



# BUSSIKALUSTON PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN EVALUOINTI: VUOSIRAPORTTI 2005

Kirjoittajat

Kimmo Erkkilä, Maija Lappi, Tuukka Hartikka, Nils-Olof Nylund

Luottamuksellisuus

Julkinen

Raportin nimi <b>Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi: Vuosiraportti 2005</b>	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot YTV, HKL	Asiakkaan viite
Projektin nimi <b>Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi (RAKEBUS)</b>	Projektin numero/lyhytnimi C3SU00127
Raportin laatija(t) Kimmo Erkkilä, Maija Lappi, Tuukka Hartikka, Nils-Olof Nylund	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 19 + liitt. 4 s.
Avainsanat <b>Kaupunkibussit, pakokaasupäästöt</b>	Raportin numero VTT-R-03435-07
Tiivistelmä <p>Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi (RakeBus) –projektissa määriteltiin todellista kaupunkibussin ajoa vastaavia päästökertoimia eri tyyppisille busseille. Mittauksissa käytettiin VTT:n raskaan kaluston alustadynamometria ja siihen kuuluvia pakokaasujen analyysilaitteita.</p> <p>Vuoden 2005 vuosiraportti sisältää yhdeksän kaupunkibussin päästötuloksia. Mittauksissa käyneiden ajoneuvojen päästötasot olivat Euro 2:sta aina EEV-luokkaan. Seitsemän dieselin lisäksi mitattavana oli myös kaksi maakaasukäyttöistä autoa.</p> <p>2005 mittausmatriisi kattoi kolme vuodesta 2002 alkaen seurannassa ollutta bussiyksilöä, joiden päästöjen kehittymistä seurattiin ajokilometrien ja käyttövuosien kertyessä. Lisäksi mittauksilla täydennettiin kaupunkibussien päästötietokantaa kuudella uudella kaupunkibussilla, ml. ureakatalysaattorilla varustetulla (SCR) dieselillä ja stoikiometrisella EEV maakaasuautolla.</p> <p>Kaikista kaupunkibusseista mitattiin säännellyt päästökomponentit, häkä (CO), kokonaishiilivedyt (THC), typen oksidit (NOx) ja partikkelit (PM). Lisäksi uusimmasta Euro 5 päästötasoa edustavasta ajoneuvosta mitattiin joukko ei-säänneltyjä päästökomponentteja.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 16.4.2007 Allekirjoitukset	
Kimmo Erkkilä projektipäällikkö	Juhani Laurikko tiimipäällikkö
Jukka Lehtomäki teknologiapäällikkö	
VTT:n yhteystiedot	
Jakelu YTV, HKL, VTT	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

# Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Koeohjelma	4
3	Tulokset ja tulosten arviointi	6
3.1	Säännellyt päästöt	6
3.2	Seuranta-autot	10
3.3	Sääntelemättömät päästöt	12
3.3.1	Yleistä	12
3.3.2	Typpiyhdisteiden NO, NO <sub>2</sub> ja NH <sub>3</sub> päästöt	12
3.3.3	Aldehydit	14
3.3.4	Hiukkasten koko ja lukumäärä	14
3.3.5	Hiilivety- ja PAH –päästöt	16
4	Johtopäätökset	18
	Viitteet	19
	LIITE 1	1

# 1 Johdanto

Käsillä oleva raportti sisältää vuonna 2002 alkaneen kaupunkibussien pakokaasupäästöjen evaluointi (RakeBus) –projektin vuoden 2005 mittaustulokset. Projektin lähtökohdat ja käytetyt menetelmät on esitelty perusteellisemmin vuosien 2002 – 2004 yhteenvetoraportissa.

<http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/RAKEBUS.pdf>

RakeBus projektissa VTT on muodostanut tietopankin erityyppisten kaupunkibussien pakokaasupäästöistä todellista kaupunkiajoa vastaavassa ajotilanteessa. Tällaista tietoa ei ole aikaisemmin ollut saatavilla.

Tässä raportissa esitettävät tulokset täydentävät kaupunkibussien päästöjen tietopankkia uusimmilla pääkaupunkiseudun liikenteeseen tulleiden Euro 3, Euro 5 ja EEV -autojen tuloksilla. Mittauksiin otettiin mm. uutta SCR –tekniikka (urearuiskutus ja pelkistyskatalysaattori) ja stoikiometrista maakaasutekniikka edustavat ajoneuvot.

Lisäksi raportti sisältää sääntelemättömien päästöjen tuloksia uudesta Euro 5 SCR-järjestelmällä varustetusta kaupunkibussista. Kyseinen auto saatiin mitattavaksi vasta kesällä 2006, mutta tulokset kuitenkin sisällytettiin vuoden 2005 mittaussarjaan alkuperäisen suunnitelman mukaisesti.

Vuonna 2005 RakeBus-toimintaa rahoittivat Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaliokunta (YTV), Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, suunnitteluosasto (HKL) ja VTT.

## 2 Koeohjelma

Koeohjelmasta päätettiin projektin johtoryhmän kokouksessa 24.5.2005. Mitattavaksi sovittiin seuraavat seitsemän autotyyppiä:

Taulukko 1. Suunniteltu mittausmatriisi vuodelle 2005

### Seuranta-autot

- Brand A Euro 2 diesel -00
- Brand C Euro 3 diesel -03
- Brand A Euro 3 CNG -02

### Muut autot

- Brand A Euro 3 diesel
- Brand C Euro 3 diesel
- Brand A Euro 5 diesel (kattavat päästömittaukset)
- Brand D EEV CNG

Seuranta-autot olivat olleet seurannassa projektin alusta 2002 alkaen ja seuranta päätettiin edelleen jatkaa. Listan muut autot edustivat uusia pääkaupunkiseudun liikenteeseen tulevia autotyyppiä.

Sovittujen autojen lisäksi VTT:llä kävi mitattavana muiden projektien yhteydessä myös kaksi muuta kaupunkilinja-autoa, joiden tulokset voitiin ottaa mukaan RakeBus'n tulosten käsittelyyn. Mittausmatriisi toteutui näin ollen hieman suunniteltua laajempaan. Toteutunut mittausmatriisi on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Toteutunut mittausmatriisi 2005

Valmistekoodi	Päästötaso	Vuosimalli	Ajokilometrit	Käyttövoima	Pakok. jälkikäsitely	Luokka
Brand A	Euro 2	2000	394634	Diesel	Hapetuskat.	Seuranta
Brand C	Euro 3	2002	412665	Diesel	Hapetuskat.	Seuranta
Brand A	Euro 3	2005	49669	Diesel	Hapetuskat.	Uusi ajoneuvo
Brand C	Euro 3	2004	137500	Diesel	Hapetuskat.	Lisäajoneuvo
Brand C	Euro 3	2005	64470	Diesel	Hapetuskat.	Uusi ajoneuvo
Brand G	Euro 3	2005	1364	Diesel	Hapetuskat.	Lisäajoneuvo
Brand A	Euro 5	2006	1400	Diesel	SCR-kat	Uusi ajoneuvo
Brand A	Euro 3	2002	237189	Maakaasu	Hapetuskat.	Seuranta
Brand D	EEV	2005	1824	Maakaasu	3-toimikat.	Uusi ajoneuvo

Kaikista ajoneuvoista mitattiin säännellyt päästöt, häkä (CO), hiilivedyt (THC), typen oksidit (NO<sub>x</sub>) ja partikkelit (PM), käyttämällä täyden virtaaman CVS-järjestelmää (Pierburg CVS-120-WT) ja siihen liitettyä analysointijärjestelmää (Pierburg AMA 4000). Laitteistot täyttävät direktiivin 1999/96/EC vaatimukset raskaiden ajoneuvomoottorien pakokaasumittauksissa käytettävistä mittalaitteista.

Kaikki mittaukset ajettiin VTT:n raskaiden ajoneuvojen alustadynamometrilla Braunschweig-ajosyklillä puolta kuormaa simuloiden. Päästötulokset ilmoitetaan tässä raportissa pääsääntöisesti ajomatkaan suhteutettuina esim. muodossa g/km.

Laissa säädelyjen päästökomponenttien lisäksi Euro 5 SCR autolle tehtiin joukko erikoispäästömittauksia. Näitä mittauksia olivat mm.:

#### Kaasufaasi:

- hiilivetyerittely C<sub>1</sub> - C<sub>8</sub> -yhdisteille (tolueeni) (GC)
- aldehydit (DNPH -näytteenotto, HPLC)
- anionit (kapillaarielektroforeesi CE)
- typen oksidit NO ja NO<sub>2</sub> (kemiluminesenssi CLD)
- ammoniakki NH<sub>3</sub> (FTIR)

#### Hiukkasfaasi:

- hiukkasten lukumäärät ja lukumääräjakaumat (ELPivi 4.0, CPC)
- PAH -yhdisteet (PM -keräys suodattimille, GC-MS (SIM))

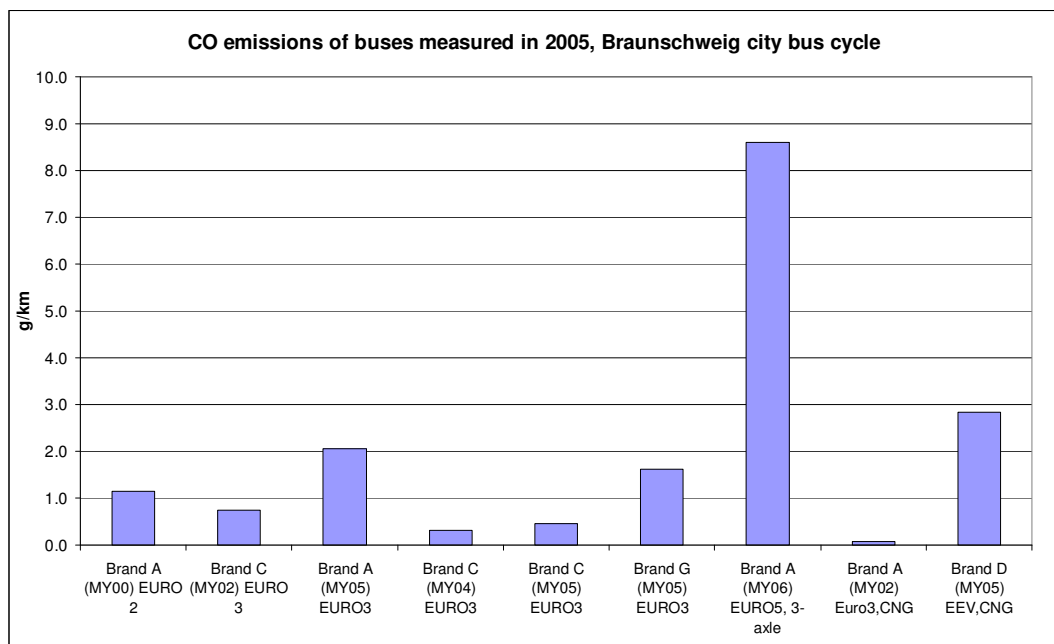
## 3 Tulokset ja tulosten arviointi

### 3.1 Säännellyt päästöt

Tyypillisesti dieselmoottorien CO ja THC päästöt ovat matalia, joten niihin ei yleensä kiinnitetä suurtakaan huomiota. Kyseiset päästökomponentit eivät myöskään yleensä tuota ongelmia dieselmoottorien päästöjen hyväksyntämittauksissa. Katalysaattorien käyttö lisäksi vähentää CO ja THC päästöjä entisestään.

