



# BUSSIKALUSTON PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN EVALUOINTI: YHTEENVETORAPORTTI 2002 - 2004

Kirjoittajat: Nils-Olof Nylund & Kimmo Erkkilä

<b>Suorittajaorganisaatio ja osoite</b> VTT Prosessit, PL 1604 02044 VTT	<b>Tilaaja</b> YTV, HKL, LVM, Gasum Oy, Vägverket (Ruotsi), IANGV
<b>Hankkeen vastuhenkilö</b> Kimmo Erkkilä	<b>Tilaajan yhdyshenkilö</b>
<b>Hankkeen asiakirjanumero (VTT)</b>	<b>Tilaajan tilaus- tai viitenumero</b>
<b>Hankkeen nimi, lyhytnimi ja suoritettunus</b> Linja-autojen pakokaasupäästöjen päästöjen evaluointi; C3SU00127	<b>Selostuksen numero ja sivumäärä Päiväys</b> PRO3/P3018/05 49 s. + liitt. 5 25.4.2005

<b>Tutkimusselostuksen nimi ja kirjoittajat</b> BUSSIKALUSTON PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN EVALUOINTI: YHTEENVETORAPORTTI 2002 – 2004 Nils-Olof Nylund & Kimmo Erkkilä	
<b>Tiivistelmä</b> <p>Vuosina 2002 – 2004 VTT:llä mitattiin yhteensä 34 erilaista kaupunkibussia. Autot edustivat Euro 1 – EEV päästoluokkia. Kaikki mittaukset tehtiin VTT:n uudessa alustadynamometrissa. Mittausten tuloksena syntyy todenperäisiä ominaispäästöarvoja muodossa g/km.</p> <p>Säännellyissä päästöissä oli huomattavaa hajontaa Euro 1 dieselautojen ja EEV kaasuautojen muodostaessa ääripäät. NO<sub>x</sub> päästö vaihtelee 20 g - 2 g/km, joista jälkimmäinen arvo saavutetaan kehittyneimmillä kaasuautoilla. Hiukkasten osalta hajonta on vieläkin suurempaa lukuarvojen ollessa 0,6 – 0,003 g/km, ts. ero pienimmän ja suurimman arvon välillä on 200 –kertainen.</p> <p>Tutkimuksessa kiinnitettiin erityistä huomiota matalapäästöisten CRT -dieselautojen ja maakaasuautojen hiukkaspäästöihin. Pysyäkseen toimintakunnossa, CRT hiukkassuodatin vaatii huoltoa. Maakaasuautojen hiukkaspäästö sen sijaan oli erittäin alhainen ajokilometreistä riippumatta. Toisaalta vanhempien maakaasuautojen THC tai oikeammin metaanipäästöt olivat korkeat.</p> <p>Perusteellisessa diesel ja maakaasuautojen päästövertailussa mitattiin yhteensä seitsemän nykyaikaista autoa, kolme dieselautoa ja neljä maakaasuautoa. Mittausohjelmaan sisältyivät sekä säännellyt pakokaasupäästöt että suuri joukko pakokaasujen erikoismittauksia. CRT –tyyppinen hiukkassuodatin parantaa dieselautojen päästöprofiilia monella tavalla. Tästä huolimatta parhaimmat maakaasuautot ovat nykytekniikalla päästöjen osalta CRT dieselautoja parempia useimmissa suhteissa.</p>	
<b>Jakelu:</b>	<b>Julkisuus</b> Julkinen

<b>Hankkeen vastuhenkilö</b>  Kimmo Erkkilä Tutkimusinsinööri	<b>Tarkastus- ja hyväksymisallekirjoitukset</b>  Matti Kytö Ryhmäpäällikkö
--	---

## TIIVISTELMÄ

Vuosina 2002 – 2004 VTT:llä mitattiin yhteensä 34 erilaista kaupunkibussia. Autot edustivat Euro 1 – EEV päästöluokkia. Kansallisen bussihankkeen puitteissa autoista mitattiin säännellyt päästöt ja CO<sub>2</sub>. Rinnan kansallisen hankkeen kanssa toteutettiin perusteellinen uusimpien diesel- ja maakaasuautojen päästövertailu.

Kaikki mittaukset tehtiin VTT:n uudessa alustadynamometrissa. Mittausten tuloksena syntyy todenperäisiä ominaispäästöarvoja muodossa g/km. Mittausmenetelmän ansiosta tulokset heijastavat edustavia ajotapahtumia ja lisäksi myös koko ajoneuvon ominaisuuksia, ei pelkästään moottorin ominaisuuksia.

Säännellyissä päästöissä oli huomattavaa hajontaa Euro 1 dieselautojen ja EEV kaasuautojen muodostaessa ääripäät. NO<sub>x</sub> päästö vaihtelee 20 g - 2 g/km, joista jälkimmäinen arvo saavutetaan kehittyneimmillä kaasuautoilla. Hiukkasten osalta hajonta on vieläkin suurempaa lukuarvojen ollessa 0,6 – 0,003 g/km, ts. ero pienimmän ja suurimman arvon välillä on 200 –kertainen.

Lohdullista on, että todelliset päästöt näyttäisivät olevan laskusuunnassa kehittyvien Euro –luokkien myötä. Näin ollen Euro 2 autot antavat keskimäärin alemmat NO<sub>x</sub> ja hiukkaspäästöt kuin Euro 1 autot, Euro 3 autot alemmat kuin Euro 2 autot ja EEV autot lopuksi alemmat kuin Euro 3 autot. Dieselautojen osalta merkki- ja ajoneuvokohtaiset erot näyttäisivät pienentyvän moottoritekniikan kehittyessä. CO<sub>2</sub> päästöjen ja energian kulutuksen osalta vaihtelukerroin on suurempi kuin 1,5. Alhaisin CO<sub>2</sub> päästö saavutettiin uudella stoikiometrisella maakaasuautolla, suurin paljon ajettulla dieselautolla.

Tutkimuksessa kiinnitettiin erityistä huomiota matalapäästöisten CRT -dieselautojen ja maakaasuautojen hiukkaspäästöihin. Yhteensä mitattiin viisi CRT –suodattimella varustettua dieselautoa. Näistä vain kolme oli hyvässä tai kohtuullisessa kunnossa. Pysyäkseen toimintakunnossa, CRT hiukkassuodatin vaatii huoltoa. Maakaasuautojen hiukkaspäästö sen sijaan oli erittäin alhainen ajokilometreistä riippumatta. Toisaalta vanhempien maakaasuautojen THC tai oikeammin metaanipäästöt olivat korkeat. Metaani ei kuitenkaan ole myrkyllistä eikä reaktiivista, joten sen merkitys ilman laadun kannalta on hyvin pieni. Sen sijaan metaani on voimakas kasvihuonekaasu, ja tästä syystä metaanipäästöjä tulisi rajoittaa.

Dieselpolttoainelaadun vaikutuksia päästöihin tutkittiin yhdellä Euro 2 ja yhdellä Euro 3 dieselbussilla. Peruspolttoaineena oli kaupallinen, alle 50 ppm rikkiä sisältävä suomalainen dieselpolttoaine. Tutkittavana polttoaineena oli ruotsalainen, vähäaromaattinen ja lähes rikitön (S < 5 ppm) Miljöklass 1 (MK 1). MK 1 alensi NO<sub>x</sub> päästöjä noin 5 %, ja hiukkaspäästöjä peräti 15 – 25 %.



Perusteellisessa diesel ja maakaasuautojen päästövertailussa mitattiin yhteensä seitsemän nykyaikaista autoa, kolme dieselautoa ja neljä maakaasuautoa. Mittausohjelmaan sisältyivät sekä säännellyt pakokaasupäästöt että suuri joukko pakokaasujen erikoismittauksia. CRT -tyyppinen hiukkassuodatin parantaa dieselautojen päästöprofiilia monella tavalla. Tästä huolimatta parhaimmat maakaasuautot ovat nykytekniikalla päästöjen osalta CRT dieselautoja parempia useimmissa suhteissa.

## ALKUSANAT

Tarve bussien todenmukaisille päästökertoimille on suuri. Viime aikoina kansainvälisellä tasolla on esitetty hyvinkin ristiriitaisia arvioita eri bussitekniikoiden toimivuudesta. Keskustelun aiheita ovat olleet mm. puhtailla dieselpolttoainelaaduilla saavutettavat päästöhyödyt, dieselmoottorien pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteet ja erityyppisten maakaasubussien todelliset päästöt. Koska raskaiden ajoneuvomoottorien pakokaasusertifiointit tehdään moottoridynamometriin asennetulla irtomoottorilla, on yleensäkin puutetta hyvistä koko ajoneuvon suorituskykyä kuvaavista g/km – muotoisista päästökertoimista.

VTT:llä otettiin käyttöön uusi raskaiden ajoneuvojen pakokaasulaboratorio keväällä 2002. Laboratorion tärkein yksittäinen laite on raskas transienttityyppinen alustadynamometri. Vuosina 2002 – 2004 yksi toiminnan painopisteistä oli todenmukaisten päästökertoimien generointi kaupunkibusseille. Yli 200 testin ja 34 mitatun auton jälkeen VTT:llä on nyt vankkaa tietoa erilaisten bussien päästöistä.

VTT:llä tehdyt mittaukset osoittavat päästötrendin olevan selvässä laskusuunnassa tekniikan kehittymisen myötä. Bussikaluston päästöjä voitaisiin alentaa merkittävästi korvaamalla vanhimmat autot uusilla autoilla, joko vähäpäästöisillä diesel- tai maakaasubusseilla. VTT tulee jatkamaan busseihin kohdistuvaa mittaustoimintaa. Uusien Euro 4 ja Euro 5 pakokaasumääräysten myötä markkinoille tulee uusia ajoneuvoja ja uusia teknisiä ratkaisuja. Toivon mukaan uuden dieseltekniikan myötä autojen todelliset päästöt laskevat edelleen.

Käsillä oleva raportti on vuosien 2002 – 2004 mittaussarjan yhteenvetoraportti, josta on tehty myös englanninkielinen versio. Kansallisesta bussihankkeesta RAKEBUS on aikaisemmin laadittu kaksi vuosiraporttia, 2002 ja 2003. Rinnan kansallisen bussihankkeen kanssa toteutettiin perusteellinen uusimpien diesel- ja maakaasuautojen päästövertailu. Tämän vertailun tulokset julkaistiin lokakuussa 2004 englanninkielisessä erillisraportissa. Niinpä tässä yhteenvetoraportissa viitataan vain lyhyesti erillisen päästövertailun tuloksiin.

Bussiprojekteja rahoittivat seuraavat tahot:

- Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta YTV
- Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, Suunnitteluyksikkö
- Liikenne- ja viestintäministeriö
- Gasum Oy
- Vägverket (Ruotsi)
- The International Association for Natural Gas Vehicles (Uusi-Seelanti)
- VTT Prosessit

Tämän raportin laativat VTT Prosessien TkT Nils-Olof Nylund ja ins. Kimmo Erkkilä.

# SISÄLTÖ

<b>1</b>	<b>TAUSTA</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>RASKAIDEN AJONEUVOJEN PAKOKAASUTUTKIMUS VTT:LLÄ</b> .....	<b>9</b>
2.1	YLEISTÄ .....	9
2.2	MITTALAITTEET JA YLEISET MITTAUSMENETELMÄT .....	10
<b>3</b>	<b>BUSSIKALUSTON EVALUOINTI 2002 -2004</b> .....	<b>12</b>
3.1	YLEISTÄ .....	12
3.2	OSALLISTUJAT .....	14
3.3	KOEAUTOT .....	15
3.4	POLTTO- JA VOITELUAINHEET .....	16
3.5	TESTIMENETELMÄT.....	17
3.5.1	<i>Alustadynamometri</i> .....	17
3.5.2	<i>Pakokaasupäästöt</i> .....	18
<b>4</b>	<b>TULOKSET JA TULOSTEN ARVIOINTI</b> .....	<b>19</b>
4.1	YLEISTÄ .....	19
4.2	SÄÄNNELLYT PÄÄSTÖT JA HIILIDIOKSIDI .....	20
4.3	AJOMATKAN VAIKUTUS PÄÄSTÖTULOKSIIN.....	29
4.4	VÄHÄPÄÄSTÖISTEN AUTOJEN HIUKKASPÄÄSTÖT .....	32
4.5	AJONEUVON PAINON VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN .....	35
4.6	DIESELPOLTTOAINEEN LAADUN VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN .....	37
4.7	PAKOKAASUJEN ERIKOISMITTAUKSET .....	38
4.7.1	<i>Yleistä</i> .....	38
4.7.2	<i>NO and NO<sub>2</sub> -päästöt</i> .....	38
4.7.3	<i>Aldehydit</i> .....	39
4.7.4	<i>Hiukkasten koko ja lukumäärä</i> .....	39
4.7.5	<i>PAH päästöt</i> .....	40
4.7.6	<i>Erikoismittausten yhteenveto</i> .....	42
<b>5</b>	<b>YHTEENVETO</b> .....	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>TEKIJÖIDEN KIITOKSET</b> .....	<b>47</b>
	<b>VIITTEET</b> .....	<b>48</b>
	<b>LIITE 1</b> .....	<b>50</b>

# 1 TAUSTA

Luotettavista raskaiden ajoneuvojen ajomatkaan perustuvista päästö- ja polttoaineenkulutusarvoista on pulaa. Sen sijaan kevyen autokaluston osalta sekä päästö- että polttoaineenkulutuslukemia on helposti saatavilla. Tilanne johtuu periaatteellisista eroista pakokaasusertifiointissa.

Kevyen kaluston osalta sertifiointit tehdään autoilla alustadynamometrissa. Tuloksena saadaan matkapohjaisia päästö- ja polttoaineen kulutuslukemia muodossa g/km tai l/km. Testimenetelmä huomioi koko auton ominaisuudet, ts. moottorin ja voimansiirron suorituskyvyn, auton painon ja ajovastukset. Vaikkakin eurooppalainen henkilöautojen testisykli on keinotekoinen ja viivoittimen avulla luotu, se antaa kuitenkin kohtuullisen hyvän arvion eri autojen suorituskyvystä.

Raskaiden ajoneuvojen osalta pakokaasusertifiointi perustuu irtomoottoreilla moottoridynamometrissa tehtäviin mittauksiin. Eurooppalainen mittausmenetelmä on kuvattu Direktiivissä 1999/96/EC. Direktiivi sisältää mm. kuvauksen mittalaitteista ja kuormitusykleistä sekä raja-arvot eri päästökomponenteille. Mittausmenetelmä tuottaa ominaispäästöarvoja muodossa g/kWh moottorin kampiakselilla. Perustelu moottorikokeille ajoneuvokokeiden sijaan on se, että samaa moottoria saatetaan käyttää hyvinkin erilaisissa ajoneuvoissa, esim. busseissa, kuorma-autoissa ja jopa erikoisajoneuvoissa. Ajoneuvokokeiden vaatiminen kaikista vaihtoehdoista oli kohtuutonta. Toisaalta haittapuolena on se, ettei mittausmenetelmä missään muodossa huomioi itse ajoneuvon ominaisuuksia tai todellisia kuormitusolosuhteita.

Direktiivi 1999/96/EC määrittelee kaksi kuormitusyhtiä, ESC – vakiokuormatestin (European Steady Cycle) ja ETC –transienttitestin (European Transient Cycle). Lisäksi Direktiivi määrittelee ELR –kiihdytysavutestin (European Load Response Test). Taulukossa 1 on yhteenveto nykyisistä ja tulevista Euroopan ja Yhdysvaltojen pakokaasumääräyksistä. Ilmoitetut raja-arvot ovat tietyille testisyklille painotettuja keskimääräisiä ominaispäästöarvoja.

Yhdysvalloissa on jo vuosia ollut käytössä transienttityyppinen (=nopeasti muuttuva dynaaminen kuormitus) mittausmenetelmä. Vuonna 2000 voimaan tulleiden Euro 3 määräysten mukaan myös Eurooppaan saatiin transienttityyppinen pakokaasutestaus. Direktiivi 1999/96/EC edellyttää dynaamista ETC –testausta kehittyneellä pakokaasujen jälkikäsittelytekniikalla varustetuilta dieselmoottoreilta ja kaasumoottoreilta jo Euro 3 päästöluokasta alkaen. Vuodesta 2005 lähtien (Euro 4) kaikki moottorityypit on testattava myös dynaamisesti.

Direktiivissä 1999/96/EC on niinkään määritelty vapaaehtoinen päästöluokka, vähäpäästöinen EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle). Parhaimmat eurooppalaiset maakaasumoottorit on sertifioitu tähän luokkaan.

Yhdysvalloissa otetaan käyttöön jopa Eurooppaa ankarammat pakokaasupäästömääräykset. Uudet määräykset tulevat vaiheittain voimaan vuosina

2007 – 2010. Vuonna 2010 raja-arvot tulevat olemaan 0,20 g NO<sub>x</sub> ja 0,01 g PM/hvh (vastaten 0,27 g NO<sub>x</sub> ja 0,014 g PM/kWh).

Taulukko 1. Päästöjen raja-arvot tieliikenteessä. (1999/96/EC, DieselNet.com)

	CO (g/kWh)	THC (g/kWh)	NMHC (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	Part. PM (g/kWh)	Savutus (m <sup>-1</sup> )
ECE R49/ Euro 2	4,0	1,1	-	7,0	0,15	-
ESC/ELR						
A (2000)	2,1	0,66	-	5,0	0,10	0,8
B1 (2005)	1,5	0,46	-	3,5	0,02	0,5
B2 (2008)	1,5	0,46	-	2,0	0,02	0,5
C (EEV)	1,5	0,25	-	2,0	0,02	0,15
ETC						
A (2000)	5,45	1,6 <sup>*)</sup>	0,78	5,0	0,16	-
B1 (2005)	4,0	1,1 <sup>*)</sup>	0,55	3,5	0,03	-
B2 (2008)	4,0	1,1 <sup>*)</sup>	0,55	2,0	0,03	-
C (EEV)	3,0	0,65 <sup>*)</sup>	0,40	2,0	0,02	-
US 2010			0,19	0,27	0,014	

<sup>\*)</sup> CH<sub>4</sub> ainoastaan maakaasumoottoreille

(A= Euro 3, B1= Euro 4, B2= Euro 5, USA:ssa vaiheittain voimaan tulevat raja-arvot NO<sub>x</sub>:lle ja NMHC:lle, vuoden 2007 vaatimus NO<sub>x</sub>:lle on 1,6 g/kWh, 50 % myytävistä ajoneuvoista täytettävä 2010 vaatimukset vuosina 2007 - 2009, 100 % vuonna 2010, hiukkasille ei siirtymävaihetta, PM 0,014 g/kWh voimassa alkaen 2007)

On helppo mieltää, etteivät vakiokuormakokeet korreloi kovinkaan hyvin todellisten ajo-olosuhteiden kanssa, ei varsinkaan kaupungissa tapahtuvan ajon kanssa. Niinpä voidaan hyvinkin kyseenalaistaa, kuvaavatko ECE R49 tai ESC sertifiointitulokset raskaiden ajoneuvojen todellisia pakokaasupäästöjä. ETC transienttikokeen käyttöönotto Euroopassa on askel oikeaan suuntaan, varsinkin tavoiteltaessa todenperäisiä hiukaspäästöarvoja.

Tietyt kaupungit huomioivat autojen päästötason tariffien muodostuksessa. Mitä puhtaampi auto, sitä parempi korvaus liikennöitsijälle. Tällä hetkellä ei ole mitään muuta mahdollisuutta kuin perustaa bonusjärjestelmä virallisille sertifiointiarvoille tai – luokille. Edellä mainitusta syistä on kuitenkin selvää, ettei se että bussin moottori on Euro 3 sertifioitu yksiselitteisesti kuvaa auton todellisia päästöjä.

Menetelmänä irtomoottoreilla tehtävät moottorikokeet eivät sovellu lainkaan käytönaikaisten päästöjen seurantaan. Jos tavoitteena on esim. merkkikohtaisen päästöjen pysyvyyden seuranta tai tiettyjen ajoneuvoryhmien seuranta, moottorien irrottaminen ajoneuvoista pakokaasutestausta varten olisi äärimmäisen työlästä ja kallista.



Niinpä luonnollinen ratkaisu erilaisten kenttäkokeiden ja ajoneuvoryhmien seurantaan sekä todenperäisten päästökertoimien generointiin on autokokeet, joko instrumentoiduilla autoilla tien päällä (on-board measurements) tai ajamalla autoja alustadynamometrissa. Molemmissa vaihtoehdoissa itse ajoneuvon ominaisuudet ja todelliset ajo- ja kuormitusolosuhteet tulevat huomioitua. VTT:llä tehtiin päätös uuden raskaan alustadynamometrin sisältävän pakokaasulaboratorion rakentamisesta. Sisätiloissa tapahtuvalla mittaustoiminnalla on selvät etunsa maantiemittausiin verrattuna, varsinkin Suomen ilmasto-olosuhteissa.

## 2 RASKAIDEN AJONEUVOJEN PAKOKAASUTUTKIMUS VTT:LLÄ

### 2.1 YLEISTÄ

Vuonna 2000 VTT käynnisti raskaisiin ajoneuvoihin liittyvän RAKE – tutkimuskokonaisuuden (RAKE= Raskaan ajoneuvokaluston kehityshanke). Kokonaisuuteen sisältyi uuden raskaan ajoneuvokaluston tutkimuslaboratorion luominen vuosina 2000 – 2001, ja ensimmäisen vaiheen busseihin ja kuorma-autoihin liittyvä tutkimustoiminta vuosina 2002 – 2004. Toinen tutkimusvaihe (2005 ->) on nyt meneillään.

