

Sampo Kuikka

# Biofore-kaupunkiauton moottorinohjauksen säätö ja päästöjenhallinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinööriytyö

5.5.2014

Tekijä Otsikko	Sampo Kuikka Biofore-kaupunkiauton moottorinohjauksen säätö ja päästöjenhallinta
Sivumäärä Aika	35 sivua 5.5.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Lehtori Heikki Parviainen
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli säätää Biofore-konseptiauton moottorinohjainlaite niin, että moottori vastaa käytökseltään normaalia nykyaikaista dieselmoottoria sekä suunnitella jatkotoimenpiteet EURO 5 -normin päästövaatimusten saavuttamiseksi. Mittauksien avulla haluttiin selvittää, kuinka paljon EGR todellisuudessa leikkaa typenoksideja. Opinnäytetyön yhteydessä suunniteltiin myös ohjauslogiikka hiukkasloukun regeneraatiolle.</p> <p>Ohjainlaitteen säätö toteutettiin laskemalla tarvittavat ruiskutusmäärät riittävien suoritusarvojen saavuttamiseksi ja sen jälkeen säätämällä ruiskutusennakko ja ahtopaine sopiviksi dynamometrissä. Säätö viimeisteltiin ajamalla testiajaja suljetulla alueella ja muuttamalla moottorin reagointiin vaikuttavia arvoja niin, että moottori saatiin reagoimaan johdonmukaisesti vaihtelevissa ajotilanteissa..</p> <p>Jatkotoimenpiteiden valmistelussa laskettiin auton ajotilapiirroksen, syklin nopeuksien ja vaihteiston välitysten perusteella syklin jokaiselle sekunnille hetkellinen teho ja kierros-luku. Näiden tulosten pohjalta muodostettiin laskentataulukko, jonka tiedoista voidaan laskea kokonaispäästön koko syklin ajalle.</p> <p>EGR-mittauksessa mitattiin moottorin tuottaman typenoksidin määrä neljästä erilaisesta kuormitustilanteesta, ilman takaisinkierätystä ja takaisinkierätyksen kanssa. Saadut tulokset osoittavat selvästi, että järjestelmä toimii tehokkaasti. Takaisinkierätystä käytettäessä typenoksidipäästöt putosivat murto-osaan verrattuna ilman takaisinkierätystä mitattuihin tuloksiin.</p> <p>Regeneraation ohjauslogiikka suunniteltiin seuraamaan hiukkasloukun tukkeutuneisuusasetta pakokaasun vastapaineen perusteella ja tarvittaessa regeneroimaan loukun nostamalla pakokaasun lämpötilaa aktiivisen regeneraation aloittamiseksi.</p>	
Avainsanat	Biofore Concept Car, EURO 5, Päästöt, Diesel

Author(s) Title	Sampo Kuikka Adjustment of the Engine Management System and the Emission Control of Biofore Concept Car
Number of Pages Date	35 pages 5:th May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport engineering
Specialisation option	Automotive Design engineering
Instructor(s)	Heikki Parviainen, Senior Lecturer
<p>The aim of this thesis was to adjust the engine control unit of the Biofore Concept Car so that the engine will perform as a normal modern diesel engine, and to design the follow-up actions to be taken to achieve the emission standards demanded by the EURO 5 norm. Measurements were carried out to investigate how much the exhaust gas recycling system reduces nitrogen oxide emissions. In addition, control logic was designed to control the regeneration of the diesel particle filter.</p> <p>The adjustment of the ECU was started by calculating the needed injection masses in order to achieve the desired performance, and then adjusting the injection advance and boost pressure to suit the purpose in a dynamometer. The final adjustments were made by performing several test drives on a closed track and doing minor adjustments after each test drive in order to make the engine react logically in varying situations.</p> <p>The design of the follow-up actions consisted of calculating the engine power and rpm for every second of the NEDC-cycle from the information based on the drive state drawing of the car, the speed used in the cycle, and the transmission ratios. These results were used to form an Excel table that calculates the total emission for the whole cycle.</p> <p>In the EGR measurement, the amount of NO<sub>x</sub> that was produced by the engine was measured in four different load points: both with and without exhaust gas recirculation. The results showed clearly that the system performs effectively. When the EGR was used, the amount of NO<sub>x</sub> –emissions decreased to fractions when compared with the results measured in the non-EGR test runs.</p> <p>The DPF regeneration control logic was designed to follow the state of the DPF by measuring the counter pressure between the DPF and the turbocharger and to regenerate the DPF when necessary by increasing the exhaust gas temperature, and thus starting the active regeneration.</p>	
Keywords	Biofore Concept Car, EURO 5, Emissions, Diesel

