



# Euro VI päästötason kaupunkibussien käytönaikaiset päästöt

Kirjoittajat:

Veikko Karvonen, Nils-Olof Nylund & Seppo Kallonen

Julkinen

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                               |                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Raportin nimi</b><br>Euro VI päästötason kaupunkibussien käytönaikaiset päästöt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                               |                                                |
| <b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b><br>Helsingin seudun liikenne HSL, Helsingin kaupungin ympäristökeskus, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, Trafikverket (Ruotsi), Transportøkonomisk institutt TØI (Norja)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                               | <b>Asiakkaan viite</b>                         |
| <b>Projektin nimi</b><br>Euro VI fleet test                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                               | <b>Projektin numero/lyhytnimi</b>              |
| <b>Raportin laatija(t)</b><br>Veikko Karvonen, Nils-Olof Nylund & Seppo Kallonen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                               | <b>Sivujen/liitesivujen lukumäärä</b><br>265/1 |
| <b>Avainsanat</b><br>Euro VI, NO <sub>x</sub> päästöt, käytön aikainen seuranta, lämpötilan vaikutus                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                               | <b>Raportin numero</b><br>VTT-CR-03289-16      |
| <b>Tiivistelmä</b><br><p>Kolme Euro VI tason dieselbussia varustettiin seurantalaitteistoilla, jotka mahdollistavat SCR katalysaattorin konversiotehokkuuden mittaamisen jatkuvatoimisesti. Hankkeen aikana tehtiin mittauksia laboratorioissa, suljetulla testiradalla ja normaalissa ajossa. Hankkeen avulla haluttiin muodostaa kuva autojen päästötasosta todellisessa ajossa, mukaan lukien talviset käyttöolosuhteet. Kenttäkokeen aikana sekä seurantalaitteissa että itse autoissa esiintyi häiriöitä. Yhdestä autosta saatiin kelvollista seurantadataa vain 18 päivältä, kun parhaimmasta autosta saatiin mittausdataa 377 päivältä. Jälkimmäisestä autosta saatu data mahdollisti SCR järjestelmän toiminnan monitoroinnin lämpötilaikkunassa -20...+20 °C. SCR järjestelmien keskimääräinen muunnostehokkuus on:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle 0 °C: 80 %</li> <li>• Lämpötila-alue 0...+10 °C: noin 90 %</li> <li>• Yli +10°C: noin 95 %</li> </ul> <p>Todettujen konversioasteiden ja arvioidun ”raakaemission” perusteella luotiin arviot todellisille päästökertoimille eri lämpötiloissa. Arvio lämpötila-alueelle 0...+10 °C (keskilämpötila Helsingissä on noin +5 °C) on 1,5 g NO<sub>x</sub>/km. Tämä tarkoittaa, että siirtyminen EEV tasoisista autoista (keskiarvo lämpimässä tehtyjen laboratoriomittausten tuloksista 6,5 g NO<sub>x</sub>/km) Euro VI autoihin vähentää todellisia NO<sub>x</sub> päästöjä ainakin 75 %.</p> <p>Hankkeen tulosten perusteella voidaan siis perustellusti sanoa, että Euro VI-päästöluokan bussit toimivat selkeästi edellisiä päästöluokkia paremmin, joskin suoraa vertailua EEV-päästöluokan ajoneuvojen jälkikäsittelyjärjestelmien lämpenemisajoista ja toteutuneista alenemista ei ole saatavilla. Uusina Euro VI ajoneuvot toimivat suorastaan erinomaisesti.</p> |                               |                                                |
| <b>Luottamuksellisuus</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Julkinen                      |                                                |
| <b>Laatija</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Tarkastaja</b>             | <b>Hyväksyjä</b>                               |
| Veikko Karvonen<br>Tutkija                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Matti Kytö<br>Johtava tutkija | Jukka Lehtomäki<br>Tutkimustiimin päällikkö    |
| <b>VTT:n yhteystiedot</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                               |                                                |
| VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain<br>Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                               |                                                |

## Sisällysluettelo

---

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sisällysluettelo.....                                                             | 2  |
| 1. Johdanto.....                                                                  | 4  |
| 2. Tutkimuksen tavoite .....                                                      | 6  |
| 3. Hankkeen osapuolet .....                                                       | 6  |
| 4. Tutkimusmenetelmän kuvaus.....                                                 | 7  |
| 5. Euro VI päästöluokan ajoneuvojen päästöjen jälkikäsittelytekniikka.....        | 9  |
| 6. Tulokset .....                                                                 | 11 |
| 6.1 Alustadynamometrimittausten tulokset.....                                     | 11 |
| 6.2 Moottoriradalla mitatut tulokset .....                                        | 12 |
| 6.3 Käytönaikaisen seurannan tulokset.....                                        | 13 |
| 6.3.1 Yleistä.....                                                                | 13 |
| 6.3.2 SCR järjestelmien lämpenemisaika.....                                       | 13 |
| 6.3.3 Keskimääräiset NO <sub>x</sub> konversioasteet.....                         | 15 |
| 6.4 Loppumittaus alustadynamometrilla.....                                        | 19 |
| 6.5 Arvio Euro VI tasoisten bussien todellisesta NO <sub>x</sub> päästöistä ..... | 20 |
| 6.6 Yhteenveto hankkeessa kerätyistä tuloksista.....                              | 22 |
| 7. Yhteenveto.....                                                                | 23 |
| Lähdeviitteet.....                                                                | 25 |
| Liitteet .....                                                                    |    |

Raportissa käytetyt lyhenteet:

|                 |                                                                                                                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DOC             | Diesel Oxidation Catalyst                                                                                                |
| EGR             | Exhaust Gas Recirculation, pakokaasujen takaisinkierätyk                                                                 |
| DPF             | Diesel Particulate Filter                                                                                                |
| ASC             | Ammonia Slip Catalyst                                                                                                    |
| NO <sub>x</sub> | Typpenoksidit                                                                                                            |
| NO              | Typpimonoksidi                                                                                                           |
| NO <sub>2</sub> | Typpidioksidi                                                                                                            |
| PEMS            | Portable Emission Measurement System                                                                                     |
| SCR             | Selective Catalytic Reduction, typenoksidipäästöjen pelkistämiseen käytettävä katalysaattoritekniikka (ureaan perustuva) |

## 1. Johdanto

Vuoden 2013 alusta voimaan tullut Euro VI päästöluokka raskaille ajoneuvoille on alentanut linja-autokaluston säänneltyjä päästöjä merkittävästi. Aikaisempiin päästöluokkiin verrattuna Euro VI-päästöluokan raja-arvot typenoksidien (NO<sub>x</sub>) ja partikkelimassan (PM) suhteen ovat merkittävästi alempia. Lisäksi Euro VI päästöluokassa on raja-arvo partikkelien lukumäärälle (PN).

*Taulukko 1: Raskaiden ajoneuvomoottorien päästörajat. ([www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com))*

EU Emission Standards for Heavy-Duty Diesel Engines: Steady-State Testing

| Stage    | Date             | Test      | CO    | HC   | NO <sub>x</sub> | PM                | PN                   | Smoke |
|----------|------------------|-----------|-------|------|-----------------|-------------------|----------------------|-------|
|          |                  |           | g/kWh |      |                 |                   | 1/kWh                | 1/m   |
| Euro I   | 1992, ≤ 85 kW    | ECE R-49  | 4.5   | 1.1  | 8.0             | 0.612             |                      |       |
|          | 1992, > 85 kW    |           | 4.5   | 1.1  | 8.0             | 0.36              |                      |       |
| Euro II  | 1996.10          |           | 4.0   | 1.1  | 7.0             | 0.25              |                      |       |
|          | 1998.10          |           | 4.0   | 1.1  | 7.0             | 0.15              |                      |       |
| Euro III | 1999.10 EEV only | ESC & ELR | 1.5   | 0.25 | 2.0             | 0.02              |                      | 0.15  |
|          | 2000.10          |           | 2.1   | 0.66 | 5.0             | 0.10 <sup>a</sup> |                      | 0.8   |
| Euro IV  | 2005.10          |           | 1.5   | 0.46 | 3.5             | 0.02              |                      | 0.5   |
| Euro V   | 2008.10          |           | 1.5   | 0.46 | 2.0             | 0.02              |                      | 0.5   |
| Euro VI  | 2013.01          | WHSC      | 1.5   | 0.13 | 0.40            | 0.01              | 8.0×10 <sup>11</sup> |       |

a - PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>

Table 2

EU Emission Standards for Heavy-Duty Diesel and Gas Engines: Transient Testing

| Stage    | Date             | Test | CO    | NMHC              | CH <sub>4</sub> <sup>a</sup> | NO <sub>x</sub> | PM <sup>b</sup>   | PN <sup>e</sup>      |
|----------|------------------|------|-------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|
|          |                  |      | g/kWh |                   |                              |                 |                   | 1/kWh                |
| Euro III | 1999.10 EEV only | ETC  | 3.0   | 0.40              | 0.65                         | 2.0             | 0.02              |                      |
|          | 2000.10          |      | 5.45  | 0.78              | 1.6                          | 5.0             | 0.16 <sup>c</sup> |                      |
| Euro IV  | 2005.10          |      | 4.0   | 0.55              | 1.1                          | 3.5             | 0.03              |                      |
| Euro V   | 2008.10          |      | 4.0   | 0.55              | 1.1                          | 2.0             | 0.03              |                      |
| Euro VI  | 2013.01          | WHTC | 4.0   | 0.16 <sup>d</sup> | 0.5                          | 0.46            | 0.01              | 6.0×10 <sup>11</sup> |

a - for gas engines only (Euro III-V: NG only; Euro VI: NG + LPG)

b - not applicable for gas fueled engines at the Euro III-IV stages

c - PM = 0.21 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>

d - THC for diesel engines

e - for diesel engines; PN limit for positive ignition engines TBD

EEV- ja Euro IV luokista lähtien dieselmoottorit testataan kolmella eri menetelmällä, vakiokuorma-koe (taulukko 1, osa 1), kuormanmuutoskoe (savutuskoe, taulukko 1, osa 1) ja transienttikoe (nopeasti muuttuva dynaaminen kuormitus, taulukko 1, osa 2).

Euro V ja Euro VI päästörajat eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska mittausmenetelmät muuttuivat Euro VI määräyksiin siirryttäessä. Sekä vakiokuormakoe (ESC -> WHSC) että transienttikoe (ETC -> WHTC) muuttuivat. Vakiokuormakoe ajetaan aina täysin lämменneellä moottorilla. Aikaisemmin myös transienttikoe ajettiin täysin lämменneellä moottorilla, mutta Euro VI:sta alkaen tulos muodostuu kylmällä moottorilla ajatun kokeen (painoarvo 14 %) ja lämpimällä moottorilla ajatun kokeen (painoarvo 86 %) yhdistelmästä.

Transienttikokeen osalta Euro VI –päästöluokan myötä typenoksidien raja-arvo laski Euro V päästötasosta 77 % ja partikkelimassan osalta 67 %. Tässä on siis huomioitava, että Euro VI raja-arvoihin on leivottu sisään em. kylmäkäynnistysosuus.

VTT:n alustadynamometrimittauksissa toteutuneen päästöjen aleneman on todettu olevan suurempi kuin mitä raja-arvojen ero antaisi olettaa. Yksi vaikuttava tekijä tässä on se, että VTT:n alustadynamometrimittaukset on perinteisesti tehty lämpimillä moottoreilla.

Merkittävämpi tekijä on kuitenkin se, että Euro VI päästömääräyksiin sisältyy ns. Real Driving Emission vaatimus. Viranomaisen voi määrätä ajoneuvoja liikuteltavalla pakokaasumittauslaitteistolla (Portable Emission Measurement System, PEMS) tehtävään käytön aikaiseen valvontaan. Ajoneuvon tyyppihyväksynnässä sallitut päästöt saa käytössä olevassa autossa ylittää enintään 50 prosentilla riippumatta siitä miten ajoneuvoa ajetaan. Mitään vastaavaa vaatimusta ei sisältynyt aikaisempiin päästömääräyksiin. Koska autonvalmistajat joutuvat nyt huolehtimaan alhaisesta päästötasosta todellisissa ajotilanteissa eikä pelkästään tyyppihyväksymiskokeessa, suorituskäytössä on tapahtunut todella merkittävä parannus.