Tutkimuslaboratorion osalta alkuperäiseen vuoden 2000 RAKE -suunnitelmaan oli kirjattu mm. seuraavaa:

*Tavoitteena on aikaansaada nykyaikaiset, raskaan kaluston transienttimittaukset sekä moottoridynamometrissa että alustadynamometrilla mahdollistavat tutkimus- ja testauspalvelut. Uuden laboratorion varusteisiin kuuluu:*

- *raskas transienttityyppinen alustadynamometri*
- *transienttityyppinen moottoridynamometri*
- *molempia laitteistoja palveleva täyden virtauksen CVS –laitteistolla varustettu pakokaasumittausjärjestelmä*

Vuosina 2002 – 2004 toteutettiin useampi uusia laitteistoja hyödyntänyt projekti. Jakson aikana alustadynamometrissa tehtiin yli 1.000 testiä raskailla ajoneuvoilla. Toimintaan sisältyi mm.:

- bussikaluston päästökertoimet
- kuorma-autokaluston päästökertoimet
- raskaan ajoneuvokaluston polttoaineen kulutuksen vähentäminen
- biodieselpolttoaineiden kehitystyö
- pakokaasunpuhdistuslaitteistojen kehitystyö
- voiteluainetutkimus
- hiukkasmittausten menetelmäkehitys

Alustadynamometrimittaus tarjoaa monia etuja moottorimittauksiin verrattuna. Mitattaessa kokonaista ajoneuvoa irtomoottorin sijaan asennus- ja valmistelutyön määrä on huomattavasti pienempi. Tämän ansiosta läpimenoaika on selvästi lyhyempi, ja tutkittavien autoyksilöiden määrää voidaan nostaa. Näin myös raskaiden ajoneuvojen osalta avautuu mahdollisuuksia käytön aikaiseen pakokaasuvalvontaan ja erilaisten kenttäkokeiden helppoon seurantaan.

Alustadynamometrin ohjelmoinnissa huomioidaan koko ajoneuvon ominaisuudet, mukaan lukien auton massa ja ajovastukset. Mikä tahansa todellista ajoa kuvaava sykli voidaan melko helposti siirtää ajettavaksi alustadynamometrillä laboratorioolosuhteissa. VTT:n alustadynamometrin kohdalla on lisäksi mahdollista sisällyttää myös tien gradientti (kaltevuus) ajovastusten ohjelmointiin. Näin voidaan tuottaa todenmukaisia ajomatkaan suhteutettuja g/km –muotoisia päästökertoimia sekä bussietä kuorma-autokalustolle. Koska bussien osalta reitit ja aikataulut on kiinnitetty, on helppoa tehdä kokonaispäästölaskelmia ja reittikohtaisia laskelmia matkapohjaisten päästökertoimien perusteella.

Tien päällä tapahtuvaan mittaukseen verrattuna alustadynamometrimittaus tarjoaa paremmin kontrolloidut olosuhteet, voidaanhan alustadynamometrimittauksessa sään vaihtelun ja muun liikenteen aiheuttamat häiriöt eliminoida kokonaan. Lisäksi mittausasetelma jossa ajoneuvo on alustadynamometrillä ja jossa käytetään kiinteitä mittalaitteita tarjoaa paremmat mahdollisuudet hyvän mittaustarkkuuden saavuttamiseen. Myös monimutkaisen instrumentoinnin vaativat erikoispakokaasumittaukset mahdollistuvat alustadynamometrissa.

## 2.2 MITTALAITTEET JA YLEISET MITTAUSMENETELMÄT

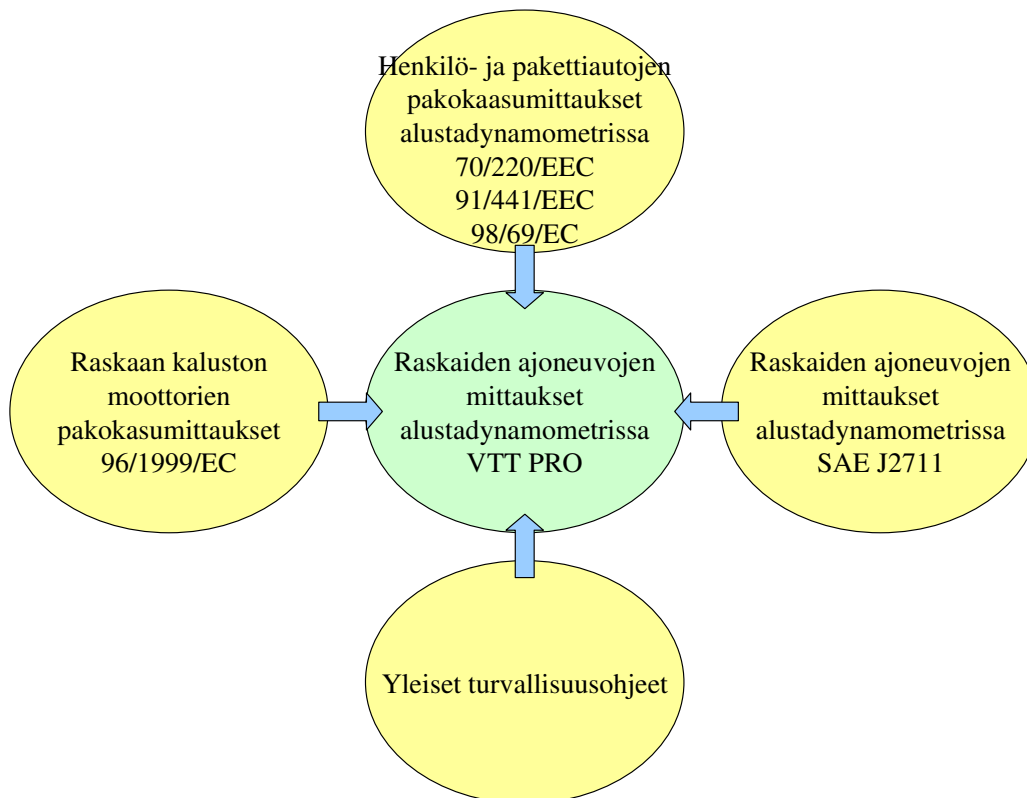
Uudessa tutkimuslaboratoriossa on alustadynamometrin, moottoridynamometrin ja täyden virtaaman CVS- emissiolaitteiston lisäksi monipuolinen laitteisto erikoispakokaasumittauksiin, mukaan lukien laitteistot hiukkasten yksityiskohtaiseen analysointiin. Laitteisto on kuvattu VTT:n verkkosivuilla osoitteessa: <http://www.vtt.fi/pro/pro3/pro31/indexe.htm>

Froude Consinen valmistaman alustadynamometrin telan halkaisija on 2,5 metriä, ja sen tehon vastaanottokyky (jatkuva) on 300 kW. Dynamometri on varustettu erittäin nopealla säätöjärjestelmällä ja sähköisellä inertian simuloinnilla mahdollistaen dynaamisen testauksen (transientitestauksen). Inertian simulointi on säädettävissä alueella 2.500 – 60.000 kg.

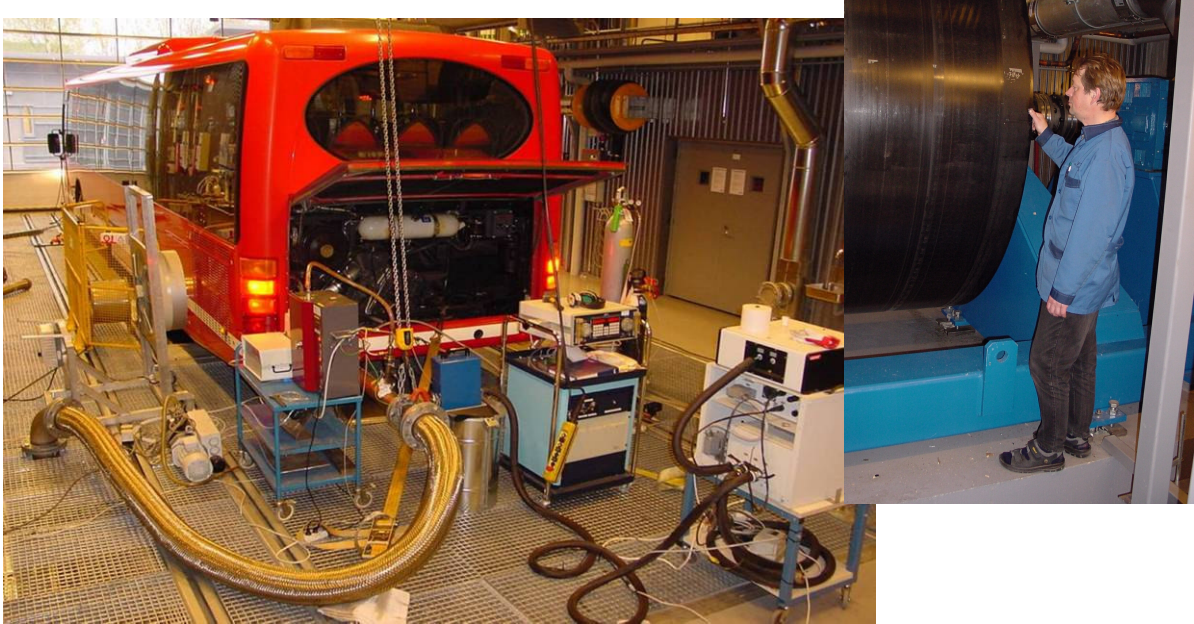
Säännellyt pakokaasukomponentit mitataan Direktiivin 1999/96/EC vaatimukset täyttävän täyden virtaaman CVS –laitteiston (Pierburg CVS-120-WT) ja analysaattorijärjestelmän (Pierburg AMA 4000) avulla. Koska mittaukset tehdään dynaamisia ajosyklejä käyttäen pakokaasumittaus tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin henkilöautojen alustadynamometrimittausten tai transienttityyppisten ETC – moottorimittausten osalta.

VTT:llä tunnistettiin tarve luoda raskaiden ajoneuvojen alustadynamometrimittauksiin hyväksytty mittaussuunnitelma. Niinpä VTT kehitti oman, olemassa oleviin elementteihin perustuvan mittaussuunnitelman. Näitä elementtejä ovat henkilö- ja pakettiautojen pakokaasumittaukset alustadynamometrissa (70/220/EC), transienttityyppinen ETC –pakokaasusertifiointi raskaille ajoneuvomoottoreille (1999/96/EC) ja amerikkalainen suositus ”Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-Duty Vehicles” (SAE J2711). VTT:n mittaussuunnitelman elementit on esitetty kuvassa 1.

Menetelmä kattaa sekä pakokaasumittaukset että polttoaineen kulutuksen mittaukset. Kesäkuussa 2003 Mittatekniikan Keskus MIKES myönsi VTT:n menetelmälle akkreditoinnin (T125, VTT:n oma mittaussuunnitelma, koodi MK02E). Kuva 2 esittää alustadynamometrissa tapahtuvaa bussin päästömittausta. Kuvassa on mukana pakokaasujen erikoismittauksiin liittyvää instrumentointia. Dynamometrin rullien mittasuhteet käyvät ilmi kuvaan upotetusta pikkukuvasta.



Kuva 1. VTT akkreditoitujen raskaiden ajoneuvojen alustadynamometrimittauksen elementit.



Kuva 2. Bussin pakokaasutesti alustadynamometrissa. Etualalla pakokaasumittauksen erikoisanalysointilaitteita (hiukkaskokojakauma, ei-säännellyt komponentit). Pikkukuvassa alustadynamometrin yksityiskohta.

### 3 BUSSIKALUSTON EVALUOINTI 2002 -2004

#### 3.1 YLEISTÄ

VTT:n RAKE –ohjelman puitteissa bussikaluston päästöt olivat yksi painopistealueista. Alkuperäinen tutkimussuunnitelma kuvasi bussiosuutta seuraavasti:

*”Bussihankkeessa perimmäisenä tavoitteena on edistää uusien puhtaiden ja energiatehokkaiden teknologioiden käyttöönottoa bussiliikenteessä ja siten edistää bussiliikenteen kilpailukykyä ja haluttavuutta. Osatehtävässä kehitetään bussiliikenteen käyttöön autojen suorituskykyä (päästöt, energiankulutus ja mahdollisesti myös melu) mittaava arviointijärjestelmä. Metodiikkaa tullaan käyttämään sekä uusien ajoneuvotekniikoiden evaluointiin että jo käytössä olevien autojen todellisen ympäristöllisen suorituskyvyn mittaamiseen. Tieto eri automallien ja pakokaasunpuhdistustekniikoiden todellisesta suorituskyvystä antaa pohjaa kehittää kilpailuttamisen kriteerejä oikeudenmukaiseen ja taloudellisesti järkevään suuntaan. Tietoa voidaan käyttää ohjailemaan tulevia kalustovalintoja.”*

Mittausmatriisi luotiin kattamaan kolme eri dimensiota:

- eri ajoneuvotekniikoiden vertailu

- uudet tai uudehkot autot, eri polttoaineet ja pakokaasujen jälkikäsittelytekniikat
- esimerkkeinä diesel, diesel + hiukkassuodatin, diesel + EGR, diesel + SCR, maakaasu
- käytössä olevien autojen todelliset päästöt ja ns. vanhenemiskertoimet eri tekniikka-vaihtoehdoille
- ajosyklien vaikutus päästöihin
  - staattiset ja dynaamiset ominaispäästökertoimet
  - päästöt erityyppisillä linjoilla
  - eri tekniikoiden reagointi erilaisiin ajotilanteisiin

Kaikkia alkuperäiseen tutkimussuunnitelmaan kirjattuja aiheita melua lukuun ottamatta on selvitetty tai tutkittu. Tosiasiassa busseja koskevaa tutkimusta tehtiin viidessä rinnakkaisessa hankkeessa:

1. Kansallinen bussihanke ”RAKEBUS” 2002 – 2004
2. Diesel- ja maakaasubussien päästövertailu ”VTT Transient Bus Study” 2002 – 2004
3. Raskaan ajoneuvokaluston energiankäytön tehostaminen ”HDEnergia” 2003 – 2005
4. Bussien syklivertailu ”Evaluation of Duty Cycles for Heavy-Duty Urban Vehicles” (IEA AMF Annex XXIX) 2004 – 2006
5. Raskaan ajoneuvokannan hiukkaspäästön koko ja morfologia ”HD-Hiuko” 2003 – 2005

Kansallinen bussihanke ”RAKEBUS” (1) on tuottanut kaksi vuosiraporttia, 2002 ja 2003. Jälkimmäisestä vuosiraportista ja nyt käsillä olevasta vuosien 2002 – 2004 yhteenvetoraportista on myös tehty englanninkieliset versiot.

Diesel- ja maakaasubussien päästövertailusta (2) tehtiin erillinen englanninkielinen raportti lokakuussa 2004. Tämä raportti on saatavissa VTT:n verkkosivuilta osoitteesta:

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

Tässä osahankkeessa tehtiin kattavat päästöanalyysit kolmesta dieselbussista ja neljästä maakaasubussista.

Raskaan ajoneuvokaluston energiansäästöön tähtäävästä hankkeesta (3) löytyy runsaasti tietoa Motiva Oy:n verkkosivuilta osoitteesta:

[www.motiva.fi/raskaskalusto](http://www.motiva.fi/raskaskalusto)

IEA –hankkeessa (4) verrataan erilaisia ajosyklejä toisiinsa ajamalla testejä eri tyyppisillä busseilla tavoitteena:

- karakterisoida eri ajosyklit ja määrittää niiden heijastumat pakokaasupäästöihin
- luoda ”koodiavain” mahdollistamaan eri sykleillä tuotetun emissiodatan vertailun

- tutkia ajoneuvon, pakokaasujen puhdistustekniikan ja polttoaineen vuorovaikutuksia erilaisissa kuormitusilanteissa eri testimenetelmiä käytettäessä
- osoittaa tarve testausmenetelmien kansainväliselle harmonisoinnille

IEA –hankkeen kuvaus on löydettävissä ositteesta:

<http://www.vtt.fi/virtual/amf/annex-xxix.html>

Raskaan kaluston hiukkashankkeessa (5) tavoitteena on lisätä raskaiden ajoneuvojen hiukkaspäästön tuntemusta puhtaan taajamailman saavuttamiseksi ja päästölainsäädännön kehittämisen tueksi. Uuden laboratorion laitteiden avulla pystytään tuottamaan raskaista dieselajoneuvoista todellisissa ajoa vastaavissa kuormitusilanteissa hiukkaspäästöön, hiukkaskokoon ja hiukkasten rakenteellisiin ominaisuuksiin liittyvää uutta tietoa.

Nyt käsillä oleva vuosien 2002 – 2004 yhteenvetoraportti summaa sekä RAKEBUS –hankkeen että diesel/maakaasuvertailun tulokset. Näissä hankkeissa tehtiin yli 200 pakokaasumittausta 34:lle eri bussiyksilölle. RAKEBUS –hankkeessa, joka keskittyi säännelyihin päästöihin, selvitettiin mm. eri Euro –luokkia, vuosimalleja ja ajokilometrimääriä edustavien autojen suorituskyky. Diesel/maakaasuvertailussa taas kaikki autot olivat uusia tai uudehkoja, huippukunnossa olevia autoyksilöitä. Tässä tapauksessa säännelyjen päästöjen lisäksi mitattiin myös ns. ei-säänneltyjä päästöjä ja lisäksi tehtiin syvällistä pakokaasuhiukkasten analysointia.

### 3.2 OSALLISTUJAT

RAKEBUS –hankkeen rahoittajia olivat:

- Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta YTV
- Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, Suunnitteluosasto
- Liikenne- ja viestintäministeriö
- Gasum Oy
- Vägverket (Ruotsi)
- VTT Prosessit

Projektin johtoryhmässä oli lisäksi mukana HKL Bussiliikenne (nyttämmin Helsingin Bussiliikenne Oy) edustamassa liikennöitsijöitä .

Pääkaupunkiseudulla YTV vastaa seutuliikenteen hankinnasta ja taas HKL Suunnitteluosasto Helsingin sisäisen liikenteen hankinnasta. Molemmilla tahoilla on käytössä tariffeihin heijastuva pisteytysjärjestelmä, joka huomioi autojen tekniset ominaisuudet, mukaan lukien autojen päästötason. Tästä syystä molempia kiinnostaa hyvinkin autojen todelliset pakokaasupäästöt.

VTT pyysi Ruotsin Vägverket'ia (Tiehallinto) mukaan hankkeeseen, ja Vägverket päättikin rahoittaa hanketta vuonna 2004. Bussikalusto Suomessa ja Ruotsissa on hyvin

pitkälle yhteneväistä, ja niinpä VTT:n generoimat päästötulokset ovat käyttökelpoisia myös Ruotsissa.

Myös kansainvälinen maakaasuajoneuvojärjestö International Association for Natural Gas Vehicles IANGV liittyi mukaan VTT:n bussitutkimukseen. Alun perin oli tarkoitus, että RAKEBUS –hanke kattaisi joitakin maakaasuautoja, ensisijaisesti autoja vuosilta 1996 – 2002. IANGV:n lisärahoitus mahdollisti kolmen uuden maakaasuauton liittämisen mukaan testiohjelmaan. Nämä kolme autoa edustivat parasta mahdollista maakaasutekniikkaa, ja ne oli kaikki sertifioitu vaativimpaan eurooppalaiseen EEV -päästöluokkaan (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle). Lisäksi IANGV:n mukanaolo mahdollisti myös tiettyjen dieselautojen yksityiskohtaiset pakokaasuanalyysit. Näin saatiin luotua hyvä pohja diesel ja kaasuautojen tasapuoliselle vertailulle.

### 3.3 KOEAUTOT

RAKEBUS –hankkeeseen ja diesel/maakaasuvertailuun liittyen VTT teki yhteensä yli 200 pakokaasutestiä 34:lle eri autoyksilölle (taulukko 2). Näistä kolme autoa, kaksi dieselautoa ja yksi maakaasuauto, oli mukana seurantaohjelmassa päästöjen pysyvyyden selvittämiseksi. Nämä autot mitattiin kolme eri kertaa.

Mitattujen autojen päästöluokat vaihtelivat Euro 1 –luokasta EEV –luokkaan. Vuonna 2004 Euro 4 sertifioituja autoja (diesel) ei ollut vielä saatavilla. Maakaasuautot edustivat Euro 2 (epävirallinen), Euro 3 ja EEV –päästöluokkia.

*Taulukko 2. Vuosina 2002 – 2004 mitatut bussit.*

	2002	2003	2004	Yhteensä
Diesel	7	10	9	26
Maakaasu	4	3	1	8
Yhteensä	11	13	10	34
Diesel – seuranta	(2)	2	2	2
Maakaasu – seuranta	(1)	1	1	1

Diesel/maakaasuvertailussa oli mukana seuraavat autot (uusia tai vähän ajettuja autoja):

- Euro 3 diesel ilman pakokaasujen jälkikäsitteilyä
- Euro 3 diesel + hapetuskatalysaattori (OC)
- Euro 3 diesel + hiukkassuodatin (CRT)
- Euro 3 CNG (maakaasu)
- EEV CNG (kolme eri merkkiä ja -palamisjärjestelmää)
  - laihaseos eli lean-burn (LB, hapetuskatalysaattorilla)
  - lean-mix eli sekajärjestelmä (LM, kolmitoimikatalysaattorilla)
  - stoikiometrinen (SM, kolmitoimikatalysaattorilla)

Dieselaivot olivat samaa merkkiä ja mallia, eroja oli ainoastaan pakokaasujen jälkikäsitteilytekniikassa. Autot oli varustettu pakokaasujen jälkikäsitteilytekniikalla auton valmistajan toimesta (ns. OEM –varusteita).

Suurimmassa osassa perusmatriisiin Euro 2 ja Euro 3 dieselaivoista oli niinkään hapetuskatalysaattori (tietyin poikkeuksin). Katalysaattorit on normaalisti integroitu äänenvaimentimeen, eikä katalysaattorin olemassa oloa voi nähdä ulkopuolelta. Koska autojen teknisessä dokumentoinnissa esiintyy silloin tällöin puutteita, oli mahdotonta selvittää ehdottoman luotettavasti selvittää, missä autoissa oli katalysaattori, missä ei. Niinpä näitä autoja on käsitelty yhtenä ryhmänä. Toisaalta taas CRT –suodattimen olemassa olo on helppo varmistaa.

Autojen ajokilometrimäärä vaihteli 4.800 ja 847.000 km:n välillä. Koeautot lainattiin joko liikennöitsijöiltä, maahantuojilta tai autonvalmistajilta. Autoille ei tehty erityisiä huolto- tai säätötoimenpiteitä ennen mittauksia. Eri osapuolien kanssa sovittiin, ettei mitattuja autoja identifioida merkin tai mallin osalta. Niinpä julkisessa raportoinnissa autoista on käytetty kirjainkoodeja (A, B C jne.).

Diesel/maakaasuvertailun erillisraporttiin sisältyy mitattujen autojen teknisiä tietoja. Tämän yhteenvetoraportin kannalta ei katsottu tarkoituksenmukaisesti luetella 34:n eri autoyksilön tekniset tiedot. Tulosten tarkastelu perustuu pääasiassa eri sertifiointiluokkiin (Euro 1, Euro 2, Euro 3 ja EEV), mutta eräiltä osin on tehty myös merkkikohtaisia tarkasteluita.