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Moottorin perussäätö	3
2.1	Suuttimien tuoton mittaus	3
2.2	Ruiskutusmäärän laskeminen	4
2.3	Ruiskutusarvojen siirto ohjainlaitteeseen	5
2.4	Ohjainlaitteen toiminta	5
2.5	Tyhjäkäynnin säätö	7
2.6	Ruiskutusennakon säätö	8
2.7	Ahtopaineen säätö	9
2.8	Pyörreläppien ohjaus	11
2.9	Hehkutus	12
2.10	Ajettavuus	13
2.11	Pakokaasun takaisinkierätyksen ohjaus	13
3	Päästöjenhallinta	15
3.1	Dieselmootorin palotapahtuma ja seoksen muodostus	15
3.2	Päästöjen synty	17
3.2.1	Hiukkaset (PM)	18
3.2.2	Typenoksidit (NOx)	18
3.2.3	Hiilivedyt (HC)	19
3.2.4	Häkä (CO)	20
3.3	Päästömääräykset	20
3.4	NEDC (New European Driving Cycle)	21
3.5	Päästöjen vähentämiseen käytettävät keinot	22
3.5.1	Välijäähdytin	22
3.5.2	EGR eli pakokaasujen takaisinkierätys	23
3.5.3	Ruiskutusennakon pienentäminen	23
3.5.4	Hapetuskatalysaattori (DOC)	23
3.5.5	Esiruiskutus	24
3.5.6	Hiukkasloukku (DPF)	24

4	Mittaukset	25
4.1	Mittausjärjestelyt	25
4.2	Tulokset	26
4.3	Analyysi	27
5	Jatkotoimenpiteet	29
5.1	EURO 5	29
5.2	Hiukkasloukun regeneraation ohjaus	30
6	Yhteenveto	33
	Lähteet	35

## Lyhenteet ja käsitteet

ECU	Engine Control Unit, moottorinohjauslaite
GCU	Glow Control Unit, hehkutuksen ohjauslaite
PWM	Pulse width Modulation, pulssinleveysmodulaatio, ohjaus signaali, jonka säätö perustuu tehollisen jännitteen muuttamiseen muuttamalla jännitteen suhteellista kytkettynä olo-aikaa.
H-silta	Napaisuutta vaihtava PWM-kytkin. Voi ajaa tasavirtamoottoria molempiin suuntiin.
PID	Proportional Integral Derivative, takaisinkytkentäohjatun säätölogiikan säätömuuttajat
Setaaniluku	Polttoaineen syttymisherkkyyttä kuvaava luku. Määritetään vertaamalla polttoaineen syttyvyyttä vertailumoottorissa setaaniin. Jos polttoaine syttyy yhtä hyvin, on luku 100, jos huonommin, on luku alle sata.
EN 590	Moottorikäyttöön tarkoitetun dieselöljyn laatustandardi
Isokoorinen	Vakiotilavuudessa tapahtuva
Isobaarinen	Vakiopaineessa tapahtuva
Lambda-arvo	Polttoaineen ja ilman seossuhde suhteessa seokseen, jonka palaessa kaikki ilman happi ja kaikki polttoaine palaa (stokiometrinenseos)

## 1 Johdanto

Metropolia Ammattikorkeakoulu ja UPM osakeyhtiön yhteistyöprojekti Biofore-konseptiauto on ollut rakenteilla vuodesta 2010 alkaen. Projektin tarkoituksena on muun muassa ollut testata UPM:n tarjoamien biomateriaalien käyttömahdollisuuksia ajoneuvoteollisuudessa. UPM:n lisäksi projektissa on ollut mukana Tekes ja myös useita muita kotimaisia yrityksiä. Auton polttoaineena tulee toimimaan UPM:n valmistama mäntyöljypohjainen BioVerno-biodiesel. BioVerno täyttää dieselpolttoaineille asetetun EN590-normin vaatimukset ja on näin ollen täysin toimivaa kaikissa dieselmootoreissa. EN590 ei määritä polttoaineelle maksimisetaanilukua, vaan ainoastaan minimin. Pääosa myytävästä polttoaineesta on setaaniluvultaan lähellä minimiarvoa 51, kun taas BioVerno on lähempänä 55:tä. Tästä johtuen haluttiin tutkia, onko saavutettavissa hyötyjä optimoimalla moottori kyseiselle polttoaineelle.