Kaupunkibusseista ajoneuvodynamometrillä ajetuissa kokeissa Euro VI -päästöluokan bussit ovat tuottaneet erittäin hyvät tulokset säänneltyjen lähipäästöjen osalta. Euro VI – päästöluokan ajoneuvoille odotettiin korkeampaa polttoaineenkulutusta monimutkaisemman päästöjenkäsittelylaitteiston sekä sen vaatiman lämpötilan ylläpidon vuoksi. Suoritettujen mittausten perusteella polttoaineenkulutus näyttää kuitenkin edelliseen päästöluokkaan verrattuna laskeneen. Eri päästöluokkien kaupunkibussien päästöt on julkaistu kaupunkibussien päästötietokannassa, jonka vuoden 2015 päivitys sisältää jo kattavan otoksen markkinoilta saatavissa olevista Euro VI-päästötason busseista (Taulukko 2).

Taulukko 2: Linja-autojen päästötietokanta 2015.

| Braunschweig                                                                            | Lukumäärä<br>n | Ajomäärä<br>Min | Max     | CO<br>g/km | HC<br>g/km | CH <sub>4</sub> *<br>g/km | NOx<br>g/km | PM<br>g/km | CO <sub>2</sub><br>g/km | CO <sub>2</sub><br>eqv**<br>g/km | FC<br>kg/100km | FC<br>MJ/km |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|---------|------------|------------|---------------------------|-------------|------------|-------------------------|----------------------------------|----------------|-------------|
| 2 - akseliset                                                                           |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| Diesel Euro I                                                                           | 2              | 555025          | 672700  | 1.39       | 0.32       |                           | 15.59       | 0.436      | 1220                    | 1220                             | 38.6           | 16.6        |
| Diesel Euro II                                                                          | 13             | 160500          | 1125674 | 1.60       | 0.21       |                           | 12.86       | 0.213      | 1286                    | 1286                             | 40.7           | 17.5        |
| Diesel Euro III                                                                         | 14             | 15934           | 786164  | 0.85       | 0.12       |                           | 8.48        | 0.209      | 1213                    | 1213                             | 38.4           | 16.6        |
| Diesel Euro IV                                                                          | 8              | 6105            | 474152  | 2.96       | 0.10       |                           | 8.36        | 0.112      | 1207                    | 1207                             | 38.2           | 16.5        |
| Diesel Euro V***                                                                        |                |                 |         | 2.96       | 0.10       |                           | 7.51        | 0.089      | 1207                    | 1207                             | 38.2           | 16.5        |
| Diesel EEV                                                                              | 21             | 1020            | 696931  | 1.08       | 0.03       |                           | 6.49        | 0.068      | 1166                    | 1166                             | 36.9           | 15.9        |
| Diesel Euro VI                                                                          | 6              | 15371           | 65201   | 0.16       | 0.00       |                           | 0.08        | 0.013      | 1118                    | 1118                             | 35.4           | 15.3        |
| Ethanol EEV                                                                             | 4              | 25249           | 133297  | 4.01       | 0.69       |                           | 6.25        | 0.022      | 1321                    | 1321                             | 69.2           | 17.5        |
| Diesel Hyb. EEV                                                                         | 5              | 2602            | 136255  | 0.89       | 0.02       |                           | 5.12        | 0.046      | 848                     | 848                              | 26.9           | 11.6        |
| Diesel Hyb. Euro VI                                                                     | 1              | 68310           | 68310   | 1.66       | 0.00       |                           | 0.21        | 0.011      | 943                     | 943                              | 29.8           | 12.9        |
| CNG Euro II                                                                             | 2              | 211000          | 672946  | 4.32       | 7.12       | 6.76                      | 16.92       | 0.009      | 1068                    | 1224                             | 42.1           | 20.7        |
| CNG Euro III                                                                            | 2              | 37600           | 237189  | 0.05       | 2.64       | 2.51                      | 9.44        | 0.019      | 1111                    | 1168                             | 43.7           | 21.5        |
| CNG EEV                                                                                 | 8              | 1824            | 640252  | 2.78       | 1.28       | 1.21                      | 3.17        | 0.008      | 1196                    | 1224                             | 47.1           | 23.2        |
| 2 - akseliset yhdistetty kylmä ja lämmin testi ****                                     |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| Diesel Euro VI****                                                                      | 1              | 26977           | 26977   | 0.21       | 0.02       |                           | 0.50        | 0.035      | 1072                    | 1072                             | 33.9           | 14.6        |
| 2 - akseliset, kevyt                                                                    |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| Diesel****                                                                              | 4              | 993             | 26436   | 0.88       | 0.03       |                           | 6.70        | 0.047      | 953                     | 953                              | 30.17          | 13.0        |
| Diesel Euro VI                                                                          | 2              | 8977            | 21726   | 0.14       | 0.01       |                           | 0.37        | 0.006      | 961                     | 961                              | 30.41          | 13.1        |
| 3 - akseliset                                                                           |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| Diesel Euro V                                                                           | 4              | 1400            | 232494  | 6.68       | 0.03       |                           | 3.16        | 0.089      | 1414                    | 1414                             | 44.8           | 19.3        |
| Diesel EEV                                                                              | 7              | 5444            | 94910   | 1.24       | 0.04       |                           | 6.02        | 0.072      | 1462                    | 1462                             | 46.3           | 19.9        |
| Diesel Euro VI                                                                          | 5              | 10215           | 86406   | 0.18       | 0.00       |                           | 0.29        | 0.007      | 1379                    | 1379                             | 43.6           | 18.8        |
| CNG EEV                                                                                 | 5              | 121773          | 651529  | 10.96      | 1.69       | 1.61                      | 6.37        | 0.010      | 1319                    | 1356                             | 51.9           | 25.5        |
| (ind.x) = yksilöin tunnistet                                                            |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| *Maakaasuautoille käytetty CH <sub>4</sub> = THC * 0.95, dieselille CH <sub>4</sub> = 0 |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| ** CO <sub>2</sub> eqv = CO <sub>2</sub> + 23 * CH <sub>4</sub>                         |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| *** Euro V tulokset arvioitu Euro IV tulosten perusteella                               |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| **** sisältää tulokset päästöluokista Euro III, Euro IV ja EEV                          |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |
| ***** Painotettu keskiarvo kylmän (14 %) ja lämpimän (88 %) testin tuloksista           |                |                 |         |            |            |                           |             |            |                         |                                  |                |             |

Lämminneillä moottoreilla tehdyissä mittauksissa typenoksidipäästöt ovat laskeneet Euro VI – päästöluokkaan tultaessa 99 % ja hiukkasmassa 81 % EEV-kalustoon verrattuna. Tulokset

ovat siis erittäin hyviä. VTT on sittemmin alkanut mitata Euro VI autoja siten, että ilmoitettu tulos on kylmän ja lämpimän testin painotettu tulos. Kylmällä testillä tarkoitetaan tässä yhteydessä mittausta, joka alkaa käytännössä yön yli normaalissa huonelämpötilassa seisseen ajoneuvon käynnistyksestä, koelämpötila sinällään ei ole alhainen. Taulukkoon 2 sisältyy tällainen tulos yhden auton osalta. Verrattaessa tuloksia EEV keskiarvoon (tämä lämpimillä moottoreilla) päästöjen alenema on 92 % typen oksidien osalta ja 49 % hiukkasmassan osalta.

## 2. Tutkimuksen tavoite

---

Linja-autokaluston päästömittauksissa on havaittu ajoneuvojen päästöjen toteutuvan erisuurina riippuen ajetusta testisyklistä, kuormasta, ympäristön olosuhteista ja käytetystä päästöjä alentavasta teknologiasta. Uusien bussien tultua liikenteeseen on tärkeää tietää toteutuvatko laboratoriossa mitatut päästöt myös ajoneuvojen todellisissa käyttöolosuhteissa.

Euro VI – kaupunkibussien kenttätestihanke perustettiin seuraamaan uusien Euro VI – bussien käytönaikaisia päästöjä. Hankkeessa keskityttiin typenoksidipäästöihin, jotka ovat Helsingin seudulla ilmanlaadun kannalta kriittisempiä ja lisäksi päästöjenkäsittelylaitteiston toiminnan suhteen herkempiä käyttöolosuhteiden vaihtelulle.

Hankkeessa seurattiin kaluston päästöjä ajanjaksolla 3/2015 – 6/2016. Seurantajakson pituudella pyrittiin saamaan riittävän kattava kuva ajoneuvojen toiminnasta päästöjenjälkikäsittelylaitteistojen kannalta kriittisissä talviolosuhteissa.

Perimmäinen tavoite oli siis varmistaa, että laboratoriossa erittäin hyvin toimivat Euro VI bussit tuovat merkittäviä päästövähennyksiä typen oksideihin myös jokapäiväisessä ympärivuotisessa käytössä. Yksi selvitettävä parametri oli mihin keskimääräiseen typen oksidien reduktioon Euro VI autoissa oleva NO<sub>x</sub> katalysaattorijärjestelmä (Selective Catalytic Reduction SCR, typen oksidien pelkistys urean avulla) kykenee.

Tutkimuksen tuloksilla arvellaan olevan käyttöä arvioitaessa ilman laadun kehittymistä Helsingin alueella.

## 3. Hankkeen osapuolet

---

Hankkeen rahoittajat olivat:

- Helsingin Seudun Liikenne HSL
- Helsingin kaupungin ympäristökeskus
- Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi
- Trafikverket (Ruotsi)
- Transportøkonomisk institutt TØI (Norja)

Hankkeen tutkijaosapuolena toimi Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja laitetoimittajana Proventia Emission Control Oy.

## 4. Tutkimusmenetelmän kuvaus

Hankkeen tutkimusmenetelmä nojaa voimakkaasti aikaisempaan kokemukseen kaupunkibussien päästömittauksista. Hankkeen perustana toimi kolmen linja-auton ryhmä, joihin on asennettu Proventia Emission Control Oy:n valmistamat seurantajärjestelmät. Testiin valittiin kolme erityyppistä linja-autoa. Valituiksi päätyneisiin malleihin vaikutti niiden yleisyys pääkaupunkiseudun liikenteessä, sovelletut tekniset ratkaisut, sekä kaluston saatavuus testiä käynnistettäessä. Testiin haluttiin ottaa mukaan yksi raskaampi 3-akselinen kaupunkibussi, jossa moottorin kuormitusaste on yleensä 2-akselista bussia suurempi ja tätä kautta moottorin tuottamat päästöt ovat korkeampia. Toisaalta korkeamman kuormitusasteen ja siitä seuraavan korkeampien pakokaasujen lämpötilojen myötä jälkikäsittelyjärjestelmä toimii tehokkaammin. Autot instrumentoitiin helmikuussa 2015.

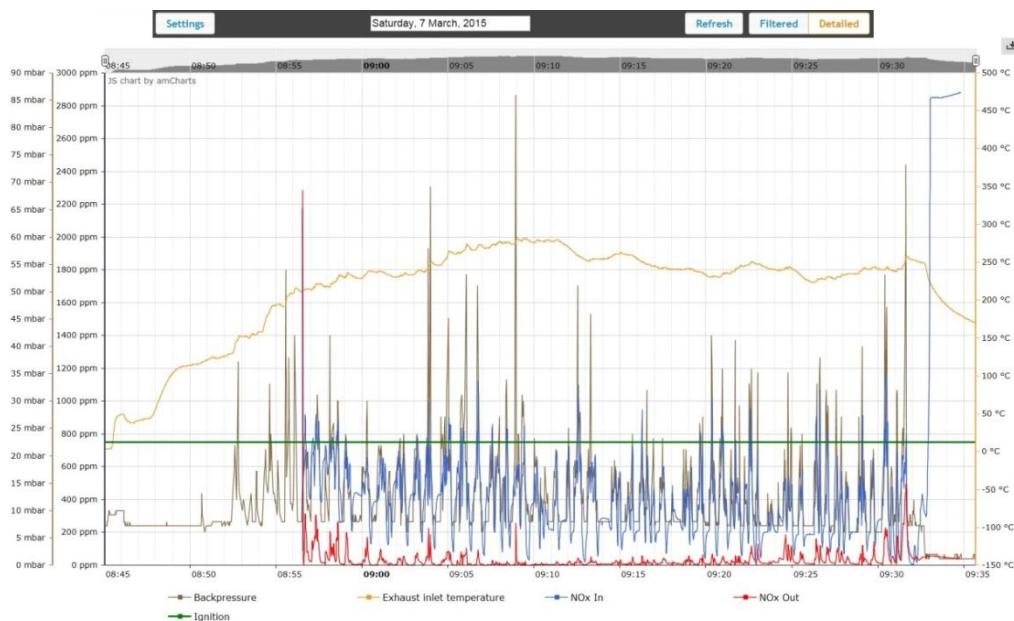
Koska otos kattaa vain kolmea autoa, yhtä autoa per merkki, autojen merkkejä ja malleja ei tässä raportissa kerrota, ainoastaan pakokaasujen puhdistusjärjestelmän konfiguraatio (taulukko 3). Mittausjärjestely on liian karkea jotta tuloksista voitaisiin päätellä automerkkien välisiä eroja.