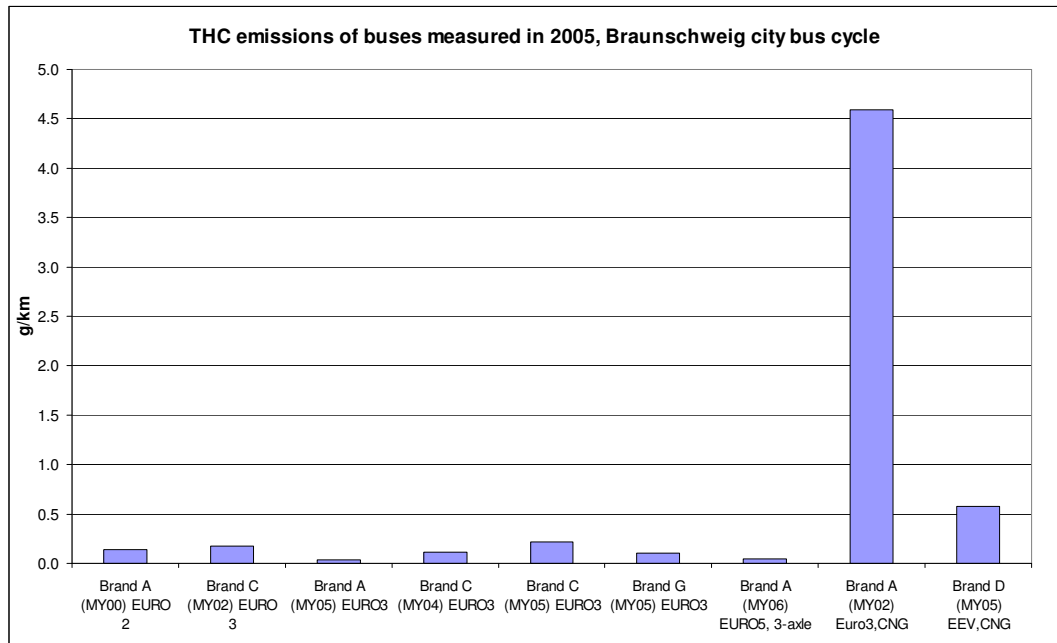
Pakokaasulainsäädännön kiristyessä haastavimmat päästökomponentit ovat olleet typen oksidit (NO<sub>x</sub>) ja partikkelit (PM). Molemmat komponentit ovat ongelmallisia dieselmoottoreille, sillä optimoitaessa moottorin säätöjä toisen komponentin suhteen, toinen komponentti vastavuoroisesti nousee.

CO päästöissä suurimmat lukemat saatiin yllättäen uudesta SCR-järjestelmällä varustetusta Euro 5 autosta. SCR auto päästi jopa 8.6 g/km, kun kaikki muut diesel- ja maakaasuautot jäivät arvoihin alle 3 g/km (kuva 1).



Kuva 1. Kaupunkibussien häkäpäästöt (CO-päästöt)

THC-päästöt (Total HydroCarbons) sisältävät kaikki hiilivedyt, myös metaanin. Toisinaan hiilivedyt eritellään metaaniksi CH<sub>4</sub> ja 'ei metaanisiksi hiilivedyiksi' NMHC (Non Methane HydroCarbon), sillä metaani luetaan kasvihuonekaasuksi, mutta ei kuitenkaan myrkylliseksi komponentiksi. Maakaasu on pääasiassa metaania, joten palamattomaksi jäänyt polttoaine näkyy maakaasuautojen päästöissä korkeina THC-lukemina (kuva 2).



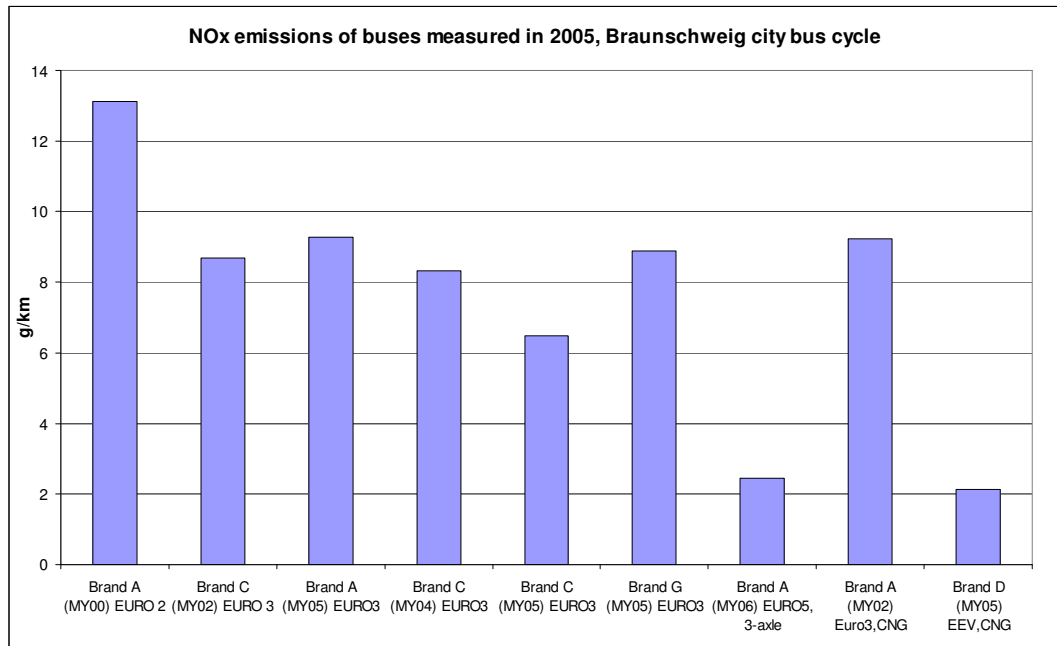
Kuva 2. Kaupunkibussien kokonaishiilivetypäästöt (THC-päästöt)

Euro 4 ja 5 päästötasoihin pyrittäessä, joudutaan vähintään toista päästökomponttia (NO<sub>x</sub> tai PM) pienentämään erinäisillä pakokaasujen vähennystekniikoilla, joko moottorin sisäisillä toimilla tai pakokaasujen jälkikäsittelyllä. Mittauksissa mukana olleessa Euro 5 autossa partikkelipäästöt on optimoitu moottorin säätötekniisesti ja typen oksideita vähennetään ureakatalysaattoriin perustuvalla pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmällä (SCR-järjestelmällä).

Tulosten perusteella Euro 5 auton SCR-järjestelmä toimi odotetun tehokkaasti. NO<sub>x</sub>-päästöjä syntyi vain n. 2.5 g/km, mikä on lähes samaa tasoa kuin stoikiometrisen maakaasuauton (Brand D) tulos. Verraten Euro 3-autojen arvoihin, SCR-auton päästöt jäivät NO<sub>x</sub>:n osalta noin kolmannekseen (kuva 3).

Maakaasukäyttöisten laihaseostekniikkaan perustuvien autojen osalta ongelmat ovat lähinnä NO<sub>x</sub>-päästöjen hallinnassa, sillä partikkelipäästöt ovat erittäin matalia vanhimmissakin maakaasumoottoreissa. Kehittyneimmässä stoikiometrisissa maakaasumoottoreissa voidaan käyttää henkilöautoista tuttua kolmitoimikatalysaattoria, jonka avulla NO<sub>x</sub>-päästöjä voidaan tehokkaasti vähentää. Kolmitoimikatalysaattorin ansiosta stoikiometrinen auto tuotti typen oksideita vain 2.1 g/km (kuva 3).