Korkeampisetaanisen polttoaineen käytön on ilman optimointia todettu vähentävän typenoksidipäästöjä. Tämä on seurausta polttoaineen nopeammasta syttymisestä ja sitä kautta esisekoittumispalamisen vähenemisestä. Nopeasta syttymisestä voidaan saada hyötyä myös hyötysuhteen parantamisessa. Viiveettömämmin syttyvä polttoaine antaa mahdollisuuden pienentää ruiskutusennakkoa palopaineen huippukohdan ajoituksen pysyessä ennallaan. Tästä johtuen ennen yläkuolokohtaa tapahtuva männän liikettä vastustava palaminen vähenee ja täten suurempi osa polttoaineen energiasta voidaan käyttää hyödyksi.

Haluttaessa tutkia säätömuutosten vaikutusta moottorin toiminnassa oli luotava edellytykset riittävän laajoille säätömuutoksille. Alkuperäiseen, moottorin mukana tulleeseen ohjainlaitteeseen ei ollut mahdollista tehdä riittäviä muutostoimia, joten päädyttiin hankkimaan ohjelmitava ohjainlaite ruotsalaiselta Nira Control AB:lta. Moottorinohjaimen asennus, anturointi ja perussäädöt niin, että moottori lähtee käyntiin, on käsitelty Teemu Tiaisen insinööriyössä vuodelta 2012.

Moottorina Biofore-autossa käytetään Volkswagenin 1.2 TDI moottoria (CFWA), jossa on yhteispaineruiskutus. Moottori alittaa alkuperäiskokoonpanossaan EURO 5 -normin rajat, joten tiedetään, että moottorilla on mekaaniset edellytykset täyttää päästönormin vaatimukset.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli säätää moottorinohjainlaite niin, että moottori vastaa käytökseltään normaalia nykyaikaista dieselmoottoria, sekä suunnitella jatkotoimenpiteet EURO 5 -normin päästövaatimusten saavuttamiseksi. Mittauksien avulla haluttiin selvittää, kuinka paljon EGR todellisuudessa vähentää typenoksideja. Opinnäytetyön yhteydessä suunniteltiin myös ohjauslogiikka hiukkasloukun regeneraatiolle. Tässä työssä käsiteltyjen toimien ja EURO 5 -normin vaatiman säädön jälkeen moottori on valmis BioVernon testaukseen.

Työn ensimmäisessä osassa esitellään moottorin perussäätö siihen saakka, että moottori toimii normaalisti ajossa. Toisessa osassa käsitellään päästöjen syntyä sekä niiden vähentämiseen käytettyjä keinoja. Lopuksi tutkitaan mittaustuloksia pakokaasun takaisinkierrätyksen tehokkuudesta typenoksidipäästöjen vähentämisessä, esitetään jatkosuunnitelma moottorin säädölle sekä suunnitelma hiukkasloukun regeneraation ohjauslogiikasta.



## 2 Moottorin perussäätö

Ennen päästörajoiden alittamiseen tähtääviä säätötoimia on moottori luonnollisesti saatava toimimaan normaalisti koko kuormitusalueella. Tämä tarkoittaa sitä, että moottori tuottaa halutun tehon ja väännön koko kierroslukualueella, vastaa kaasuun ripeästi ja toimii savuttamatta myös poljettaessa kaasua äkillisesti.

Moottorin tuottama teho on verrannollinen aikayksikköä kohti poltetuun polttoainemäärään ja hyötysuhteeseen (1, s. 458). Dieselmoottorin tapauksessa tarkka seossuhde ei ole merkityksellinen moottorin toimiessa ilmaylijäämällä. Säätö voidaan siis aloittaa laskemalla eri kierroslukujen tavoitetehoista ja ominaiskulutuksista tarvittavat ruiskutusmäärät, minkä jälkeen voidaan aloittaa säätötyö dynamometrissä.

