat yleisiä Saksan Liittotasavallassa. Syynä on liittovaltion antama alennus vuotuisissa käyttömaksuissa, mikä jo parissa vuodessa kompensoi suodattimen ja sen asennuskulut.

Jälkiasennukseen soveltuvia hiukkassuodattimia valmistavia ja/tai markkinoivia yrityksiä ovat mm.:

- HJS Fahrzeugtechnik
- TwinTec

- Remus
- Tenneco Automotive (Walker)
- Oberland Mangold

Umlenkung der Rußpartikel in das Sintermetall



Kuva 17. Jälkiasennukseen tarkoitetun Remus-hiukkaspuhdistimen virtauskaaviokuva (Remus AG).

Näiden tarjonta kattaa etupäässä saksalaiset merkit ja niiden volyymimallit, mutta jonkin verran myös ranskalaisia dieselautoja. Tarkka saatavuus kannattaa tarkistaa valmistajien luetteloista tai web-palveluista, sillä eri vuosimallien väliset pienetkin erot pakoputkistojen rakenteessa edellyttävät juuri oikeanlaisen suodatinsarjan valintaa. Eri valmistajiin ja niiden saatavuusluetteluihin on linkit lähdeluettelossa.

Edellä mainittujen tuottajien markkinoimien suodattimien ja asennussarjojen hinnat vaihtelevat Saksassa noin 500–700 euron välillä tyypistä riippuen.

3.3.3 Jälkiasennettavien hiukkaspuhdistimien asennusten tukiohjelmia

Kuten jo edellä todettiin, jälkiasennettavien hiukkaspuhdistimien asentamista tuetaan erilaisilla taloudellisilla kannustimilla, useimmiten verohelpotuksilla tai vastaavilla, Euroopassa laajimmin Saksan liittotasavallassa. Omat vastaavat ohjelmat on käynnistetty myös Hollannissa ja Itävallassa [GreenCarCongress, 2005], sekä Italian pohjoisosissa (Etelä-Tiroli), jolla on vahvat kulttuuri- ym. siteet saksankieliseen talousalueeseen. Myös Sveitsissä suodattimien asentamista tuetaan taloudellisin kannustimin.

Saksassa tukiohjelma hyväksyttiin lopullisesti keväällä 2007 ja se käynnistyi 1.4.2007. Se kattaa ennen 31.12.2006 rekisteröidyt dieselhenkilöautot, ja sen puitteissa maksetaan suodattimen asentamisesta kertakorvauksena 330 euroa. Lisäksi vuotuinen käyttömaksu on alempi, vajaan 100 €/a tyypillisellä 2-litraisella moottorilla (alennus on 1,2 €/100 cm³ moottorin iskutilavuudesta) [Die Welt 2006]. Asennuksia tuetaan vuoden 2009 loppuun asti, ja käyttömaksujen alennukset jatkuvat vuoden 2011 loppuun [GreenCarCongress 2006].

Itävallassa on ollut voimassa jo 1.1.2005 alkaen 300 euron kertakorvaus asennuksesta [GreenCarCongress 2006]. Hollannissa kampanja käynnistyi kesällä 2007, ja jälkiasennuksia on [AECC 2008] mukaan tehty nyt noin 150,000. Siellä asennuksesta saa 500 euron kertakorvauksen [VROM 2007], [AECC 2008].

3.4 Jälkiasennettavien hiukkassuodattimien sopivuus Suomessa rekisteröityihin dieselhenkilöautoihin

Edellä esitettyjen puhdistimien toimittajien tarjontaa on peilattu Suomen ajoneuvorekisterin tietoihin dieselmoottorisista henkilöautoista, jotka rekisteröitiin vuosina 2000–2007. Sen perusteella on arvioitu, että runsaaseen 100 000:een, ehkä jopa 120 000:een mainittuna aikana rekisteröityyn dieselautoon voitaisiin todennäköisesti jälkiasentaa hiukkassuodatin. Tämä lukumäärä on noin puolet ko. aikavälin rekisteröineistä.

Mikäli noin puolet tästä potentiaalista saataisiin toteutettua, ja suodattimien erotusaste olisi noin 50 prosenttia, merkitsisi se noin 15 prosentin alenemaa noiden vuosiluokkien hiukkastuotossa. Tämä merkitsisi noin 10 prosentin vähenemää dieselhenkilöautojen kokonaishiukkaspäästöistä, jolloin koko tieliikenteen hiukkaspäästöjen kokonaisaleneaksi saataisiin vastaavasti noin 2,5 prosenttia.

3.5 Hiukkassuodattimien käytössä esiintyviä ongelmia

Saksassa, jossa on oletettavasti eniten hiukkassuodattimella varustettuja autoja, on moottorilehdistö ja muu media raportoinut myös niihin liittyvistä ongelmista. Niitä on esiintynyt sekä tehdasasenteisissa että jälkiasennetuissa suodattimissa [Stern, 2008].

Tehokkaiden, tehdasasenteisten suodattimien ongelmat liittyvät yleensä suodattimen itsepuhdistukseen eli regeneraatioon. Koska regeneraation käynnistymiseksi lämpötilan pitää suodattimessa nousta verrattain korkealle, noin 600 asteeseen, ei siihen normaalissa kaupunkiliikenteessä juuri päästä. Siksi eräissä automalleissa (mm. Volkswagen) on varoitusvalo, joka varoittaa paine-eromittauksen perusteella suodattimen tukkeutumisvaarasta, ja omistajan käsikirja ohjeistaa silloin ajamaan vähän reippaampaa moottoritieajoa, kunnes suodatin puhdistuu.

Lähteen [Wikipedia, 2008] mukaan eräissä autoissa suodattimen varoitusvalon syttymisen jälkeen ohjeistetaan ajamaan vähintään 15 minuuttia ainakin 60 km/h nopeudella. Jos näin ei kuitenkaan tehdä, ja suodattimen häiriömerkkivalo pysyy syttyneenä viiden käynnistyksen ajan, ajonaikainen valvontajärjestelmä (OBD) ohjeistaa ajajalle käyntiä huollossa, ja samalla asettaa moottorinohjausyksikön varakäyntitilaan, jossa ajaminen onnistuu vain enintään 50 km/h nopeudella. Tällainen ei kuitenkaan ole kaikkien auton käyttäjien mieleen, ja eräissä tapauksissa [Auto, Motor und Sport, 2008.1] auton omistaja on – oikeuden päätöksellä – voinut jopa purkaa autokaupan, koska on joutunut suodattimen tukkeutumisen takia toistuvasti käyttämään autoa huollossa.