Autoissa A ja C on sekä pakokaasujen takaisinkierrätys (EGR) että SCR katalysaattori, autossa B pelkästään SCR katalysaattori. Teoriassa, jos pelkällä SCR katalysaattorilla varustetussa autossa SCR järjestelmä ei jostakin syystä toimisi, tämä merkitsisi huomattavan korkeita NO<sub>x</sub> päästöjä ilman pakokaasujen takaisinkierrätyksen vaimentavaa vaikutusta (kts. lisää kohta 5).

*Taulukko 3: Seurantaan valitut ajoneuvot.*

| Tunnus | Tyyppi                    | Päästöjenjälkikäsittelylaitteisto |
|--------|---------------------------|-----------------------------------|
| A      | 2-akselinen kaupunkibussi | SCR+DPF+EGR                       |
| B      | 2-akselinen kaupunkibussi | SCR+DPF                           |
| C      | 3-akselinen kaupunkibussi | SCR+DPF+EGR                       |

Päästöjen seurantajärjestelmä (Proventian PROCARE Drive) koostuu kahdesta NO<sub>x</sub>-anturista ja tiedonkeruujärjestelmästä. NO<sub>x</sub>-anturit on sijoitettu ennen ja jälkeen päästöjen jälkikäsittelyjärjestelmää. Pelkällä järjestelmän jälkeen asennetulla anturilla saataisiin tallennettua tieto järjestelmän läpi tulevan pakokaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuudesta. Kahta anturia käytettäessä saadaan lisäksi tieto järjestelmän toimivuudesta, sekä siitä kuinka suuren osuuden päästöistä jälkikäsittelyjärjestelmä pystyy poistamaan. Hiukkasmassan mittaamiselle vastaavaa kevyttä järjestelyä ei ole saatavilla. Hiukkaspäästöjä alennetaan hiukkassuodattimella, jonka toiminta ei ole yhtä olosuhderiippuvaista kuin SCR-järjestelmällä.



Kuva 1: Kuvakaappaus seurantajärjestelmän käyttöliittymästä.

Tiedonkeruujärjestelmä kerää tietoja NO<sub>x</sub> antureilta, ajoneuvoa koskevia tietoja ajoneuvon dataväylästä, tiedon ajoneuvon sijainnista, sekä välittää tiedot reaaliaikaisesti palvelimelle. Palvelimelta tiedot ovat käyttäjien luettavissa koska tahansa. Laitteistoa voidaan näin ollen käyttää tiedon keräämisen lisäksi ajoneuvojen toiminnan seuraamiseen.

SCR –järjestelmän toimintaa arvioidaan kahdella tunnusluvulla. Lämpenemisaika kuvaa sitä aikaa, jonka järjestelmä tarvitsee tuottaakseen tietyn aleneman, esim. 90 %, typenoksidien tasossa. Typenoksidien alenema puolestaan kuvaa syklin tai muun ajosuorituksen yli toteutunutta typenoksidipäästöjen alenemaa. Alenema ei kuitenkaan huomioi välittömästi kylmäkäynnistyksen jälkeen tuotettuja päästöjä, koska typenoksidianturit voidaan kytkeä vasta kun lämpötila on noussut riittävästi.

Varsinaisessa kokeellisessa tutkimuksessa oli kolme erillistä vaihetta:

- Laitteistojen kalibrointi VTT:n alustadynamometrilla
- Laitteistojen kokeilua ja ajoneuvoverailua talviolosuhteissa moottoriradalla
- Varsinainen kenttäkoe ja toiminnallisen datan keräys

Ajoneuvojen päästöjenkäsittelylaitteiden ja seurantajärjestelmän toimivuuden varmistamiseksi ajoneuvojen päästöt mitattiin myös ajoneuvodynamometrilla. Dynamometrimittauksissa referenssisyklinä käytettiin Braunschweig -sykliä. Samaa sykliä on käytetty myös linja-autojen päästötietokantaan sisällytetyissä kokeissa. Vertailukelpoisuuden takaamiseksi koejärjestelyt noudattivat muutenkin samaa käytäntöä päästötietokantaan tehtävien kokeiden kanssa. Simuloituna testikuormana käytettiin ajoneuvon omaa massaa lisättynä puolella ajoneuvon kantavuudesta. Ajoneuvojen anturointi ja laitteiston testaukset suoritettiin helmikuussa 2015.

Jatkuvasta seurannasta kerättävän datan vertailun helpottamiseksi testiryhmän ajoneuvoilla ajettiin testisyklejä suljetulla moottoriradalla talviaikaan. Testiajoja varten ajoneuvot kuormattiin kantavuuden perusteella puoleen kuormaan. Testit aloitettiin kaikilla ajoneuvoilla kylmäkäynnistyksellä, jonka jälkeen ajettiin Braunschweig- ja Millbrook -syklejä (Taulukko 44). Testisyklien nopeusprofiilit ovat raportin liitteenä. Sykliajon aikana autosta tallennettiin

päästöjenseurantalaitteiden lisäksi ajoneuvoon liittyviä tietoja. Testit suoritettiin Botniaringin moottoriradalla Jurvassa 7.3.2015.

*Taulukko 4: Testisyklien perustiedot.*

| Sykli       | Keskinopeus (km/h) | Ajomatka (km) | Aika (min) |
|-------------|--------------------|---------------|------------|
| Braunshweig | 22.5               | 10.873        | 29         |
| Millbrook   | 14.2               | 8.968         | 38         |

Hankkeen aikana yhdellä seurantaan kuuluneista busseista ajettiin alustadynamometrikoe päästöjenhallintajärjestelmän ollessa vikaantuneena.



*Kuva 2: Testisyklin ajoa suljetulla moottoriradalla*

## 5. Euro VI päästöluokan ajoneuvojen päästöjen jälkikäsittelytekniikka

Euro VI –päästöluokan erittäin matalat lähipäästöt perustuvat pitkälle kehitettyjen pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiden käyttöön. Aikaisemmissa päästöluokissa valmistajat pystyivät valitsemaan eri vaihtoehtojen välillä, mutta Euro VI rajojen tiukkuudesta johtuen valmistajien valinnanvara on huomattavan paljon pienempi. Päästöjen jälkikäsittelyssä keskitytään pitkälti typenoksidien ja hiukkaspäästöjen alentamiseen.

Useat ajoneuvovalmistajat käyttävät pakokaasun takaisinkierätyksen (EGR) ja SCR-katalysaattorin yhdistelmää typenoksidipäästöjen vähentämiseen Euro VI-moottoreissa. EGR alentaa moottorista suoraan ulos tulevaa NO<sub>x</sub> päästöä (moottorin sisäinen toimenpide), SCR edustaa pakokaasujen jälkikäsittelyä.

Pakokaasujen takaisinkierätyksessä laskee palamislämpötilaa ja vapaan hapen määrää alentaen näin typenoksidien määrää, mutta laskee samalla moottorin hyötysuhdetta.

Euro VI taso voidaan saavuttaa myös pelkällä SCR-järjestelmällä (kts. kommentti edellä), mutta toisaalta pelkällä EGR:n käytöllä ei ole mahdollista saavuttaa Euro VI  $\text{NO}_x$ -tasoa. Eräät valmistajat kylläkin tekivät Euro V moottoreita käyttämällä pelkästään EGR:ää typen oksidien rajoittamiseen.

SCR-katalysaattori käyttää typenoksidien pelkistämiseen ureaa, joka järjestelmässä höyrystyy ja hajoaa ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi. Ammoniakki pelkistää typenoksidit ja reaktion lopputuotteina on tyypeä ja vesihöyryä. SCR-järjestelmän hyviä puolia ovat moottorin käyttäminen korkealla hyötysuhteella ja järjestelmän tehokkuus päästöjen pienentämisessä. SCR-järjestelmän huonoja puolia ovat järjestelmän hinta, tarve erilliselle lisäaineelle ja järjestelmän vaatima korkea toimintalämpötila. Keskeinen ero uusien Euro VI –päästöluokan ajoneuvojen SCR-järjestelmissä aikaisempiin verrattuna liittyy lämmönhallintaan. Liian kylmään järjestelmään ruiskutettu urea kerääntyy katalysaattorin kennostoon tukkien sen lopulta. Järjestelmän vikaantumisen ehkäisemiseksi ureaa ruiskutetaan vasta kun järjestelmä on saavuttanut toimintalämpötilansa, joka on yli 200 °C.

Euro VI –päästöluokassa pakokaasujen jälkikäsittelylaitteet on paketoitu yhdeksi tiiviiksi lämpöeristetyksi kokonaisuudeksi lämmönhukan estämiseksi. Lisäksi pakokaasujärjestelmää lämmitetään erilaisin keinoin, kuten johtamalla palamatonta polttoainetta pakokaasujärjestelmään, jossa se palaessaan tuottaa lämpöä. Osa valmistajista rajoittaa moottorin läpi tyhjäkäynnillä virtaavaa ilmamäärää jäähtymisen ehkäisemiseksi imukanavaan asennetulla kuristuslapalla. Kaikkinensa lämmönhallintaan kiinnitetään merkittävästi enemmän huomiota kuin aikaisemmin.

Korkeaan  $\text{NO}_x$ -alenemaan pyritäessä riskinä on, että järjestelmään ruiskutettu ylimääräinen ammoniakki virtaa pakokaasujen mukana ulos järjestelmästä. Ammoniakkipäästöjen ehkäisemiseksi SCR-järjestelmään on usein liitetty ammoniakkikatalysaattori (Ammonia Slip Catalyst ASC).

Euro VI hiukkaspäästörajojen täyttäminen edellyttää varsinaisen hiukkassuodattimen (DPF) käyttöä. Massapohjaisen rajan lisäksi nyt on voimassa myös raja-arvo hiukkasten lukumäärälle ( $6.0 \cdot 10^{11}/\text{kWh}$ ).

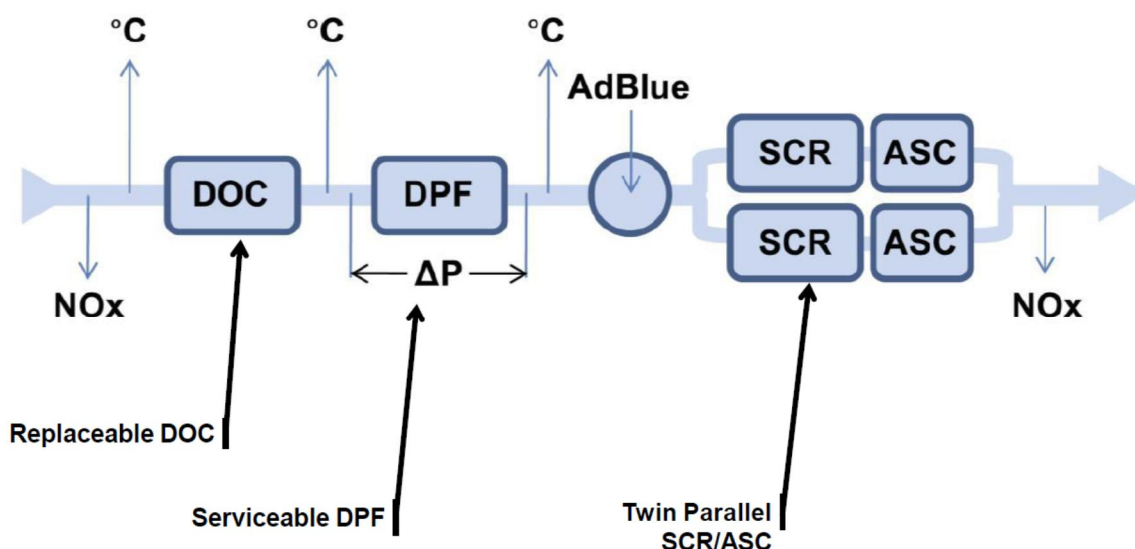
Hiukkassuodattimet keräävät hiukkaset pakokaasuvirrasta. Suodattimeen kerääntyneet hiilihiukkaset poistetaan suodattimen regeneroinnissa, jossa suodattimen lämpötilaa nostetaan niin korkealle, että hiukkaset palavat. Osassa suodattimia käytetään katalyyttiä laskemaan suodattimen regeneroinnin vaatimaa lämpötilaa. Lämpötilan nostamiseksi saatetaan ruiskuttaa polttoainetta moottorin pakotahdin aikana, jolloin polttoaine kulkeutuu palamattomana hiukkassuodattimeen. Toinen käytäntö on lisätä suodattimen regenerointia varten erillinen polttoainesuutin ennen hiukkassuodatinta. Suodattimen täytyessä se nostaa pakokaasujärjestelmän aiheuttamaa vastusta pakokaasujen virtaukselle, joka puolestaan heikentää moottorin hyötysuhdetta. Aika ajoin suodattimesta on mekaanisesti poistettava siihen kerääntynyt epäorgaaninen aine (tuhka).