### 2.1 Suuttimien tuoton mittaus

Käyttämässämme moottorissa käytetään ajotilanteesta riippuen ruiskutuspaineita 250:stä 1800 baariin. Moottorinohjaus säätää ruiskutusmäärää ja ruiskutuspainetta käyttäjän määrittämien karttojen perusteella. Jotta ruiskutusmäärä pysyisi haluttuna pyydetyn paineen muuttuessa, tarvitaan konversiotaulukko, joka muuttaa ruiskutusai-kaa paineen muuttuessa. Taulukon Y-akselin muodostaa paine ja X-akselin ruiskutusmäärä, matriisissa on suuttimen aukioloaika.

Suuttimien tuotosta ei ollut saatavilla tietoa, joten suuttimet lähetettiin Hämeen Diesel-nimiseen yritykseen mitattaviksi. Saaduista mittaustuloksista käy ilmi ruiskutusmäärä ruiskutusajan ja -paineen funktiona. Käytetty ohjainlaite puolestaan käyttää korjausarvona ruiskutusaikaa. Mittaustulokset myös käsittivät varsin suppean sektorin suuttimen toiminta-alueesta. Edellä mainituista johtuen saadut tulokset taulukoitiin taulukkolaskentaohjelmaan, taulukoiduista tiedoista muodostettiin kuvaajat ja kuvaajille muodostettiin yhtälöt. Saatujen yhtälöiden muuttujaksi muutettiin ruiskutusaika ja näiden yhtälöiden perusteella laskettiin taulukko, joka laskee tarvittun ruiskutusajan halutun ruiskutusmäärän saavuttamiseksi halutulla paineella. Käytännössä havaittiin, että mittatarkkuuden ja puuttuvien arvojen ekstrapoloinnin johdosta moottorin käyttöön tuli portaita pyydetyn ruiskutuspaineen muuttuessa. Portaat tasoitettiin säätötyön yhteydessä hienosäätämällä konversiotaulukon ruiskutusaikoja niin, että muutettaessa ruiskutuspainetta tasakuormatilanteessa, moottorin tuottama teho ei havaittavasti muuttunut.

## 2.2 Ruiskutusmäärän laskeminen

Dieselmoottorin perussäätöä helpottaa se, että moottoria pyritään käyttämään aina ilmaylimäärällä, eli palotilassa on aina enemmän ilmaa kuin mitä palamiseen tarvitaan. Tästä johtuen seossuhteesta ei tarvitse välittää, niin kauan kuin ilmaa on tarpeeksi.

Moottorin säätö aloitettiin laskemalla täyskaasuasennon ruiskutusmäärät seuraavalla kaavalla (1, s. 458):

$$V_e = \frac{1000 * P_{eff} * b_e}{60 * q * n_p * z}$$

Suureet:

- $V_e$  on kertasyöttöannos [ $\text{mm}^3$ ]
- $P_{eff}$  on nettoteho [kW]
- $b_e$  on polttoaineen ominaiskulutus [g/kWh]
- $q$  on polttoaineen tiheys [ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ]
- $n_p$  on kierrosluku [1/min]
- $z$  on sylinterien lukumäärä

Esimerkkilasku 1. Ruiskutusmäärä täyskaasulla 1000 rpm.

$$1000 * 10 \text{ kW} * 230 \text{ g/kWh} / (60 * 0,85 \text{ kg/l} * 1000 \text{ rpm} * 3 \text{ syl}) = 15,03 \text{ mg/isku}$$

Koska tavoitteena on saada taloudellinen ja päästöiltään Euro 5 -normin täyttävä moottori, otettiin tehontuoton tavoitteeksi vakiomoottorin arvot. Kaavan laskentaperusteena käytetään siis vakiomoottorin tehoa ja siitä mitattuja ominaiskulutuksia.

### 2.3 Ruiskutusarvojen siirto ohjainlaitteeseen

Ohjainlaitteen Demand torque eli momenttipyyntötaulukko ei käytä muuttujana ruiskutusmäärää, vaan prosenttiarvoa maksimiruiskutusmäärästä työkiertoa kohti. Maksimimääräksi määritettiin 90 mg/työkierto, joka on noin 10 % enemmän kuin haluttujen suoritusarvojen saavuttamiseen tarvitaan. Näin saadaan hieman marginaalia säätötaulukoon. Lasketut kertaruiskutusmäärät kerrottiin sylinteriluvulla, jolloin saatiin ruiskutusmäärä mg/cycle (milligrammaa työkiertoa kohti). Saadut arvot muokattiin ohjainlaitteen ymmärtämään muotoon laskemalla, kuinka monta prosenttia 90 milligrammasta ne ovat.