### 3.4 POLTTO- JA VOITELUAINHEET

RAKEBUS –ohjelmat autot testattiin autojen säiliöissä olleella kauppalaatuisella polttoaineella. Näin ollen polttoaineen laadusta ei ole tarkkaa tietoa, mutta voidaan olettaa, että polttoaineen rikkipitoisuus oli selvästi alle 50 ppm.

Diesel/maakaasuvertailun dieselaivoissa käytettiin samaa polttoaine-erää, Direktiivin 2003/17/EC:n mukaista vuoden 2005 polttoainespesifikaatiota vastaavaa polttoainetta. Polttoaineesta tehtiin rikkianalyysi, ja rikkipitoisuus oli 23 ppm.

Ruotsin Vägverket'in pyynnöstä kaksi dieselaivoa mitattiin myös ruotsalaisella Miljöklass 1 (MK 1) polttoaineella. MK 1:n tiheys on alhainen perinteisiin diesellaatuihin verrattuna, se on käytännössä aromaattivapaata, ja sen rikkipitoisuus on alle 5 ppm.

Suomessa käytettävä maakaasu on peräisin Siperiasta, ja tämän korkealaatuisen kaasun metaanipitoisuus on yli 98 %. Gasum Oy ilmoittaa kaasulle seuraavanlaisen spesifikaation:

- metaani > 98 % (vol.)
- etaani < 1 %
- propaani ja muut raskaammat hiilivedyt < 0.5 %
- typpi < 1 %



Ajoneuvokäytössä kaasuun ei lisätä rikkipitoisia hajusteita, ja itse kaasun rikkipitoisuuden on arveltu olevan alle 5 ppm (massapohjalta).

## 3.5 TESTIMENETELMÄT

### 3.5.1 Alustadynamometri

Kaikki mittaukset tehtiin VTT Prosessien uudessa raskaan ajoneuvokaluston tutkimuslaboratoriossa. Muiden projektien yhteydessä VTT on tehnyt eri tyyppisille autoille ns. rullauskokeita (coast-down) ajovastusyhtälöiden määrittämiseksi. Näitä yhtälöitä käytettiin nyt hyväksi ajovastusten asettelussa (mm. ajoneuvon massan vaikutus). Dynamometrin säätöjärjestelmä mahdollistaa käytännössä minkä tahansa ajoneuvon ajovastusten simuloinnin. Koematriisiin kuului sekä kaksi- että kolmiakselisia busseja, ja lisäksi vielä yksi nivelauto. Pääosa autoista oli kuitenkin tavallisia kaksiakselisia kaupunkibusseja.

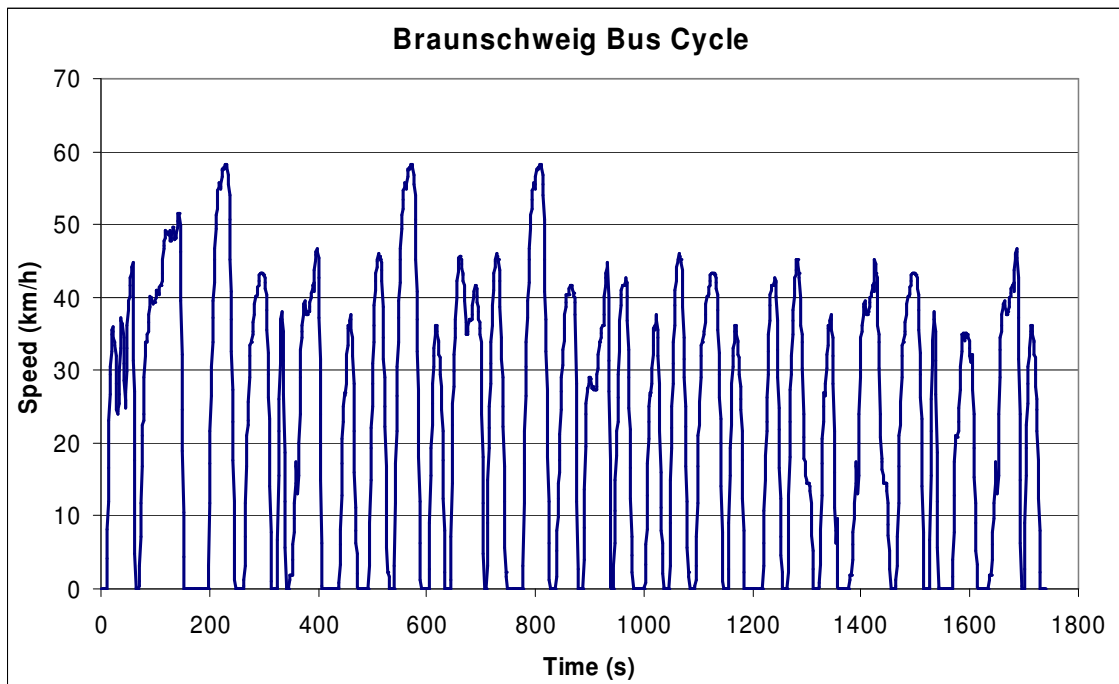
Lähtökohtaisesti kaikki ajoneuvot mitattiin simuloimalla auton omaa painoa lisättynä 50 %:lla auton kantavuudesta (puolikuorma). Kaksiakselisten autojen osalta menettely on yksiselitteinen. Jotkut kolmiakseliset autot mitattiin sekä kaksi- että kolmiakselisen auton painoja simuloiden. Koematriisiin sisältynyt ainoa nivelauto mitattiin niin ikään kaksi- ja kolmiakselista autoa simuloiden

Diesel/maakaasuvertailussa käytettiin kaksiakselisten autojen painoja. Koskapa maakaasuautot ovat hieman dieselautoja raskaampia, tämä otettiin huomioon säätöparametreja aseteltaessa.

Alustadynamometrikokeen aikana kuljettaja seuraa annettua nopeus/aikaprofiilia, eli ajosykliä. Kaikki autot ajettiin vähintään Braunschweig –bussisyklillä. Tämä keskusta-ajoa kuvaava hyvin transienttinen sykli on melko raskas. Osa ajoneuvoista testattiin myös muita syklejä käyttäen (mm. amerikkalainen Orange County, ECE 15 henkilöautosyklin kaupunkiosuus jne.). Taulukossa 3 on esitetty tärkeimpien syklien tiedot, ja kuvassa 3 on Braunschweig –syklin nopeuskuvaaja ajan funktiona. VTT on todennut, että Braunschweig –sykli vastaa kohtuullisen hyvin ajoa Helsingin ydinkeskustassa. Diesel/kaasuautovertailussa käytettiin sekä Braunschweig- sykliä että Orange County –sykliä. Loppujen lopuksi testisykli vaikuttaa suhteellisen vähän kilometripohjaisiin päästöarvoihin. Syklin vaikutus polttoaineen kulutukseen sen sijaan on selvempi.

Taulukko 3. Ajosykliä tiedot.

	Pituus (km)	Kesto (s)	Keskinopeus (km/h)	Maksimi-nopeus (km/h)	Joutokäynnin osuus (%)
Braunschweig (BSC)	10.873	1740	22.5	58.2	25
Orange County (OCC)	10.526	1909	19.9	65.4	21
ECE 15	3.976	780	18.4	50	25



Kuva 3. Braunschweig bussisyklin (BSC) nopeuskuvaaja ajan funktiona.

### 3.5.2 Pakokaasupäästöt

Kaikista autoista mitattiin säännellyt päästöt (CO, THC, NO<sub>x</sub>, PM) käyttämällä täyden virtaaman CVS- järjestelmää (Pierburg CVS-120-WT) ja siihen liitettyä analysaattorijärjestelmää (Pierburg AMA 4000). Laitteistot täyttävät Direktiivin 1999/96/EC vaatimukset raskaiden ajoneuvomoottorien pakokaasumittauksissa käytettävistä mittalaitteista. Alustadynamometrimittausten osalta päästöarvot suhteutettiin ajomatkkaan, eli päästökertoimen ovat muodossa g/km.

Diesel/maakaasuautovertailun autoille (7 autoa) tehtiin lisäksi koko joukko erikoismittauksia. Näitä mittauksia olivat mm.:

Kaasufaasi:

- hiilivetyerittely aina C<sub>8</sub> hiilivetyihin asti (GC)
- aldehydit (DNPH näytteenotto, HPLC)

- anionit (kapillaarielektroforeesi)
- typpiyhdisteet (FTIR)

Puolihaihtuva faasi:

- PAH yhdisteet (keräys polyuretaanivaahtoon, GC-MS (SIM))

Hiukkasfaasi:

- hiukkasten lukumääräjakauma
- PAH yhdisteet (keräys suodattimille, GC-MS (SIM))
- hiukkasmassan mutageenisuus Ames -mutageenisuustestillä (*Salmonella* bakterikannat TA98 –S9 ja +S9)

Nyt käsillä oleva raportti ei paneudu erikoismittausten yksityiskohtiin. Lisätietoa erikoismittauksista on löydettävissä diesel/maakaasuautovertailun erillisraportista osoitteesta:

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

## 4 TULOKSET JA TULOSTEN ARVIOINTI

### 4.1 YLEISTÄ

Suurimmasta osasta autoja mitattiin pelkästään säännellyt pakokaasupäästöt. Niinpä tämä raportti keskittyy ensisijaisesti säännelyihin päästöihin. Diesel/maakaasuautovertailun erillisraportti sisältää yksityiskohtaista tietoa mittauksista ei-säänneltyjen päästöjen ja tarkempien hiukkasanalyysien osalta. Näitä asioita ei toisteta tässä raportissa. Tosin tähänkin raporttiin on otettu tiettyjä tuloserimerkkejä erikoismittaustenkin osalta.

Erillisraportti sisältää tiivistelmän eri pakokaasukomponenttien haittavaikutuksista. Tämä kuvaus on liitteenä tämän raportin lopussa.

Tulosten esittely tapahtuu seuraavassa järjestyksessä:

- säännellyt päästöt ja CO<sub>2</sub>
- ajomatkan vaikutus Euro 2 ja Euro 3 dieselautojen päästöihin
- CRT –dieselautojen ja maakaasuautojen hiukkaspäästöt
- ajoneuvon painon vaikutus päästöihin (kaksiakselinen/kolmiakselinen auto)
- dieselpolttoainelaadun vaikutus päästöihin
- tulosesimerkkejä diesel/maakaasuautovertailun erikoismittauksista

## 4.2 SÄÄNNELLYT PÄÄSTÖT JA HIILIDIOKSIDI

Kuvissa 4 – 7 on kaikkien vuosina 2002 – 2004 mitattujen bussien CO, THC, NO<sub>x</sub> ja PM päästöt (g/km, Braunschweig -sykli). Taajamailman laadun kannalta haitallisimmat päästökomponentit ovat NO<sub>x</sub> (erityisesti NO<sub>2</sub>) ja hiukkaset, CO ja THC ovat vähemmän merkityksellisiä (katso Liite 1).

Auto on ryhmitelty seuraavasti:

- Euro 1 diesel (vain kaksi autoa)
- Euro 2 diesel
- Euro 3 diesel
- CRT –suodattimella varustetut Euro 2 ja Euro 3 dieselautot
- Euro 2 ja Euro 3 maakaasu
- Euro 5/EEV maakaasu

Kuviin on sisällytetty autojen tietoihin liittyviä alaviitteitä. Merkintää ”n” on käytetty rinnakkaisten autoyksilöiden määrästä. Tietyt valmistajat tarjoavat useampia mallivaihtoehtoja, jotka saattavat poiketa toisistaan esim. moottorin koon osalta. Rinnakkaisista mallivaihtoehtoista on käytetty merkintöjä ”mod.1” tai ”mod.2”. CRT –suodattimella varustettujen dieselautojen kohdalla tuloksissa esiintyy merkittävää hajontaa. Niinpä tässä tapauksessa eri autoyksilöt on identifioitu (”ind.1”, ”ind.2”). Edellä esitetyn seurauksena kuvissa on sekä ajoneuvoyksilökohtaisia, automallikohtaisia että autoryhmäkohtaisia tuloksia.

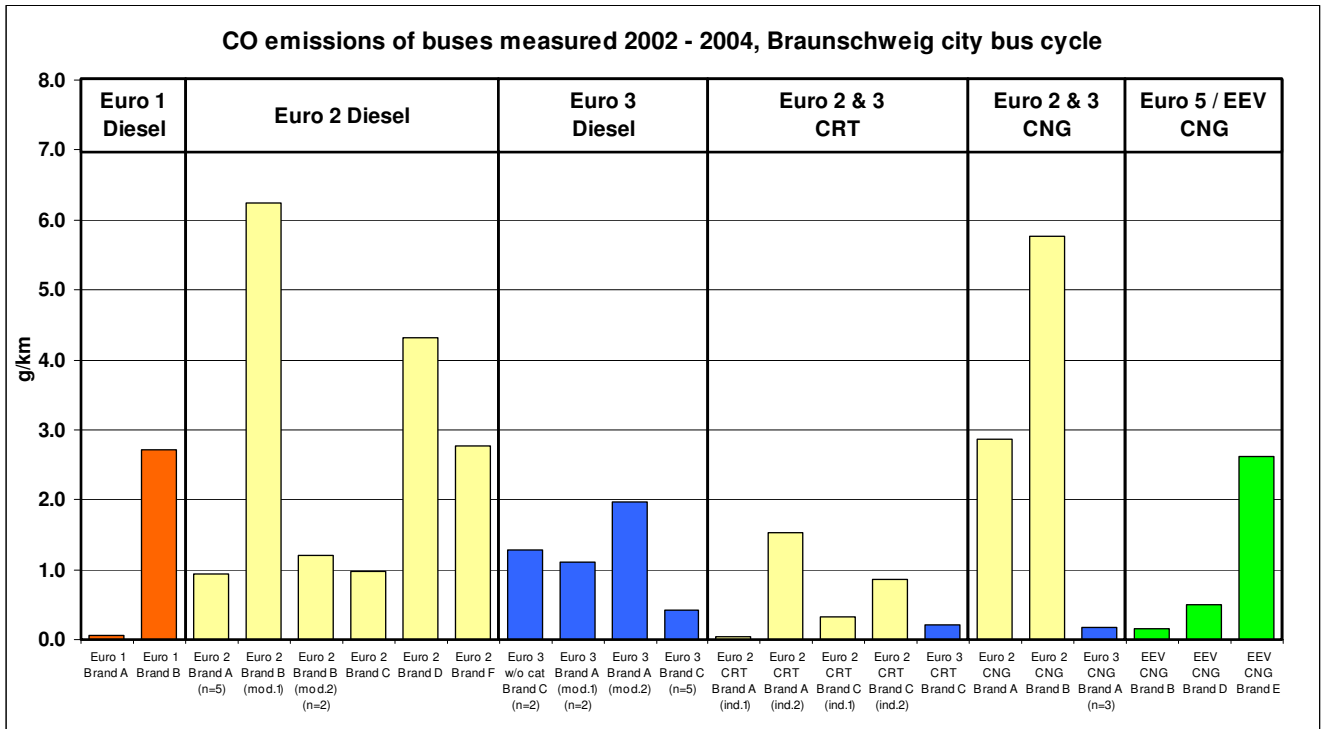
Keskimääräinen CO –päästö on noin 1,5 g/km (kuva 4). Suurimmat arvot löytyvät Euro 2 autojen joukosta, niin diesel kuin kaasuautojenkin osalta. Dieselautojen osalta THC -arvo on keskimäärin alle 0,5 g/km (kuva 5). Hyvässä kunnossa olevien maakaasuautojen osalta THC -arvo on luokka 1 g/km. Vanhemmissa kaasuautoissa THC -arvo saattaa kohota jopa kymmenkertaiseksi katalysaattorien heikon toiminnan vuoksi. THC kohoaa iän myötä erityisesti laihaseostekniikka käyttävissä autoissa. Tässä on kuitenkin muistettava, että maakaasuauton THC –päästö on yli 95 %:sesti metaania, joka ei ole myrkyllistä eikä reaktiivista. Metaani on kuitenkin voimakas kasvihuonekaasu, ja sen osuus tulisi ottaa huomioon arvioitaessa kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjä. Bussikaluston kohdalla sekä CO:n että THC:n merkitys on vähäinen.

NO<sub>x</sub> –päästö vaihteluväli on 20 - 2 g/km (Euro 1 ja Euro 2 dieselautot - EEV sertifioidut maakaasuauto, kuva 6). Dieselautojen osalta päästöluokkien sisäinen hajonta on suurempi Euro 2 kuin Euro 3 –luokassa. Euro 3 –autoissa käytettävät sähköiset säätöjärjestelmät toimivat tarkemmin ja antavat ylipäätensä paremman suorituskyvyn kuin vanhemmat täysin mekaaniset säätöjärjestelmät.

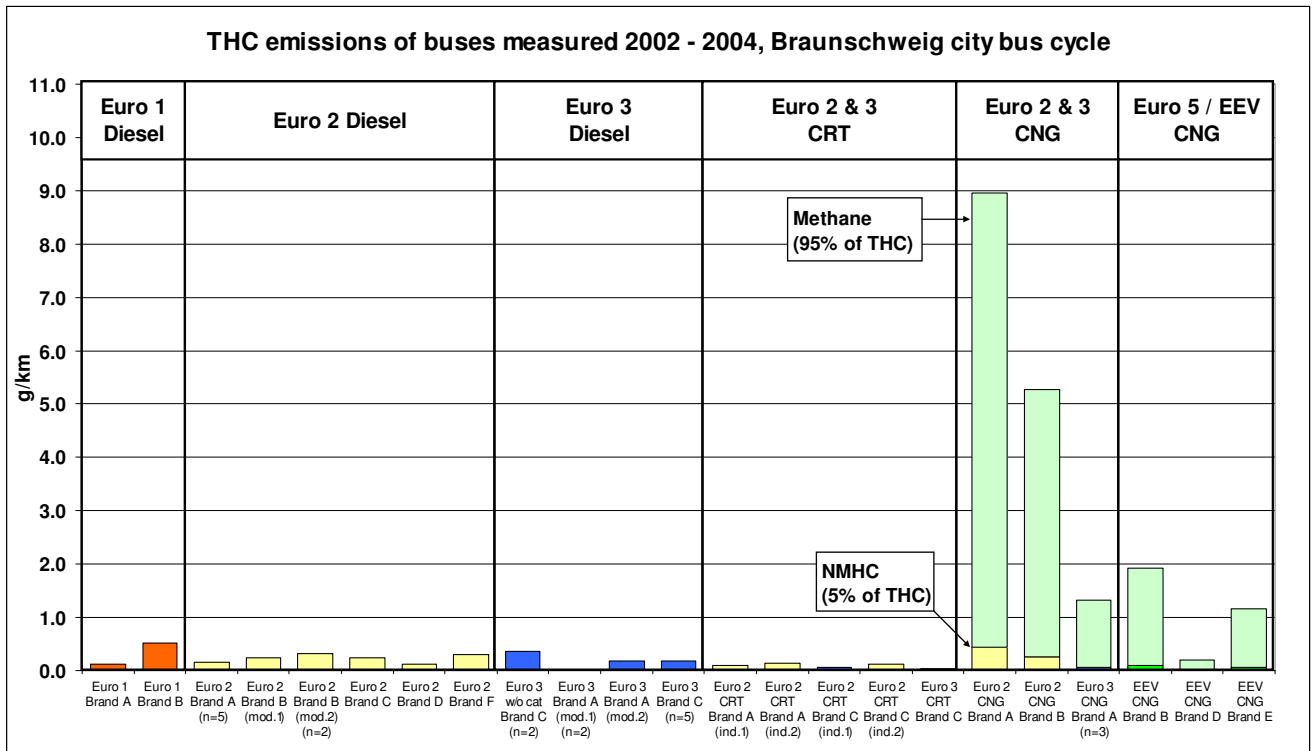
Hajonta on kuitenkin suurimmillaan hiukkaspäästöissä (kuva 7). Hiukkasmassa on suurimmillaan 0,6 g/km (Euro 1 diesel), ja pienimmillään käytännössä lähes nolla (parhaimmat maakaasuautot). Hiukkasten osalta kaikki maakaasuautot ikään ja tekniikkaan katsomatta antavat hyviä tuloksia, samaten kuin kunnossa olevat CRT –suodattimet.

Kuvissa 8 (NO<sub>x</sub>) ja 9 (hiukkaset) on yhteenvedot päästötrendeistä. Sekä NO<sub>x</sub>:n että PM:n osalta päästöt ovat selvässä laskusuunnassa kiristyvien Euro -luokkien myötä, joskin tietyt bussityypit poikkeavat tästä yleisestä trendistä.