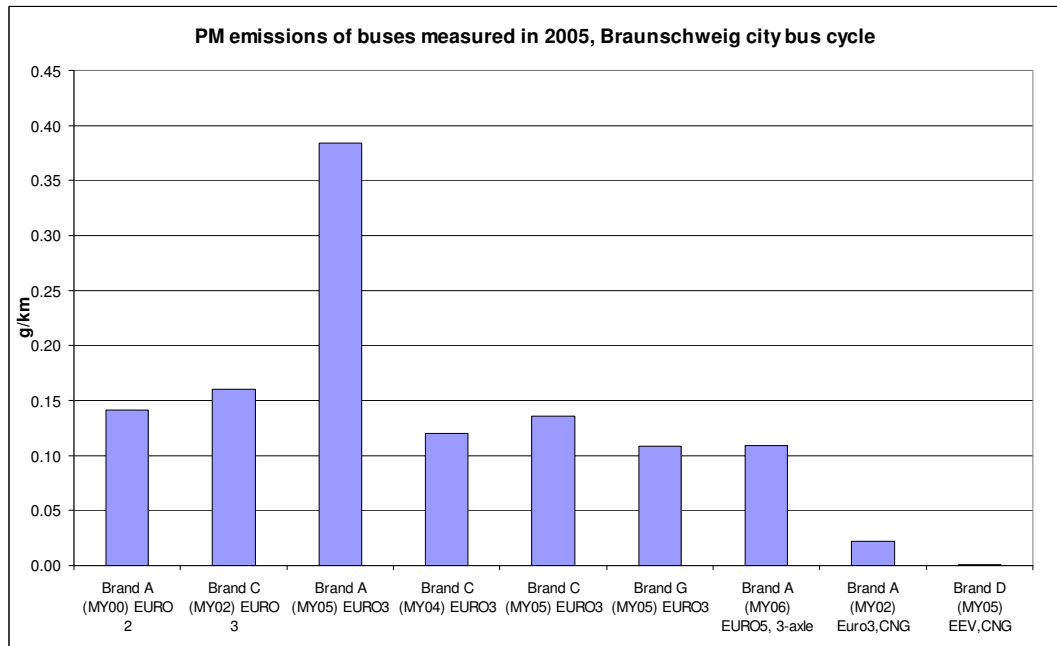


Kuva 3. Kaupunkibussien typpioksidipäästöt (NO<sub>x</sub>-päästöt)

Partikkelipäästöissä huolestuttavan suuren lukeman, n. 0.38 g/km, antoi Merkin A Euro 3 –auto. Määrä on noin kolminkertainen, verraten muihin Euro 3 –päästöluokan autoihin. Aikaisempien vuosien havaintojen perusteella kyse ei valitettavasti ole viallisesta yksilöstä, sillä muutkin saman mallin autot ovat tuottaneet poikkeuksellisen korkeita partikkelipäästöjä (kuva 4).

Partikkelien osalta Euro 5 SCR auton tulokset olivat samaa tasoa matalimpien Euro 3 autojen tulosten kanssa (n. 0.11 g/km). Lainsäädännössä Euro 4/5 moottorien partikkelipäästöjen tyypitys raja-arvot ovat vain noin viidennes Euro 3 rajoista, joten ainakaan tässä tapauksessa Euro raja-arvomutokset eivät toteutuneet käytännössä (kuva 4).

Toinen joukosta erottuva ryhmä on kaasautot. Uusimman kaasuauton partikkelipäästöt olivat hädän tuskin mitattavissa (kuva 4).

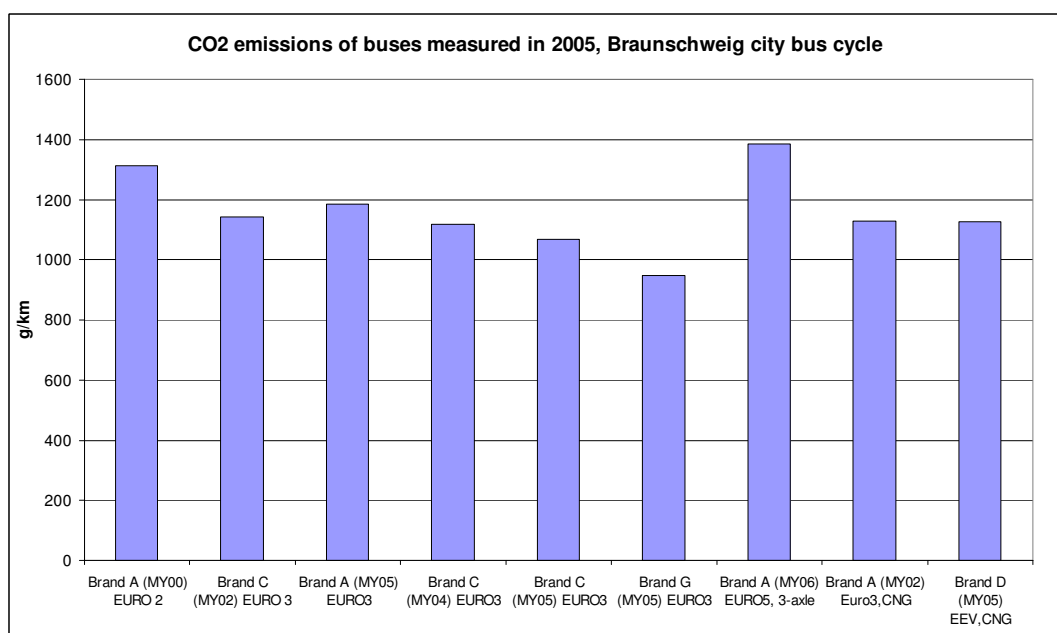


Kuva 4. Kaupunkibussien partikkelipäästöt (PM-päästöt)

Hiilidioksidipäästöissä Brand C Euro 3 autot ovat kaikki samalla tasolla, luokkaa 1100 g/km. Brand A Euro 3 puolestaan tuotti n. 1190 g/km ja Euro 2 seuranta-auto (Brand A) n. 1310 g/km (kuva 5).

Kuvassa 5 korkeimpana pylväänä esiin nousee uusi SCR-auto, mikä osaltaan selittyy auton korkeammalla massalla. Muista poiketen SCR auto oli kolmiakselinen, mikä tarkoittaa n. 4000 kg suurampaa kuormaa ajosyklissä. Tämä luonnollisesti näkyy sekä hiilidioksidipäästöissä että kulutuksessa.

Joukon alimpana pylväänä näkyy Euro 3 auto (Brand G), jonka matalat CO<sub>2</sub>-päästöt ovat seurausta auton poikkeuksellisen matalasta omapainosta. (kuva 5)



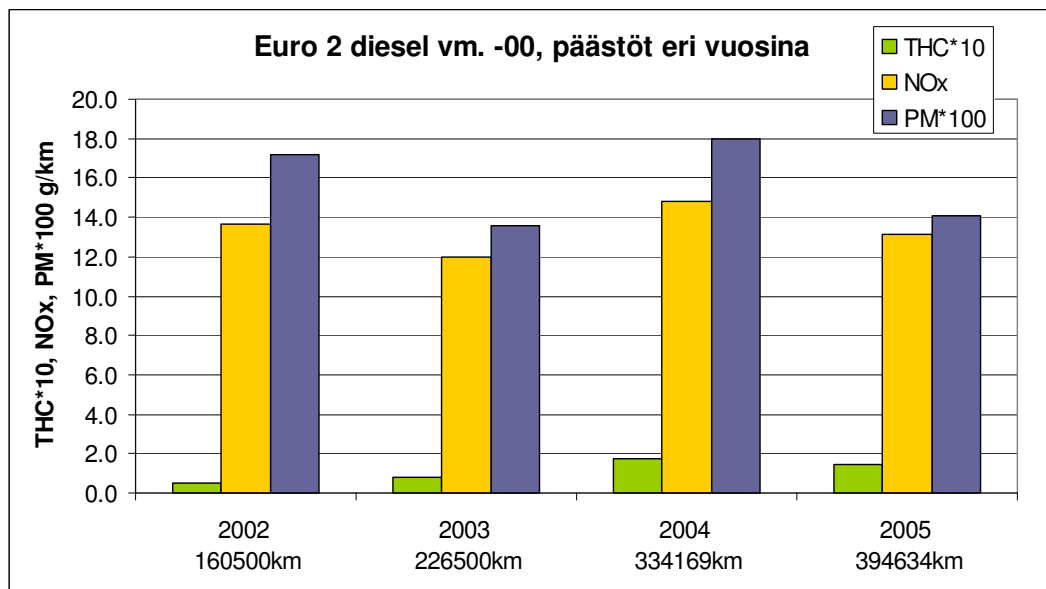
Kuva 5. Kaupunkibussien hiilidioksidipäästöt (CO<sub>2</sub>-päästöt)

### 3.2 Seuranta-autot

Vuodesta 2002 lähtien RakeBus-projektissa on seurattu kolmen auton päästöjen kehittymistä ajokilometriä ja iän suhteen. Seurantamittauksissa on käynyt kaksi dieselautoa, päästötasot Euro 2 ja Euro 3, sekä yksi maakaasukäyttöinen Euro 3 auto.

Euro 2 auton (Brand A) NO<sub>x</sub>- ja PM-tulokset ovat ailahtelleet vuosien ja kilometrien karttuessa, mutta taso on säilynyt keskimäärin samana, eikä selvää vanhenemisesta aiheutuvaa muutostrendiä ole havaittavissa. NO<sub>x</sub> taso on ollut seurantamittauksissa n. 12 – 14,8 g/km ja PM päästöt n. 0,138 - 0,180 g/km.

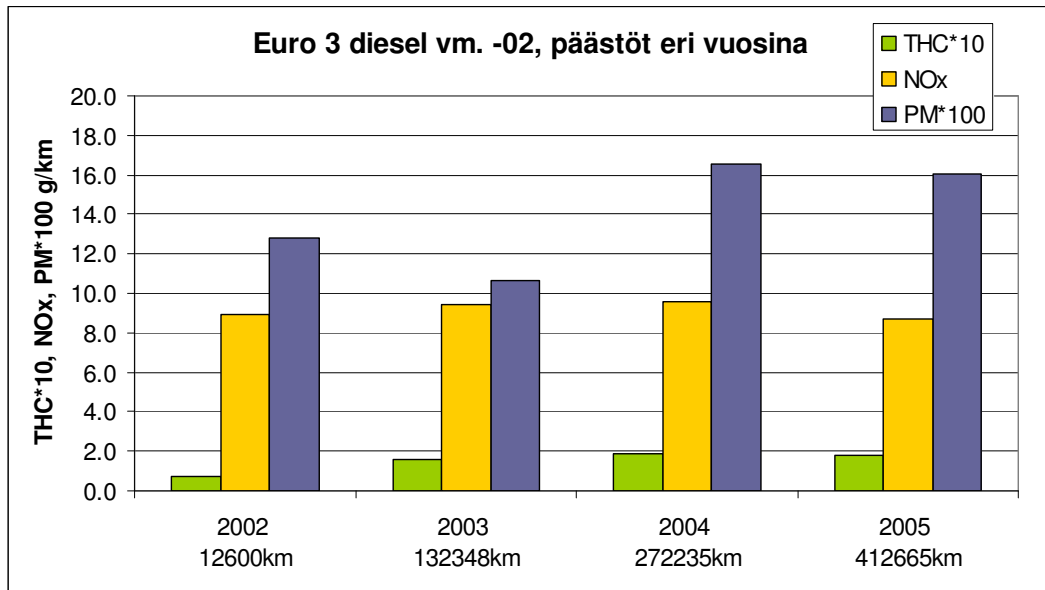
Hiilivetyypäästöt (THC) ovat havaittavasti kasvaneet, mutta edelleen hyvin matalat. THC päästöjen kasvaminen kertoo usein katalysaattorin tehon heikkenemisestä. (kuva 6)



Kuva 6. Euro 2 kaupunkibussin seurantatulokset (Brand A)

Euro 3 dieselauton (Brand C) osalta tulokset olivat lähes samat kuin 2004 (kuva 7). Partikkeleita mitattiin 0,160 g/km ja No<sub>x</sub>-päästöjä 8,7 g/km. PM-päästöt ovat kasvaneet merkittävästi seurannan aikana (n. 25%), mutta NO<sub>x</sub>-päästöissä ei ole tapahtunut mainittavia muutoksia.