Epätäydellisen ja liian matalassa lämpötilassa (250 to 500 °C) tapahtuvan regeneraation on havaittu myös lisäävän mm. haitallisten PAH-yhdisteiden määrää. Epäilyksiä on esitetty myös ns. ”supermyrkkujen” kuten dioksiinin ja furaanin esiintymisestä [Wikipedia, 2008].

Myös jälkiasennettavien suodattimien ongelmista on raportoitu. Lähteen [Auto, Motor und Sport, 2008.2], [Auto, Motor und Sport, 2008.3] mukaan käytössä tehottomiksi on

osoittautunut runsaat 45 000 eri valmistajien (GAT, Bosal, Tenneco) suodatinta, jotka olisi pitänyt vaihtaa toimivampiin. Uhkana on ollut hyväksymisien peruminen, ellei toimivia suodattimia ole kyetty vaihtamaan viallisten tilalle [Auto, Motor und Sport, 2008.4].

Erään lähteen [Eberspächer, 2008] mukaan jälkiasennettavissa suodattimissa on joukossa myös sellaisia, joiden asentamisen jälkeen auton pakoääni on voimakkaampi kuin alkuperäisellä putkistolla.

3.6 Low Emission Zones – suoja-alueet

Euroopassa on perustettu useita ns. Low Emission Zone -alueita, joissa on liikennöinti-rajotuksia autoille sen mukaan, miten puhtaita niiden pakokaasupäästöt ovat. Ensimmäisiä olivat Ruotsissa perustetut ”miljözon”-alueet Tukholmassa, Göteborgissa ja Malmössä. Niissä kiellettiin tietyillä keskusta-alueilla liikennöinti kaikilta raskailta ajoneuvoilta, jotka olivat kuutta vuotta vanhempia, elleivät ne täyttäneet EURO2-rajaroja ja olleet enintään kahdeksan vuoden ikäisiä. Näihin on nyttemmin liitetty myös Lund.

Saksassa on kymmenien kaupunkien keskustoissa alueita, joissa on liikennöinti-rajotuksia. Niissä liikkumisen salliminen tapahtuu pakokaasuluokitusten mukaan. Luokituksia on neljä:

- Luokka 1, tarkoittaa katalysaattoritonta bensiiniautoa tai EURO1-dieselautoa.
- Luokka 2 on varattu EURO2-dieselmoottorisille tai EURO1-dieselautoille, joissa on hyväksyttävästi jälkiasennettu hiukkaspuhdistin.
- Luokkaan 3 kuuluvat EURO3-dieselhenkilöautot tai EURO2-autot, joissa on jälkiasennettu hiukkaspuhdistin.
- Korkeimpaan luokkaan 4 kuuluvat EURO4-dieselautot, sekä ne EURO3-dieselhenkilöautot, joissa on jälkiasennettu hiukkaspuhdistin.

Luokitus 2-4 on helppo tunnistaa tuulilasiin kiinnitettävästä tarrasta, jossa on luokkatunnus ja erivärinen pohjaympyrä. (2=punainen, 3=keltainen ja 4=vihreä). Luokan 1 autoissa ei ole mitään erityisiä tarroja. Tällä helpotetaan liikennevalvontaa.

Edellä mainittujen lisäksi vastaavanlaisia suoja-alueita on [Low Emission Zones in Europe 2008] mukaan määritelty myös Iso-Britanniassa, Italiassa, Itävallassa, Tsekin tasavallassa, Hollannissa, Tanskassa ja Norjassa.



Kuva 18. Esimerkki Berliinin Low Emission Zone -suoja-alueesta (Lähde: Low Emission Zones in Europe, 2008)

Lähdeluettelo

[Geivanidis 2006] Geivanidis, S. & Samaras, S. Evaluation of the actual NO₂/NO_x ratio of recent vehicle technologies. Laboratory of Applied Thermodynamics. Thessaloniki. 5/04/2006.

[Hörmandinger 2006] Hörmandinger, G. The issues of NO₂ from cars: Overview of the 2006 workshop. International Conference on Transport and Environment: A global challenge, Technological and Policy Solutions, 19-21 March 2007, Milan, Italy.

[Ricardo 2003] Ricardo. Emission factors for cars. Q40240/VSE Project S0135/VB. March 2003.

[Gense 2006] Gense, R., Vermuelen, R. Weilenmann, M. & McRae, I. NO₂ emissions from passenger cars. 2nd Conf. Environment & Transport, Reims, France, 12-14 June 2006. Vol.1, p. 175-182.

[Latham 2004] Latham, S., Boulter, P. & Barlow, T. The effects of traffic management schemes on emissions from heavy-duty vehicles. TRL Project report PR/SE/960/04. TRL. UK.

[KTL] KTL. Ilman epäpuhtauksille altistuminen.
http://www.ktl.fi/portal/suomi/tietoa_terveydesta/elinymparisto/ilma/ (viitattu 4.7.2008)

[ACS] American Cancer Society (ACS). Environmental carcinogens, Air Pollution, Diesel Exhaust
http://www.cancer.org/docroot/PED/content/PED_1_3x_Diesel_Exhaust.asp?sitearea=PED (viitattu 4.7.2008)

[Jokiniemi 2000] Jorma Jokiniemi, Mikael Ohlström, Markku Kulmala ja Kaarle Hämeri. Kartoitus pienhiukkastutkimuksesta Suomessa. TEKES Teknologiakatsaus 100/2000. Helsinki 2000. 46 s.

[Salonen 2006] Raimo O. Salonen ja Arto Pennanen, Timo Paukku (toim.) Pienhiukkasten vaikutus terveyteen. Tuloksia ja päätelmiä teknologiaohjelmasta FINE Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys TEKES, Helsinki 2006. 32 s.