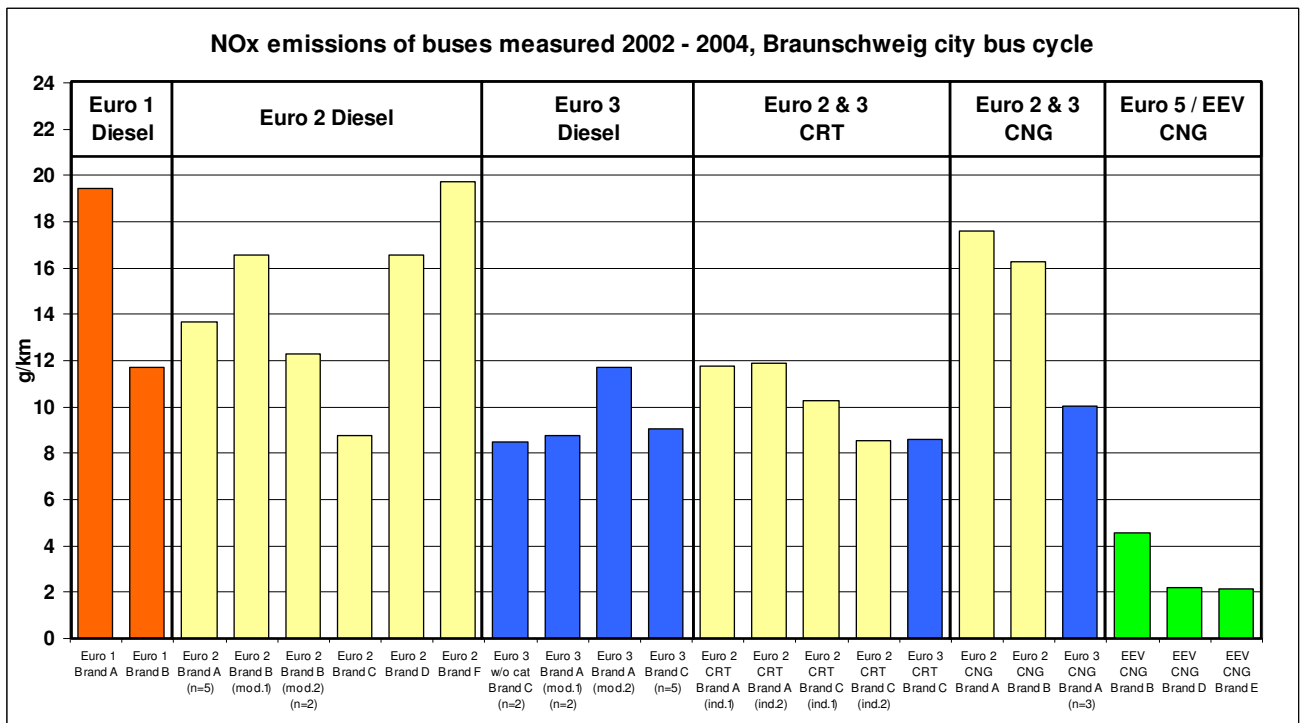
Keskimäärin kaksiakselisen kaupunkibussin moottori tekee n. 1,8 kWh työtä kampiakselilla kilometriä kohti. Kuvissa näkyvät pylväät ovat eri Euro -luokkien raja-arvoja, jotka on saatu siten, että g/kWh muotoa olevat päästöraajat on kerrottu kertoimella 1,8 g/km muotoisten raja-arvojen muodostamiseksi. Näin voidaan verrata mitattuja g/km muotoisia arvoja raja-arvoihin (likimääräisiin). Euro 3 dieselautojen osalta nähdään, että keskimääräinen mitattu NO<sub>x</sub> -arvo (g/km) vastaa hyvinkin skaalattua arvoa ( $5 \text{ g/kWh} * 1,8 \text{ kWh/km} = 9 \text{ g/km}$ ). Kuvissa olevat yhtenäisellä viivalla piirretyt käyrät perustuvat mitattuihin dieselautoihin (ilman CRT -suodattimia). Alustadynamometrimittauksissa saadut keskimääräiset NO<sub>x</sub> ja PM -arvot vastaavat hyvinkin eri päästöluokilta odotettavissa olevia arvoja.



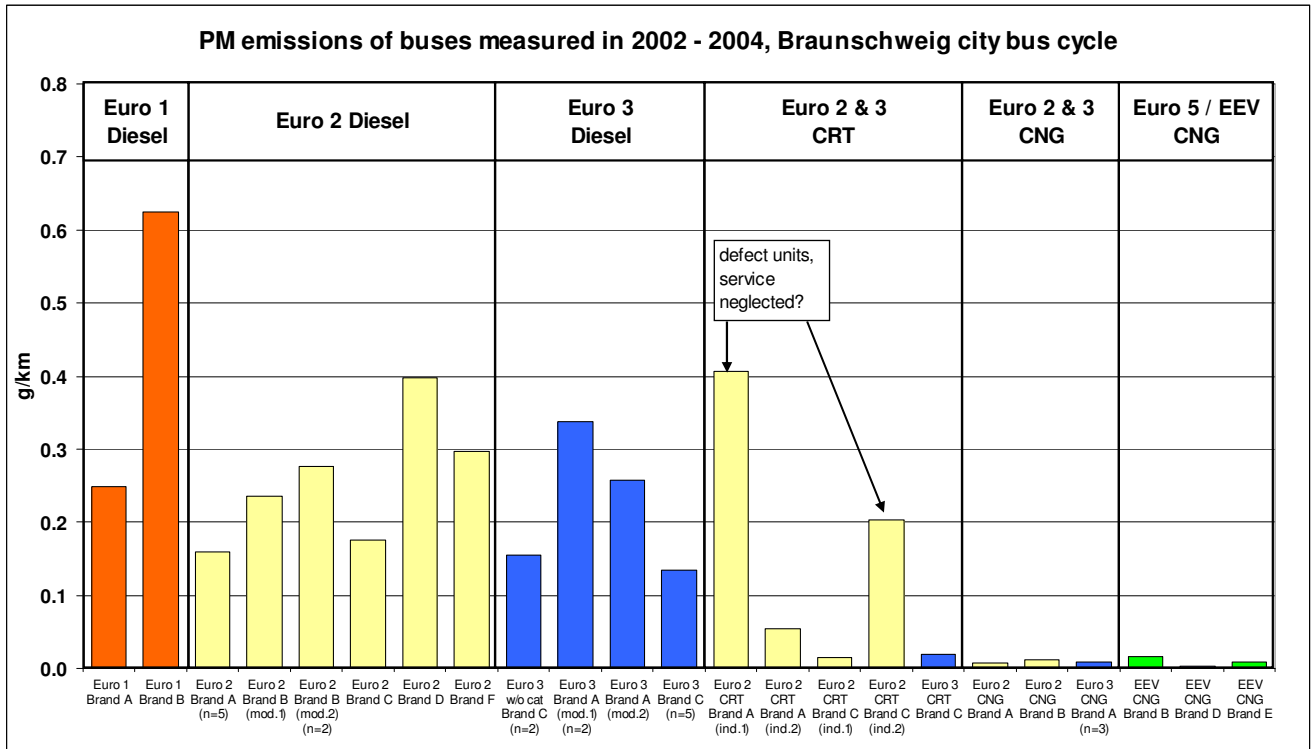
Kuva 4. CO -päästöt .



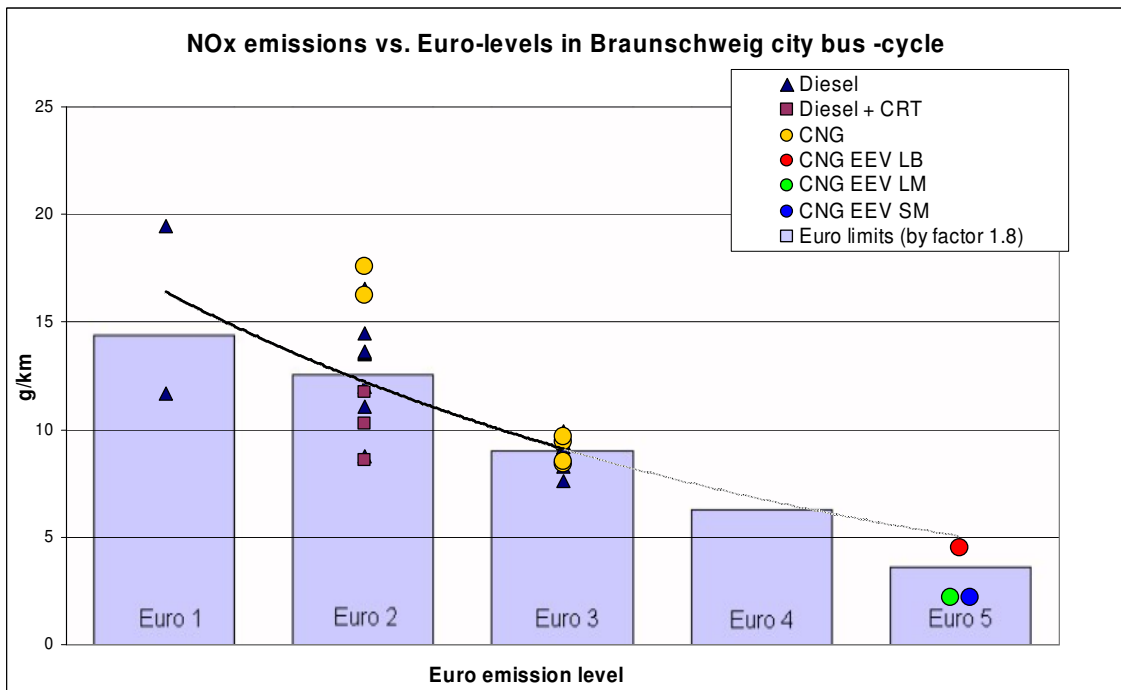
Kuva 5. THC -päästöt (maakaasuautojen NMHC -arvoksi arvioitu 5 % THC -arvosta).



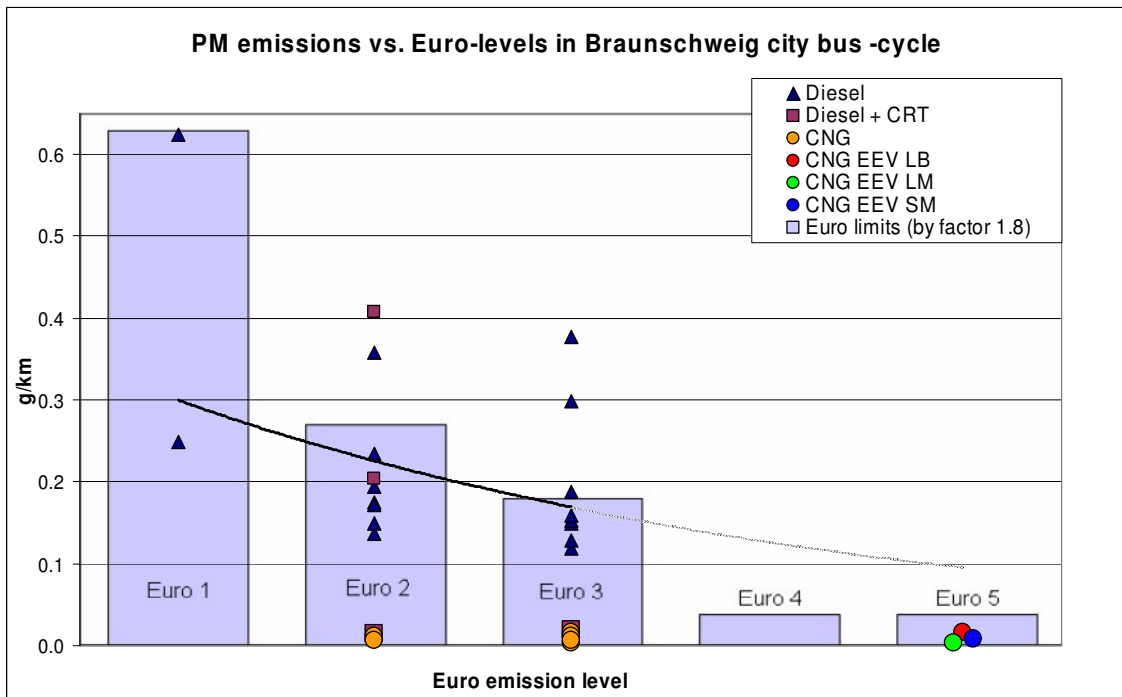
Kuva 6. NO<sub>x</sub> -päästöt.



Kuva 7. PM -päästöt.

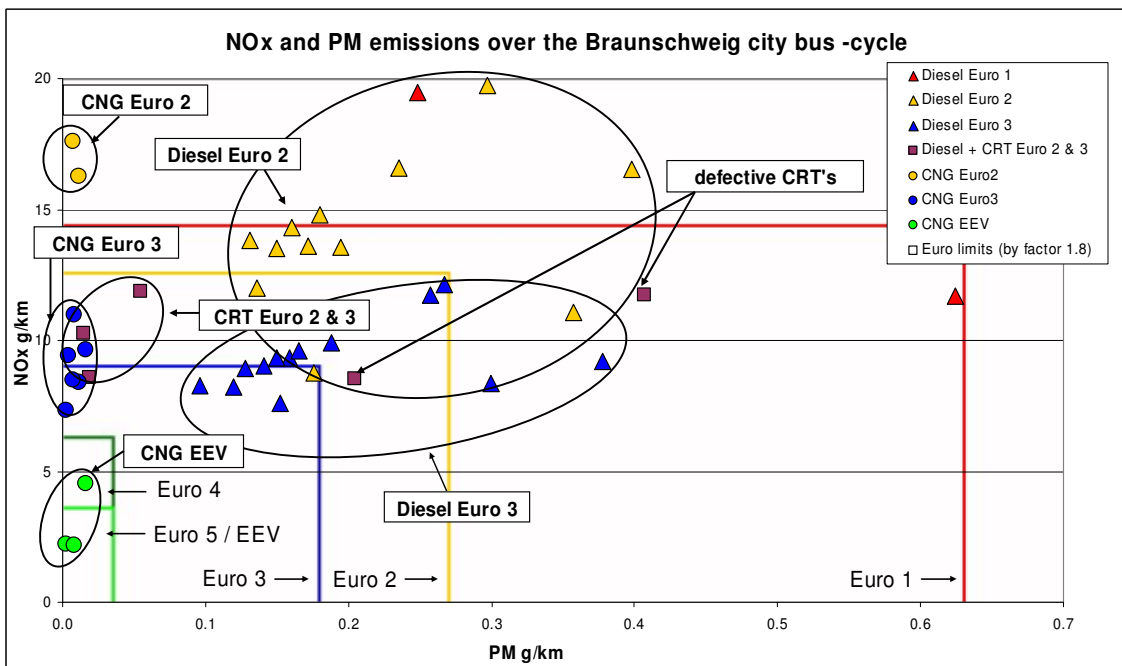


Kuva 8. NO<sub>x</sub>-päästöjen trendi.



Kuva 9. PM-päästöjen trendi.

Kuva 10 esittää toisenlaisen tarkastelutavan tuloksille, ts.  $\text{NO}_x/\text{PM}$  -kartan. Tämä tarkastelutapa tuo hyvin esille erot eri päästoluokkien suorituskyvyssä, ja näyttää samalla hajonnan eri päästoluokkien sisällä (merkkikohtaiset erot).



Kuva 10.  $\text{NO}_x/\text{PM}$  -kartta.

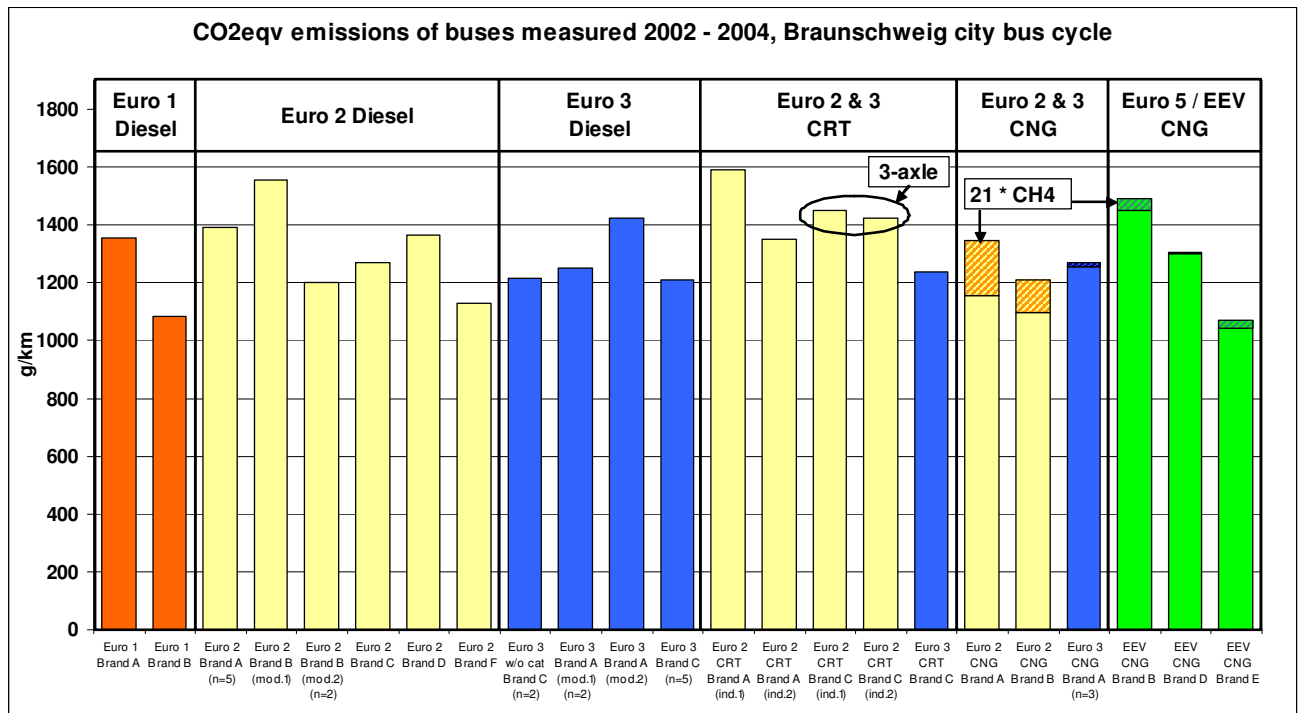


NO<sub>x</sub>- ja hiukkaspäästöjen lisäksi myös CO<sub>2</sub> -päästöillä on yleistä mielenkiintoa. CO<sub>2</sub> eli hiilidioksidi on kasvihuonekaasuista tärkein. Vakioidulla polttoaineella, esimerkiksi dieselpolttoaineella, CO<sub>2</sub> -päästö korreloi polttoaineen kulutuksen ja ajoneuvon hyötysuhteen kanssa. Toisaalta grammaa CO<sub>2</sub>/MJ<sub>polttoaine</sub> -muotoinen ominaispäästö riippuu polttoaineen kemiallisesta rakenteesta. Maakaasussa tai oikeammin metaanissa on enemmän vetyä suhteessa hiileen kuin dieselpolttoaineessa, ja niinpä metaanin CO<sub>2</sub> -ominaispäästö on noin 25 % alempi dieselpolttoaineeseen verrattuna.

Myös moottorin hyötysuhde vaikuttaa CO<sub>2</sub> -kokonaispäästöön. Nykyiset raskaan kaluston kaasumoottorit toimivat kipinäsytytys/otto -periaatteella (dieselmootoreista konvertoituja moottoreita), ja niiden hyötysuhde on selvästi dieselmootoreita alempi. Tästä syystä polttoaineen kemian tuoma CO<sub>2</sub> -etu kumoutuu useimmissa tapauksissa.

Myös palamaton metaani on otettava huomioon kasvihuonekaasujen tarkasteluissa. Metaani on voimakas kasvihuonekaasu sen vaikutuksen ollessa noin kaksikymmenkertainen CO<sub>2</sub>:een verrattuna. Niinpä ekvivalentti CO<sub>2</sub> -päästö lasketaankin usein lisäämällä suoraan CO<sub>2</sub> -päästöön metaanipäästö kerrottuna kertoimella 21.

Kuvassa 11 on esitetty pakoputken päästä mitattu CO<sub>2</sub> -päästö. Maakaasuautojen osalta tuloksissa on huomioitu palamaton metaani. Uudehkojen maakaasuautojen kohdalla metaanipäästö on tasolla 1 g/km, metaanin osuus ekvivalentti CO<sub>2</sub> -päästöistä on näin ollen tasolla 2 %. Vastaavasti vanhempien maakaasuautojen osalta metaanipäästön (n. 10 g/km) osuus ekvivalentti CO<sub>2</sub> -päästöstä on tasolla 15 %, jolloin sillä alkaa jo olla merkitystä.

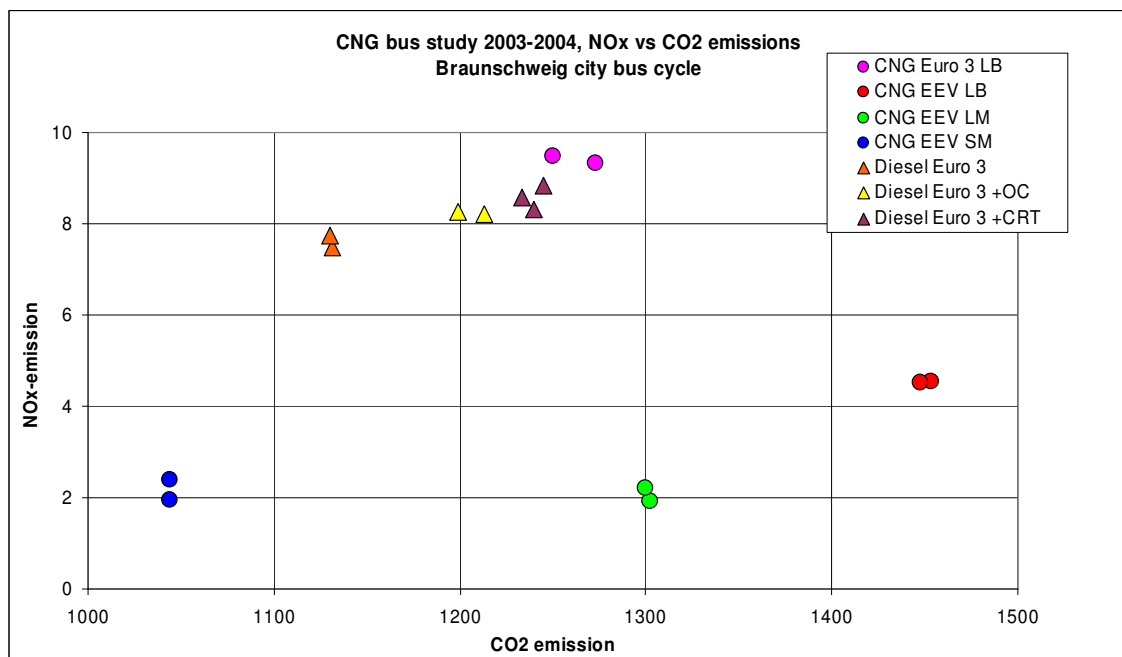


Kuva 11. Ekvivalentti CO<sub>2</sub> -päästö.

Kaksiakselisten autojen osalta CO<sub>2</sub> -päästö on n. 1.100 – 1.600 g/km (Euro 1 ilman pakokaasujen jälkikäsitteilyä/Euro 2 diesel + CRT), eli ero pienimmän ja suurimman luvun välillä on noin 45 %. Maakaasuautojen osalta haarukka on 1.100 – 1.500 (stoikiometrinen EEV/laihaseos -EEV).

Kuvassa 12 on NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> kartta diesel/maakaasuvertailun 7:lle autolle. Tässä kuvassa metaania ei ole otettu huomioon, koska kyse oli hyväkuntoisista autoista, joiden metaanipäästö oli alhainen. Kuvasta 12 nähdään, että dieselin lisätty pakokaasupuhdistustekniikka lisää CO<sub>2</sub> -päästön lisäksi myös jossakin määrin NO<sub>x</sub> -päästöä. CRT -suodatin lisäsi näissä mittauksissa polttoaineen kulutusta n. 10 % perusautoon verrattuna. Alhaista hiukaspäästöä ei saavuteta ilman kustannuslisää.