Typenoksidien ja hiukkasten lisäksi pyritään hillitsemään hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöjä. Näiden poisto tehdään hapettavalla katalysaattorilla (Diesel Oxidation Catalyst DOC). Katalysaattorin ongelmana kuitenkin on, että se hapettaa myös typpimonoksidiä ( $\text{NO}$ ) typpidioksidiksi ( $\text{NO}_2$ ), joka on ilmanlaadun kannalta suurempi ongelma kuin typpimonoksidi. Tästä syystä hapettava katalysaattori on sijoitettua päästöjenjälkikäsittelylaitteistossa ennen hiukkassuodatinta ja SCR-järjestelmää. Hiukkassuodattimessa typpidioksidi helpottaa hiilen hapettumista (palamista).

Euro VI –päästötason linja-autoissa joudutaan yleensä käyttämään kaikkia edellä kuvattuja järjestelmiä. Pakokaasulaitteiston toiminnan ohjaamiseksi kerätään tietoa lämpötiloista,

paineista ja NO<sub>x</sub>-pitoisuuksista eri osissa järjestelmää. Kuvassa 3 on esimerkki pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmän rakenteesta. Pakokaasut kulkevat järjestyksessä hapettava katalysaattori, hiukkassuodatin, SCR ja ASC. Lämpötilaa mitataan ennen hapettavaa katalysaattoria, hiukkassuodatinta ja SCR-katalysaattoria. Hiukkassuodattimen regenerointitarvetta seurataan mittaamalla paine-eroa hiukkassuodattimen eri puolilla. SCR-katalysaattorin toimintaa ohjataan mittaamalla typenoksidipitoisuus raakapakokaasusta, sekä järjestelmän läpi kulkeutuneesta pakokaasusta.

## Schematic layout of Euro VI system



Kuva 3: Esimerkkikaavio Scanian Euro VI päästöjen jälkikäsittelylaitteistosta, SAE 2014 Heavy-Duty Diesel Emissions Control Symposium, Magnus Mackaldener.

## 6. Tulokset

### 6.1 Alustadynamometrimittausten tulokset

Seurantaan valittujen bussien päästöt mitattiin ennen seurannan aloitusta alustadynamometrillä. Mittaukset tehtiin joko seurantaan menevällä yksilöllä tai samaa autosarjaa edustavalla teknisesti täysin identtisellä bussilla. Mittausten perusteella tulokset olivat erittäin hyviä (taulukko 5). Sekä typenoksidi, että hiukkaspäästöt olivat erittäin matalia. Hyvänä vertailukohtana mitattujen bussien päästöille toimii aiemmin puhtaimman EEV-luokan kaupunkibussien keskiarvotulos.

Alustadynamometrillä mitatut g/km-muodossa olevat päästöarvot voidaan muuntaa likimääräisiksi g/kWh arvoiksi. Kaksiakselinen bussin moottorin tekemä työmäärä Braunschweig -syklissä auton ollessa puoleen kuormaan kuormattuna on noin 1,8 kWh/km. Lämpimällä moottorilla kaksiakselisen autojen NO<sub>x</sub>-päästö 0,02 g/km on kampiakselilla tehtyyn työhön suhteutettuna äärimmäisen matala eli vain noin 0,01 g/kWh. Raskaamman kolmiakselisen auton (C) NO<sub>x</sub>-päästö 0,22 g/km on g/kWh lukuna arviolta 0,1 g/kWh

(muunnoskerroin noin 2,3). Moottorista ulos tuleva NO<sub>x</sub>-päästö on arviolta tasolla 5 – 10 g/kWh, joten SCR katalysaattorin muunnostehokkuus on kaikissa tapauksissa vähintään 98 %.

Hyvin alhaisesta päästötasosta huolimatta Euro VI autot näyttäisivät kuluttavan noin 5 % vähemmän polttoainetta kuin EEV autot keskimäärin.

*Taulukko 5: Dynamometritestien tulokset. Mittaukset ajettu lämpimillä moottoreilla.*

|               | CO (g/km) | HC (g/km) | NO <sub>x</sub> (g/km) | PM (g/km) | Polttoaineen kulutus (kg/100km) | CO <sub>2</sub> (g/km) |
|---------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------|
| A             | 0.27      | 0.00      | 0.02                   | 0.002     | 34.6                            | 1093                   |
| B             | 0.08      | 0.00      | 0.02                   | 0.004     | 35.4                            | 1119                   |
| C             | 0.10      | 0.00      | 0.22                   | 0.009     | 45.2                            | 1428                   |
| EEV keskiarvo | 1.08      | 0.03      | 6.49                   | 0.068     | 36.9                            | 1166                   |

## 6.2 Moottoriradalla mitatut tulokset

Suljetulla moottoriradalla ajatun testin tavoitteena oli ajaa laboratoriossa käytettyjä testisyklejä kylmissä olosuhteissa ja seurata päästöjenhallintajärjestelmän toimintaa seurantajärjestelmän avulla. Kokeet ajettiin 7.3.2015 ulkoilman lämpötilan vaihdellessa -2 ...0 °C välillä. Kullakin autolla ensimmäinen sykli aloitettiin suoraan kylmällä moottorilla ja päästölaiteistolla. Mittasykleiksi kenttäkokeeseen valittiin Braunschweig ja Millbrook –syklit. Syklien nopeusprofiilit ovat raportin liitteenä.

Auton "C" tiedonkeruujärjestelmä menetti moottoriradalla verkkoyhteyden eikä sillä suoritetuista ajoista näin ollen saatu tuloksia. Yhden testipäivän aikana oli mahdollista suorittaa vain yksi täysin kylmä käynnistys ja kylmäkäynnistyksellä ajettavaksi valittiin Millbrook -sykli. Ennen ensimmäisen Braunschweig -syklin ajoa autojen pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmän annettiin jäähtyä.

Moottoriradalla ajatut testit antoivat keskenään hyvin erityyppiset tulokset (Taulukko 6). Kylmäkäynnistyksellä aloitetuissa Millbrook-sykleissä auton "A" jälkikäsittelyjärjestelmän lämpenemiseen kului pitkäkö aika, 11 minuuttia, mutta typenoksidien alenema koko syklin aikana oli kuitenkin niinkin korkea kuin 94 %. Saavutettuaan toimintalämpötilan järjestelmä on siis toiminut hyvin korkealla tehokkuudella. Auton "B" jälkikäsittelyjärjestelmä (pelkkä SCR) käynnistyi nopeammin, viidessä minuutissa, mutta järjestelmän kokonaisalenema jäi kuitenkin 82 prosenttiin.

Braunschweig -syklissä vastaavaa täysin kylmää käynnistystä ei ollut mahdollista suorittaa. Jäähtyneellä pakokaasulaitteistolla aloitettujen testien lämpenemisajat jäivät olennaisesti lyhyemmiksi. Silti auton "A" tuloksen perusteella laskettu alenema toteutui Millbrook-sykliä korkeampana.

*Taulukko 6: Moottoriradalla ajettujen testien tulokset, \* merkityissä tuloksissa moottori ei ole ollut täysin kylmä.*

|              |        | Auto A               |             | Auto B               |             |
|--------------|--------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
|              |        | Lämpenemisaika (min) | Alenema (%) | Lämpenemisaika (min) | Alenema (%) |
| Braunschweig | Kylmä  | 4*                   | 85*         | 2*                   | 90*         |
|              | Lämmin | -                    | -           | 1                    | 97          |
| Millbrook    | Kylmä  | 11                   | 94          | 5                    | 82          |
|              | Lämmin | 0                    | 94          | 2                    | 92          |

## 6.3 Käytönaikaisen seurannan tulokset

### 6.3.1 Yleistä

Käytönaikaisen seurannan aikana sekä autoissa että tiedonkeruulaitteissa esiintyi tiettyjä ongelmia ja häiriöitä. Lisäksi tulosten analysointia vaikeutti autojen ajoittainen poikkeava käyttö, mukaan lukien seisonnapäivät. Auton "B" osalta saatiin kerättyä kaikkein vähiten dataa, autosta "C" eniten:

- Auto A: dataa 236 päivää
- Auto B: dataa 18 päivältä
- Auto C: dataa 377 päivältä

Autojen seurannalle osuneena aikana erittäin kylmiä päiviä on ollut kohtalaisen vähän, ja osittain autojen käyttö on rajoittanut esimerkiksi kylmäkäynnistyksestä johtuvien päästöjen arviointia auton seistessä yön aikana vain muutamia tunteja.

Vuosilta 2015 ja 2016 löytyi kuitenkin sellaisia päiviä, joiden osalta voitiin tehdä arvioita SCR järjestelmien käynnistysnopeudesta.

Arviot keskimääräisestä NO<sub>x</sub> konversioasteesta tehtiin tarkastelemalla NO<sub>x</sub> konversiota ulkolämpötilan funktiona.

### 6.3.2 SCR järjestelmien lämpenemisaika

Autojen käytönaikaisesta seurannasta on raporttia varten poimittu tuloksia yksittäisiltä päiviltä vuodelta 2015 ja 2016. Tulosten analysointiin on valittu päivät niiden sääolosuhteiden, sekä autojen käyttötavan perusteella. Vertailupäivien lämpötilaolosuhteet Ilmatieteenlaitoksen Kaisaniemen mittausasemalla on esitetty alla (taulukko 7). Kaikkein kokeessa mukana olleiden bussien varikot sijaitsevat pääkaupunkiseudulla, joten niiden olosuhteet voidaan olettaa tulosten tarkastelun kannalta samankaltaisiksi.

*Taulukko 7: Vertailupäivien lämpötila-olosuhteet Ilmatieteenlaitoksen Kaisaniemen mittausasemalla (lähde: Ilmatieteenlaitos, Avoin data).*

| Päivämäärä | Vuorokauden alin lämpötila | Vuorokauden keskilämpötila | Vuorokauden ylin lämpötila |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 4.3.2015   | 0.8                        | 1.6                        | 2.6                        |
| 30.7.2015  | 13.9                       | 15.3                       | 18.1                       |
| 7.1.2016   | -23.7                      | -22.7                      | -20.7                      |
| 21.1.2016  | -20.1                      | -16.0                      | -12.0                      |
| 2.2.2016   | 0.0                        | 1.4                        | 2.8                        |

Vertailupäiviltä on laskettu ajoneuvon päästöjenkäsittelyjärjestelmän toimintalämpötilan saavuttamiseen tarvitsema aika aamun ensimmäisen lähdön (kylmäkäynnistys) sekä keskellä päivää tapahtuvan vuoron vaihdon jälkeen (lämminkäynnistys). Kriteerinä järjestelmän toimintalämpötilan saavuttamiselle on ollut 90 %:n aleneman saavuttaminen mitattaessa NO<sub>x</sub> pitoisuus ennen ja jälkeen SCR-katalysaattorin. Normaalitylanteessa täysin lämmin järjestelmä vähentää NO<sub>x</sub>-pitoisuutta yli 98 % (kts. kohta 6.1).