[Tainio 2001] Marko Tainio, Jouni T. Tuomisto, Päivi Aarnio, Matti Jantunen, Kimmo Koistinen, Otto Hänninen, Juha Pekkanen, Eri bussiteknikoiden vaikutus pienhiukkasten aiheuttamaan kuolleisuuteen pääkaupunkiseudulla vuonna 2020. Sosiaali- ja terveysministeriön monisteita 2004:1, Helsinki 2001. 59 s.

[Pekkanen 2004] Juha Pekkanen, Kaupunki-ilman pienhiukkasten terveysvaikutukset. Duodecim, 2004;120(13):1645-52

[Lanki 2008] Timo Lanki, Juha Pekkanen. Kaupunki-ilman hiukkaset ja sydänsairaudet. Suomen Lääkärilehti 11/2008, Vol 63, ss. 1059-1065.

[Salonen 2007] Salonen, I, Dufva, H, Dufva, J, Linkola E, Värri, E., Asuinpaikan ilmanlaatu ja sarastavuus. Ilmansuojelu 3/2007, ss. 14-21.

[Halonen 2008] J I Halonen, T Lanki, T Yli-Tuomi, M Kulmala, P Tiittanen, J Pekkanen, Urban air pollution, and asthma and COPD hospital emergency room visits. Thorax, Jul 2008; 63: 635 - 641.

[Penttinen 2001] P. Penttinen, K.L. Timonen, P. Tiittanen, A. Mirme, J. Ruuskanen and J. Pekkanen. Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *Eur Respir J* 2001; 17:428-435

[Myllynen 2007] Maria Myllynen, Suvi Haaparanta, Anssi Julkunen, Tarja Koskentalo, Anu Kousa ja Päivi Aarnio, Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2006. YTV Julkaisuja 12/2007, Helsinki 2007, 112 s.

[Kousa 2002] Kousa, Anu, PM_{2.5} and NO₂ exposure assessment of urban population in the Helsinki metropolitan area and other European urban areas. Doctoral Thesis, 2002-08. University of Helsinki, Faculty of Science, Department of Physical Sciences. Helsinki 2002

[Mukala 1999] Mukala, Kristiina, Personal Exposure to Nitrogen Dioxide and Health Effects among Preschool Children. Doctoral Thesis, 1999-11, University of Helsinki, Faculty of Medicine, Department of Public Health, Helsinki 1999.

[Stewart 2003] Stewart, K. Health effect of diesel exhaust. American Lung Association of Pennsylvania, May 30, 2003.
www.phila.gov/health/units/ams/Diesel/Kevin_Stewart_ALA.ppt

<http://www.terveysportti.fi/terveysportti/Dlehti2.tunnista?a=Y&t=H&fname=D94393.htm>

[Krivoshto 2008] Irina N. Krivoshto, John R. Richards, Timothy E. Albertson and Robert W. Derlet, The Toxicity of Diesel Exhaust: Implications for Primary Care. *The Journal of the American Board of Family Medicine* 21 (1): 55-62 (2008).
DOI: 10.3122/jabfm.2008.01.070139.

[AHA 2007] American Heart Association (2007, November 10). Diesel Exhaust Associated With Higher Heart Attack, Stroke Risk In Men. *ScienceDaily*. Retrieved July 9, 2008, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/11/071106092015.htm>

University of Edinburgh (2007, September 14). Diesel Exhaust May Increase Risk In Patients With Heart Disease. *ScienceDaily*. Retrieved July 9, 2008, from <http://www.sciencedaily.com-/releases/2007/09/070912190002.htm>

[Mills 2007] Mills NL, Tornqvist H, Gonzalez MC, Vink E, Robinson SD, Soderberg S, Boon NA, Donaldson K, Sandstrom T, Blomberg A, Newby DE. Ischemic and Thrombotic Effects of Dilute Diesel-Exhaust Inhalation in Men with Coronary Heart Disease. *N Engl J Med* 357:1075, Massachusetts Medical Society, 2007.

[Törnqvist 2008] Törnqvist, Håkan, Respiratory and Cardiovascular Responses to Diesel Exhaust Exposure. Umeå University, Department of Public Health and Clinical Medicine, Respiratory Medicine and Allergy, Umeå, Sweden, 2008. (doctoral thesis)

[Burke 2008] Gregory L. Burke, Alain G. Bertoni, Steven Shea, Russell Tracy, Karol E. Watson, Roger S. Blumenthal, Hyoju Chung, Mercedes R. Carnethon, The Impact of Obesity on Cardiovascular Disease Risk Factors and Subclinical Vascular Disease The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *Arch Intern Med*. 2008; 168(9):928-935.

[Baccarelli 2008] Andrea Baccarelli, Ida Martinelli, Antonella Zanobetti, Paolo Grillo, Li-Fang Hou, Pier A. Bertazzi, Pier Mannuccio Mannucci, Joel Schwartz, Exposure to Particulate Air Pollution and Risk of Deep Vein Thrombosis. *Arch Intern Med*. 2008;168(9):920-927.