Keskimääräiset CO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub> -arvot pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteistoilla varustetuille Euro 3 -autoille (diesel ja maakaasu, hapetuskatalysaattori tai CRT) ovat noin 1.250 g CO<sub>2</sub> ja 9 g NO<sub>x</sub>/km. EEV -maakaasuautojen NO<sub>x</sub> -päästöt olivat 2 – 4,5 g/km, ja CO<sub>2</sub> -päästö 1.050 – 1.450 g/km. Hieman yllättäen pienin CO<sub>2</sub> -päästö saatiin stoikiometrisellä maakaasuautolla.



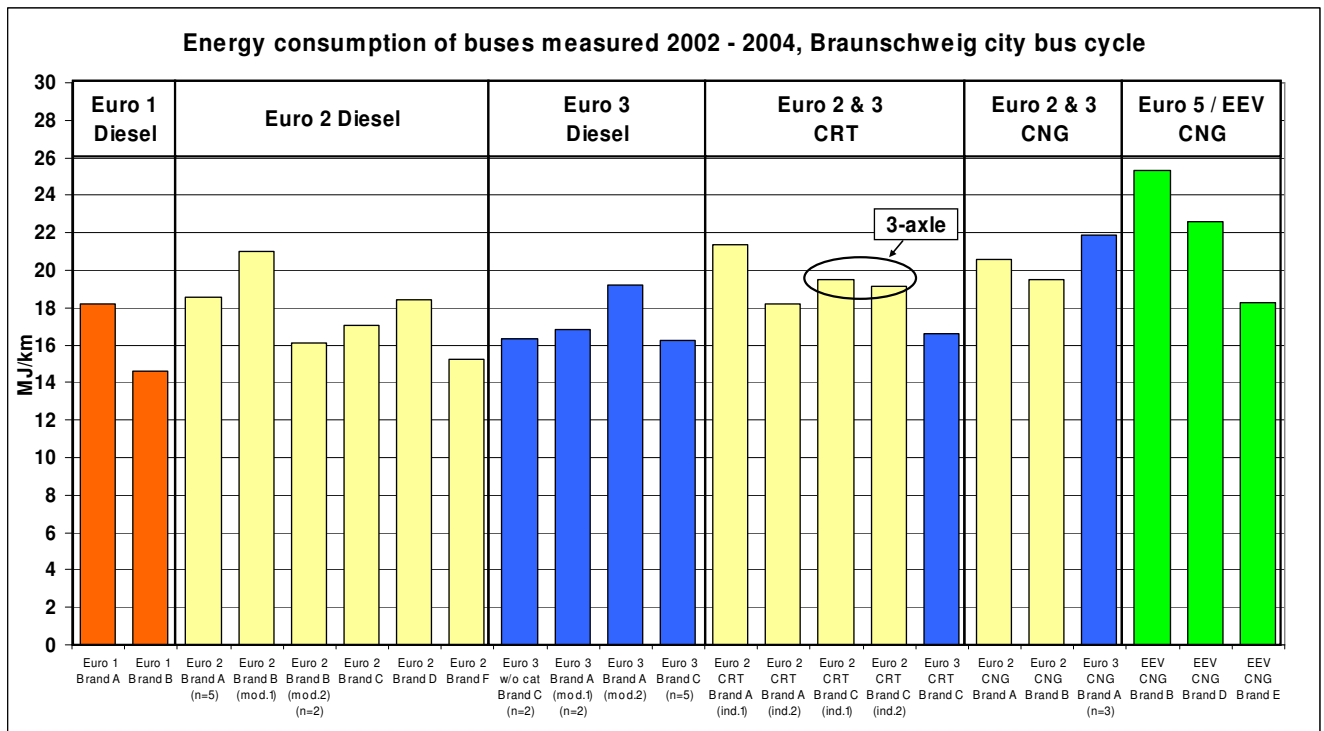
Kuva 12. NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> kartta diesel/maakaasuvertailun autoille.

CO<sub>2</sub> -päästön (hiilitaseen) perusteella on mahdollista laskea energian- ja polttoaineenkulutusarvoja. Kuvassa 13 on esitetty eri autoluokkien energiankulutus. Kaksiakselisille dieselautoille energiankulutus on 14,6 – 21,4 MJ/km. Polttoaineen kulutuksena tämä on 41 – 60 l/100 km, erona edellä mainittu 45 %. Dieselautoille ilman CRT -suodatinta keskimääräinen energian kulutus on 17 MJ/km (48 l/100 km), ja CRT-autoille taas 18,5 MJ/km (52 l/100 km, arvio kaksiakselisille autoille).

Euro 2 ja Euro 3 maakaasuautojen keskimääräinen energiankulutus on 21 MJ/km, Euro 5/EEV maakaasuautojen 22 MJ/km. Näin ollen maakaasuautojen energiankulutus on

keskimäärin 25 – 30 % korkeampi verrattuna dieselautoihin ilman CRT –suodatinta, ja 15 -20 % korkeampi CRT –autoihin verrattuna.

Polttoaineen kulutuksen hajonta EEV –sertifioitujen maakaasuautojen ryhmässä on huomattavan suuri. Tarkasteltaessa diesel/maakaasuvertailun autoja nähdään, että EEV maakaasuautot kuluttivat 10 – 50 % enemmän energiaa CRT –dieseliin verrattuna, 15 – 55 % enemmän hapetuskatalysaattorilla varustettuun dieselautoon verrattuna ja 20 – 65 % enemmän perusdieseliin verrattuna. Ekvivalentti dieselkulutukseksi muutettuna tehokkain EEV kaasauto kulutti 51 l/100 km, eniten kuluttava peräti 71 l/100 km.



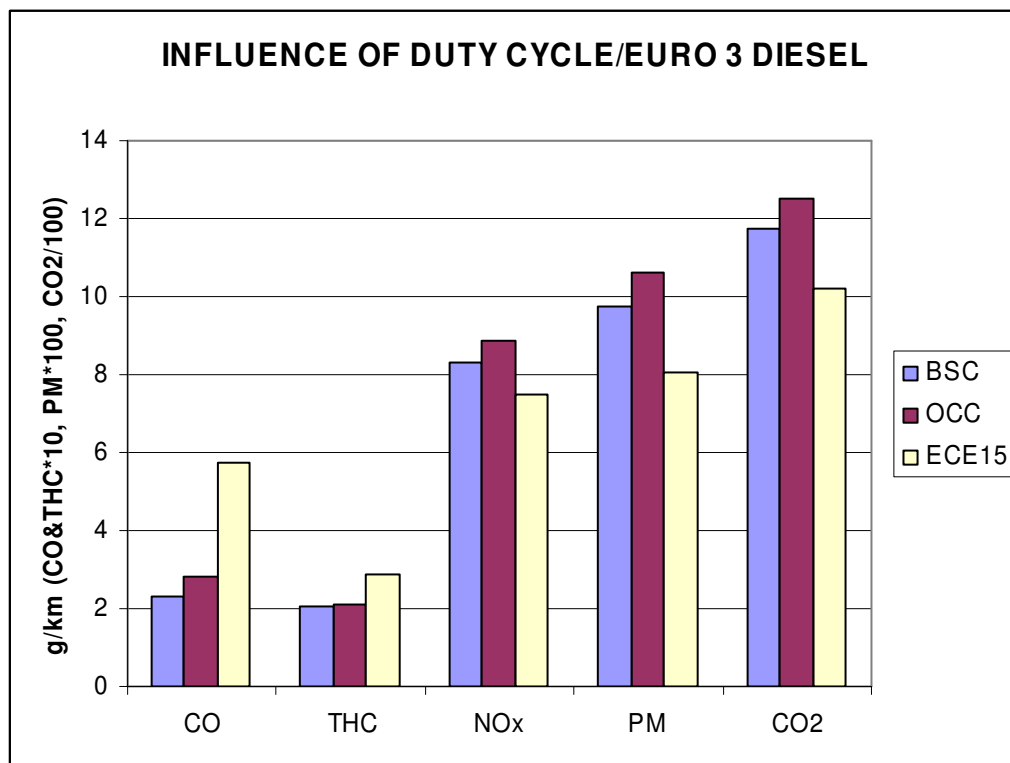
Kuva 13. Energian kulutus.

Kuvissa 14 (Euro 3 diesel hapetuskatalysaattorilla) ja 15 (Euro 3 maakaasu) on testisyklin vaikutus päästötuloksiin. Kuvissa olevat syklit ovat Braunschweig, Orange County ja ECE 15. Viimeksi mainittu sykli on keinotekoinen sykli rakentuen joutokäyntijaksoista, vakiokiihdytyksistä, vakionopeuksista ja vakiohidastuksista.

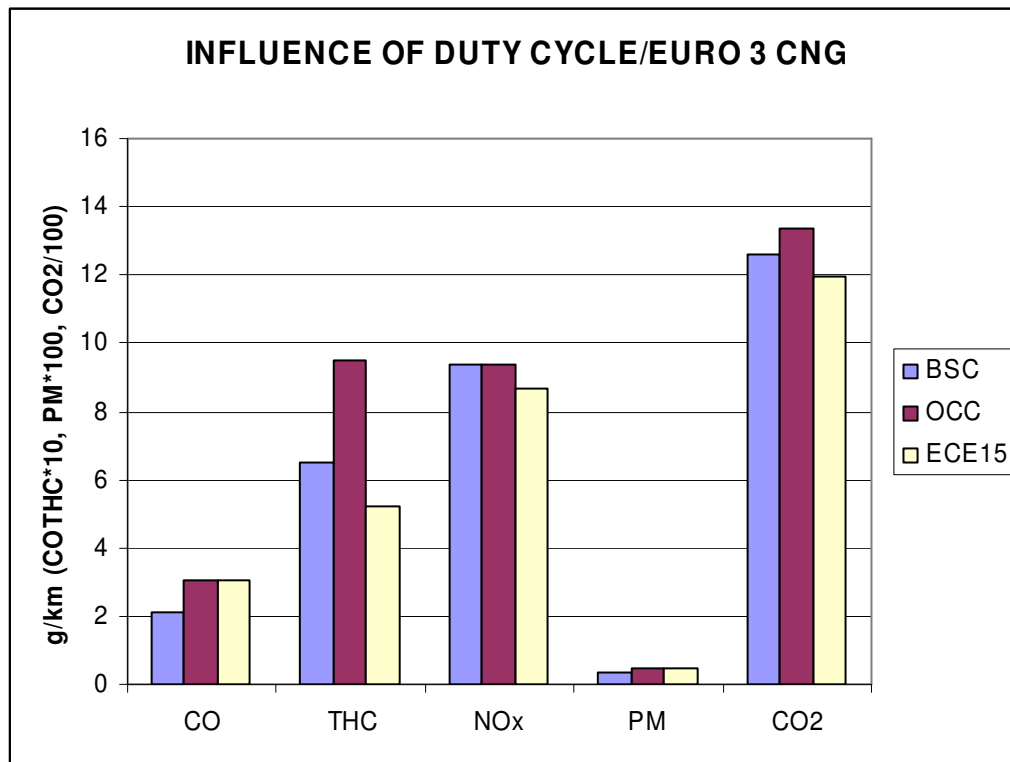
CO<sub>2</sub> –päästö korreloi keskimääräiseen kuormaan, ja on järjestyksessä pienimmästä suurimpaan ECE 15, Braunschweig ja Orange County. Dieselauton osalta myös NO<sub>x</sub> ja PM –päästöt noudattavat samaa järjestystä. Maakaasuauton osalta Braunschweig ja Orange County –sykleillä saavutetaan samaa tasoa olevat NO<sub>x</sub> ja PM –arvot. Kevyen kuorman ECE 15 –sykli lisää CO –päästöä dieselauton osalta, mutta vähentää toisaalta THC –päästöä maakaasuauton osalta.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että ajosyklin vaikutus matkapohjaisiin päästöarvoihin on varsin pieni. Tämä pätee erityisesti NO<sub>x</sub> –päästöön.

Vuosien 2002 ja 2003 vuosiraportit sisälsivät g/km –muotoisen päästökerrointaulukon, johon oli koottu dynaamisen ajon tyypillisiä päästökertoimia eri päästoluokkia edustaville autoille. Vastaavasti taulukkoon 4 on koottu päästökerroinyhteenveto kaikista vuosien 2002 – 2004 mittauksista. Aikaisempiin taulukkoihin verrattuna tämän taulukkoon on lisätty sarakkeita (lisää ajoneuvoryhmiä). CRT –dieselautojen osalta yksi poikkeuksellisen korkea hiukkastulos (vaurioitunut suodatin) on jätetty huomioimatta. Taulukossa esitetyt arvot ovat peräisin eri-ikäisistä autoista, ja näin ollen taulukon arvoihin on tietyllä tavalla sisäänrakennettu vanhenemiskertoimet. Tämä pätee erityisesti Euro 1 ja Euro 2 –luokkien autoihin.



Kuva 14. Testisyklin vaikutus Euro 3 dieselauton päästöihin.



Kuva 15. Testisyklin vaikutus Euro 3 maakaasuauton päästöihin.

Taulukko 4. Tyypillisiä dynaamisen ajon päästökertoimia (g/km, arvot pyöristetty).

	Euro 1 diesel	Euro 2 diesel	Euro 3 diesel	Euro 2/3 diesel CRT	Euro 2 CNG	Euro 3 CNG	Euro 5/EEV CNG
CO	1.5	1.5	1.0	0.5	4.0	0.2	1.0
THC	0.3	0.2	0.15	0.1	7.0	1.0	1.0
NO <sub>x</sub>	16	14	9.0	9 – 14	17	10	3.0
PM	0.45	0.20	0.18	0.03	0.01	0.01	0.01
CO <sub>2</sub>	1200	1350	1250	1400	1100	1250	1250
CO <sub>2</sub> eqv.					1300	1300	1300

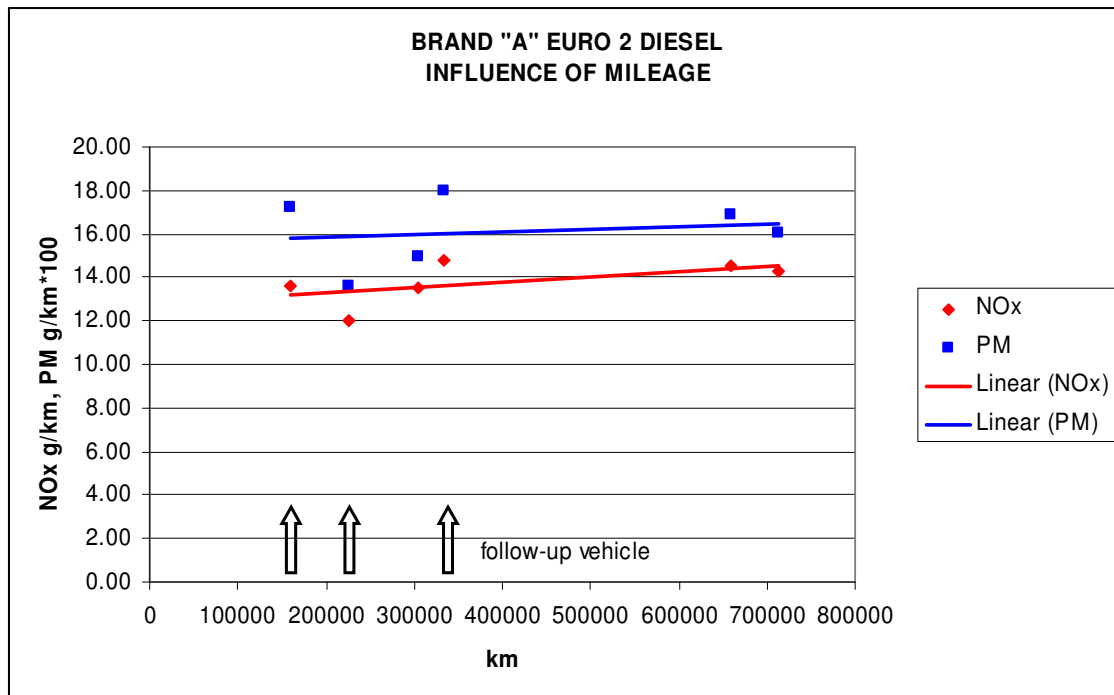
### 4.3 AJOMATKAN VAIKUTUS PÄÄSTÖTULOSSIIN

Kolmen autotyypin osalta on mahdollista arvioida ajomatkan vaikutuksia päästötuloksiin. Nämä autotyypit ovat merkin ”A” Euro 2 dieselautot, merkin ”C” Euro 3 dieselautot ja merkin ”A” Euro 3 maakaasuautot. Näissä ryhmissä on mitattu useita rinnakkaisia autoyksilöitä, ja lisäksi näihin ryhmiin kuuluu jatkuvan seurannan piirissä olevia autoja. Vanhemmissa Euro 2 dieselautoissa kilometrikertymä on luonnollisestikin kahta muuta autoryhmää suurempi.

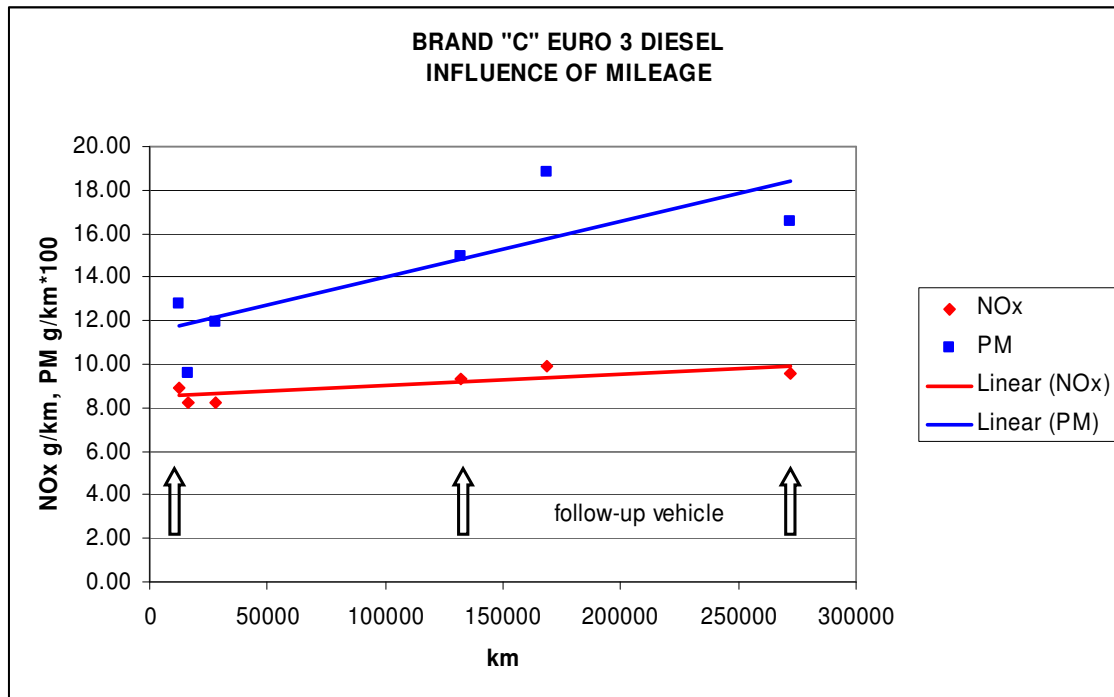
Kuvassa 16 on merkin "A" Euro 2 –autojen NO<sub>x</sub> ja PM –päästöt ajomatkan funktiona. Mittauksissa oli mukana neljä autoyksilöä, joista yksi mitattiin kolmeen eri otteeseen. On mielenkiintoista nähdä, miten NO<sub>x</sub> ja PM –arvot muodostavat pareja; korkeat NO<sub>x</sub> –arvot kulkevat käsi kädessä korkeiden PM –arvojen kanssa. Oletusarvo on, että korkea NO<sub>x</sub> antaisi alhaisen PM –arvon ja päinvastoin.

Hajonta on suurimmillaan seurannan kohteena olevan auton osalta, tästä autosta mitattiin sekä korkeimmat että alhaisimmat NO<sub>x</sub> ja PM –arvot. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että tämä autotyyppi on päästöiltään varsin stabiili. Päästöarvot 200.000 ja 700.000 km:n kohdalla eivät poikkea oleellisesti toisistaan. Keskimääräiset päästöarvot ovat NO<sub>x</sub> 13,8 ja PM 0,16 g/km.

Kuvassa 17 on vastaavasti tulokset merkin "C" Euro 3 –autojen osalta. Tässäkin tapauksessa mittauksissa oli neljä autoyksilöä, joista yksi mitattiin kolmeen otteeseen. Tässä tapauksessa tulokset kuitenkin poikkeavat hieman edellisestä autotyypistä. Hajonta on pienempää, mutta PM –päästöt näyttäisivät kasvavan ajokilometrien myötä. Tämä siitäkin huolimatta, että ajokilometrimäärät ovat huomattavasti alhaisemmat merkin "A" Euro 2 –autoihin verrattuna. Keskimääräiset päästöarvot ovat NO<sub>x</sub> 9 ja PM 0,14 g/km. Kun huomioidaan erot ajokilometrimäärissä voidaan arvioida, että tässä vertailuparissa Euro 3 tuo etuja Euro 2:een verrattuna NO<sub>x</sub> –päästöjen osalta, muttei välttämättä hiukkaspäästöjen osalta.



Kuva 16. NO<sub>x</sub> ja PM päästöt ajokilometrien funktiona merkin "A" Euro 2 dieselautoille.