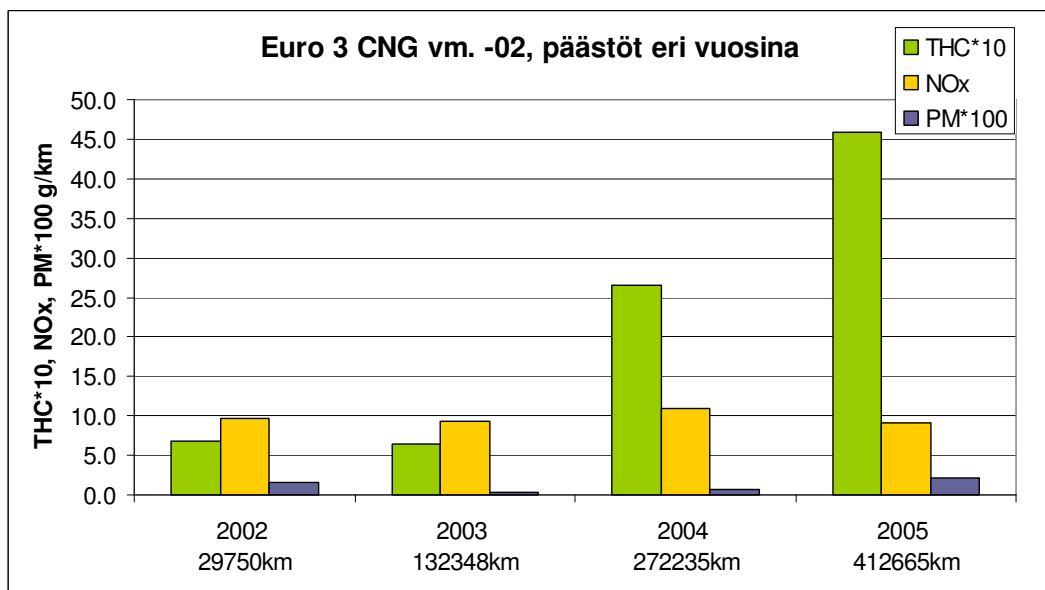
Ensimmäisellä mittauskerralla v.2002 autossa oli mittarissa 126 tkm, mutta katalysaattorilla ajettu vielä vähemmän (asennettu ensimmäisessä huollossa). Tämä saattaa olla osasyynä vuoden 2002 matalaan hiilivetytasoon. (kuva 7)



Kuva 7. Euro 3 kaupunkibussin seurantatulokset (Brand C)

Seurannassa olevan Euro 3 CNG THC-päästöt ovat kasvaneet voimakkaasti. Nyt taso on jo lähes seitsemänkertaiset lähtömittauksiin nähden (4.6g/km vs. 0.7), mikä kielii hapetuskatalysaattorin tehon merkittävästä heikkenemisestä, tai itse moottorin palotapahtuman häiriöistä, esim. sytytyskatkoksista. Kokonaishiilivedyt ovat maakaasuautossa pääosin metaania.

CNG-auton NOx-päästöt ovat pysyneet samalla Euro 3-autoille tyypillisellä tasolla (n. 10g/km) ja partikkelit ovat matalat, kuten maakaasuautoissa yleensä (iästä ja mallista riippumatta). (kuva 8)



Kuva 8. Euro 3 maakaasukäyttöisen kaupunkibussin seurantatulokset (Brand A). Huomaa eri asteikko aikaisempiin kuviin verrattuna.

### 3.3 Säätelämättömät päästöt

#### 3.3.1 Yleistä

Vuosina 2003-2004 VTT toteutti RakeBus-hankkeen yhteydessä diesel/maakaasuautojen pakokaasuvertailun, joka sisälsi kattavan sarjan pakokaasujen erikoismittauksia. Tutkimus julkaistiin omana raporttinaan, joka on löydettävissä seuraavasta internet-osoitteesta:

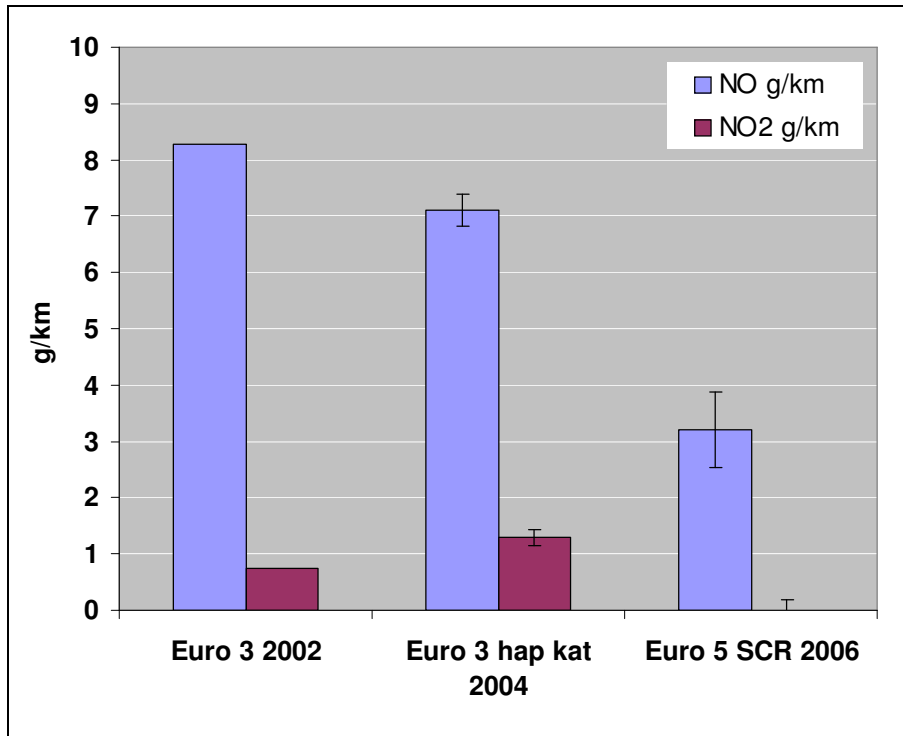
[http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTT\\_Nylund.pdf](http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTT_Nylund.pdf)

Mittauksiin valittiin tuolloin uusinta liikennöitsijöiden saatavilla ollutta tekniikkaa sisältäviä ajoneuvoja. Diverseitä edustamaan vertailuun otettiin versiot ilman jälkikäsitteilyä, hapettavalla katalysaattorilla varustettuna ja tehdasasennetulla CRT-suodattimella varustettuna. Maakaasubusseja edustivat Euro 3 laihaseosauto ja kolme EEV-hyväksyttyä, mutta eri tekniikoihin perustuvaa autotyyppiä, laihaseos, stoikiometrinen ja näiden yhdistelmä ”lean-mix”.

Tässä raportissa sarjaa täydennetään uudella vasta markkinoille tulleella SCR-järjestelmään perustuvalla Euro 5 luokitellulla dieselkaupunkibussilla ja verrataan saatuja tuloksia aiempiin.

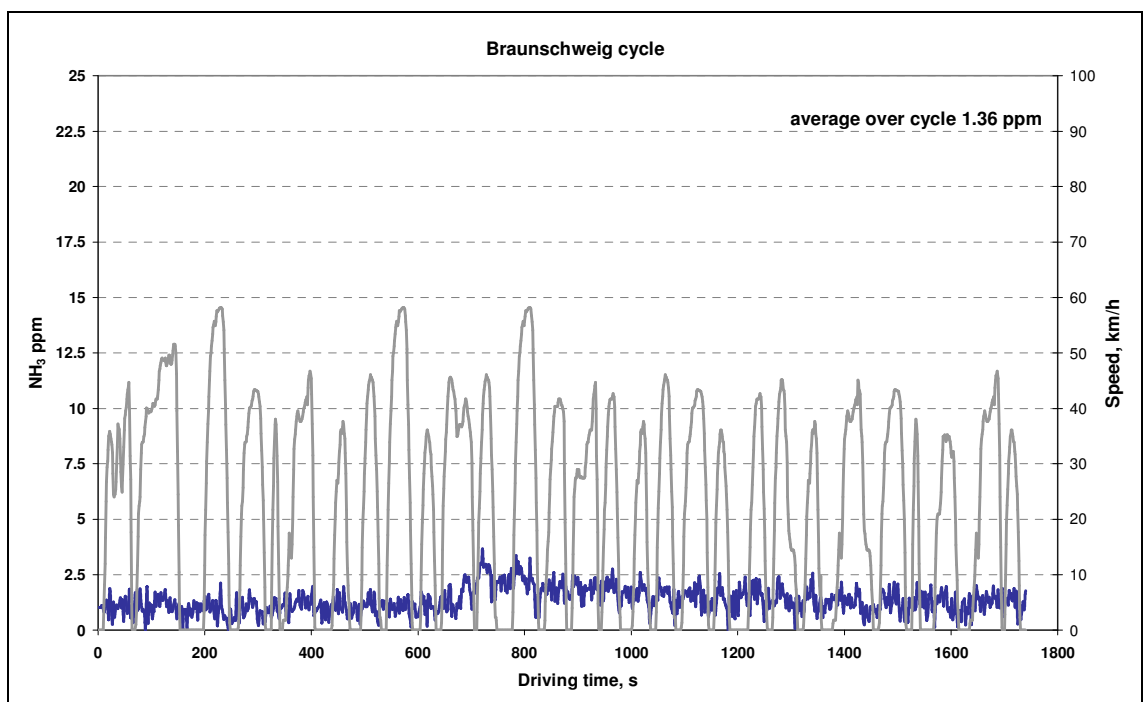
#### 3.3.2 Tyypiyhdisteiden NO, NO<sub>2</sub> ja NH<sub>3</sub> päästöt