- [Dominici 2006] Dominici F, Peng RD, Bell ML, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA* 2006;295:1127-1134.
- [Miller 2007] Kristin A. Miller, David S. Siscovick, Lianne Sheppard, Kristen Shepherd, Jeffrey H. Sullivan, Garnet L. Anderson, Joel D. Kaufman. Long-Term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women. *N Engl J Med* 356;5. February 1, 2007.
- [Cruts 2008] Björn Cruts, Ludo van Etten, Håkan Törnqvist, Anders Blomberg, Thomas Sandström, Nicholas L Mills, Paul JA Borm. Exposure to diesel exhaust induces changes in EEG in human volunteers. *Particle and Fibre Toxicology* 2008, 5:4 doi:10.1186/1743-8977-5-4. 11-2008.
- [Block 2004] M. L. Block, X. Wu, Z. Pei, G. Li, T. Wang, L. Qin, B. Wilson, J. Yang, J. S. Hong, and B. Veronesi. Nanometer size diesel exhaust particles are selectively toxic to dopaminergic neurons: the role of microglia, phagocytosis, and NADPH oxidase. *The FASEB Journal*. 2004;18:1618-1620.
- [Margai 2003] Margai F, Henry N. A community-based assessment of learning disabilities using environmental and contextual risk factors. *Soc Sci Med*. 2003 Mar;56(5):1073-85.
- [Suglia 2007] S. Franco Suglia, A. Gryparis, R. O. Wright, J. Schwartz and R. J. Wright, Association of Black Carbon with Cognition among Children in a Prospective Birth Cohort Study. *American Journal of Epidemiology*, Vol. 167, No. 3. DOI: 10.1093/aje/kwm308. November 15, 2007.
- [Oberdörster 2004] Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, Cox C. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol*. 2004 Jun; 16(6-7):437-45.
- [Campbell 2005] Campbell A, Oldham M, Becaria A, Bondy SC, Meacher D, Sioutas C, Misra C, Mendez LB, Kleinman M. Particulate matter in polluted air may increase biomarkers of inflammation in mouse brain. *Neurotoxicology*. 2005 Jan; 26(1):133-40.
- [McCreanor 2007] McCreanor J, Cullinan P, Nieuwenhuijsen MJ, Stewart-Evans J, Malliarou E, Jarup L, Harrington R, Svartengren M, Han IK, Ohman-Strickland P, Chung KF, Zhang J. Respiratory Effects of Exposure to Diesel Traffic in Persons with Asthma. *N Engl J Med* 357:2348, December 6, 2007.
- [Mamessier 2006] E. Mamessier, A. Nieves, D. Vervloet, A. Magnan. Diesel exhaust particles enhance T-cell activation in severe asthmatics. *Allergy*, Volume 61 Issue 5, Pages 581 – 588. 03/2006.
- [Gauderman 2004] W. James Gauderman, Edward Avol, Frank Gilliland, Hita Vora, Duncan Thomas, Kiros Berhane, Rob McConnell, Nino Kuenzli, Fred Lurmann, Edward Rappaport, Helene Margolis, David Bates, and John Peters, The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age. *N Engl J Med* 2004;351:1057-67. Massachusetts Medical Society, 2004.
- [Parent 2006] Marie-Elise Parent, Marie-Claude Rousseau, Paolo Boffetta, Aaron Cohen, and Jack Siemiatycki, Exposure to Diesel and Gasoline Engine Emissions and the Risk of Lung Cancer. *American Journal of Epidemiology*, Vol. 165, No. 1, DOI: 10.1093/aje/kwj343, October 24, 2006.

[Guo 2004] Johannes Guo, Timo Kauppinen, Pentti Kyyrönen, Pirjo Heikkilä, Marja-Liisa Lindbohm, Eero Pukkala. Risk Of Esophageal, Ovarian, Testicular, Kidney and Bladder Cancers and Leukemia Among Finnish Workers Exposed to Diesel or Gasoline Engine Exhaust. *Int. J. Cancer*: 111, 286–292 (2004).

[Kulkarni 2006] Neeta Kulkarni, Nevil Pierse, Lesley Rushton and Jonathan Grigg, Carbon in Airway Macrophages and Lung Function in Children. *N Engl J Med* 2006;355:21-30. Massachusetts Medical Society, 2006

[Blank 2007] Fabian Blank, Barbara Rothen-Rutishauser and Peter Gehr, Dendritic Cells and Macrophages Form a Transepithelial Network against Foreign Particulate Antigens. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*. Vol. 36, pp. 669-677, 2007

[Shengsu 2008] Dang Shengsu, Anna Lucia Serafino, Jens-Olivermüller, Rolf E. Jentoft, Robert Schlögl, Silvana Fiorito. Cytotoxicity and Inflammatory Potential of Soot Particles of Low-Emission Diesel Engines. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 1761–1765.

[Kendall 2007] Michaela Kendall, Fine airborne urban particles (PM_{2.5}) sequester lung surfactant and amino acids from human lung lavage. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 293: L1053-L1058, 2007. doi:10.1152/ajplung.00131.2007

[Kim 2005] Kim E, Hopke PK, Pinto JP, Wilson WE, Spatial variability of fine particle mass, components, and source contributions during the regional air pollution study in St. Louis. *Environ Sci Technol.* 2005 Jun 1;39(11):4172-9.

[Kuehni 2006] Kuehni CE, Strippoli MP, Zwahlen M, Silverman M. Association between reported exposure to road traffic and respiratory symptoms in children: evidence of bias. *Int J Epidemiol* 2006; 35: 779–86.

[Mohr 2006] Martin Mohr, Anna-Maria Forss, Urs Lehmann. Particle Emissions from Diesel Passenger Cars Equipped with a Particle Trap in Comparison to Other Technologies. *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40,2375-2383.

[Heeb 2007] Norbert V. Heeb, Markus Zennegg, Erika Gujer, Peter Honegger, Kerstin Zeyer, Urs Gfeller, Adrian Wichser, Martin Kohler, Peter Schmid, Lukas Emmenegger, Andrea Ulrich, Daniela Wenger, Jean-Luc Petermann, Jan Czerwinski, Thomas Mosimann, Markus Kasper, Andreas Mayer. Secondary Effects of Catalytic Diesel Particulate Filters: Copper-Induced Formation of PCDD/Fs. *Environ. Sci. Technol.* 2007, 41,5789-5794.

[Wenger 2008] Daniela Wenger, Andreas C. Gerecke, Norbert V. Heeb, Markus Zennegg, Martin Kohler, Hans Peter Naegeli, Renato Zenobi. Secondary Effects of Catalytic Diesel Particulate Filters: Reduced Aryl Hydrocarbon Receptor-Mediated Activity of the Exhaust. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 2992–2998.

[Müller 2006] J.-O. Müller, D.S. Su, R.E. Jentoft, U. Wild, R. Schlögl. Diesel Engine Exhaust Emission: Oxidative Behavior and Microstructure of Black Smoke Soot Particulate. *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40,1231-1236.

[Ban-Weiss 2008] George A. Ban-Weiss, John P. Mclaughlin, Robert A. Harley, Andrew J. Kean, Eric Grosjean, Daniel Grosjean. Carbonyl and Nitrogen Dioxide Emissions From Gasoline- and Diesel-Powered Motor Vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 3944–3950.