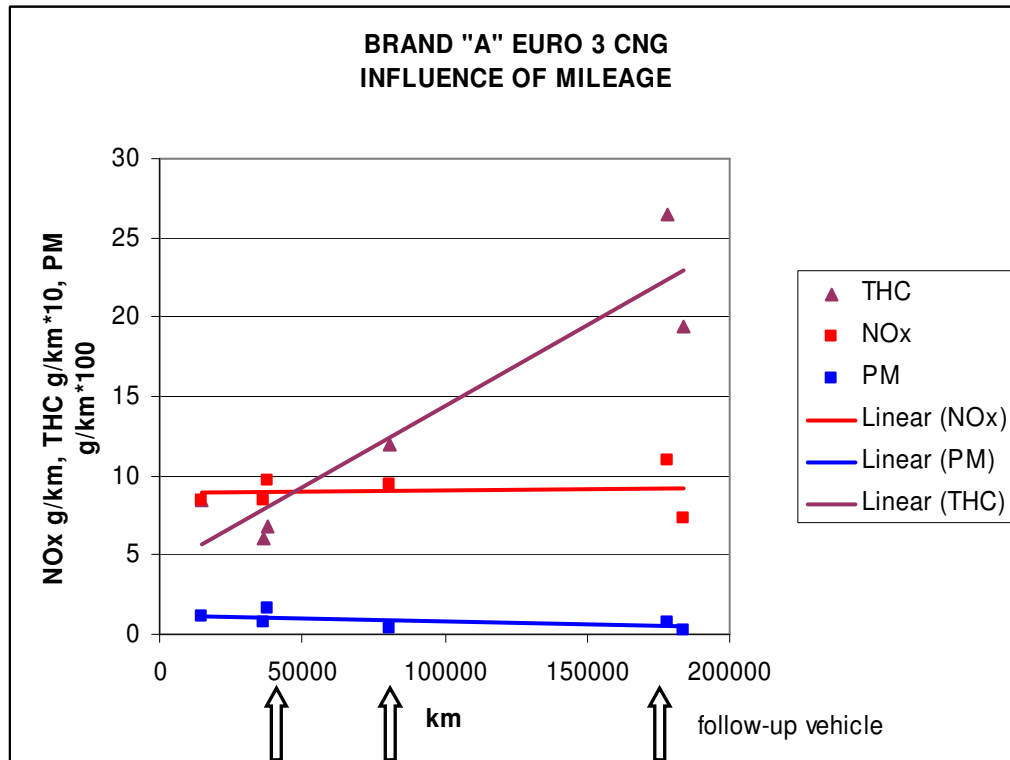


Kuva 17.  $NO_x$  ja PM päästöt ajokilometrien funktiona merkin "C" Euro 3 dieselautoille.

Kuvassa 18 on merkin "A" Euro 3 maakaasuautojen tulokset. Mittauksissa oli kolme autoyksilöä, joista yksi mitattiin vain kerran, yksi kaksi kertaa ja varsinainen seuranta-auto kolme kertaa. Seuranta-autona oli kaksiakselinen bussi, kaksi muuta autoa olivat kolmiakselisia. Kuvassa 18 näitä autoja on kuitenkin käsitelty yhtenä joukkona. Maakaasuautojen osalta kuvaan on lisätty myös THC -päästö.

Maakaasuauton ovat stabiileja sekä  $NO_x$ :n että hiukkasten osalta. Hiukkaspäästö erittäin alhainen, ja käytännössä hyvin lähellä määrittelyrajaa. Koska RAKEBUS- mittauksissa käytettiin normaalia diesellaimennustunnelia, kaasuautojen hiukkastulokset ovat suuntaa antavia, ei absoluuttisesti oikeita. Diesel/maakaasuvertailussa sen sijaan käytettiin erikoistunnelia kaasuautoille.

THC -päästöt (jotka maakaasuauton osalta ovat yli 95 %:sesti metaania) kasvavat voimakkaasti ajokilometrien karttuessa. Tämä johtunee ensisijaisesti hapetuskatalysaattorin tehon heikkenemisestä. Keskimääräiset päästöarvot ovat  $NO_x$  9,1, PM 0,01 ja THC 1,2 g/km. THC nousee arvoon 2 g/km noin 150.000 km:n kohdalla.



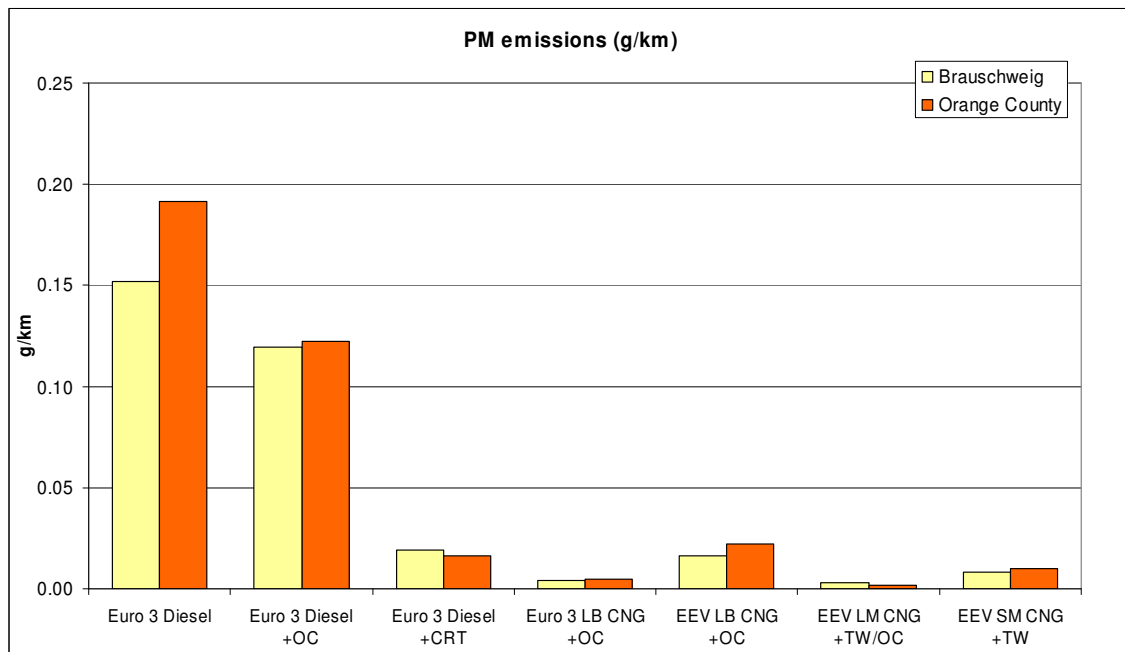
Kuva 18.  $NO_x$ , PM ja THC -päästöt ajokilometrien funktiona merkin "A" Euro 3 maakaasuautoille.

#### 4.4 VÄHÄPÄÄSTÖISTEN AUTOJEN HIUKKASPÄÄSTÖT

Hiukkaspäästöt ovat erityisen mielenkiinnon kohteena, ovathan hiukkaset haitallisin pakokaasukomponentti taajamailman laadun kannalta. Perusdieseliin verrattuna hiukkasten massaemissio pienenee noin kertoimella 10 siirryttäessä CRT- dieseliin tai maakaasuun.

Kuvassa 19 diesel/maakaasuautovertailun hiukkasmassatuloksia. Arvot ovat välillä 0,2 – 0,002 g/km (diesel ilman jälkikäsitteilyä - lean-mix -tyyppinen maakaasuauto). Dieselautossa hapetuskatalysaattori alentaa hiukkaspäästöä 20 – 30 %, CRT –suodatin noin 90 %. Kaiken kaikkiaan CRT –diesel ja maakaasuautot tarjoavat erinomaisen suorituskyvyn hiukkaspäästöjen osalta. Tosin kolme kaasuautoa neljästä antaa vielä CRT –dieseliäkin alhaisemman hiukkaspäästön.





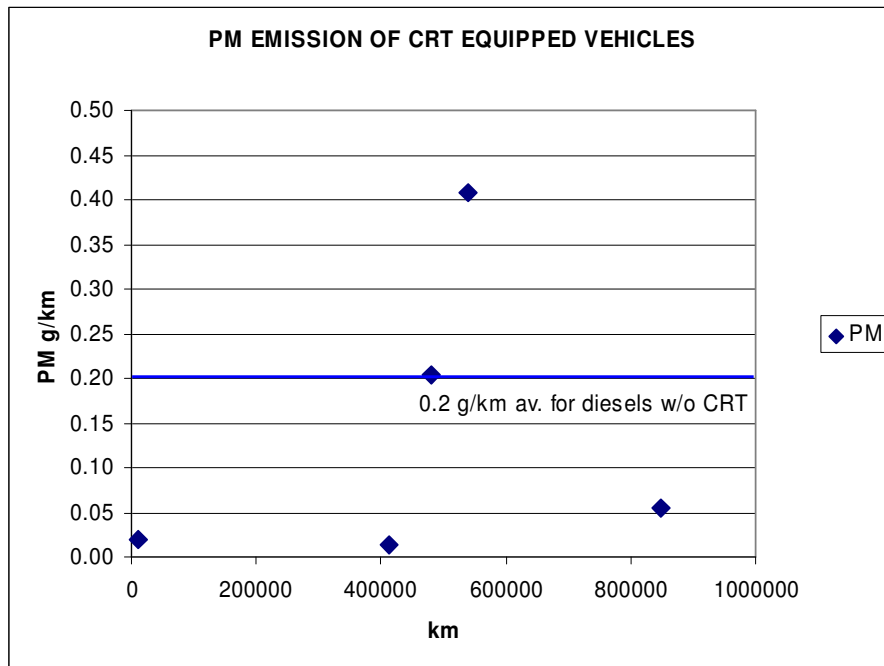
Kuva 19. Diesel/maakaasuautovertailun hiukkastulokset. LB = laihaseosmaakaasu, LM = lean-mix -maakaasu (sekajärjestelmä), SM = stoikiometrinen maakaasu..

Herää tietenkin kysymys siitä, miten stabiileja vähäpäästöiset autot ovat. RAKEBUS – projektin mittauksissa oli yhteensä viisi CRT- autoa. Kolmessa autossa CRT –suodatin oli hyvässä kunnossa. Alhaisin mitattu hiukkasarvo oli 0,015 g/km. Keskimääräinen perusdieseliin hiukkaspäästö on noin 0,2 g/km.

Yksi CRT –suodatin ei vähentänyt hiukkaspäästöjä, ja yksi suodatin jopa lisäsi niitä verrattuna perusautoon (kuva 20). Jälkimmäinen tapaus voidaan selittää vain siten, että suodatin oli pahasti vaurioitunut, ja että sen keraaminen matriisi oli murenemassa.

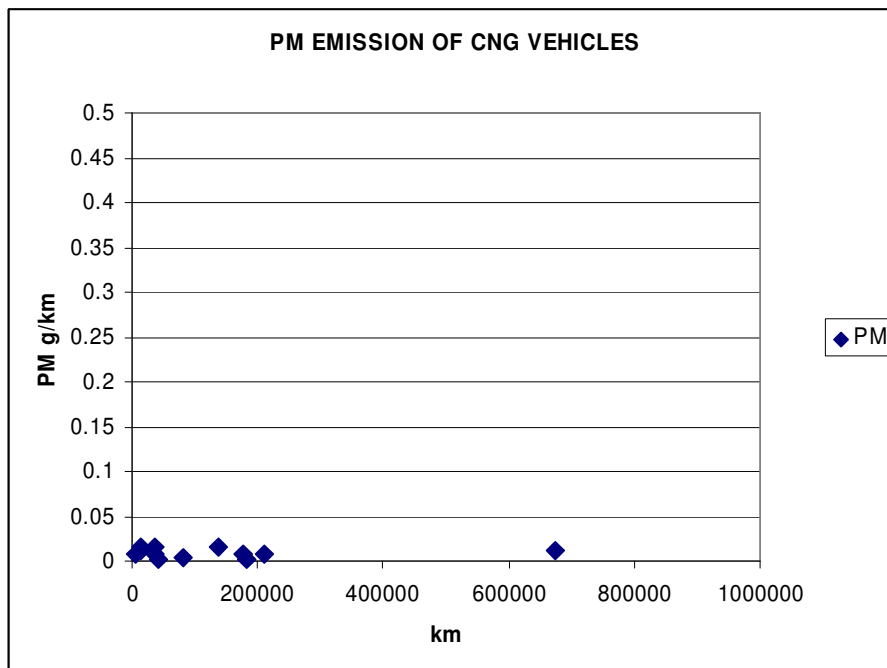
Ensin mainitussa tapauksessa suodattimen etuosassa oleva hapetuskatalysointilohko oli irronnut, tukkien osittain varsinaisen suodatinosan. Näistä syistä suodattimen teho oli heikentynyt merkittävästi, ja samalla polttoaineen kulutus oli kasvanut kohonneen pakokaasujen vastapaineen takia.

Huomion arvoista on, että kaikista mitatuista eniten ajettu auto, n. 850.000 km ajettu vuosimallin 1996 CRT –dieselauto toimi varsin hyvin. Hiukkaspäästö oli 0,05 g/km, eli CRT –suodatin oli vielä toimintakuntoinen. Mittaukset osoittavat, että oikein huollettu CRT –suodatin kestää varsin pitkään, mutta että huoltojen laiminlyönti tuhoaa suodattimet.



Kuva 20. CRT- dieselautojen hiukkaspäästö ajomatkan funktiona.

Kuvassa 21 on maakaasuautojen hiukkaspäästö ajomatkan funktiona. Suurin ajokilometrimäärä oli 673.000 km. Kaasuautojen hiukkaspäästöt ovat pysyvästi matalaa tasoa. Tässä suhteessa kaasuautot tarjoavat CRT -dieselautoja paremman suorituskyvyn.

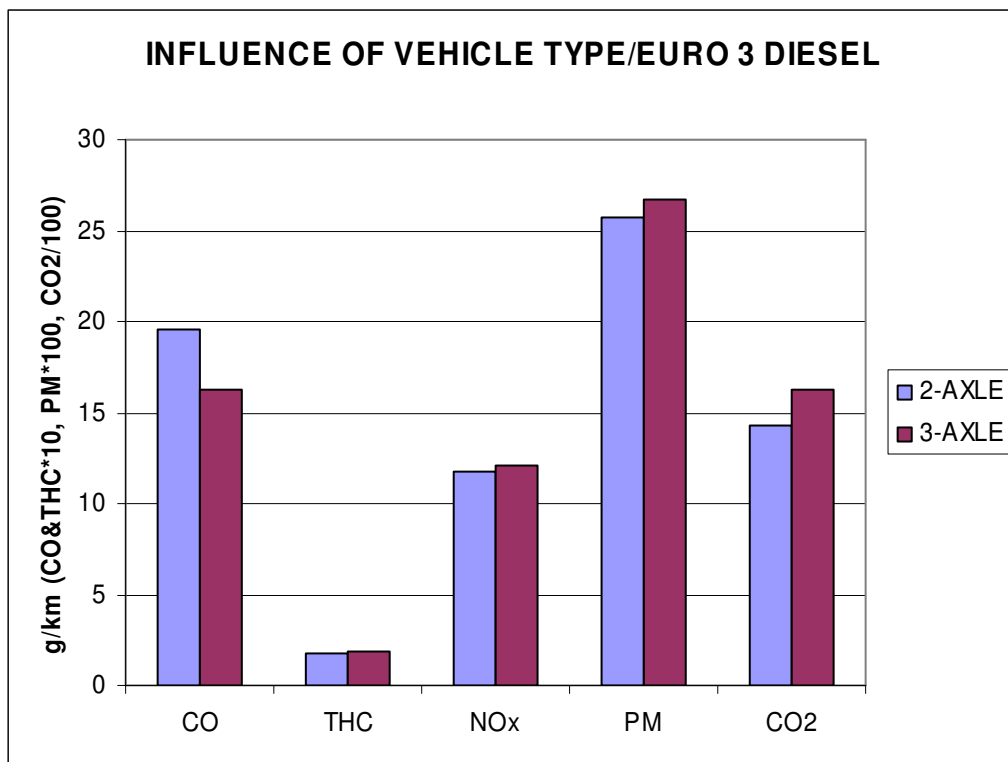


Kuva 20. Maakaasuautojen hiukkaspäästö ajomatkan funktiona.

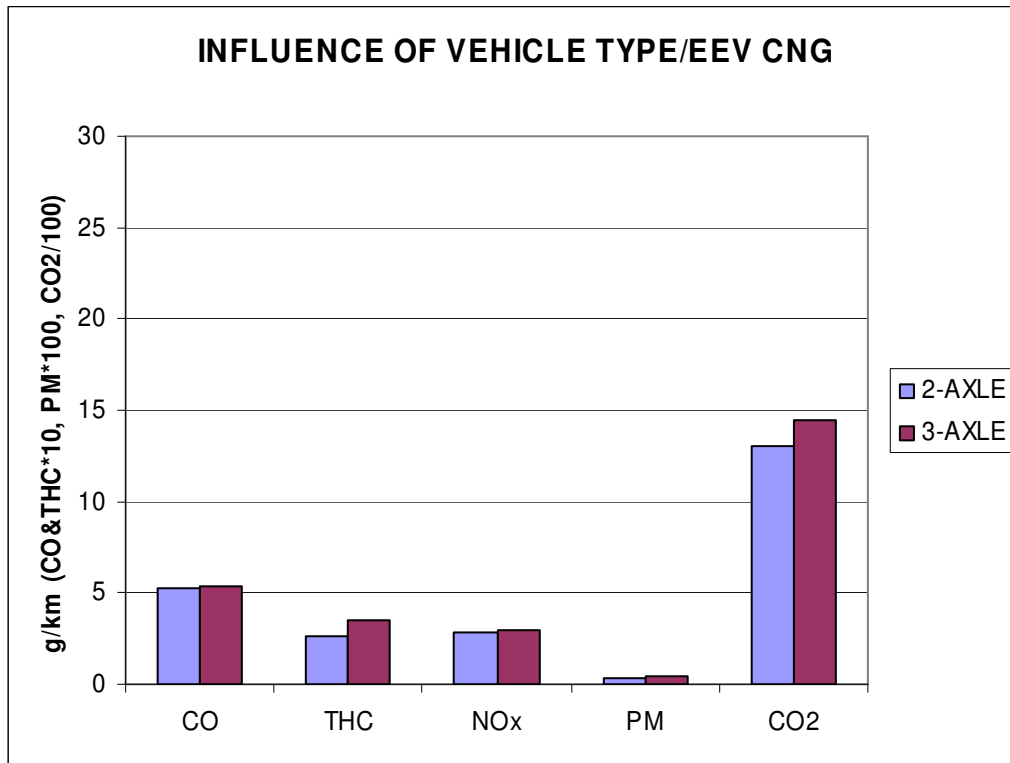
#### 4.5 AJONEUVON PAINON VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN

Tietyt autot mitattiin simuloiden sekä kaksi- että kolmiakselisen auton massaa ja ajovastuksia. Molemmissa tapauksissa käytettiin puolta kuormaa, mikä kaksiakselisten auton tapauksessa tarkoitti n. 3000 kg:aa ja kolmiakselisten autojen tapauksessa noin 5.000 kg:aa. Kuvissa 22 (Euro 3 diesel) ja 23 (EEV maakaasu) on esimerkkejä painon vaikutuksesta (kaksiakselisuus vs. kolmiakselisuus) autojen absoluuttisiin päästöarvoihin. Kuvassa 24 on vastaavasti esitetty kolmiakselisten autojen suhteellisen päästöt verrattuna kaksiakselisiin autoihin.

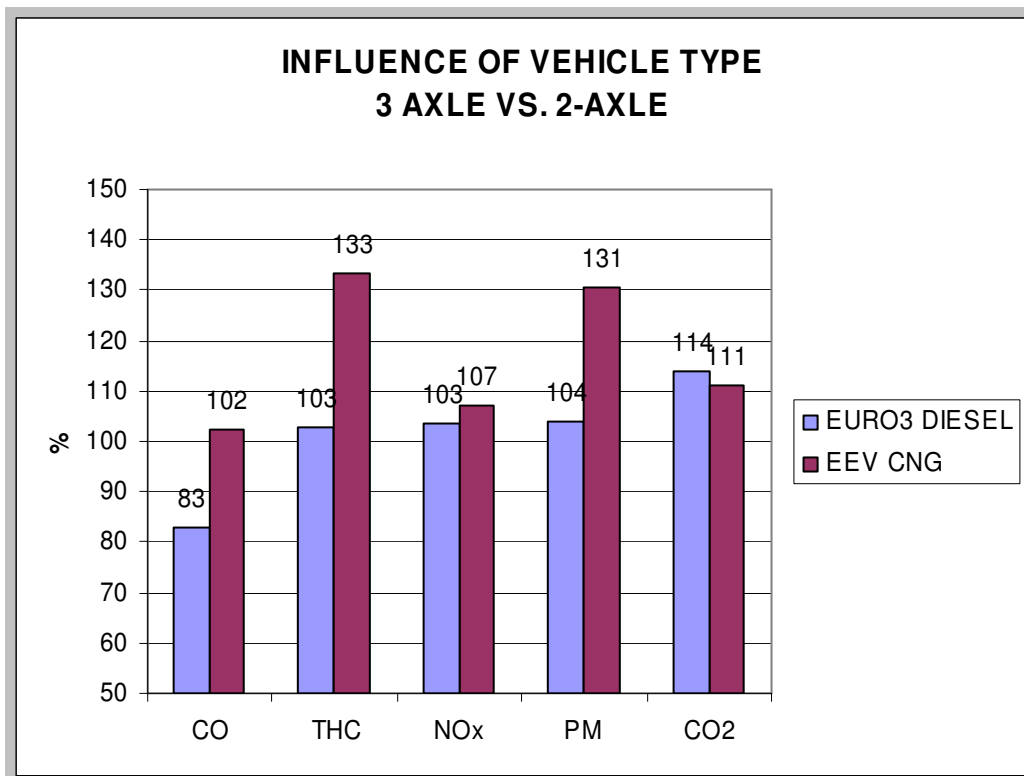
Kolmiakselisten autojen suhteelliset päästöt ovat 83 – 133 % kaksiakselisiin autoihin verrattuna. Ainoa päästökomponentti joka pieneni kuorman kasvaessa oli CO –päästö dieselauton osalta, kaikki muut päästöt kasvoivat kuorman mukana. Maakaasuauton osalta THC- ja hiukkasarvot kasvoivat n. 30 %. Tässä oltiin kuitenkin hyvin matalalla absoluuttitasolla hiukkasten osalta. Kummankin autotyypin osalta NO<sub>x</sub> kasvoi noin 5 % ja CO<sub>2</sub> –päästö (polttoaineen kulutus) 10 – 15 %, kuitenkin niin, että kaasuauton osalta suhteellinen polttoaineen kulutuksen kasvu oli hieman pienempi dieselautoon verrattuna.



Kuva 22. Ajoneuvon painon vaikutus päästöihin, Euro 3 diesel, puolikuorma.



Kuva 23. Ajoneuvon painon vaikutus päästöihin, EEV maakaasu, puolikuorma..