Esimerkkilasku 2. Ruiskutusmäärätieto ohjainlaitteella, 50 % maksimista ruiskutetaan täyskaasulla 1000 rpm.

$$\frac{\frac{15mg}{isku} * 3}{90mg/cycle} * 100 = 50\%$$

Kaasunasento nollan kohdalle momenttipyyntötaulukkoon annettiin ruiskutusmääräksi 0 % ja arvot 0:n ja 100:n välillä interpoloitiin lineaarisen kaasuun vastaavuuden saavuttamiseksi. Kaasun asennon ollessa nolla, tyhjäkäynninsäätöpiiri määrittää ruiskutusmäärän itsenäisesti pitäen kierrosluvun haluttuna.

### 2.4 Ohjainlaitteen toiminta

Moottorinohjainlaite sisältää logiikan, jonka mukaan moottorin toimilaitteita ohjataan, sekä pääteasteet, joilla ohjaussignaalit ohjataan toimilaitteille. Ohjainlaitteen tehtävä on pyrkiä toteuttamaan kuljettajan kaasupolkimella pyytämä vääntömomentti ohjelmointinsa ja anturitiedon rajoissa sekä suojata moottoria häiriötilanteilta ja väärinkäytöltä. Esimerkkinä tehon rajoitus, jos moottori ei ole käyntilämpöinen tai käy liian kuumana.

Lähes kaikkien moottorin toimilaitteiden ohjaus on toteutettu closed loop- eli takaisinkytkentäohjauksella. Takaisinkytkentä tarkoittaa sitä, että ohjauslaitteella on esiohjelmoidussa kartassa eri ajotilanteiden tavoitearvot toimilaitteille. Ohjainlaite saa tiedon säädön vaikutuksesta antureilta ja korjaa säätöarvoa pyrkien saamaan anturitiedon vastaamaan kartan tavoitearvoa. Takaisinkytkentälogiikka muodostuu yleensä PID-

säädöstä sekä feed-forward- eli myötäkylkentätaulukosta. PID-säätö muodostuu proportionaali-, integraali- ja derivaattaosista.

Proportionaaliosa kasvattaa korjausarvoa virheen suuruuden funktiona. Vertauskohtana on tilanne, jossa autonkuljettaja pyrkii pysymään tien keskiviivan päällä. Mitä kauemmas sivuun auto ajautuu, sitä voimakkaammin kuljettajaa korjaa ratilla. Heikkoutena on taipumus oskillointiin, eli jos auto menee korjauksen jälkeen yli viivan, seuraa taas korjausliike vastakkaiseen suuntaan.

Integraaliosa korjaa virhettä virheen keston funktiona, eli kuljettaja kääntää rattia korjatakseen sivuun ajautumisen sitä voimakkaammin, mitä kauemmin auto on ollut halutulta linjalta sivussa. Heikkoutena on saturaatiotaipumus, eli pitkään kestänyt virhe kasvattaa integraalikorjauksen niin suureksi, että kauan liian oikealla kulkenut auto ajetaan vasempaan ojaan.

Derivaattaosa pyrkii ennakoimaan virheen kasvua virheen muutosnopeuden perusteella, eli se on ennustava säätöarvo. Kun kuljettaja huomaa voimakkaan sivutuulen äkkinäisesti siirtävän autoa sivuttain, hän korjaa suuntaa voimakkaasti, vaikka sivuttaissiirtymä ei ole suuri eikä se ole kestänyt kovin kauan.

Riippuen säätökohteen rakenteellisesta hitaudesta ja käytöksen äkkinäisyydestä, tarvitaan P, I ja D arvoista yleensä vähintään kahta. Säätö aloitetaan hakemalla proportionaaliosiolle sellaiset arvot, että saavutettu arvo vaeltaa pienen matkaa pyydetyn arvon molemmin puolin. Tämän jälkeen kasvatetaan derivaatan arvoja niin, että saavutetun arvon vaellus lakkaa. Integraalisäätöä käytetään, jos arvolla on taipumus vaeltaa halutusta pois niin hitaasti ja vähäisessä määrin, että P- ja D-säätimet eivät siihen reagoi.