Päästöjen jälkikäsittelylaitteistojen lämpenemistä kuvaavat ajat on esitetty alla (taulukko 8). Vertailupäiviltä, joissa puhdistusjärjestelmä on saavuttanut pysyvästi 90 % aleneman, toimintalämpötilan saavuttamiseen kulunut aika on ilmaistu minuutteina. Talvikauden kylmimpinä päivinä kaikki ajoneuvot eivät ole kyenneet saavuttamaan kriteerinä käytettyä 90 % alenemaa, ja näissä tapauksissa tulos on merkitty viivalla. Ajoneuvojen seurantarajajärjestelmän ja muiden teknisten ongelmien vuoksi puuttuvat tulokset on esitetty taulukossa merkinnällä N/A). Tulostaulukossa esitetty materiaali esitellään tarkemmin ajoneuvokohtaisesti seuraavassa tekstissä.

*Taulukko 8: Päästöjen jälkikäsittelylaitteistojen lämpenemiseen kulunut aika. N/A merkityissä data puuttuu, - merkityissä järjestelmä ei ole saavuttanut normaalia NO<sub>x</sub> -alenemaa.*

|           |                        | Auto A | Auto B | Auto C |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|
| 4.3.2015  | kylmäkäynnistys [min]  | 12.2   | 10.9   | 5.2    |
|           | Lämminkäynnistys [min] | 1.0    | 3.4    | 1.8    |
| 30.7.2015 | kylmäkäynnistys [min]  | 7.3    | N/A    | 7.7    |
|           | Lämminkäynnistys [min] | 3.2    | N/A    | 2.0    |
| 7.1.2016  | kylmäkäynnistys [min]  | N/A    | N/A    | -      |
|           | Lämminkäynnistys [min] | N/A    | N/A    | -      |
| 21.1.2016 | kylmäkäynnistys [min]  | ~23    | N/A    | -      |
|           | Lämminkäynnistys [min] | 14     | N/A    | -      |
| 2.2.2016  | kylmäkäynnistys [min]  | 23     | N/A    | N/A    |
|           | Lämminkäynnistys [min] | N/A    | N/A    | N/A    |

#### Auto A

Vertailupäivien tuloksia tarkastellessa auton A tulokset ovat osittain ristiriitaisia.

Kylmien päivien kylmäkäynnistysten jälkeen lämpenemiseen on kulunut 12 – 23 minuuttia ja lämpimien käynnistysten jälkeen 1 – 14 minuuttia. Kylmimpänä vertailupäivänä 7.1.2016 järjestelmä ei pysyvästi saavuttanut toimintalämpötilaa, jolloin sen päästöt ovat koko päivän liikenteessä olleet tavallista korkeammat. Toisena lähes yhtä kylmänä vertailupäivänä 21.1.2016 toimintalämpötilan saavuttamiseen kului 23 minuuttia, joskin jo lyhyiden pysähdysten jälkeen järjestelmä viileni ja sen tuottama NO<sub>x</sub>-alenema pieneni. Vastaavasti lämpimän käynnistysten jälkeen autolla ajettiin 14 minuuttia ennen kuin alenema oli normaalilla tasolla.

Kesältä 2015 poimittu vertailu osoittaa jälkikäsittelyjärjestelmän lämpenevän lämpimänä päivänä huomattavasti nopeammin kuin talvella. Lämpimänä päivänä kylmäkäynnistysten jälkeen järjestelmä on ollut toiminnassa jo 7.3 minuutin jälkeen ja lämpimän käynnistysten jälkeen 3.2 minuutin jälkeen.

Tulosten ristiriitaisuus liittyy jälkikäsitteilyjärjestelmän lämpenemiseen kuluvaan aikaan lämpimän käynnistyksen jälkeen vuoden 2015 vertailupäivinä. 4.3.2015 lämpimän käynnistyksen jälkeen järjestelmä on ollut toimintavalmis jo yhden minuutin jälkeen kun taas lämpimänä kesäpäivänä tähän on kulunut 3,2 minuuttia. Eroa voi osaltaan selittää auton erilaiset käyttötavat. Merkittävin ero on kuitenkin 4.3.2015 ja 2.2.2016 kylmäkäynnistyksen jälkeen toteutuneissa lämpenemisajoissa. Kyseiset vertailupäivät ovat lämpötiloiltaan olleet hyvin samankaltaiset, mutta järjestelmän lämpenemisajassa kylmäkäynnistyksen jälkeen on erittäin suuri ja merkittävä ero.

Auton A tiedonkeruujärjestelmässä esiintyi vikoja syyskaudella, jotka ajoittuivat samaan aikaan autoon liittyneiden teknisten ongelmien kanssa. Datan perusteella voidaan olettaa, että auto ehti olla liikenteessä noin kuukauden verran ilman, että päästöjenjälkikäsitteilyjärjestelmä toimi normaalilla tehokkuudella. Havaintoa ei kuitenkaan voida täysin varmistaa tiedonkeruussa ilmenneiden puutteiden vuoksi.

#### Auto B

Auton B pakokaasujärjestelmä toimi talven 2015 aikana muiden autojen kanssa vastaavalla tavalla. Auton osalta seuranta kuitenkin päättyi varhain. Ajoneuvon maahantuoja ei tiennyt järjestelmästä ja poisti sen ajoneuvosta korjaamokäynnin yhteydessä. Järjestelmää ei enää tämän jälkeen saatu toimimaan erinäisten teknisten ongelmien vuoksi.

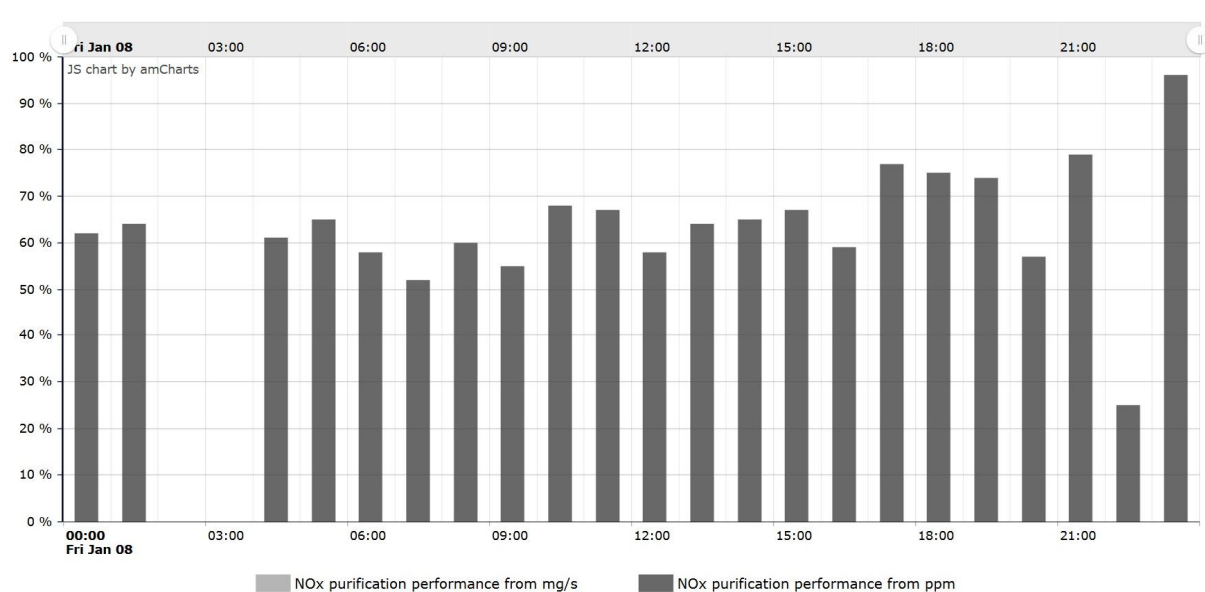
#### Auto C

Kahden ensimmäisen vertailupäivän osalta auton tulokset olivat samalla tasolla muiden bussien kanssa. 4.3.2015 kylmäkäynnistyksen jälkeen auto C on lämmennyt muita ajoneuvoja nopeammin. Osa syy tälle on auton suuremmasta matkustajakapasiteetista seuraava korkeampi massa, jonka seurauksena moottorin kuormitusaste ja lämmöntuotto on suurempaa. Auton C päästöjenhallintajärjestelmän lämpenemiseen on kesäpäivänä kulunut enemmän aikaa kuin talvisena lauhana päivänä. Erot ovat kuitenkin pieniä ja saattavat liittyä erilaiseen käyttöön / kuormitukseen eri vertailupäivinä.

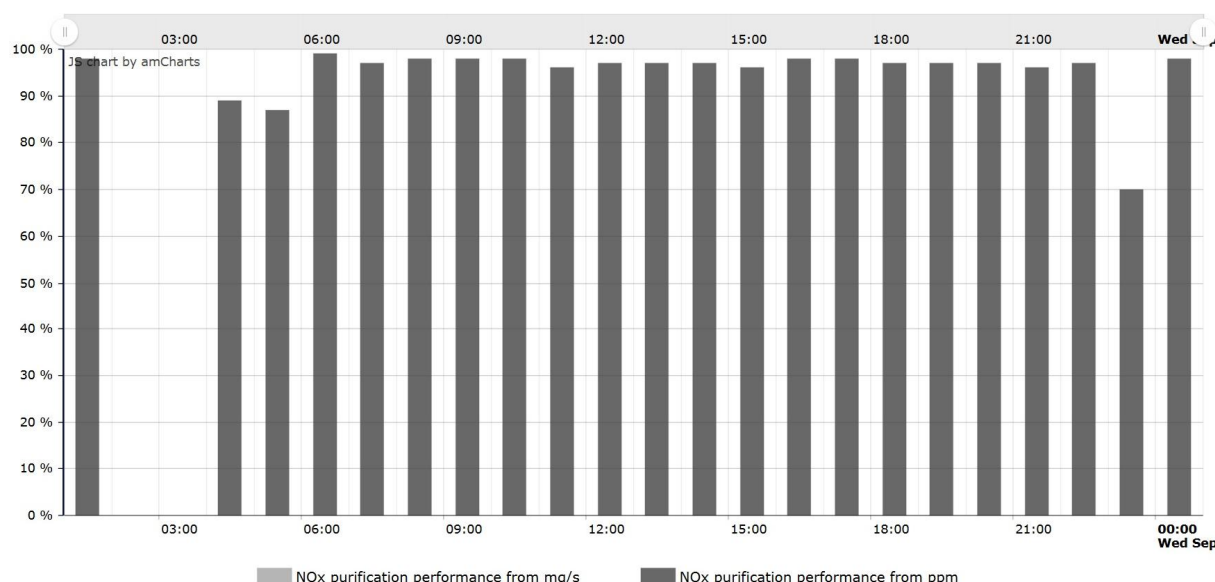
Talven 2016 kylminä vertailupäivinä auton C pakokaasulaitteisto ei saavuttanut normaalia  $\text{NO}_x$  alenemaa. Järjestelmän keräämän datan perusteella suhteellinen  $\text{NO}_x$ -alenema on liikkunut välillä 60 – 70 %. Suhteellisen aleneman perusteella ei voida vielä suoraan arvioida toteutunutta absoluuttista päästötasoa. Mitä enemmän moottoria kuormitetaan, sitä korkeampi on moottorista ulos tuleva  $\text{NO}_x$  päästö, mutta toisaalta SCR katalysaattorin muunnostehokkuus kasvaa kuormituksen ja pakokaasujen lämpötilan noustessa. Koejakson aikana autolla on ollut muutaman kuukauden pituinen jakso, jonka aikana päästöjen jälkikäsitteilyjärjestelmä ei ole toiminut täydellä teholla. Vika ei kuitenkaan ole aiheuttanut vääntömomentin rajoitusta, jonka seurauksena auto olisi vedetty pois liikenteestä.