Pakokaasujen jälkikäsitteily muuttaa pakokaasujen NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> -suhdetta (kuva 9). Mitä enemmän hapettavia elementtejä jälkikäsitteilyjärjestelmässä on sitä korkeammaksi NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> -suhde voi nousta. Perustaso ilman jälkikäsitteilyratkaisuja on tyypillisesti 5 - 10 % NO<sub>2</sub> NO<sub>x</sub>:sta. Tutkitussa SCR -bussissa katalysaattori toimi tehokkaasti jo Braunschweig -syklin lämpötiloissa ja sekä NO- että NO<sub>2</sub> -tasot olivat matalat verrattuna Euro 3 -aikakauden busseihin. SCR -auton NO<sub>2</sub> -päästö oli lähellä nollaa. Myös SCR -ajoneuvoissa NO<sub>2</sub>:ia voi muodostua, jos joudutaan käyttämään NO<sub>2</sub> -generointia matalan lämpötilan ureareaktioiden aikaansaamiseksi. Kuvan 9 NO<sub>2</sub> -päästöt ovat suoraan pakokaasusta CLD analysaattorilla mitattuja. Vuosien 2002 - 2004 tutkimuksessa NO/NO<sub>2</sub> -suhde saatiin FTIR -mittauksista ja määrät suhteutettiin CLD:llä mitattuun kokonais-NO<sub>x</sub> -tasoon. Suoriin mittauksiin verrattuna 2002 - 2004 tulokset olivat NO<sub>2</sub>:n osalta matalampia. NO<sub>2</sub>:n vaikutuksia on kuvattu liitteessä 1.



Kuva 9. NO ja NO<sub>2</sub> -päästöt (BSC).

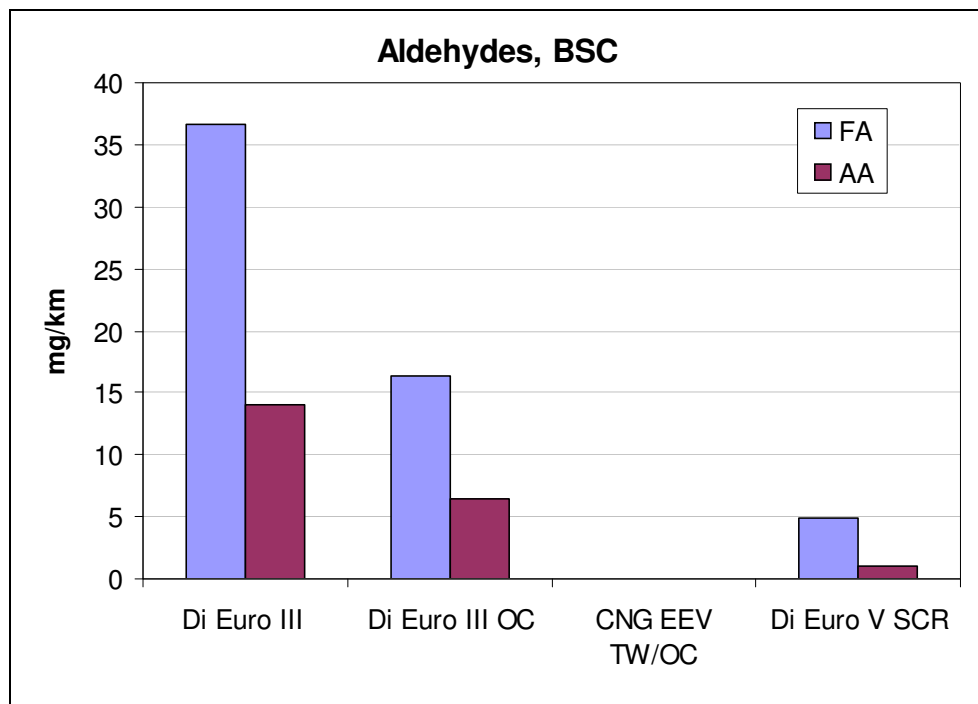
Komission uusimman ajoneuvopäästöjä koskevan direktiivin 2006/51/EC mukaan dieselmootorin reagenssia vaativan pakokaasun jälkikäsittelylaitteen jälkeiset ammoniakkipäästöt eivät tyyppihyväksyntäkokeessa saa ylittää keskimääräistä 25 ppm:n pitoisuutta. Euro 5 SCR -bussin ammoniakkipäästöt mitattiin jatkuvatoimisesti BSC(Braunschweig) -syklin yli Gasmet FTIR -laitteella. Tulos on kuvassa 10. Ns. ammoniakkiislippiä, so. NO<sub>x</sub>:in kanssa reagoimatonta ammoniakkia ei syklin aikana juurikaan esiintynyt. Keskimääräinen NH<sub>3</sub> -pitoisuus pakokaasussa oli 1.36 til-ppm ja suurinkin hetkellinen pitoisuus alle 4 ppm.



Kuva 10. Ammoniakkipäästö BSC:n raakapakokaasussa

### 3.3.3 Aldehydit

Kuvassa 11 on esitetty SCR -bussin form- and asetaldehydipäästöt verrattuna Euro 3 -bussiin sekä puhtaimpaan maakaasubussiin, jonka aldehydipäästöt olivat alle mittauksen alarajan. Yleisesti ottaen (hapetus)katalysaattorin käyttö maakaasu- tai dieselmootorissa alentaa formaldehydipäästöä merkittävästi. SCR -bussin form- ja asetaldehydipäästöt olivat alle 1/3:n hapetuskatalysaattorilla varustetun Euro 3 -bussin päästöistä. Hapetuskatalysaattori alensi pitoisuuksia n. 50 %. Toistokokeiden tulosten hajonta oli pieni. Muita yksittäisiä aldehydejä oli vähän ja niiden pitoisuudet olivat alle 0.2 mg/km.



Kuva 11. SCR -ajoneuvon form (FA)- ja asetaldehydipäästöt (AA) ajokokeessa BSC.

### 3.3.4 Hiukkasten koko ja lukumäärä

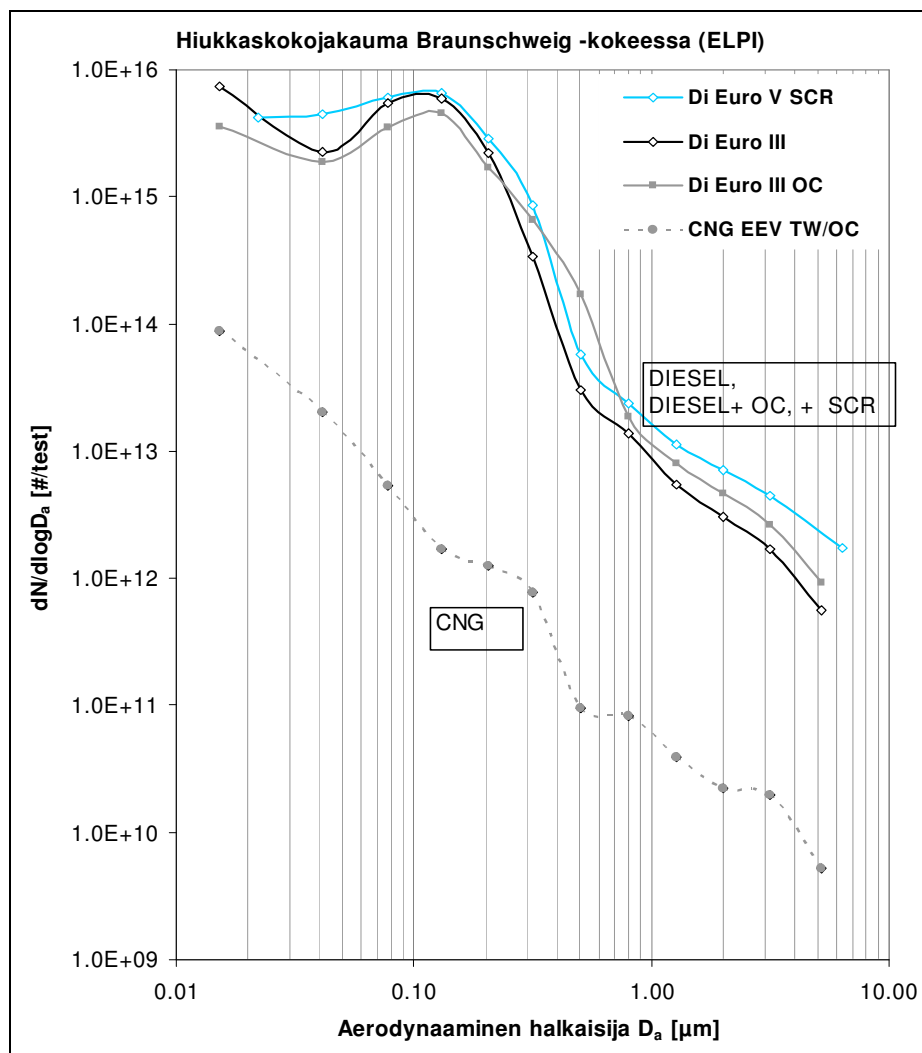
Hiukkaskokojakaumat perustuvat sähköiseen alipaineimpaktoriin ELPIin, joka mittaa välillisesti hiukkasten aerodynaamista kokoa. Laite oli vuoteen 2004 saakka ainoa transienttia nanohiukkaskokojakaumaa mittaamaan kykenevä tekniikka. Pakokaasu laimennettiin pakoputkesta mittalaitteeseen huokoisen putken osavirtalaimentimella HPL (+ lisänä ejektori v. 2006). Kuvassa 12 on esitetty hiukkasten kokojakauma Braunschweig -ajokokeessa. Koska hiukkaslukumäärien erot eri kokoluokissa välillä Da 17 - 10000 nm hyvin suuret samoin erot eri ajoneuvotekniikoiden kesken, kuvan y-akseli on logaritminen.