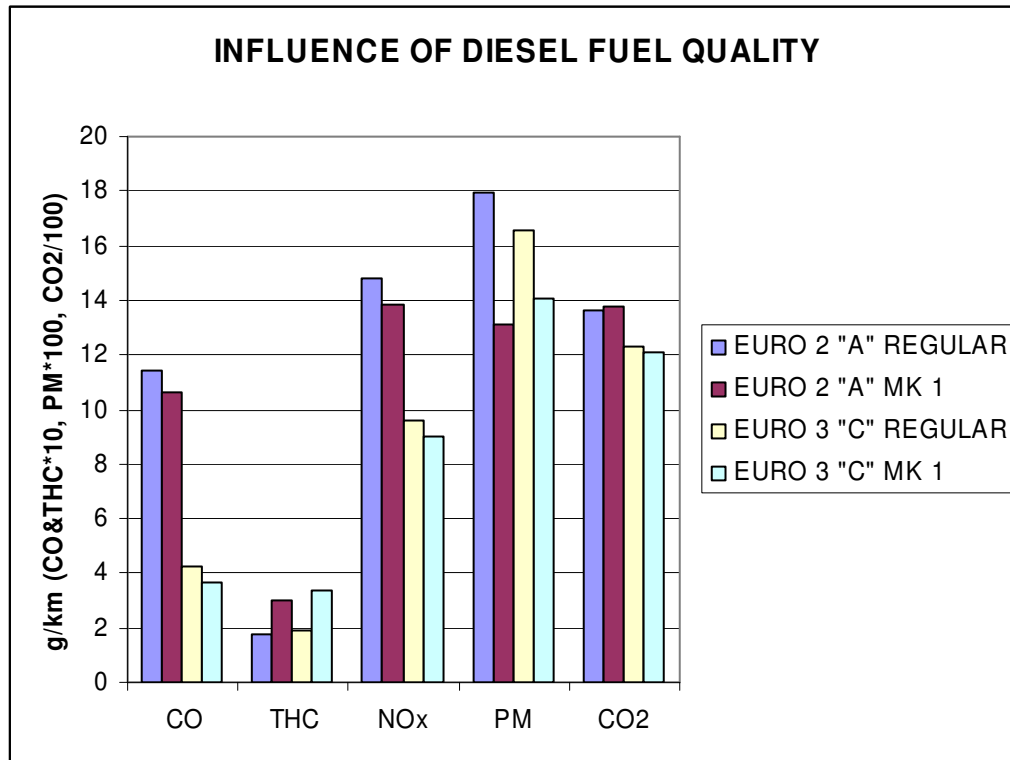
Kuva 24. Painon suhteellinen vaikutus, kolmiakselinen vs. kaksiakselinen auto (kaksiakselinen indeksoitu 100 %).

3.000 kg:n kuorma vastaa noin 40 matkustajaa, 5.000 kg noin 67 matkustajaa. Näin ollen, kun päästö- ja kulutuslukemat lasketaan matkustajakilometriä kohti, kolmiakselinen auto on edullisempi. Esimerkiksi energian kulutus on kaksiakselisen auton osalta 0,5 MJ/matkustaja-km, kun se kolmiakselisen auton osalta on 0,34 MJ/matkustaja-km. Jos autot olisivat kuormattuina täyteen kuormaan (henkilömäärään), tilanne olisi vieläkin edullisempi kolmiakselisen auton kannalta.

#### 4.6 DIESELPOLTTOAINEEN LAADUN VAIKUTUS PÄÄSTÖIHIN

Ruotsin Vägverket'in toivomuksesta kaksi dieselautoa, yksi Euro 2 -auto ja yksi Euro 3 -auto, mitattiin sekä kaupallisella suomalaisella polttoaineella että kevyellä ruotsalaisella Miljöklass 1 (MK 1) polttoaineella. Tulokset on esitetty kuvassa 25.

MK 1 alensi päästöjä, lukuun ottamatta THC -päästöä. Kummassakin autossa NO<sub>x</sub> -alennema oli noin 5 %. MK 1 alensi hiukkaspäästöjä suhteellisesti enemmän Euro 2 -autossa, 25 % verrattuna Euro 3 -auton 15 %:n päästöjen vähenemään. Tämän seurauksena MK 1 -polttoaineella Euro 2 -auto oli hiukkasten osalta vähäpäästöisempi kuin Euro 3 -auto, vaikka tilanne peruspolttoaineella olikin päinvastainen. 25 %:n päästöjen vähenemää voidaan jo pitää merkittävänä. Polttoaineen laatu ei vaikuttanut pakoputkesta mitattuun CO<sub>2</sub> -päästöön.



Kuva 25. Polttoaineen laadun vaikutus dieselautojen päästöihin.

## 4.7 PAKOKAASUJEN ERIKOISMITTAUKSET

### 4.7.1 Yleistä

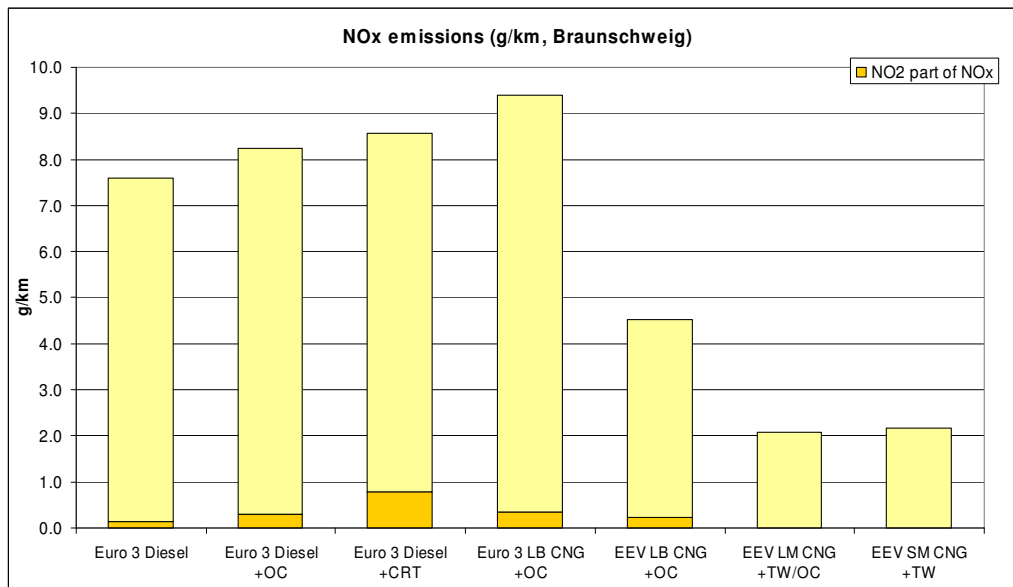
Diesel/maakaasuautojen pakokaasuvertailun yhteydessä VTT toteutti kattavan sarjan pakokaasujen erikoismittauksia. Erikoismittauksia tehtiin seitsemällä autolla autojen kokonaislukumäärän ollessa 34 (katso 3.3 ja 3.5.2). Diesel/maakaasuvertailun raportti täydessä laajuudessaan on ladattavissa VTT:n verkkosivuilta osoitteesta:

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

Käsillä olevassa raportissa esitetään vain esimerkinomaisesti joitakin erikoismittauksien tuloksia (NO<sub>2</sub>, aldehydit, hiukkasten lukumääräjakautuma, PAH).

### 4.7.2 NO and NO<sub>2</sub> -päästöt

Pakokaasujen jälkikäsitely muuttaa pakokaasujen NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> -suhdetta (kuva 26). CRT -diesel tuottaa sekä absoluuttisesti että suhteellisesti korkeimmat NO<sub>2</sub> -arvot, 0,8 g/km ja 10 %. Perusdieselin osalta vastaavat arvot ovat 0,14 g/km ja 2 %. hapetuskatalysaattoreilla varustetuissa autoissa (diesel ja maakaasu) NO<sub>2</sub> -osuus oli 4 - 5 %. Stoikiometristen maakaasuautojen (ml. sekajärjestelmä) NO<sub>2</sub> -päästö oli käytännössä nolla. (NO<sub>2</sub>:n vaikutukset katso liite).



Kuva 26. NO<sub>x</sub> ja NO<sub>2</sub> -päästöt (BSC).

Vaikkakin CRT –diesel antoi tässä korkeimmat absoluuttiset ja suhteelliset NO<sub>2</sub> -arvot, mitattu auto antoi kuitenkin selvästi paremmat tulokset eräisiin muihin tutkimuksiin verrattuna. Eräät tahot ovat mitanneet NO<sub>2</sub> –osuudeksi jopa 50 %.

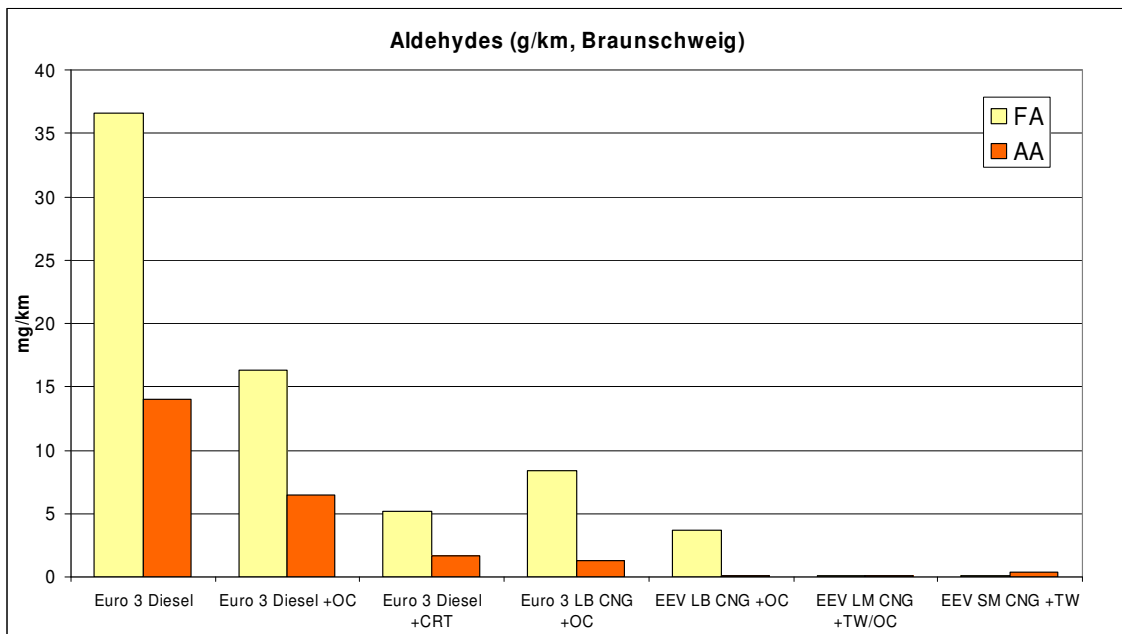
### 4.7.3 Aldehydit

Kuvassa 27 on esitetty form- and asetaldehydipäästöt. Diesel ilman pakokaasujen jälkikäsitteilyä antaa korkeimmat arvot, 37 ja 14 mg/km. Hapetuskatalysaattori alentaa näitä arvoja n. 50 %, CRT –suodatin 85 %. Laihaseos-maakaasuautojen formaldehydipäästö on samaa tasoa kuin CRT –dieselautolla, n. 5 mg/km. Jälleen kerran stoikiometriset kaasuaivot (sekäjärjestelmä mukaan lukien) antavat parhaan tuloksen, aldehydipäästöjen ollessa nollassa.

### 4.7.4 Hiukkasten koko ja lukumäärä

Tässä esitettävät tulokset perustuvat ELPI –mittalaitteeseen (electrical low-pressure impactor, sähköinen impaktori). Kuvassa 28 on esitetty hiukkasten kokojakauma BSC ja OCC -testisykleissä. Huomaa, että kuvassa on käytetty logaritmisia asteikoita!

Perusdieseliin verrattuna hiukkasten lukumäärä alenee kaksi kertaluokkaa siirryttäessä CRT –suodattimeen ja maakaasuun (kolme maakaasuautoa neljästä, alimmat käyräparvet). Parhaimpien autojen pakokaasuja on likimain saman verran hiukkasia kuin tavallisessa ulkoilmassa. Neljäs maakaasuauto sijoittui hiukkasten lukumäärän osalta perusdieseliin ja parhaimpien autojen välimaastoon. Tähän voi olla kaksikin selitystä, toisaalta moottorin voiteluöljyn kulutus ja toisaalta katalysaattorin vajavainen toiminta. Näistä jälkimmäinen on todennäköisempi, koska katalysaattori oli asennettu varsin viileään paikkaan auton katolle (liian alhainen pakokaasujen lämpötila katalysaattorin optimaalista toimintaa ajatellen, näkyy myös THC –arvossa).



Kuva 27. Form (FA)- ja asetaldehydipäästöt (AA), testisyklinä BSC.

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

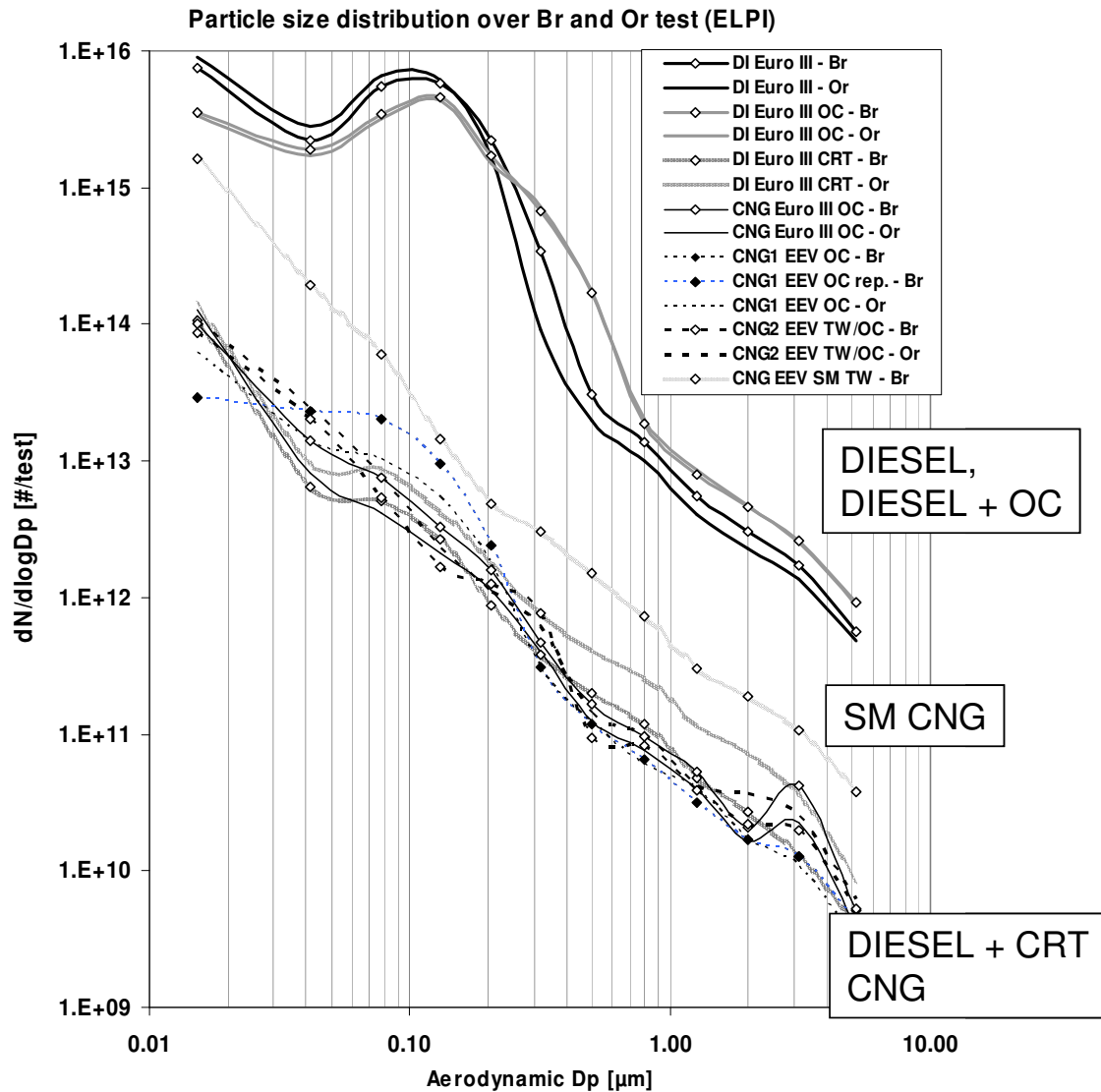
Merkille pantavaa on, että sekä CRT –dieselin että maakaasuautojen osalta hiukkaskokojakauman kuvaajat ovat lähestulkoon lineaarisia log-log –asteikolla. Tästä voidaan vetää se johtopäätös, että esim. CRT –suodatin toimii tehokkaasti kaikissa hiukkasten kokoluokissa. Näin ollen ei CRT eikä myöskään maakaasu tuota epänormaalien korkeita nanohiukkaslukumääriä. Stoikiometrinen maakaasuauto olisi todennäköisesti hyötynyt korkeammasta katalysaattorin lämpötilasta.

#### 4.7.5 PAH päästöt

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

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

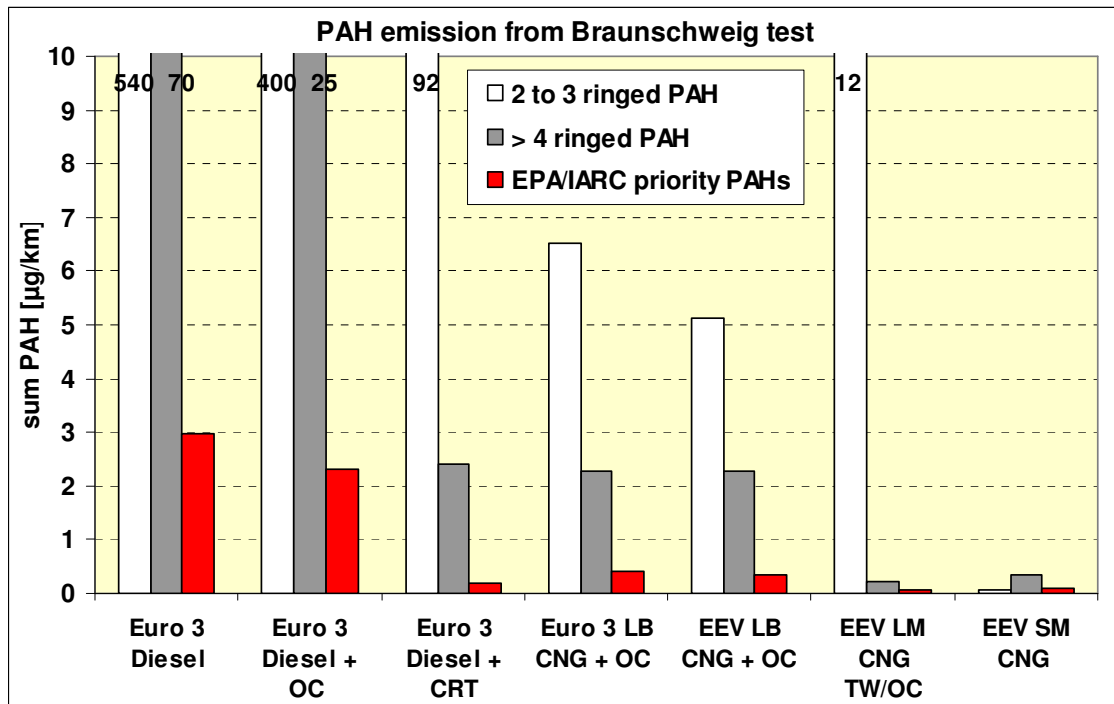




Kuva 28. Hiukkasten kokojakauma (lukumäärä).

Kuvassa 29 summattuna eri tyyppisten PAH –yhdisteiden päästöt (2 – 3 rengasta, 4 ja yli, tunnetusti syöpävaaralliset yhdisteet, lineaarinen asteikko). Joukossa on mukana seitsemän kansainvälisen syöpätutkimusjärjestön IARC:n ja Yhdysvaltojen ympäristöviranomaisen EPA:n listaamaa syöpävaaralliseksi tiedettyä tai epäiltyä PAH –yhdistettä (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



Kuva 29. Eri PAH –yhdisteiden päästösummat.

CRT –suodatin vähensi tehokkaasti kaikentyyppisiä PAH –yhdisteitä (85 – 95 %, jälkimmäinen luku syöpävaarallisille PAH –yhdisteille). CRT –dieseliin verrattuna laihaseos-maakaasu antoi hieman korkeammat syöpävaarallisten PAH –yhdisteiden lukemat, vastaavat 4+ -lukemat ja selvästi alemmat 2 – 3 –renkaisten yhdisteiden lukemat.

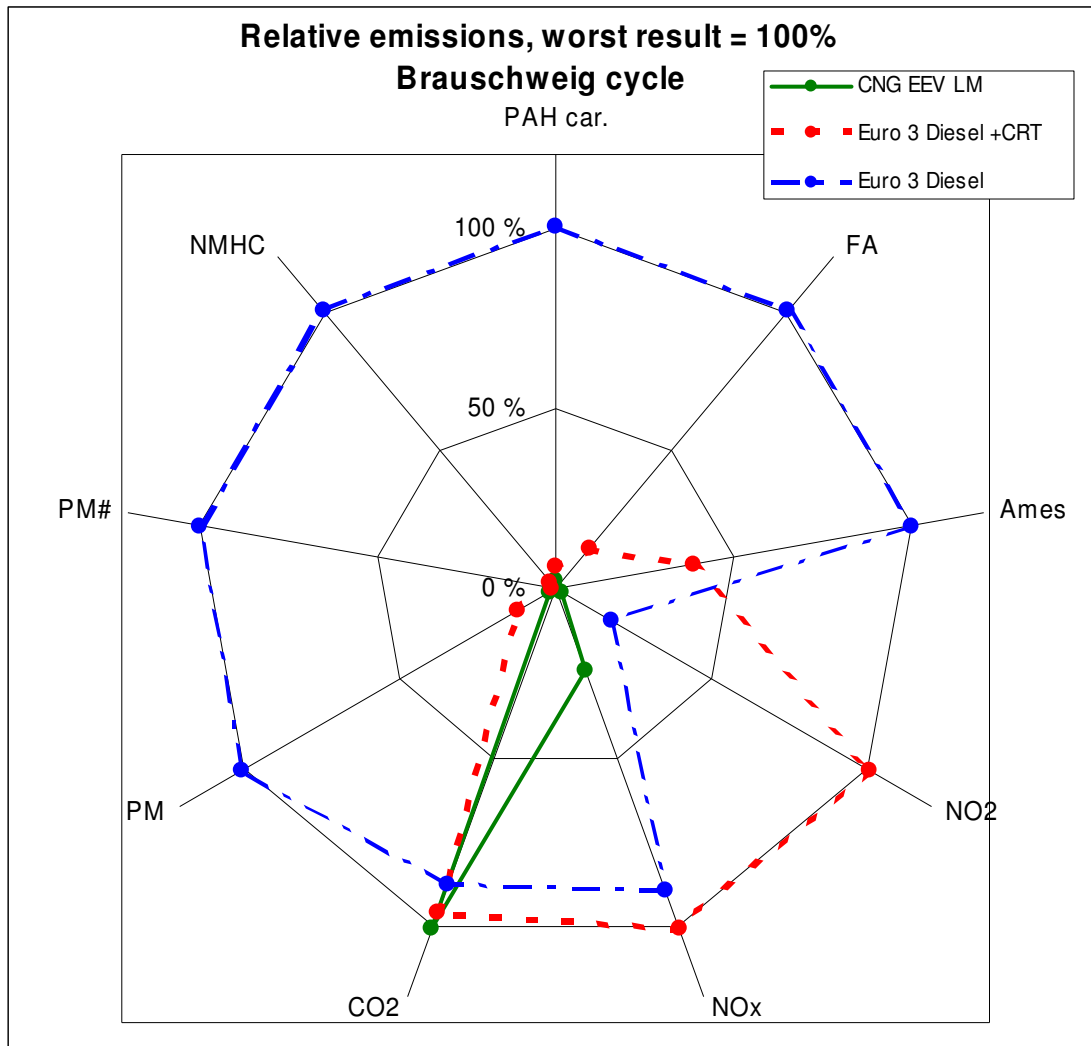
Stoikiometriset maakaasuautot erottuvat joukosta edukseen. CRT- dieseliin verrattuna sekä 2 – 3 –renkaisten että 4+ -yhdisteiden päästö on kertaluokkaa pienempi. Syöpävaarallisten PAH –yhdisteiden osalta etu CRT- dieseliin verrattuna on 50 – 70 %.