[GreenCarCongress, 2005]

http://www.greencarcongress.com/2005/08/ford_expands_av.html

[HJS, 2008] <http://www.cityfilter.de/home.php>, suodatinvalikoima

<http://www.cityfilter.de/lieferprogramm.php>

[TwinTec 2008] <http://www.twintec.de/en/index.php>, suodatinvalikoima:

<http://www.twintec.de/en/index.php?area=autofahrer&link=rfk&sub=lieferprogramm>

[Remus 2008] suodatinvalikoima

<http://www.remus.at/cms/cms.php?pageName=74&sid=rmekshf4o4gnvtgg25dqpsd2p2>

[Oberland 2008] www.oberland-mangold.de, suodatinvalikoima

www.oberland-mangold.de/index.php?option=com_content&task=view&id=76&Itemid=118

[GreenCarCongress 2006]

http://www.greencarcongress.com/2006/12/vlf_credit_for_.html, viitattu 30.11.2008.

[Die Welt 2006]

http://www.welt.de/motor/article699508/Endlich_Steuerfoerderung_fuer_Russfilter.html, viitattu 30.11.2008.

[VROM 2007] <http://www2.vrom.nl/pagina.html?id=10880>, viitattu 30.11.2008.

[AECC 2008] <http://www.dieselretrofit.eu/news.aspx>, viitattu 30.11.2008.

[Low Emission Zones in Europe, 2008]

<http://www.environmentzones.eu/content/view/63/90/lang,en/>, viitattu 30.11.2008.

[Stern, 2008] <http://www.stern.de/auto/service/:Diesel-Partikelfilter-Vollgas-Filter/607806.html>

[Auto, Motor und Sport, 2008.1] http://www.auto-motor-und-sport.de/news/politik_-_verkehr/hxcms_article_513657_13987.hbs, 4.7.2008.

[Eberspächer, 2008]

http://www.eberspaecher.com/abgasprofi/images/AbgasProfi_18.pdf

[Auto, Motor und Sport, 2008.2] http://www.auto-motor-und-sport.de/news/politik_-_verkehr/hxcms_article_515269_13987.hbs, 08.09.2008

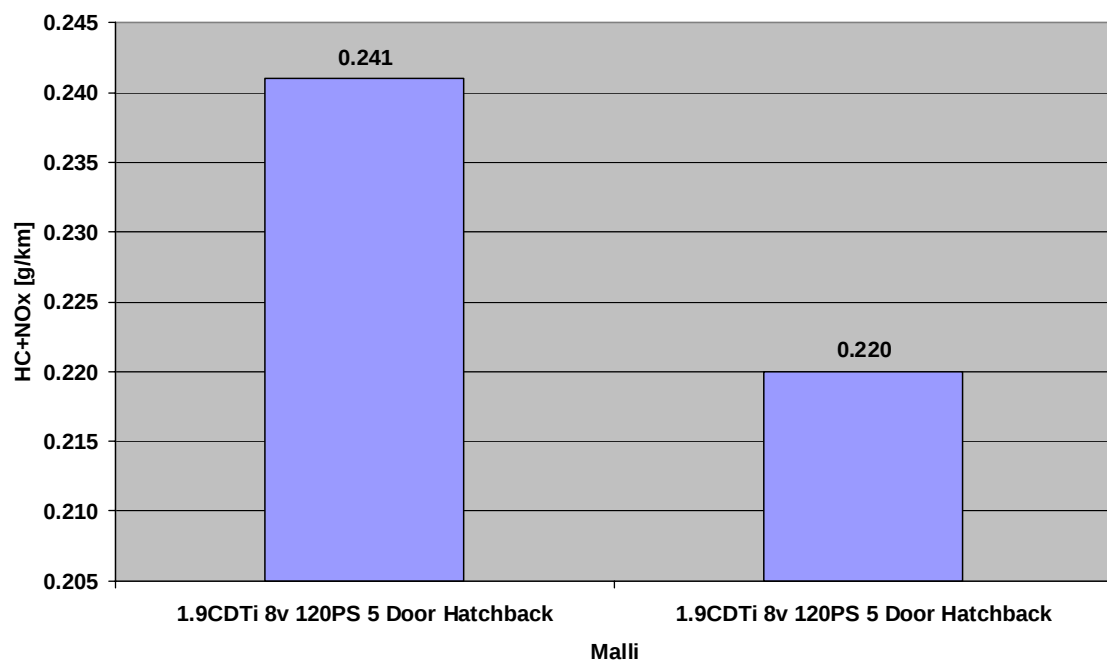
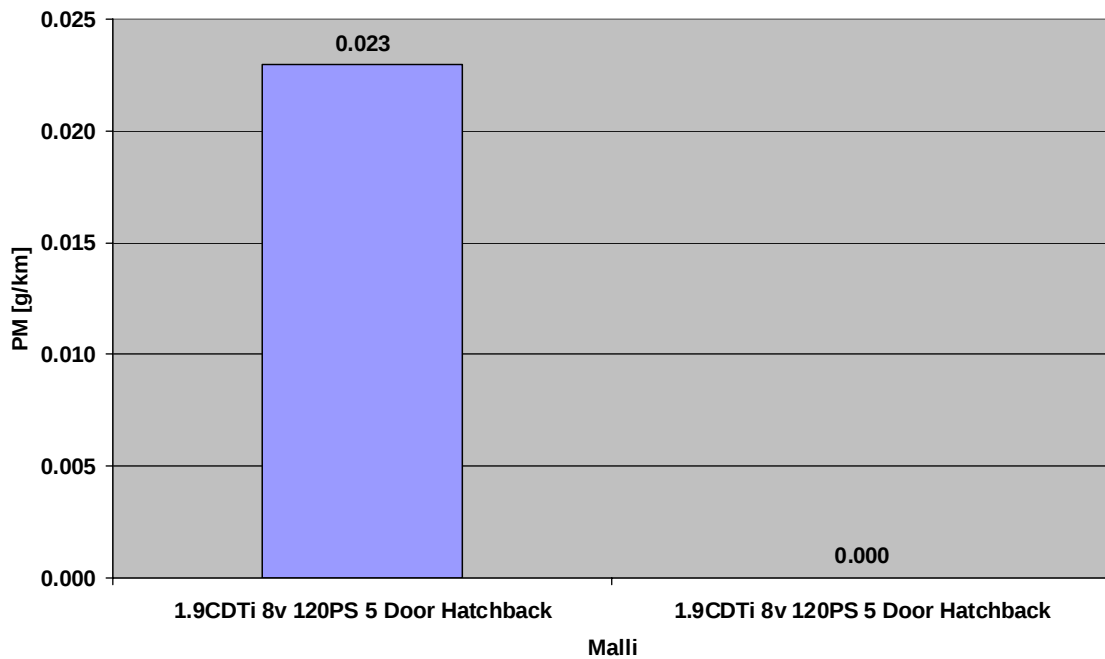
[Auto, Motor und Sport, 2008.3] http://www.auto-motor-und-sport.de/news/wirtschaft_-_handel/hxcms_article_512577_13987.hbs, 20.05.2008.