#### 6.3.3 Keskimääräiset $\text{NO}_x$ konversioasteet

Kuvissa 4 ja 5 on esimerkkejä lämpötilan vaikutuksesta auton "C" konversioasteeseen. Kummassakin kuvassa on yhden päivän tuntikohtaiset tulokset. Kuva 4 on talviolosuhteista ( $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 8.1.2016) ja kuva 5 melko kesäisistä olosuhteista ( $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1.9.2016). Kuvassa 4 keskimääräinen konversioaste on noin 65 %, kuvassa 5 noin 95 %. Ulkolämpötila vaikuttaa siis varsin voimakkaasti keskimääräiseen konversioasteeseen. Lohdullista on kuitenkin, että myös alhaisessa lämpötilassa SCR katalysaattori poistaa suuruusluokkaisesti 2/3 osaa moottorista ulos tulevista typen oksideista.



Kuva 4. Tuntikohtaiset konversioasteet vuorokauden keskilämpötilan ollessa -16 °C.

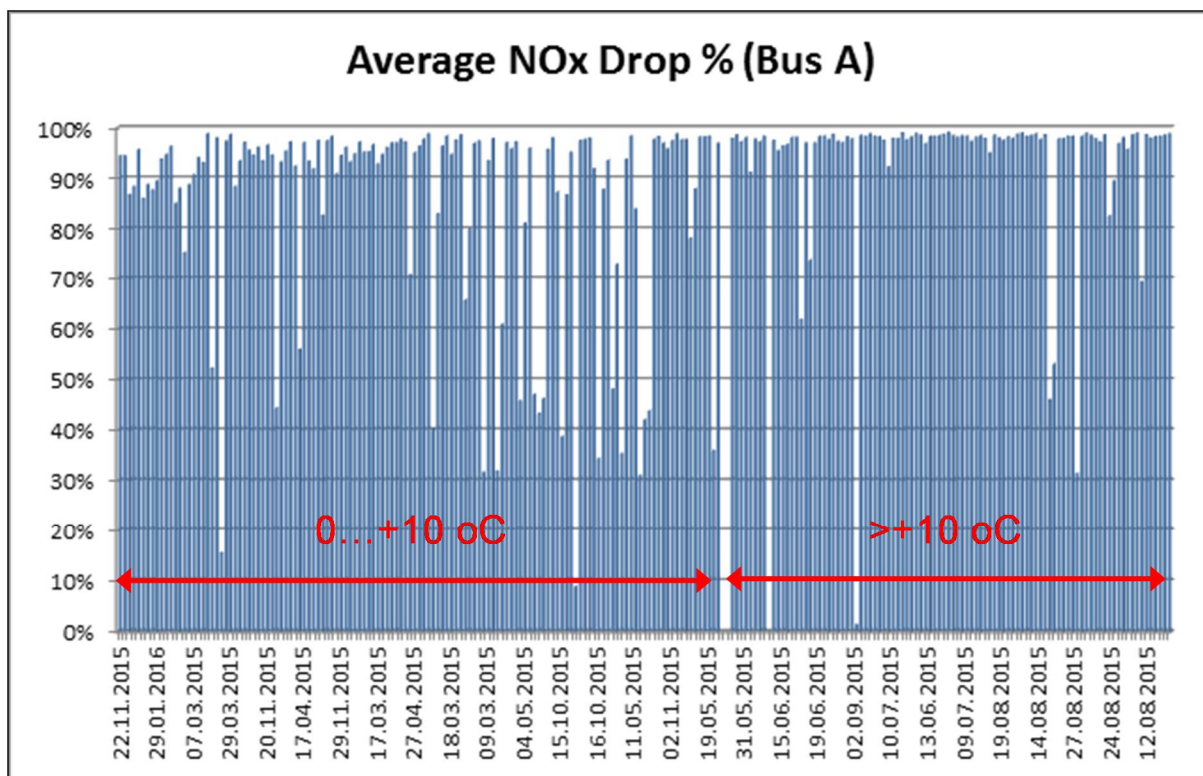


Kuva 5. Tuntikohtaiset konversioasteet vuorokauden keksilämpötilan ollessa +16 °C.

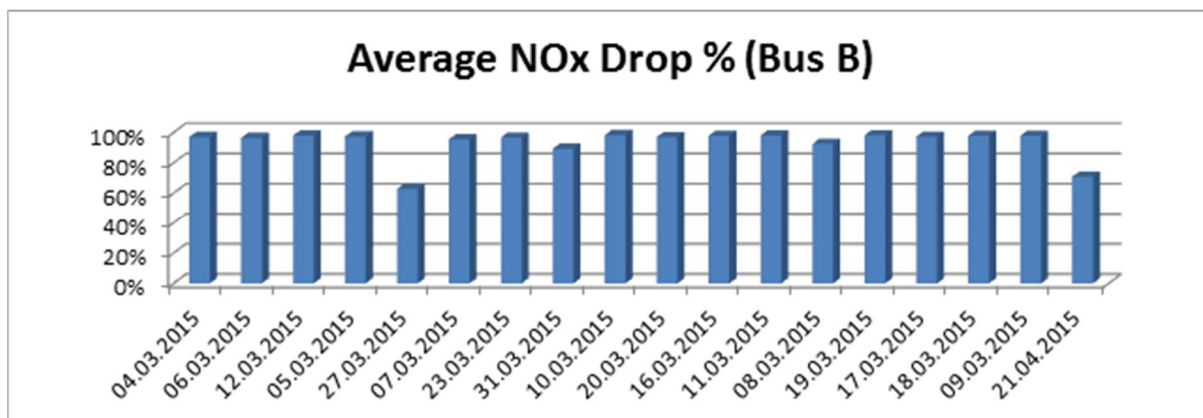
Varsinaiset arviot keskimääräisestä NO<sub>x</sub> konversioasteesta tehtiin tarkastelemalla päiväkohtaisia NO<sub>x</sub> konversiota ulkolämpötilan funktiona. Kuviissa 6 – 8 on autokohtaiset tulossarjat. Kuvaan 9 on yhdistetty auton C tulokset ja ulkolämpötilan käyrä. Tuloksista on poistettu selvästi virheelliset lukemat, niin mittausjärjestelmän toimimattomuudesta kuin autojen poikkeuksellisesta käytöstä johtuvat lukemat. Datasta on myös poistettu alle 1 tunnin ajojaksot, koska niitä ei katsottu busseille tyypillisiksi. Kuviissa tulospylväät on järjestetty nousevan ulkolämpötilan mukaan, ja tulokset on jaettu kolmeen lämpötila-alueeseen:

- Alle 0 °C
- 0...+10 °C
- Yli +10 °C

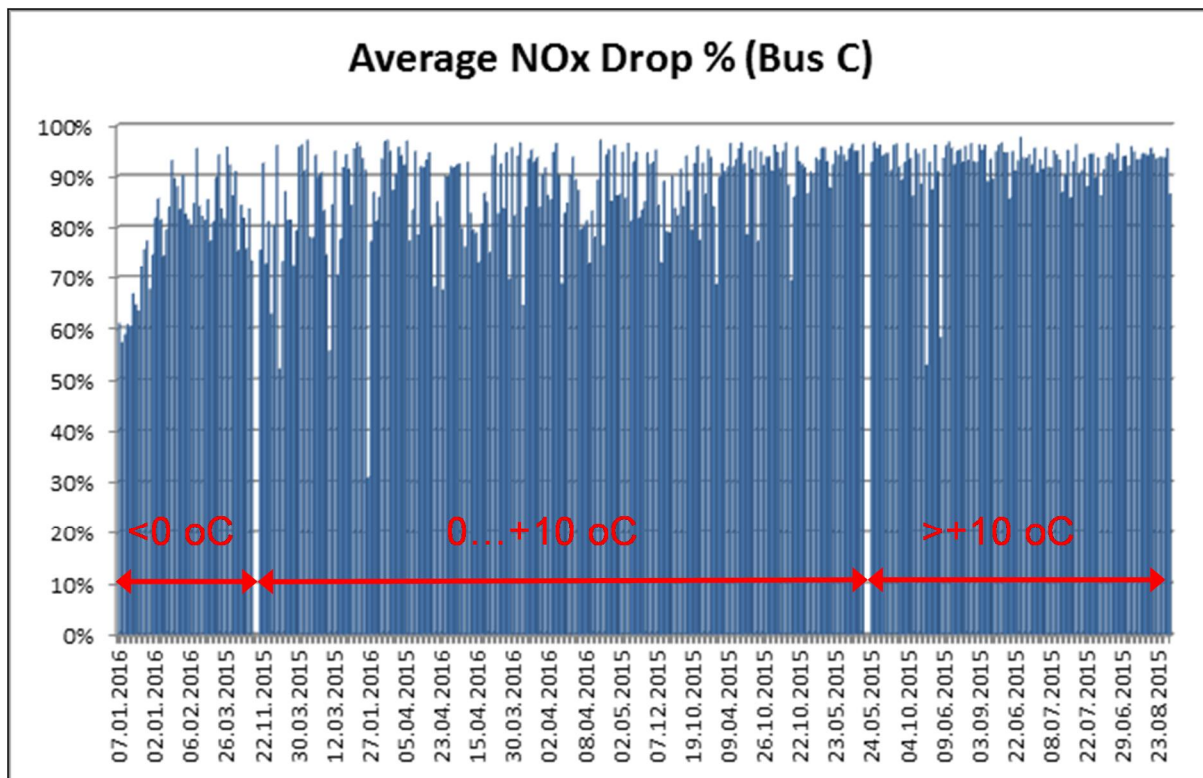
Valitettavasti vain autolle C saatiin valideja tuloksia kaikille lämpötila-alueille (kts. 6.3.1). Autolle A on tuloksia 0...+10 ja yli +10 °C lämpötila-alueille, autolle B laiteongelmien takia vain rajoitetusti dataa lämpötila-alueelle 0...+10 °C.



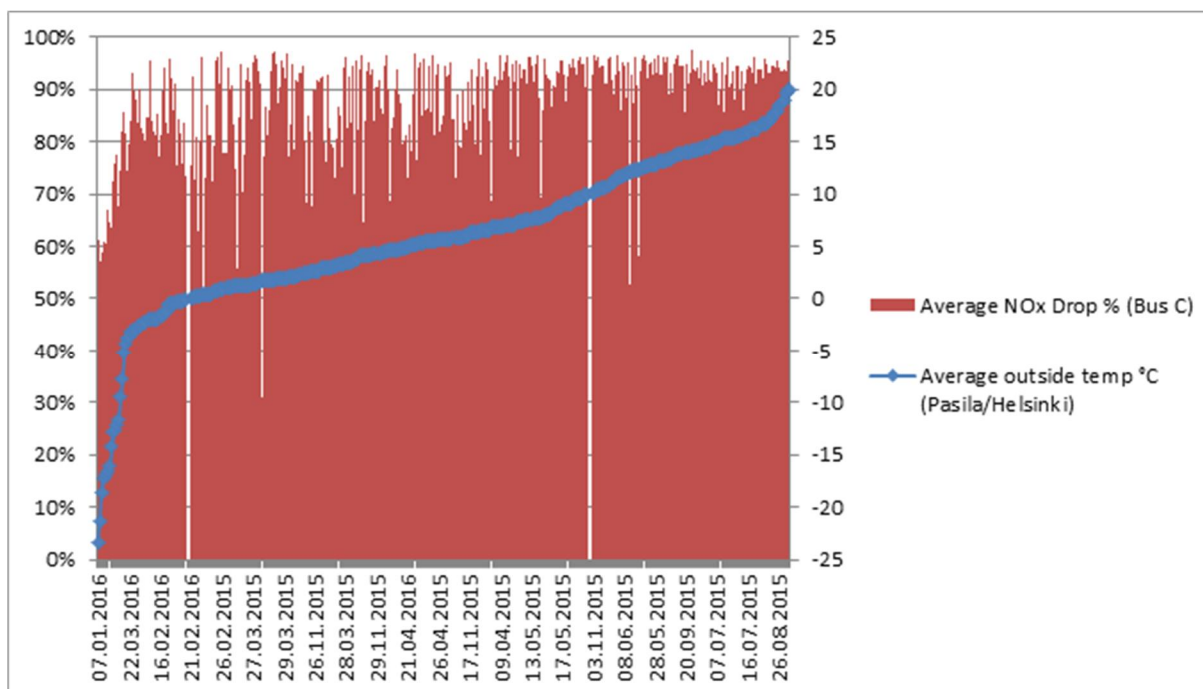
Kuva 6. Päivittäinen NO<sub>x</sub> konversio prosentteina bussista A. Skaalaus tehty päivälämpötilan mukaan pienimmästä suurimpaan. Lämpötila-alueiden vaihdot näkyvät kuvassa tyhjinä väleinä.