#### 4.7.6 Erikoismittausten yhteenveto

Kuva 30 esittää graafisen vertailun perusdieselille, CRT –dieselille ja lean-mix (sekajärjestelmä) maakaasuautolle. Jokaisen päästökomponentin kohdalta huonoimmalle tulokselle on annettu indeksi 100. Tarkastelun kohteita ovat NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, mutageensisuus (Ames), formaldehydi, hiukkasten massa, nanohiukkasten lukumäärä (PM #), syöpävaaralliset PAH –yhdisteet sekä NMHC.

Useimpien kriteerien osalta perusdiesel antaa huonoimman tuloksen. CRT –diesel on perusdieseliä hieman huonompi NO<sub>x</sub>:n ja CO<sub>2</sub>:n osalta, mutta selvästi huonompi NO<sub>2</sub>:n suhteen. Muilta osin CRT –diesel on selvästi perusdieseliä parempi.

Maakaasu antaa parhaimman suorituskyvyn päästöjen osalta. Ajoneuvosta riippuen maakaasu saattaa jopa tarjota CO<sub>2</sub> vähenemää.



Kuva 30. Perusdieselin, CRT –dieselin ja maakaasuauton (lean-mix sekajärjestelmä) päästövertailu. Huonoin tulos on indeksoitu 100.

## 5 YHTEENVETO

Vuosina 2002 -2004 VTT mittasi yhteensä 34:n eri Euro 1 – EEV sertifioidun kaupunkibussin pakokaasupäästöt. Kansallisen bussihankkeen (RAKEBUS) tavoitteiksi ja tehtäviksi kirjattiin alunperin:

- eri tekniikkavaihtoehtojen vertailu
- todenmukaisten päästökertoimien generointi ajossa oleville autoille sekä vanhenemiskertoimet eri tyyppiselle kalustolle
- ajosykliä vaikutukset päästöihin

RAKEBUS –hankkeen puitteissa autoista mitattiin säännellyt päästöt ja hiilidioksidipäästö. Rinnan RAKEBUS –hankkeen kanssa tehtiin perusteellinen päästövertailu diesel- ja maakaasubusseille. Rinnakkaishankkeessa tarkempaan tutkimukseen otettiin kaikkiaan seitsemän uutta tai uudehkoa autoa. Mittausten tuloksena saatiin yksityiskohtaista tietoa diesel- ja maakaasuautojen säännellyistä ja ei-säännellyistä päästöistä, mukaan lukien tietoa hiukkasten lukumääristä ja koostumuksesta.

Kaikki mittaukset tehtiin VTT:n uudessa alustadynamometrissa. Mittausten tuloksena saadaan todenmukaisia g/km –muotoisia päästökertoimia. Generoidut päästökertoimet heijastavat sekä autojen tyypillistä käyttöä että mitattujen ajoneuvojen ominaisuuksia, mukaan lukien esim. auton paino.

Säännellyissä päästöissä oli huomattavaa hajontaa Euro 1 dieselautojen ja EEV kaasuautojen muodostaessa ääripäät. NO<sub>x</sub> päästö vaihtelee 20 g - 2 g/km, joista jälkimmäinen arvo saavutetaan kehittyneimmillä kaasuautoilla. Hiukkasten osalta hajonta on vieläkin suurempaa lukuarvojen ollessa 0,6 – 0,003 g/km, ts. ero pienimmän ja suurimman arvon välillä on 200 –kertainen.

Vanhempien maakaasuautojen THC- tai oikeammin metaanipäästöt ovat varsin korkeat. Metaani ei kuitenkaan ole myrkyllistä tai reaktiivista, joten sillä ei ole vaikutusta taajamailman laatuun. Metaani sen sijaan on voimakas kasvihuonekaasu, ja tästä syystä metaanipäästöjä tulisi rajoittaa.

Lohdullista on, että todelliset päästöt näyttäisivät olevan laskusuunnassa kehittyvien Euro –luokkien myötä. Näin ollen Euro 2 autot antavat keskimäärin alemmat NO<sub>x</sub> ja hiukkaspäästöt kuin Euro 1 autot, Euro 3 autot alemmat kuin Euro 2 autot ja EEV autot lopuksi alemmat kuin Euro 3 autot. Dieselautojen osalta merkki- ja ajoneuvokohtaiset erot näyttäisivät pienentyvän moottoritekniikan kehittyessä.

Braunschweig –sykliä ajettaessa kaksiakselisen kaupunkibussin moottori tekee n. 1,8 kWh työtä kilometrille kampiakselilta mitattuna. Tämä tieto mahdollistaa alustadynamometrissa mitattujen matkaperustaisten päästöarvojen vertaamisen irtomoottoreilla ajettaviin virallisiin pakokaasujen sertifiointiarvoihin (joskin kuormitusykyissä on merkittäviä eroja). Eri autoluokista mitatut keskimääräiset

päästöarvot näyttäisivät olevan hyvin koherenssissa eri päästöluokkien raja-arvojen kanssa.

CO<sub>2</sub> päästöjen ja energian kulutuksen osalta vaihtelukerroin on suurempi kuin 1,5. Alhaisin CO<sub>2</sub> päästö saavutettiin uudella stoikiometrisella maakaasuautolla, suurin paljon ajettulla dieselautolla.

Polttoaineen kemiasta johtuen metaani tarjoaa n. 25 %:n edun lämpöarvoon suhteutetussa CO<sub>2</sub> -ominaispäästössä dieselpolttoaineeseen verrattuna. Valitettavasti kaasumootoreiden energian kulutus on huonomman hyötysuhteen takia korkeampi dieselmootoreihin verrattuna. Ero on keskimäärin 25 – 30 % perusdieseleihin ja 15 -20 % CRT -dieseleihin verrattuna. Tästä on seurauksena se, että nykytekniikalla polttoaineen kemian tuoma etu hukkuu kaasumootorin huonompaan hyötysuhteeseen, ja näin ollen diesel- ja maakaasuautot antavat likimain saman CO<sub>2</sub> -päästön.

Ajosykliä vaikutuksia tutkittaessa huomattiin, että ajosykli loppujen lopuksi vaikuttaa varsin vähän matkaperusteisiin päästökertoimiin. Tosin tarkastelussa ei ollut mukana yhtään poikkeuksellisen kevyttä tai raskasta sykliä. CO<sub>2</sub> -päästö korreloi keskimääräisen kuorman kanssa, ja dieselautojen NO<sub>x</sub>- ja hiukkaspäästöt noudattavat samaa suuntausta. Maakaasuautojen kohdalla kuorma ei juurikaan vaikuttanut NO<sub>x</sub>- tai hiukkasarvoihin.

Tiettyjen autotyyppien, merkin "A" Euro 2 -dieselautojen, merkin "C" Euro 3 -dieselautojen sekä merkin "A" Euro 3 -maakaasuautojen kohdalla tehtiin riittävästi mittauksia jotta pystytään arvioimaan ajokilometrimäärän vaikutuksia päästöihin. Merin "A" Euro 2 -dieselautot näyttäisivät olevan hyvin stabiileja sekä NO<sub>x</sub>:n että hiukkasten osalta, kun taas merkin "C" Euro 3 -dieselautojen hiukkastrendi on kasvava. Ottaen huomioon erot ajokilometrimäärissä tulokset indikoivat että merkin "C" Euro 3 -dieselautoilla voidaan saavuttaa etuja NO<sub>x</sub>:n suhteen verrattuna merkin "A" Euro 2 -dieselautoihin, mutta että pitkässä juoksussa sama ei päde hiukkaspäästöille. Euro 3 -maakaasuautot ovat stabiileja NO<sub>x</sub>:n ja hiukkasten osalta, mutta THC (metaani) sen sijaan kasvaa varsin nopeasti. Tulokset osoittavat että maakaasuautojen hapetuskatalysaattorit olisi syytä uusida noin 200.000 km:n välein, ja että sytytys- ja palamisjärjestelmien huoltoon tulisi kiinnittää huomiota.

On mielenkiintoista seurata vähäpäästöisten CRT -dieselautojen ja maakaasuautojen hiukkaspäästöjä. Tutkimuksessa mitattiin yhteensä viisi CRT -autoa, joista vain kolme oli hyvässä tai kohtuullisessa kunnossa. Pysyäkseen toimintakunnossa CRT -suodatin vaati asianmukaista huoltoa. Toisaalta, parhaimmassa tapauksessa CRT -suodatin saattaa kestää yli 800.000 km.

Maakaasuautot antavat ikään ja ajokilometreihin katsomatta hyvin alhaisen hiukkaspäästön. Maakaasuautojen osalta suurin ajokilometrimäärä oli noin 700.000 km.

Puoleen kuormaan kuormattuna kolmiakselinen bussi (67 matkustajaa) kuluttaa 10 -15 % enemmän polttoainetta kaksiakseliseen bussiin (40 matkustajaa) verrattuna. Keskimäärin NO<sub>x</sub>- ja hiukkaspäästöt kasvavat samassa suhteessa. Kun päästö- ja

kulutuslukemat lasketaan matkustajakilometriä kohti, kolmiakselinen auto on selvästi edullisempi.

Dieselpolttoainelaadun vaikutuksia päästöihin tutkittiin yhdellä Euro 2 ja yhdellä Euro 3 dieselbussilla. Peruspolttoaineena oli kaupallinen, alle 50 ppm rikkiä sisältävä suomalainen dieselpolttoaine. Vertailupolttoaineena oli ruotsalainen, vähä-aromaattinen ja lähes rikitön ( $S < 5$  ppm) Miljöklass 1 (MK 1). MK 1 alensi  $\text{NO}_x$  päästöjä noin 5 %, ja hiukkaspäästöjä peräti 15 – 25 %. Hiukkaspäästöjen vähenemää voidaan pitää merkittävänä.

Perusteellisessa diesel ja maakaasuautojen päästövertailussa mitattiin yhteensä seitsemän nykyaikaista autoa, kolme dieselautoa ja neljä maakaasuautoa. Mittausohjelmaan sisältyivät sekä säännellyt pakokaasupäästöt että suuri joukko pakokaasujen erikoismittauksia. CRT –tyyppinen hiukkassuodatin parantaa dieselautojen päästöprofiilia monella tavalla, mm. alentaen huomattavasti hiukkasmassaa, hiukkasten lukumääriä, PAH –yhdisteitä ja aldehydejä. CRT –suodattimiin liittyy kuitenkin myös tiettyjä haittapuolia, kuten suoran  $\text{NO}_2$  –päästön ja polttoaineen kulutuksen lisääntyminen.

Maakaasu tarjoaa polttoaineena monia etuja. Metaani ei ole myrkyllistä, ja metaani palaa savuttomasti. Usein väitetään maakaasulla saavutettavan merkittäviä etuja  $\text{NO}_x$ :n ja hiukkaspäästöjen osalta. Ensimmäinen väite pitää hyvinkin paikkansa, myös paljon ajettujen autojen osalta.  $\text{NO}_x$ :n suhteen laihaseos-maakaasuautot eivät välttämättä ole ylivertaisia dieselautoihin nähden. Toisaalta stoikometrisellä palamisella maakaasulla voidaan saavuttaa 75 %:n  $\text{NO}_x$  –vähenemä Euro 3 –dieselautoihin verrattuna.

VTT suoritti yli 200 pakokaasutestiä 34 eri bussiyksilölle. Tämän toiminnan ansiosta VTT:llä on nyt vankkaa tietoa eri tyyppisten bussien suoritusarvoista. VTT:n mittausten mukaan myös todelliset päästöt ovat selvässä laskusuunnassa tekniikan kehittyessä. Vaihtamalla vanhimmat autot uusinta tekniikkaa edustaviin autoihin, joko diesel- tai kaasuautoihin, bussikaluston päästöjä voitaisiin alentaa merkittävästi. VTT tulee jatkamaan busseihin kohdistuvaa mittaustoimintaa. Uusien Euro 4 ja Euro 5 pakokaasumääräysten myötä markkinoille tulee uusia autoja ja uusia teknisiä ratkaisuja. Toivottavasti myös uuden sukupolven dieselajoneuvot tuovat mukanaan päästövähennyksiä todellisissa käyttöolosuhteissa.

## 6 TEKIJÖIDEN KIITOKSET

Kansallisen RAKEBUS –projektin rahoittajia olivat:

- Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta YTV
- Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, Suunnitteluosasto
- Liikenne- ja viestintäministeriö
- Gasum Oy
- Vägverket (Ruotsi)
- VTT Prosessit

Kansainväliseltä International Association for Natural Gas Vehicles (IANGV) – järjestöltä saatu rahoitus mahdollisti syvällisen uusinta tekniikka edustavien diesel- ja maakaasuautojen päästövertailun.

Testiajoneuvot saatiin lainaksi joko liikennöitsijöiltä, autojen maahantuojilta tai autojen valmistajilta.

VTT Prosessien mittaustoiminnassa olivat mukana Tom Eklund, Reijo Mikkola, Ari-Pekka Pellikka, Pekka Piimäkorpi, Hannu Vesala ja Erkki Virtanen.

Kirjoittajat haluavat kiittää kaikkia osapuolia, jotka ovat myötävaikuttaneet tämän tutkimuksen toteutukseen.

## VIITTEET

### Yleiset viitteet:

- DieselNet.com. (2004). Emission standards. Summary of worldwide diesel emission standards. <http://www.dieselnets.com/standards.html>
- 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>
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (1989). Diesel and gasoline exhaust. <http://193.51.164.11/htdocs/monographs/vol46/46-01.htm>
- TNO. (2003). Comparison of particle size distribution and emissions from heavy-duty diesel engines and gas engines for urban buses. Joep van Ling, Rinie van Helden, Iddo Riemersma, TNO. Transport and air pollution. 12 th Symposium. Avignon, 16-18 June 2003. <http://www.automotive.tno.nl/VM/EST/publicaties/Paper%20Avignon%20urban%20buses%20jvl.pdf>
- Altshuler, S. (2002). Nanoparticle emissions. Presentation to the joint IANGV/NGVC Technical Committee Meeting. Washington D.C., October 2002. In conjunction with NGV 2002.

### Raskaiden ajoneuvomoottorien ja ajoneuvojen mittaustekniikka, metodologia:

- Direktiivi 1999/96/EC
- SAE J2711: Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-Duty Vehicles.

### Projektiraportit:

- Nylund, Nils-Olof, Ikonen, Markku, Eklund, Tom & Erkkilä, Kimmo, Bussikaluston evaluointi – Vuosiraportti 2002. Mobile<sup>2</sup>-raportti n:o M2T0241-1, VTT Prosessit, Espoo, tammikuu 2003.
- Ikonen, Markku, Erkkilä, Kimmo, Nylund, Nils-Olof & Eklund, Tom, Bussikaluston evaluointi – Vuosiraportti 2003. Mobile<sup>2</sup> -raportti n:o M2T0241-2, VTT Prosessit, Espoo maaliskuu 2004.
- Nylund, Nils-Olof, Erkkilä, Kimmo, Lappi, Maija & Ikonen, Markku, 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>



Konferenssiesitelmät:

- Nylund, Nils-Olof, Ikonen, Markku and Laurikko, Juhani, (2003). Heavy-duty vehicle in-use performance. Proceedings of DEER 2003. 9th Diesel Engine Emission Reduction Conference. August 24-28, Newport, Rhode Island, USA. <http://www.orau.gov/deer/DEER2003/presentations/session5/6.%20Ikonen%20-%20VTTnew.pdf>
- Laurikko, Juhani, Nylund, Nils-Olof, Ikonen, Markku and Erkkilä, Kimmo, (2004). The evaluation of exhaust emission performance of city buses using transient heavy-duty chassis dynamometer. FISITA World Automotive Congress. 23-27 May 2004, Barcelona, Spain. Paper F2004V082.
- Erkkilä, Kimmo, Nylund, Nils-Olof, Ikonen, Markku and Laurikko, Juhani, (2004). Evaluating exhaust emission performance of urban buses using transient heavy-duty chassis dynamometer. Proceedings of DEER 2004. 10th Diesel Engine Emission Reduction Conference. August 28-September 2, Coronado, California, USA. <http://www.orau.gov/deer/presentations/Session2/02ErkkilaKimmo.pdf>
- Nylund, Nils-Olof, Erkkilä, Kimmo & Ikonen, Markku, The IANGV Bus Emission Study. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Natural Gas vehicles. October 26-28, 2004, Buenos Aires, Argentina.

## LIITE 1

### ERI PÄÄSTÖKOMPONENTTIEN MERKITYS

Typen oksideja (NO<sub>x</sub>) 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 CO<sub>2</sub>: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 syöpävaarallisia 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.

Maakaasumoottoreissa metaanin osuus kokonaishiilivedyistä (THC) on tyypillisesti yli 90 %, ja vain pieni osa on NMHC –hiilivetyjä. Tällä hetkellä eurooppalaiset raskaita ajoneuvomoottoreita koskevat pakokaasumääräykset rajoittavat kokonaishiilivetyjä (THC) dieselmoottoreiden ja sekä metaania että NMHC –päästöjä maakaasumoottorien 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 vähitellen NO<sub>2</sub>:ksi. NO<sub>2</sub> on pistävän hajuista, ja se ärsyttää hengitysteitä. 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.

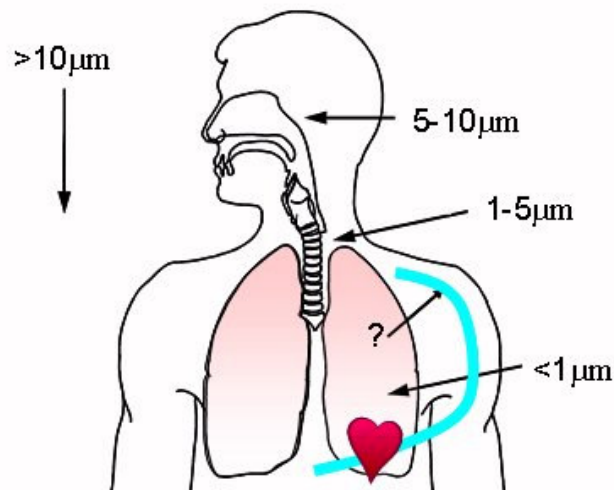
Perinteisen dieselmoottorin pakokaasuissa on pääasiassa NO:ta (NO:n osuus NO<sub>x</sub>:stä on yli 90 %). Tietyt pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteet, esimerkiksi tehokkaat hapetuskatalysaattorit ja CRT:n tapaiset katalysoidut hiukkassuodattimet lisäävät suoran NO<sub>2</sub>:n osuutta. Tämä on ei-toivottu 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, korkean molekyylipainon omaavien PAH –hiilivetyjen kantajina.



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

Yhteensä 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). Alemman molekyylipainon omaavat 2 – 3 renkaiset PAH- yhdisteet, jotka esiintyvät lähinnä puolihaihtuvassa faasissa, on katsottu vähemmän myrkyllisiksi.

Nitro-PAH –yhdisteitä (esim. 1-nitropyreeni) saattaa syntyä itse palamistapahtumassa tai ilmakemiallisten reaktioiden seurauksena. IARC on luokitellut useat nitro-PAH –yhdisteen mahdollisesti syöpävaaralliseksi (IARC 1989).

Kiinteille pakokaasuhiukkasille ja tietyin varauksin myös puolihaihtuville yhdisteille voidaan tehdä mutageenisuutta mittaava Ames –bakteerikoe. Nitro-PAH –yhdisteet ovat suoraan vaikuttavia mutageenejä, ja ne reagoivat *Salmonella typhimurium* testisoluiissa ilman metabolista aktivointia (TA98-S9). Metabolisen aktivoinnin avulla (+S9) avulla saadaan tyypillisesti aikaan lisävastetta välillisesti vaikuttavista ei-substituoiduista PAH –yhdisteistä (Maron & Ames 1983).

Pienimmät, alle 30 – 50 nm hiukkaset ovat enimmäkseen tiivistyneitä nestemäisiä ja haihtuvia yhdisteitä. Näitä kutsutaan nukleatiomoodin hiukkasiksi. Uusissa vähäpäästöisissä moottoreissa nukleatiomoodin hiukkaset edustavat yli 90 %:a hiukkasten kokonaislukumäärästä. Nämä hiukkaset muodostuvat poltto- ja voiteluaineperäisen rikin sulfaateista ja lisäksi muista tiivistyneistä yhdisteistä, lisäksi pieni määrä kiinteitä poltto- ja voiteluaineiden ainesosasia 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 öljyvudolle 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 dominoi. Formaldehydi on luokiteltu haitalliseksi EPA:n Mobile Source Air Toxics -listalla (MSAT, taulukko 1). Dieselhiukkaset sinällään on luokiteltu terveydelle vaarallisiksi. Taulukkoon 1 on myös merkitty seitsemän syöpävaaralliseksi luokiteltua PAH –yhdistettä (vrt. aikaisempaan). Katalysaattorin käyttö maakaasumoottorissa alentaa formaldehydipäästöä merkittävästi.

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).

20