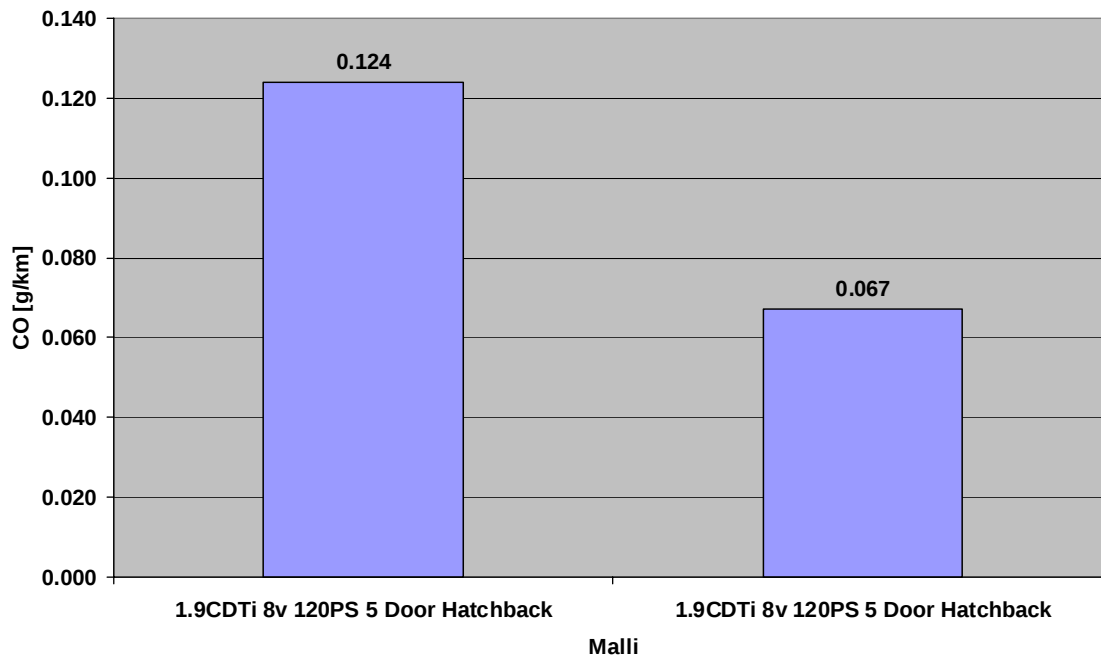
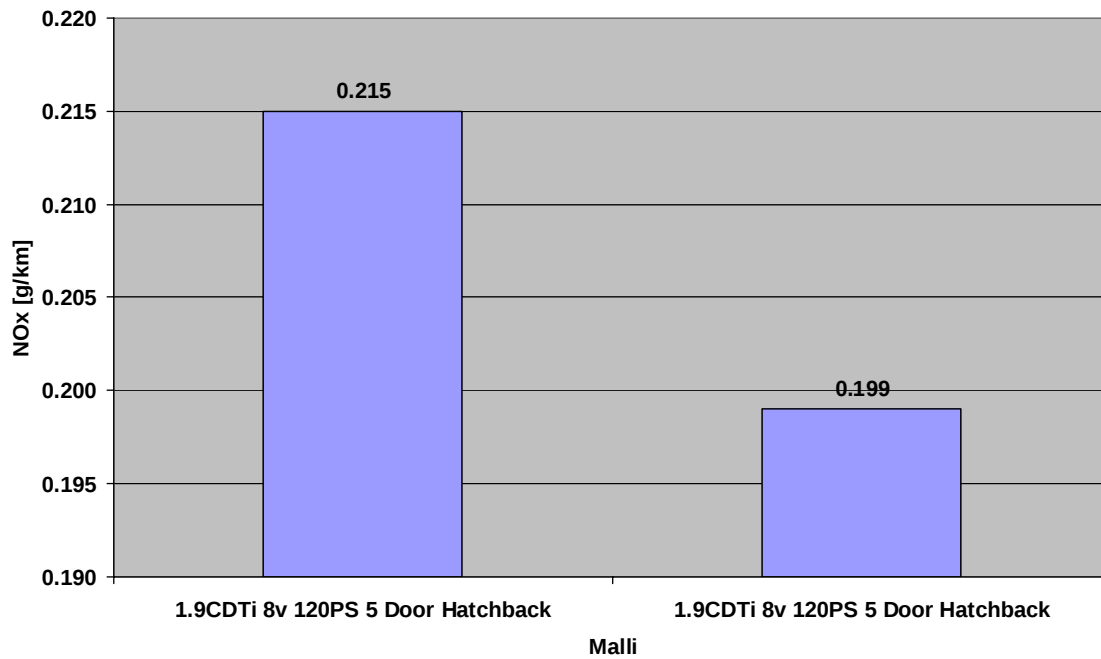
[Auto, Motor und Sport, 2008.4] http://www.auto-motor-und-sport.de/news/politik_-_verkehr/hxcms_article_510092_13987.hbs, 11.02.2008.