Kuva 7. Päivittäinen NO<sub>x</sub> konversio prosentteina bussista B. Skaalaus tehty päivälämpötilan mukaan pienimmästä suurimpaan.



Kuva 8. Päivittäinen NO<sub>x</sub> konversio prosentteina bussista C. Skaalaus tehty päivälämpötilan mukaan pienimmästä suurimpaan. Lämpötila-alueiden vaihdot näkyvät kuvassa tyhjinä väleinä.



Kuva 9. Päiväkohtainen NO<sub>x</sub> konversio ja ulkoilman lämpötila bussista C. Lämpötila-alueiden vaihdot näkyvät kuvassa tyhjinä väleinä.

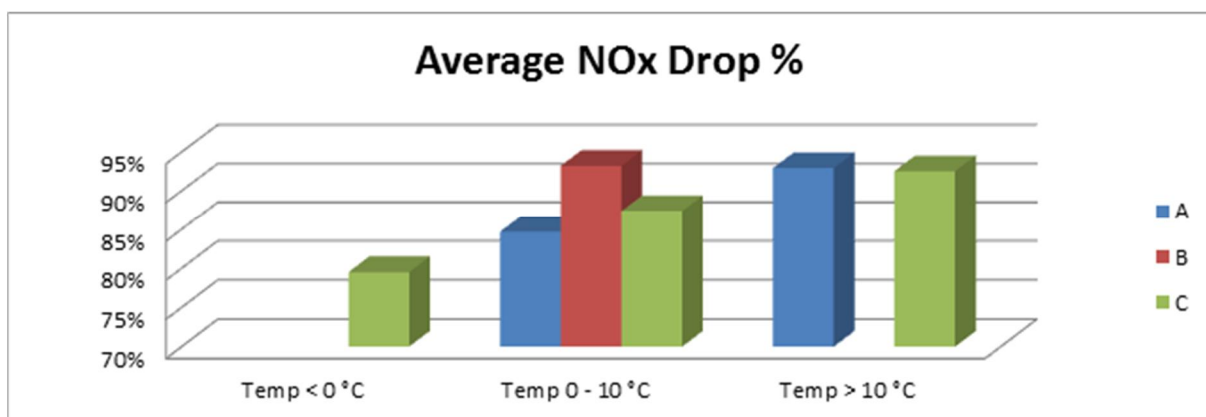
Auto C, josta on eniten dataa käytettävissä, on toiminut tasaisimmin ja luotettavimmin. Kuvasta näkyy selvästi ulkolämpötilan vaikutus. Alimmillaan konversioaste on vajaa 60 %, ylimmillään n. 95 %. Yksittäisiä päiviä, jolloin järjestelmä on toiminut huonosti, on vain vähän. Kuvasta 9 nähdään että auto toimii varsin hyvin aina -5 °C lämpötilaan asti.

Auton A tuloksissa esiintyy selvästi enemmän päiväkohtaista hajontaa, erityisesti lämpötila-alueella 0...+10 °C. Toisaalta, lämpötila-alueella >+10 °C, auto toimii ajoittain erittäin tasaisesti ja hyvin.

Auto B toimii sekin parhaimmillaan hyvin, mutta datamäärä (dataa vain 18 päivältä) on niin pieni, ettei tuloksista voida vetää pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että tulokset on esitetty ulkolämpötilan funktiona, ei ajan funktiona. Näin ollen kuviin sisältyy myös mahdollinen SCR katalysaattorin tehon aleneminen ajan funktiona. Kaksi vierekkäistä lämpötilan perusteella valittua päivää saattavat olla jopa eri vuosilta, ja tämä aiheuttaa tiettyä epätasaisuutta tuloksiin.

Kuvassa 9 on keskimääräiset konversioasteet eri lämpötila-alueille, ja numeroarvot on vastaavasti esitetty taulukossa 9.



Kuva 9. NO<sub>x</sub> konversioasteet prosenttina eri busseille eri lämpötiloissa.

Taulukko 9. NO<sub>x</sub> konversioasteet prosenttina eri busseille eri lämpötiloissa.

| Auto | Lämpötila <0 °C | Lämpötila 0...+10 °C | Lämpötila >+10 °C |
|------|-----------------|----------------------|-------------------|
| A    |                 | 85 %                 | 93 %              |
| B    |                 | 93 %                 |                   |
| C    | 80 %            | 87 %                 | 93 %              |

Kuten edellä on selostettu, SCR katalysaattori eikä myöskään NO<sub>x</sub> anturit toimi pakokaasun lämpötilan ollessa alhainen. Edellä olevaan analyysiin ei siten sisälly SCR järjestelmän "kuollut hetki" heti kylmäkäynnistyksen jälkeen. Ajallisesti tämä jakso on tyypillisesti luokkaa 10 minuuttia (taulukot 6 ja 8). Bussilla ajetaan kuitenkin lähes 20 tuntia päivässä (1200 minuuttia), joten toimimattomuuden aika edustaa suuruusluokkaisesti vain noin prosenttia päivän ajoajasta.

## 6.4 Loppumittaus alustadynamometrilla

Hankkeen loppuvaiheilla yhden testiryhmän ajoneuvon päästöjen jälkikäsitteilyjärjestelmän huomattiin toimivan heikommin kuin järjestelmän tulisi täydessä suorituskäytössä toimia. Seurantajärjestelmän poiston yhteydessä päätettiin suorittaa koeluontoinen mittaus myös alustadynamometrillä, jolloin saatiin selvitettyä millaisella päästötasolla ajoneuvon diagnostiikkajärjestelmä sallii jatkaa auton ajoa. Mittauksiin otetun auton valmistajaa ei tässä

yhteydessä julkaista, koska teknisiä ongelmia on ollut kaikissa testin autoissa, eikä merkin esille tuominen ole relevanttia. Muille ajoneuvoille ei myöskään ollut mahdollisuutta järjestää vastaavanlaista pistokoetta.

Loppumittausten yhteydessä suoritettiin mittaukset aloittamalla mittaukset kylmällä moottorilla sekä lämpimällä moottorilla. Kylmäkäynnistystä varten ajoneuvo lepäsi yön yli mittatilassa 23 asteen lämpötilassa. Kylmäkäynnistystestin tulos koostuu yhdestä kylmällä moottorilla sekä tämän jälkeen ajetuista kahdesta lämpimällä moottorilla aloitetusta syklistä. Sykliä välillä on pidetty tyyppihyväksyntämenettelyä seuraillen 10 minuutin tauko. Mittauksia suoritettaessa autolla oli ajettu hieman alle 200 000 km.

Vikatilassa olevan auton typenoksidipäästöt nousivat kylmäkäynnistykseen huomioivassa testissä arvoon 2.9 g/km ja lämpimällä käynnistyksellä aloitetussa testissä 1.6 g/km (taulukko 10). Typenoksidipäästöt nousivat lämpimällä moottorilla aloitetussa testissä 17-kertaisiksi alkumittausten keskiarvoon verrattuna. Hiukkaspäästöt kasvoivat n. 20 %, joskin absoluuttisen päästömäärän ollessa pieni kasvu ei muodostu merkittäväksi.

Taulukko 10. Loppumittauksen tulokset.

|                                                                           | CO (g/km) | HC (g/km) | NO <sub>x</sub> (g/km) | PM (g/km) |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|
| Braunschweig kylmäkäynnistyksellä                                         | 0.17      | 0.01      | 2.9                    | 0.03      |
| Braunschweig lämminkäynnistyksellä                                        | 0.10      | 0.00      | 1.6                    | 0.006     |
| Keskiarvo alkumittauksista - Kolmen auton keskiarvo lämminkäynnistyksellä | 0.15      | 0.00      | 0.09                   | 0.005     |

## 6.5 Arvio Euro VI tasoisten bussien todellisesta NO<sub>x</sub> päästöistä

Kenttäseurannassa pystyttiin mittaamaan ainoastaan SCR katalysaattorin konversioaste, ei NO<sub>x</sub> massaemissiota. Päästöinventarioiden tekoon tarvitaan kuitenkin ajosuoritteeseen suhteutettuja massaemissioita muodossa g/km.

VTT:n bussien päästötietokanta, jossa tulokset on g/km muodossa, perustuu lämpimillä moottoreilla tehtyihin mittauksiin, ja vasta uusimpien Euro VI mittausten yhteydessä on ryhdytty tuottamaan kylmä- ja kuumakäynnistykseen perustuvia yhdistelmätuloksia.

Euro II tasoisten autojen keskimääräinen NO<sub>x</sub> päästö Braunschweig -testisyklissä on noin 13 g/km, suuruusluokkaisesti 7 g/kWh. Euro III luvut ovat vastaavasti 8,5 g/km ja noin 5 g/kWh.

Euro II autoissa ei käytetty mitään erityistä NO<sub>x</sub> vähennystekniikkaa, joissakin Euro III moottoreissa saattoi jo olla käytössä pakokaasujen takaisinkierätykset. Näissä vanhemmissa autoissa ulkoilman lämpötila ei vaikuttanut oleellisesti NO<sub>x</sub> päästöön. Vasta autot, joissa on pakokaasujen jälkikäsittelytekniikkaa, saattavat olla herkkiä lämpötilan suhteen.

Arvion Euro VI autojen todellisista päästöistä kenttäolosuhteissa on tehty olettamalla, että pelkällä SCR järjestelmällä varustetun Euro VI auton NO<sub>x</sub> lähtötaso vastaa Euro II tasoa, ja että sekä EGR:ää että SCR:ää hyödyntävän Euro VI auton NO<sub>x</sub> lähtötaso vastaa Euro III tasoa. Autossa, jossa on pelkkä SCR, SCR katalysaattorilta vaaditaan suurempi muunnostehokkuus kuin autossa jossa on EGR:n ja SCR:n yhdistelmä (NO<sub>x</sub> lähtötaso on ensiksi mainitussa korkeampi).

Arvio todellisista NO<sub>x</sub> päästöistä muodostetaan siis Euro II (kuva pelkkää SCR:ää) ja Euro III (kuva EGR:n ja SCR:n yhdistelmää) NO<sub>x</sub> arvoista ja taulukon 9 keskimääräisistä konversioprosenteista eri lämpötilahaarukoissa. Estimaatteja laskettaessa on lisäksi oletettu

että SCR laitteisto on kylmäkäynnistysten takia toimimaton 3 % kokonaisajasta (jos kokonaisaika olisi 20 tuntia eli 1200 minuuttia, järjestelmä olisi toimimaton päivän aikana 36 minuuttia), jolloin Euro VI auton päästötaso on tekniikasta riippuen joko Euro II tai Euro III tasoa.

Pelkällä SCR järjestelmällä varustetun auton osalta on oletettu, että keskimääräinen konversioaste alle 0 °C lämpötiloissa vastaa muiden (EGR + SCR) autojen konversioastetta, mutta että lämpötila-alueella yli +10 °C konversioaste on korkeampi (kuten lämpötila-alueella 0...+10 °C). Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 11.