Euro 5 SCR -ajoneuvon kiinteiden (nokimoodin) hiukkasten  $\geq$  Da 80 nm lukumäärä ei mittaustarkkuuden rajoissa eroa Euro 3 -perusdieselbussin hiukkasista. Myös virallisen punnitukseen perustuvan menetelmän mukaisesti määritetyt kokonaishiukkasmassatulokset ovat niin ikään samalla tasolla Euro 3 autojen kanssa. Niin koko kuin lukumääräkin ovat jokseenkin samat. Erot  $<$  80 nm:n hiukkaskoossa eivät ole vertailukelpoisia, koska ELPI -laskentaohjelmaa on muutettu kokeiden välillä; pienimpien hiukkasten koon alaraja on muuttunut

aiemmasta n. 8 nm:stä nykyiseen n. 17 nm:iin. Samoin alimman asteen laskenta hiukkaskokoluokassa 17 - 29 nm on tarkistettu, mikä vaikuttaa tämän kokoluokan hiukkaslukumääriä alentavasti. SCR -auton kohdalla hiukkasnäytteenotto pakoputkesta ELPIin poikkesi aiemmasta siten, että laimennin oli 2-vaiheinen sisältäen Dr 3 -ejektorin. Laimennussuhde oli samaa luokkaa kuin v. 2002 - 2004 kokeissa eli Dr 40 - 60. Maakaasubussien hiukaspäästö on kaikissa kokoluokissa 2 - 3 kertaluokkaa alempi kuin minkään, jälkikäsitteilylaitteintaan varustetun dieselbussin.

Perusdieselin ja hapetuskatalysaattorilla varustetun dieselin osalta näkyy selvä hiukkasten akkumulaatiomoodin piikki noin 100 nm:n kohdalla. Hapetuskatalysaattori vähensi hiukkasten lukumääriä pienimmissä kokoluokissa hieman.

Ainoastaan maakaasuautojen ja CRT -bussien hiukkasemissio ei sisällä ns. nokimoodia eli juurikaan kiinteitä hiukkasia, mikä näkyy hiukkaskokojakaumakuvaajien lähestulkoon lineaarisuutena log-log -asteikolla. SCR -katalysaattori onkin primäärisesti NO<sub>x</sub> -poistoon optimoitua jälkikäsitteilylaite, eikä PM -emissiosta päästyä tutkitulla SCR -ajoneuvolla eroon moottoriteknisin säädöin.



Kuva 12. Hiukkasten kokojakauma (lukumäärä).



### 3.3.5 Hiilivety- ja PAH –päästöt

Kaikkien analysoitujen NMHC -päästökomponenttien pitoisuudet olivat SCR-ajoneuvosta alle määrittäjärajan. Metaani CH<sub>4</sub> oli ainoa kaasukromatografisesti HC -kokoalueella C1 - C8 havaittava yhdiste; sen pitoisuus pakokaasussa oli 21 mg/km.

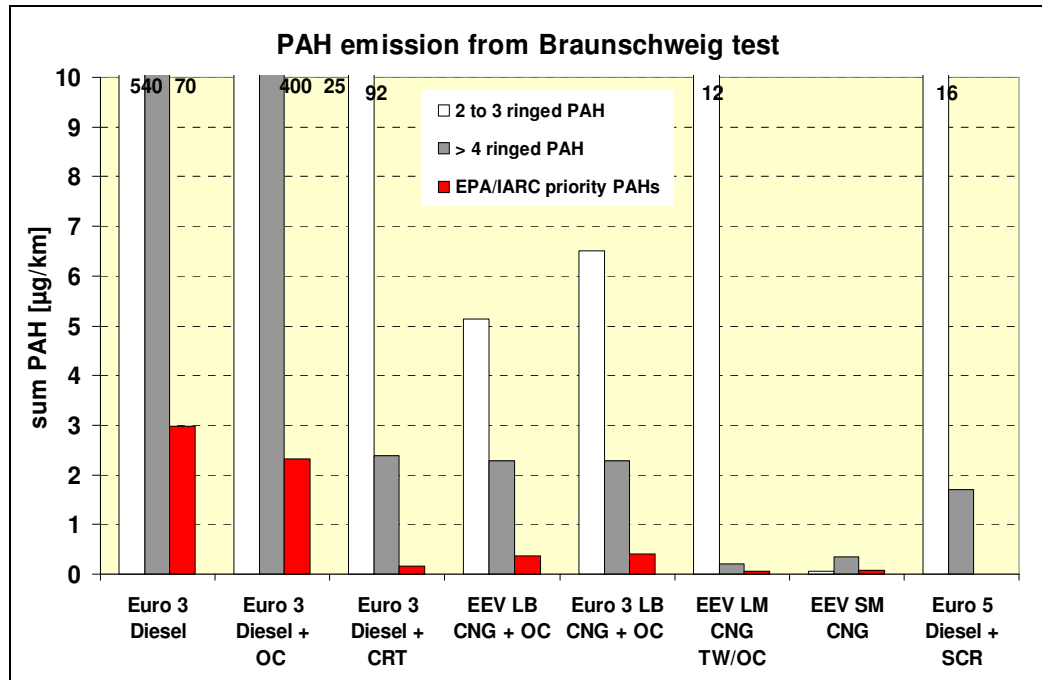
PAH –päästöjen, varsinkin keveimpien polttoaineperäisten yhdisteiden osalta muodostui kolme tasoa: korkeimmalla tasolla perusdiesel ja hapetuskatalysaattorilla varustettu diesel, alimmalla tasolla maakaasuauto ja sitten CRT –diesel näiden välimaastossa.

Dieselpolttoaineesta poiketen maakaasu (metaani) ei tuota PAH –yhdisteitä, ei keveitä eikä raskaita. Maakaasumoottorin pakokaasuista löytyvät PAH –yhdisteet ovat voiteluöljyperäisiä raskaita yhdisteitä. Raskaiden PAH –yhdisteiden päästöt ovat samaa tasoa CRT –suodattimella ja maakaasulla.

Kuvassa 13 ovat summat kooltaan ja vaikutustavaltaan erilaisten PAH –yhdisteiden päästömääristä (2 – 3 -aromaattirenkaiset,  $\geq 4$  -renkaiset, tunnetusti syöpävaaralliset yhdisteet). Viimeinen kategoria perustuu nykyään kahdeksaan kansainvälisen syöpätutkimusjärjestön IARC:n ja Yhdysvaltojen ympäristöviranomaisen EPA:n listaamaan syöpävaaralliseksi tiedettyyn tai epäiltyyn PAH –yhdisteeseen (priority PAH compounds):

- bents(a)antraseeni
- bentso(b)fluoranteeni
- bentso(k)fluoranteeni
- bentso(a)pyreeni
- dibentso(a,h)antraseeni
- indeno(1,2,3-cd)pyreeni
- kryseeni
- 7,12 -dimetyylibents(a)antraseeni (lis. v.2006)

Viimeistä yhdistettä on VTT:ssä analysoitu v. 2006 lähtien, ja se sisältyy liitteen 1 Mobile Source Air Toxics -luetteloon (MSAT, 2001 rulemaking US EPA probable human carcinogen). Vuonna 2006 analysoitujen PAH -yhdisteiden luettelosta puuttuu puolestaan 4 PAC -yhdistettä, mm. 3-metyylibifenyylä sekä bentso(a)fluoreeni. Mikään näistä ei kuitenkaan ole epäilty karsinogeeni, joten vaikutus näkyy enintään vähäisesti muiden PAH -yhdisteiden summissa.



Kuva 13. PM-päästön PAH-yhdisteiden summat.

Verrattuna vuoden 2004 raportin busseihin Euro 5 -päästötavoitteeseen pyrkivän SCR-bussin PAH-päästöt olivat karkeasti keskimäärin CNG-bussien tasolla sillä erotuksella, että SCR-bussin hiukkasista ei löytynyt lainkaan määritysrajan ylittäviä määriä karsinogeenisia tai mahdollisesti karsinogeenisiksi arvioituja PAH-yhdisteitä. Verraten stoikiometrisen maakaasubussin (EEV SM CNG) tuloksiin, SCR-auton 2-3- ja 4-renkaiset PAH-päästöt olivat kuitenkin selvästi suuremmat. 2-3-renkaisilla PAH-yhdisteillä on merkitystä enintään ilmakehäreaktiivisina yhdisteinä, jos sellaisenaakaan, koska pitoisuudet ovat hyvin pieniä kaasumaisten päästöjen otsoninmuodostajiin.

## 4 Johtopäätökset

Euro 2 ja 3 autojen tulokset olivat linjassa aikaisempien vuosien mittausten kanssa. Kaupunkibussien Braunschweig-ajosyklillä mitatut Euro 2 ja 3 autot tuottivat partikkeleita n. 0.11 – 0.38 g/km. Näistä sekä suurimmat että pienimmät lukemat saatiin Euro 3 autoista. Merkin A Euro 3 tuotti jopa enemmän partikkeleita kuin saman merkin Euro 2 auto.

Euro 3 -autoilla mitatut NO<sub>x</sub>-päästöt olivat keskimäärin n. 8.3 g/km, mikä on noin 25% matalampi kuin Euro 2 autojen 13 g/km taso.