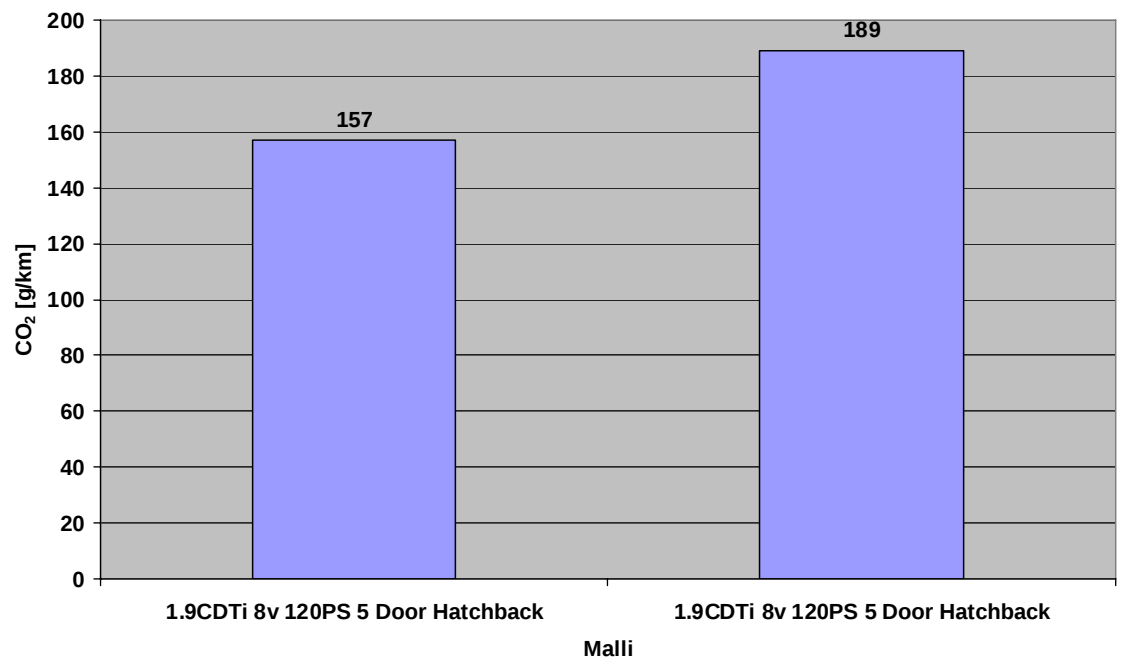
[Wikipedia, 2008] <http://de.wikipedia.org/wiki/Partikelfilter#Kritik>, viitattu 30.11.2008.

Liite: Parivertailuja hiukkassuodattimella varustetun ja normaalimallin välillä

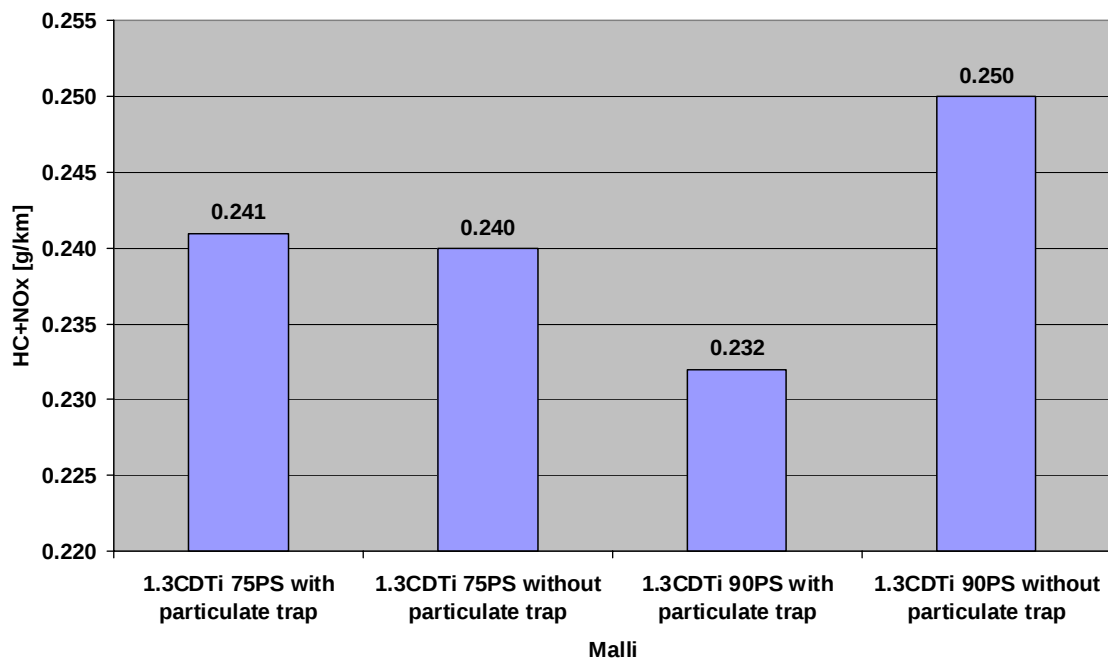
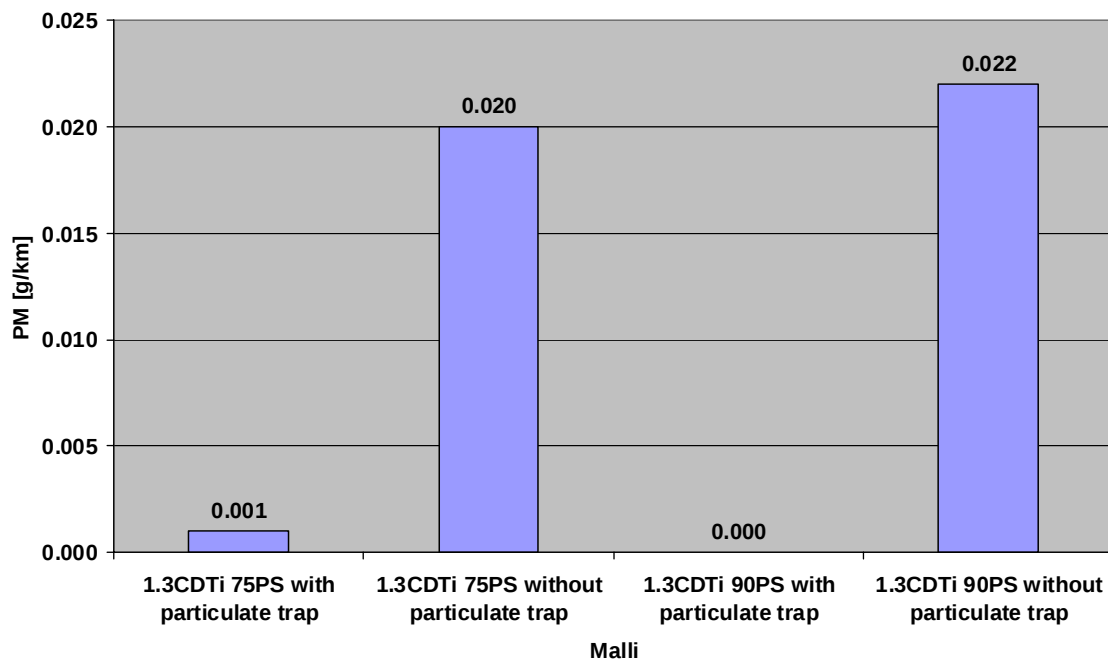
Opel Astra 1.9CDTi