*Taulukko 11. Arvio Euro VI autojen todellisista NO<sub>x</sub> massapäästöistä eri lämpötiloissa. Arvot kaksiakselisille busseille ja Braunschweig testisyklille.*

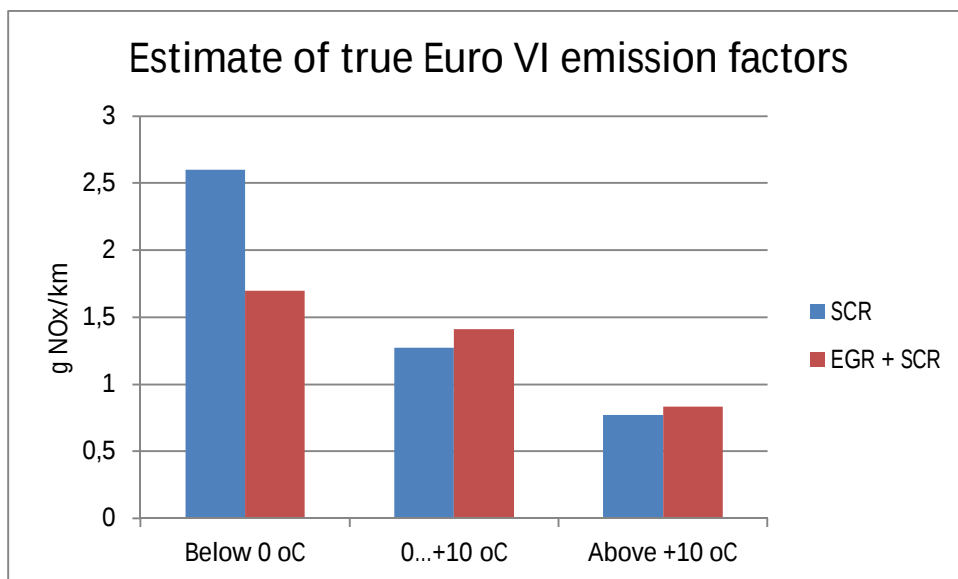
| Tekniikka                                 | SCR | EGR + SCR |
|-------------------------------------------|-----|-----------|
| Lähtötaso (g/km)                          | 13  | 8,5       |
| Konversioaste alle 0 °C (%)               | 80  | 80        |
| Suora tulos (g/km)                        | 2,6 | 1,7       |
| Kylmäkäynnistysosuus 3 % huomioitu (g/km) | 2,9 | 1,9       |
| Konversioaste 0...+10 °C (%)              | 93  | 86        |
| Suora tulos (g/km)                        | 0,9 | 1,2       |
| Kylmäkäynnistysosuus 3 % huomioitu (g/km) | 1,3 | 1,4       |
| Konversioaste alle 0 °C (%)               | 97  | 93        |
| Suora tulos (g/km)                        | 0,4 | 0,6       |
| Kylmäkäynnistysosuus 3 % huomioitu (g/km) | 0,8 | 0,8       |

Laskentaharjoitus osoittaa, että molemmat tekniikat antaisivat likimain saman päästötason lämpötilan ollessa yli 0 °C, mutta että käytetyillä oletuksilla pelkkää SCR hyödyntävä tekniikka antaisi korkeammat NO<sub>x</sub> päästöt alhaisissa lämpötiloissa. Viimeksi mainittu on siis pelkkä oletus, koska autosta B ei saatu luotettavia konversiotuloksia alle 0 °C lämpötiloissa.

VTT:n bussitietokannan mukaan yhdistetty (kylmä ja kuumakäynnistys) NO<sub>x</sub> tulos Braunschweig syklille on luokkaa 0,5 g/km. Suuruusluokka on siis sama, johon päädytään yllä olevassa laskennassa yli +10 °C lämpötiloille. Taulukon 11 arvoja voitaneen siis pitää suuntaa antavina arvioitaessa ulkolämpötilan vaikutuksia Euro VI tasoisten bussien todelliseen NO<sub>x</sub> päästöön.

Lämpötilan vaikutus päästöihin on havainnollistettu kuvassa 10.

Jos oletetaan, että lämpötilahaarukka 0...+10 °C edustaa keskimääräisiä olosuhteita pääkaupunkiseudulla, alustadynamometrissa ajettujen yhdistelmätulokset (kylmä ja kuumakäynnistys) tulee kertoa luvulla joka on noin 3 arvioitaessa todellisia keskimääräisiä päästöjä (päästötaso suuruusluokkaisesti 1,5 g/km). Päästöinventarioiden tekeminen pelkkien lämpimällä moottorilla ajettujen tulosten perusteella (suuruusluokka 0,1 g NO<sub>x</sub>/km) johtaa kertaluokkaa liian pieniin päästömääriin.



Kuva 10. Arvio Euro VI bussien todellisista NO<sub>x</sub> päästöistä ulkolämpötilan funktiona.

Joka tapauksessa siirtyminen Euro VI tasoihin autoihin tarkoittaa merkittävää NO<sub>x</sub> päästövähennystä, koska keskimääräinen EEV-autojen päästötaso (mitattu lämpimillä moottoreilla) on 6,5 g/km. Toteutuva päästövähennys on siis luokkaa 75 %, mikä vastaa hyvinkin NO<sub>x</sub> raja-arvon muutosta mentäessä Euro V tasosta Euro VI tasoon (2 – 0,46 g/kWh, -77 %).

## 6.6 Yhteenveto hankkeessa kerätyistä tuloksista

Kenttätestin alussa tulokset olivat erittäin lupaavia. Raporttiin poimittujen ensimmäisten vertailupäivien sekä taustajärjestelmän silmämääräisen tarkastelun perusteella ajoneuvojen pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmät toimivat hyvin ja lämpenemisajat olivat kohtuullisia. Seurantajakson edetessä teknisiä häiriöitä oli kuitenkin odotettua enemmän, eikä osa näistä häiriöistä aiheuttanut ajoneuvon vetämistä pois liikenteestä korjattavaksi. Hankkeen tulosten analysointia osittain heikentää tiedonkeruujärjestelmässä ilmenneet tekniset ongelmat.

Ilmenneistä hankaluuksista huolimatta pystyttiin arvioimaan Euro VI bussien todellisia NO<sub>x</sub> massapäästöjä eri lämpötiloissa. On selvää, että liikenteessä olevien Euro VI-päästöluokan bussien todellinen päästötaso ei ole niin matala kuin uusien bussien dynamometristien perusteella voidaan olettaa. Lämpimällä moottorilla alustadynamometritulos on keskimäärin 0,1 g/km, ja yhdistetyssä kylmä- ja kuumatestissä 0,5 g/km. Kenttäseurannan perusteella keskimääräinen todellinen NO<sub>x</sub> päästö voisi olla luokkaa 1,5 g/km ulkolämpötilan ollessa haarukassa 0...+10 °C. Arvio on, että alustadynamometrin yhdistelmätulos tulisi kertoa luvulla 3 jotta tulos kuvaisi todellista keskimääräistä tulosta. Jos näin on, NO<sub>x</sub> päästö alenee todellisuudessa merkittävästi, suuruusluokkaisesti 75 %, siirryttäessä EEV-tasoisista autoista Euro VI-autoihin.

Vikatilassakin mittauksiin poimittu ajoneuvo tuotti paljon EEV-luokan keskiarvoa puhtaamman tuloksen.

## 7. Yhteenveto

---

Laboratoriossa tehdyissä mittauksissa uudet Euro VI tasoiset dieselbussit ovat osoittautuneet erittäin vähäpäästöisiksi. Kenttäkokeella haluttiin muodostaa kuva autojen päästötasosta todellisessa ajossa, mukaan lukien talviset käyttöolosuhteet.

Kolme Euro VI tason dieselbussia varustettiin Proventia Emission Control Oy:n PROCARE Drive seurantalaitteistoilla. Järjestelmä koostuu kahdesta NO<sub>x</sub>-anturista ja tiedonkeruujärjestelmästä. NO<sub>x</sub>-anturit on sijoitettu ennen ja jälkeen SCR katalysaattorin, ja järjestelmä mahdollistaa SCR katalysaattorin konversiotehokkuuden mittaamisen jatkuvatoimisesti. Kahdessa autossa NO<sub>x</sub> hallintaan käytetään pakokaasujen takaisinkierrätyksen ja SCR katalysaattorin yhdistelmää, yhdessä autossa oli pelkkä SCR katalysaattori.

Hankkeen aikana tehtiin mittauksia laboratorioissa, suljetulla testiradalla ja normaalissa ajossa. Kenttäkokeen aikana sekä seurantalaitteissa että itse autoissa esiintyi häiriöitä. Yhdestä autosta saatiin kelvollista seurantadataa vain 18 päivältä, kun parhaimmasta autosta saatiin mittausdataa 377 päivältä. Jälkimmäisestä autosta saatu data mahdollisti SCR järjestelmän toiminnan monitoroinnin lämpötilaikkunassa -20...+20 °C.

SCR järjestelmien keskimääräinen muunnostehokkuus on:

- Alle 0 °C: 80 %
- Lämpötila-alue 0...+10 °C: noin 90 %
- Yli +10°C: noin 95 %

Ajoneuvovalmistajat voisivat mahdollisesti parantaa SCR järjestelmien toimivuutta kylmässä parantamalla edelleen järjestelmien lämmön hallintaa (lisäeristykset, mahdolliset lisätoimenpiteet pakokaasujen lämpötilan nostamiseksi jne.).

Päästöinventaarioria varten pitää tietää massaemissio, pelkkä SCR katalysaattorin muunnossuhde ei kerro päästöjen määrää. Massapäästöjen arvioinnissa oletettiin, että pelkällä SCR katalysaattorilla varustetun auton "raakapäästö" vastaa Euro II tasoista autoa, ja että EGR:n ja SCR:n yhdistelmällä varustetun auton "raakapäästö" vastaa Euro III tasoista autoa. Käyttäen sitten eri lämpötila-alueille määriteltyjä keskimääräisiä konversiokertoimia ja olettamalla lisäksi tietty aikaosuus, jolloin SCR järjestelmä ei toimi lainkaan, voitiin muodostaa arviot Euro VI bussien todellisista päästöistä. Arvio lämpötila-alueelle 0...+10 °C on 1,5 g NO<sub>x</sub>/km. Tämä tarkoittaa, että siirtyminen EEV tasoisista autoista (keskiarvo lämpimässä tehtyjen laboratoriomittausten tuloksista 6,5 g NO<sub>x</sub>/km) Euro VI autoihin vähentää todellisia NO<sub>x</sub> päästöjä ainakin 75 %.

Hankkeen tulosten perusteella voidaan siis perustellusti sanoa, että Euro VI-päästöluokan bussit toimivat selkeästi edellisiä päästöluokkia paremmin, joskin suoraa vertailua EEV-päästöluokan ajoneuvojen jälkikäsitteilyjärjestelmien lämpenemisajoista ja toteutuneista alenemista ei ole saatavilla. Uusina Euro VI ajoneuvot toimivat suorastaan erinomaisesti. Lämpenemisajat olivat nopeita ja typenoksidien alenemat korkeita. Hankkeen edetessä järjestelmiin tuli kuitenkin oletettua enemmän teknisiä vikoja.

Kenttäseurannan ajanjakso on ollut ajoneuvon elinkaaren kannalta melko lyhyt. Euro VI – päästöluokan ajoneuvon päästötason tulisi pysyä tyyppihyväksyntärajojen sisällä 700 000 km ajomatkan verran. Jo hankkeen aikana on ollut selvästi nähtävissä, että uutena loistavasti toimineet ajoneuvot ovat alkaneet pikkuhiljaa vikaantua. Vikaantumisen syistä ei ole tarkempaa tietoa, eikä tiedetä miltä osin ongelmat olisi vältettävissä tarkemmalla kunnossapidolla.

Kaluston päästöjen kehittymistä kannattaa seurata vielä jatkossakin. Alustadynamometrimittauksia kannattaa täydentää todellisessa ajossa tehtävillä päästömittauksilla (PEMS). Laajemmin katsottuna koko linja-autojärjestelmän päästöt olisi teknisesti mahdollista ottaa tarkempaan seurantaan. Useilla kalustovalmistajilla on jo nyt tarjolla ympäristöraportointijärjestelmiä, jotka laskevat ajoneuvojen oman ohjausjärjestelmän anturien tuottaman tiedon perusteella toteutuneet päästöt. Ajoneuvovalmistajien omien järjestelmien lisäksi löytyy ulkopuolisten, ajoneuvovalmistajista riippumattomien yritysten tarjoamia päästöjen seurantalaitteistoja. Myös tässä hankkeessa käytetystä seurantajärjestelmästä on kehitetty uusi versio, jolla päästöjä voi seurata huomattavasti kätevämmiin ja pienemmällä työmäärällä. Tämän tyyppisen laitteiston avulla liikenteen tilaaja voisi halutessaan seurata päästötason toteutumista ja valvoa sitä, että ajoneuvot ovat teknisesti täydessä kunnossa. Vastaavia käytäntöjä löytyy Euroopassa tavaraliikenteessä. Osa kuljetusten tilaajista edellyttää puhtaan kaluston käyttöä, sekä ympäristöraporttien toimittamista.

## Lähdeviitteet

---

Kaupunkibussien päästötietokanta 2015, VTT R-06008-15

Magnus Mackaldener, SAE 2014 Heavy-Duty Diesel Emissions Control Symposium

## Liitteet