Seuranta-autoista Euro 2 pysyi käytännössä muuttumattomana. Euro 3 dieselauton partikkelipäästöt ovat nousseet lähtötasoon verraten n. 25%. Korkeampi taso näkyi sekä vuoden 2004 että 2005 mittauksissa.

Euro 3 CNG:n osalta kokonaishiilivetyypäästöt ovat voimakkaassa kasvussa. Nyt mitattu lukema oli 4.6 g/km, kun se vuonna 2002 0.7 g/km, ero siis noin seitsemänkertainen. Korkea THC-lukema aiheutuu joko hapetuskatalysaattorin heikkenemisestä tai moottorin käyntiongelmista.

Uuden SCR-järjestelmällä varustetun Euro 5 -auton partikkelitulokset olivat samaa tasoa hyvien Euro 3 autojen kanssa. Tulos ei vastannut päästörajojen tiukentumisesta seuranneita odotuksia. PM-päästöjen Euro-rajat alenevat viidennekseen (0.16 --> 0.03) siirryttäessä Euro 3 --> Euro 4/5, mutta käytännössä tilanne oli toinen.

Uuden tekniikan tuoma päästöhyöty näkyi selvimmin NO<sub>x</sub>-päästöissä. SCR-auton NO<sub>x</sub>-päästöt olivat n. 2.3 g/km. CO -päästö oli huomattavan korkea.

Stoikiometrisella seoksella varustettu EEV-päästöluokiteltu maakaasuauto pärjasi päästötarkasteluissa kaikin puolin loistavasti. NO<sub>x</sub>-päästöt olivat alhaiset, 2.1 g/km. Partikkeleita ei käytännössä tullut (0.00 g/km).

Erikoismittauksissa käytiin SCR-auton päästöt läpi perusteellisemmin, ja yhteenvedona voidaan todeta että mitattujen sääntelemättömien komponenttien osalta uudella tekniikalla varustetun ajoneuvon tulokset olivat erittäin hyviä. Suora NO<sub>2</sub>-päästö oli lähes olematon, reagoimatonta ammoniakkaa ei tullut ulos merkittäviä määriä, PAH arvot olivat erittäin matalat, eikä liioin aldehydeissäkään jäänyt juuri toivomisen varaa. SCR-tekniikka ei kuitenkaan vaikuttanut hiukkaslukumäärää alentavasti.

## Viitteet

Nylund, Nils-Olof & Erkkilä, Kimmo. (2005). Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi. Yhteenvetoraportti 2002 -2004. Tutkimusselostus PRO3/P3018/05. VTT Prosessit, Espoo, huhtikuu 2005.

<http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/RAKEBUS.pdf>

Nylund, Nils-Olof, Erkkilä, Kimmo, Lappi, Maija & Ikonen, Markku. (2004). Transient Bus Emission Study: Comparison of Emissions from Diesel and natural Gas Buses. Research Report PRO3/P5150/04. VTT Processes, Espoo, October 2004.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTTNylund.pdf>

International Agency for Research on Cancer (IARC). (1989). Diesel and gasoline exhaust.

<http://193.51.164.11/htdocs/monographs/vol46/46-01.htm>

Altshuler, S. (2002). Nanoparticle emissions. Presentation to the joint IANGV/NGVC Technical Committee Meeting. Washington D.C., October 2002. In conjunction with NGV 2002.

Environmental Protection Agency (EPA). (2000). Control of Emissions of Hazardous Air Pollutants from Motor Vehicles and Motor Vehicle Fuels.

<http://www.epa.gov/otaq/regs/toxics/r00023.pdf>

Commission directive 2006/51/EC

<http://www.dft.gov.uk/consultations/closed/conemisrerrds/directive200651ecame ndingdir1219>

## LIITE 1

### ERI PÄÄSTÖKOMPONENTTIEN MERKITYS

Typen oksideja ( $\text{NO}_x$ ) ja hiukkasia (PM) pidetään haitallisimpina komponentteina taajamailman laadun kannalta. Hiilimonoksidi (CO) on vähemmän merkityksellinen, samaten kuin maakaasuautojen metaanipäästö. Dieselpakokaasujen hiilivetypitoisuus on yleensä varsin alhainen, mutta dieselpakokaasut saattavat sisältää haitallisia ja haisevia yhdisteitä.

#### **Hiilimonoksidi, CO**

Hiilimonoksidi eli häkä on suurina pitoisuuksina tappava myrkky, jota saattaa esiintyä hetkellisesti haitallisia määriä vilkkaasti liikennöidyillä väylillä tai parkkipaikoilla tuulettomina pakkasaamuina, kun suuria määriä moottoreita käynnistetään kylmänä. Häkäkaasun vaikutukset ovat välittömät, mutta häkäkaasusta ei aiheudu kumulatiivisia pitkäaikaisvaikutuksia.

Dieselmoottorin CO -tuotto on yleensä melko vähäinen, koska moottori toimii runsaalla ilmaylimäärällä. CO eli häkä on ongelmallinen päästökomponentti lähinnä vanhoissa bensiiniautoissa. Uudemmissa bensiiniautoissakin sitä syntyy heti kylmäkäynnistyksen jälkeen, mutta lämpimänä enää erittäin vähäisiä määriä. CO hapettuu ilmassa ennen pitkää  $\text{CO}_2$ :ksi, joten pysymättömyytensä takia se ei ole ilmakehän kokonaisuuden kannalta erityisen haitallinen.

Ennen 1990-lukua valmistetut (katalysaattorittomat) bensiiniautot tuottavat häkää huomattavia määriä myös lämpimänä. Häkää voi esiintyä erityisen vaarallisia määriä suljetuissa tiloissa, joissa käynnistetään bensiinimoottoreita. Katalysaattorilla varustettujen maakaasuautojen CO -päästö on alhainen, vastaten dieselmoottorien tasoa, olipa kyse sitten stoikiometriasta moottorista tai laihaseosmoottorista.

#### **Hiilivedyt, kokonaishiilivedyt, ei-metaani hiilivedyt: HC, THC, NMHC**

Dieselmoottorissa pakokaasut sisältävät polttoaineen palamatta jääneitä tai osittain palaneita komponentteja, jotka voivat polttoaineen heterogeenisuuden takia olla hyvinkin monenlaisia hiilivety-yhdisteitä. Lisäksi joissakin olosuhteissa voi palotapahtumassa muodostua yhdisteitä, joita ei sellaisenaan polttoaineista löydy. Niinpä erityyppisten hiilivetyjen kirjo, joita dieselmoottorin pakokaasuista voi esiintyä, on verrattain laaja.

Myös hiilivetyjen tapauksessa katalysaattorittomat bensiiniautot ovat pääasiallinen päästölähde, ja jollain alueilla myös kaksi- ja kolmipyöräiset kaksitahtimoottorilla varustetut kulkuvälineet ovat huomattavia hiilivetylähteitä.

Hiilivetyjen kokonaisvaikutus riippuu sekä laadusta että määrästä; hiilivetyjen ryhmään kuuluu useita syöpövaarallisia yhdisteitä. Eräät reaktiiviset hiilivedyt myötävaikuttavat alailmakehän otsonin ja savusumun muodostumiseen.

Yhdysvalloissa on jo pitempään tehty ero metaanin ja ei-metaanihiilivetyjen (NMHC) välillä, ja lainsäädäntö on pääasiassa rajoittanut NMHC -päästöjä (DieselNet.com 2004). Syy tähän

on se, että metaani ei ole myrkyllistä eikä reaktiivista. Metaani on kuitenkin voimakas kasvihuonekaasu, vaikutukseltaan noin 20 –kertainen CO<sub>2</sub>:een verrattuna.

Maakaasumootoreissa metaanin osuus kokonaishiilivedyistä (THC) on tyypillisesti yli 90 %, ja vain pieni osa on NMHC –hiilivetyjä. Tällä hetkellä eurooppalaiset raskaita ajoneuvomootoreita koskevat pakokaasumääräykset rajoittavat kokonaishiilivetyjä (THC) dieselmoottoreiden ja sekä metaania että NMHC –päästöjä maakaasumootorien osalta. (1999/96/EC)

## Typen oksidit, NO<sub>x</sub>

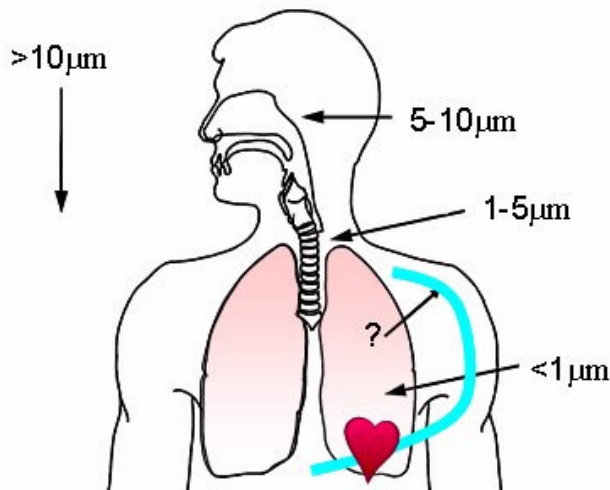
NO<sub>x</sub> tarkoittaa typpioksidin (NO) ja typpidioksidin (NO<sub>2</sub>) summaa. Pakokaasumääräykset rajoittavat nimen omaan NO<sub>x</sub> –summaa. Ulkoilmassa NO hapettuu vaihtelevilla nopeuksilla NO<sub>2</sub>:ksi. Nopeus riippuu meteorologisista tekijöistä, konsentraatiosta, otsonin ja hiilivetyjen määrästä sekä UV -säteilystä, ja sen on mainittu vaihtelevan muutamista minuuteista tunteihin. NO<sub>2</sub> on pistävän hajuista, ja se ärsyttää hengitysteitä sekä aiheuttaa keuhko-oireita pitkään jatkuessaan (yli 25 ppm pitoisuus 8 tunnin ajan). NO<sub>2</sub> aiheuttaa akuuttia ärsytystä hengitystiesairaille ja astmaatikoille. Niinpä nimen omaan NO<sub>2</sub>:ta käytetään ilman laadun mittarina, ja ilman laadun raja-arvot perustuvat NO<sub>2</sub>:een. Typen oksidit aiheuttavat lisäksi happamoitumista ja vesistöjen rehevöitymistä.