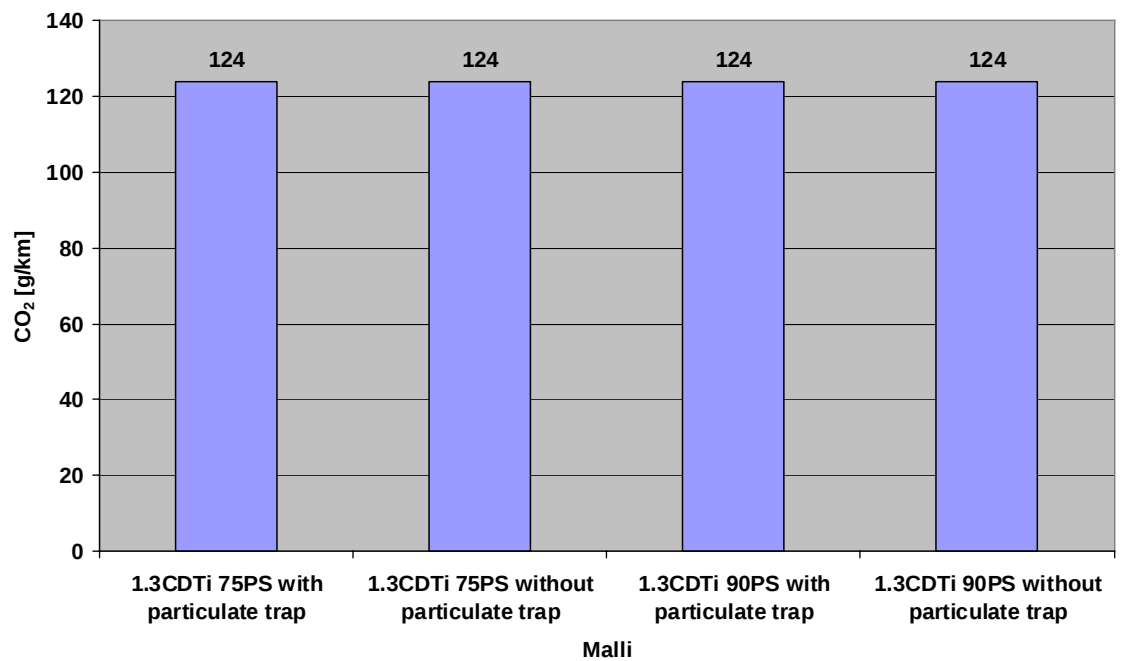
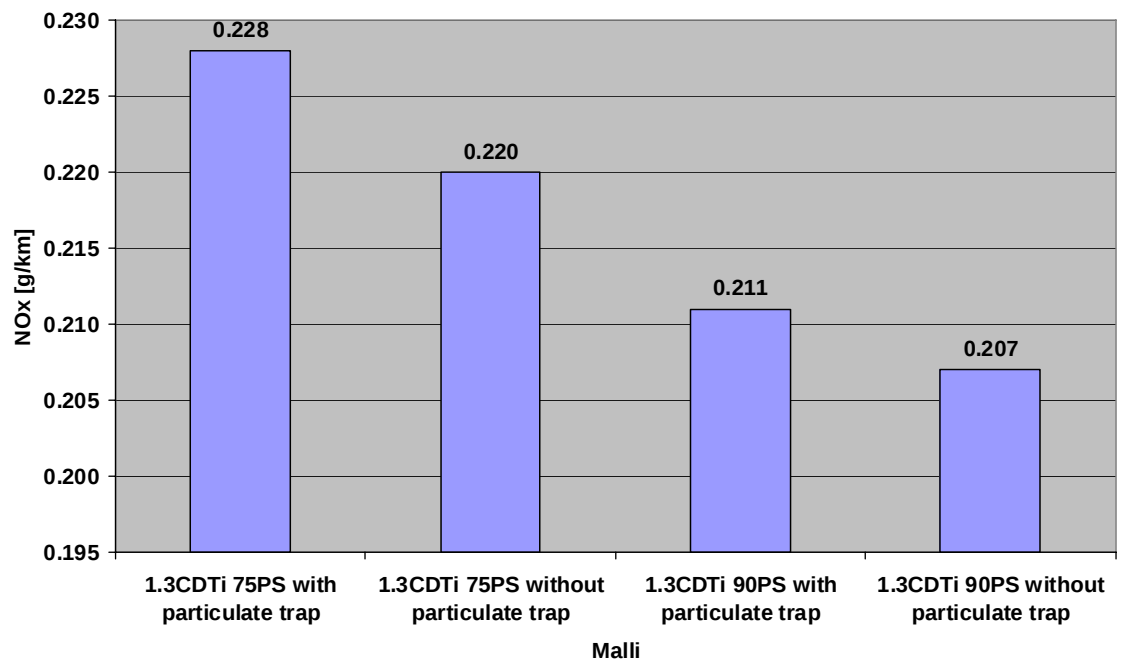






Opel Corsa 1.3CDTi





Volkswagen Golf 2.0 TDI