Perinteisen dieselmoottorin pakokaasuissa on pääasiassa NO:ta (NO:n osuus NO<sub>x</sub>:stä on yli 90 %). Tietty pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteet, esimerkiksi tehokkaat hapetusкатаlysaattorit ja CRT:n tapaiset katalysoidut hiukkassuodattimet lisäävät suoran NO<sub>2</sub>:n osuutta. Tämä on ei-toivottu ilmiö, joka saattaa antaa pakokaasuille hyvinkin pistävän hajun ja johtaa paikallisesti kohonneisiin NO<sub>2</sub> –pitoisuuksiin esim. katukuiluissa. Saksassa on todettu, että vaikkakin NO<sub>x</sub> –päästöt ovat alentuneet merkittävästi uusien pakokaasumääräysten myötä, kaupunki-ilman NO<sub>2</sub> –pitoisuus on pysynyt lähes vakiona. Syyksi tähän epäillään mm. pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteilla varustettujen dieselautojen yleistymistä.

## Hiukkaspäästöt, PM, ja hiukkasten PAH –yhdisteet

Ihmisen hengitystiet ja keuhkot ovat kohtuullisen hyvin suojassa karkeilta hiukkasilta, esim. maaperäiseltä pölyltä. Polttoprosessit yleisesti ja varsinkin polttomoottorissa tapahtuva palaminen saattavat synnyttää suuria määriä erittäin pienikokoisia hiukkasia. Ihmiskeholla ei ole suojamekanismia näitä nanohiukkasia vastaan, ja on epäilty että pienimmät hiukkaset saattavat kulkeutua vereen asti. *Kuva 1* esittää miten erikokoiset hiukkaset kulkeutuvat ihmiskehoon.

Hiukkasten terveysvaikutukset riippuvat mitä todennäköisimmin sekä hiukkasten koosta että hiukkasten kemiallisesta koostumuksesta. Pakokaasuhiukkaset jaotellaan eri kokoluokkiin, ja eri kokoluokkia edustavilla hiukkasilla on omat syntymekanisminsa ja ominaisuutensa. Niitä hiukkasia, joka muodostavat suurimman osan hiukkasmassasta ja jotka ovat helposti vangittavissa hiukkassuodattimen avulla, kutsutaan akkumulaatiomoodin hiukkasiksi. Nämä hiukkaset ovat halkaisijaltaan yli 30 - 50 nm, ja ne koostuvat pääasiassa epätäydellisen palamisen tuotteista, mm. noesta. Akkumulaatiomoodin hiukkaset toimivat kaikkein haitallisimmiksi epäiltyjen pakokaasukomponenttien, korkeamolekyylipainoisten PAC –yhdisteiden (hiilivedyt ja muut polyaromaattiset yhdisteet) kantajina.



Kuva 1. Hiukkasten kulkeutuminen ihmiskehoon. (Altshuler 2002).

Seitsemän yksittäistä PAH -yhdistettä (enimmillään kuusi rengasta) on luokiteltu syöpävaaralliseksi tai mahdollisesti syöpävaaralliseksi yhdysvaltalaisen Environmental Protection Agency:n (EPA) ja kansainvälisen syöpätutkimusjärjestön International Agency for Research on Cancer:in (IARC) toimesta (EPA 2000, IARC 1989). Pienempimolekyylipainoiset 2 – 3 renkaista PAH -yhdisteet, jotka esiintyvät lähinnä puolihaihtuvassa faasissa, on katsottu vähemmän myrkyllisiksi.

Lisäksi saattaa syntyä nitro-PAH -yhdisteitä (jotka ovat myös POM/PAC -yhdisteitä, esim. 1-nitropyreeni) itse palamistapahtumassa tai ilmakeemiallisten reaktioiden seurauksena. IARC on luokitellut useat nitro-PAH -yhdisteen mahdollisesti syöpävaaralliseksi (IARC 1989).

Kiinteille pakokaasuhiukkasille ja tietyin varauksin myös puolihaihtuville yhdisteille voidaan tehdä mutageenisuutta mittaavia kokeita, josta yksinkertaisin on Ames –bakteerikoe. Nitro-PAH -yhdisteet ovat suoraan vaikuttavia mutageeneja, ja ne reagoivat *Salmonella typhimurium* testisoluisissa ilman metabolista aktiivointia (TA98-S9). Metabolisen aktiivoinnin avulla (+S9) avulla saadaan tyypillisesti aikaan lisävastetta välillisesti vaikuttavista ei-substituoiduista PAH -yhdisteistä (Maron & Ames 1983). Ames -kokeen merkitys on viime vuosina huomattavasti vähentynyt ja sitä on alettu korvata vaativammilla mutta kuvaavammilla eläin- tai ihmisolukokeilla.

Pienimmät, alle 30 – 50 nm hiukkaset ovat enimmäkseen tiivistyneitä nestemäisiä ja haihtuvia voiteluaineperäisiä (tai rikkiperäisiä) yhdisteitä. Näitä kutsutaan nukleaatiomoodin hiukkasiksi. Uusissa vähäpäästöisissä moottoreissa nukleaatiomoodin hiukkaset edustavat yli 90 %:a hiukkasten kokonaislukumäärästä. Nämä hiukkaset muodostuvat poltto- ja voiteluaineperäisistä hiilivedyistä sekä rikin sulfaateista; lisänä voi olla pieniä määriä kiinteitä poltto- ja voiteluaineiden aineosasia kuten tuhkaa ja metalleja. Useimmat haihtuvat komponentit ovat läpikäyneet faasimuutoksen kaasusta nestemäiseksi aineeksi pakokaasujen jäähtyessä ja laimentuessa. Pienten hiukkasten muodostamien aerosolien terveysvaikutuksista ei ole täyttä varmuutta. Nämä pienimmät hiukkaset voivat kulkeutua hengitysjärjestelmän äärimmäisiin osiin keuhkorakkuloihin asti, ja voivat lisäksi osittain nestemäisen koostumuksensa takia liueta verenkiertoon ja muihin kehon nesteisiin.

Maakaasun taipumus PAH -yhdisteiden muodostamiseen palamisessa on vähäistä. Maakaasumoottoreiden pakokaasuista saattaa kuitenkin löytyä voiteluaineperäisiä PAH -yhdisteitä. Nykyiset raskaan kaluston kaasumoottorit ovat kaasuläpällä varustettuja

kipinäsytytysmoottoreita, ja kevyellä kuormalla imusarjassa vallitsee alipaine. Niinpä kaasumoottorit ovat arempia venttiilin ohjainten kautta tapahtuvalle öljyvuodolle kuin kuristamattomat dieselmoottorit. Tästä syystä kaasumoottorien rakenteessa tulisi huomioida öljynkulutuksen minimointi esim. tiivistämällä venttiiliohjaimet. Kaasumoottoreissa olisi mahdollisesti syytä käyttää aromaattivapaata moottoriöljyä.

## Muut komponentit

Sulfaateilla ja nitraateilla saattaa olla joitakin terveydellisiä haittavaikutuksia, varsinkin yhdessä muiden pakokaasukomponenttien kanssa. Nykytilanteessa poltto- ja voiteluaineiden rikkipitoisuutta on rajoitettu niin, että liikenteen pakokaasut eivät enää ole merkittävä hengitettävien sulfaattien lähde.

Minkä tahansa hiilivedyn, mukaan lukien metaani, epätäydellinen palaminen saattaa synnyttää aldehydejä. Yleensä metaanista muodostuva formaldehydi hallitsee. Form- ja asetaldehydi sekä akroleiini on luokiteltu haitallisiksi EPA:n Mobile Source Air Toxics -listalla (MSAT, *taulukko 1*). Dieselhiukkaset sinänsä on myös luettelossa luokiteltu terveydelle vaarallisiksi. *Taulukkoon 1* on myös merkitty seitsemän syöpävaarallisimmaksi luokiteltua polyaromaattista hiilivetyä PAH.

*Taulukko 1. EPA:n luettelo liikenneperäisistä terveydelle vaarallisista komponenteista. (EPA 2000)*

List of Mobile Source Air Toxics (MSATs)

Acetaldehyde <sup>4</sup>	Ethylbenzene	Naphthalene
Acrolein <sup>4</sup>	Formaldehyde <sup>4</sup>	Nickel Compounds <sup>1,4</sup>
Arsenic Compounds <sup>1,4</sup>	n-Hexane	POM <sup>3</sup>
Benzene <sup>4</sup>	Lead Compounds <sup>1,4</sup>	Styrene
1,3-Butadiene <sup>4</sup>	Manganese Compounds <sup>1,4</sup>	Toluene
Chromium Compounds <sup>1,4</sup>	Mercury Compounds <sup>4</sup>	Xylene
Dioxin/Furans <sup>2,4</sup>		
Diesel Particulate Matter & Diesel Exhaust Organic Gases	MTBE	

<sup>1</sup> Although the different metal compounds differ in their toxicity, the on-road mobile source inventory contains emissions estimates for total metal compounds (i.e., the sum of all forms).

<sup>2</sup> This entry refers to two large groups of chlorinated compounds. In assessing their cancer risks, their quantitative potencies are usually derived from that of the most toxic, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxin.

<sup>3</sup> Polycyclic Organic Matter includes organic compounds with more than one benzene ring, and which have a boiling point greater than or equal to 100 degrees centigrade. A group of seven polynuclear aromatic hydrocarbons, which have been identified by EPA as probable human carcinogens (benz(a)anthracene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, chrysene, 7,12-dimethylbenz(a)anthracene, and indeno(1,2,3-cd)pyrene) are sometimes used as surrogates for the larger group of POM compounds.

<sup>4</sup> Although the different metal compounds differ in their toxicity, the on-road mobile source inventory contains emissions estimates for total metal compounds (i.e., the sum of all forms).