Myötäkylkentä on esiohjelmoitu korjausarvo, jolla voidaan vahvistaa takaisinkytkennän korjausta jonkun muun kuin takaisinkytkennän mittaaman säätöarvon perusteella. Jos edellisen esimerkin autoilija saisi ennen sivutuuleen joutumistaan varoituksen voimakkaasta tuulesta, ehtisi hän reagoida siihen ohjaamalla tuulen suuntaan, ennen kuin tuuli on poikkeuttanut autoa ajolinjalta.

Ohjainlaite saa tietoa seuraavista lähteistä:

- moottorin kierrosluku ja kampiakselin asento, kampiakselin asentoanturilta
- nokka-akselien asentoanturi
- jäähdytysnesteen lämpöanturi
- imuilman lämpö ja massavirta ilmamassamittarilta
- ahtoilman lämpöanturi
- ahtopaineanturi
- polttoaineenpaineanturi
- ahtimen siipien asentoanturi
- pyörreläppien asentoanturi
- kaasupolkimen asentoanturit
- kaasuläpän asentoanturi.

Näiden tietojen ja esiohjelmoitujen karttojen perusteella ohjataan moottorin toimilaitteita:

- suuttimia
- polttoaineenpaineensäädintä
- ahtopaineensäädintä
- kaasuläppää
- pyörreläppiä
- jäähdytyspuhallin
- yhteispainepumppua.

## 2.5 Tyhjäkäynnin säätö

Tyhjäkäynnin säätö on takaisinkytkentäohjattu, eli moottorinohjain pyrkii pitämään tyhjäkäyntikierrosluvun halutussa arvossa. Kun haluttu kierrosluku on annettu ohjainlait-

teelle, säädetään tyhjäkäynnin säätimen PID-säätö sellaiseksi, että tyhjäkäynti pysyy halutussa arvossa myös häiritäessä, esimerkiksi nostettaessa kytkin äkillisesti. Hyvin toimiessaan tyhjäkäyntisäädin pitää tyhjäkäynnin vakaana ja tekee liikkeellelähdoistä sujuvia, koska säädin osaa itse lisätä syöttöä jos auto pyrkii sammumaan kytkintä nostettaessa.

## 2.6 Ruiskutusennakon säätö

Moottorinohjain pystyy jaksottamaan yhden ruiskutuksen esi-, pää-, ja jälkiruiskutukseen. Jälkiruiskutus on tarpeellinen hiukkasloukun regeneroinnissa, joten sitä ei käsitellä perussäädön yhteydessä. Esiruiskutuksen tehtävänä on toimia eräänlaisena ”sytykkeenä” pääruiskutukselle. Dieselmoottorissa on ruiskutuksen alun ja syttymishetken välillä niin sanottu syttymisjättämä, jonka aikana polttoainetta ruiskutetaan sylinteriin ilman että seos palaa. Syttymisjättämästä seuraa palotilan paineen jyrkkä nousu palamisen alettua, koska vapaata ilmaan sekoittunutta polttoainetta on sylinterissä ja se palaa hallitsemattomasti. Esiruiskutus ajoitetaan niin aikaiseksi, että sen annos on jo syttynyt pääruiskutuksen alkaessa ja näin ollen pääruiskutusannos syttyy lähes välittömästi ruiskutuksen alkaessa. Tästä seuraa hallitumpi palopaineennousu, joka auttaa estämään paikallisten, typenoksideja muodostavien korkeapainealueiden syntymisen sekä pienentää merkittävästi seoksen syttymisen aiheuttamaa ääntä. Esiruiskutusannos on itsessään niin pieni, ettei se merkittävästi nosta palopainetta.

Kun lasketut ruiskutusarvot oli syötetty ohjainlaitteeseen, annettiin ruiskutusennakko taulukkoon arvoiksi 5 astetta EYKK (ennen yläkuolokohtaa) jotta moottori kävisi koh-tuudella ja aloitettiin säätö. Tässä vaiheessa keskityttiin tavoittelemaan mahdollisimman hyvää hyötysuhdetta, päästöihin tul-taisiin paneutumaan myöhemmin.

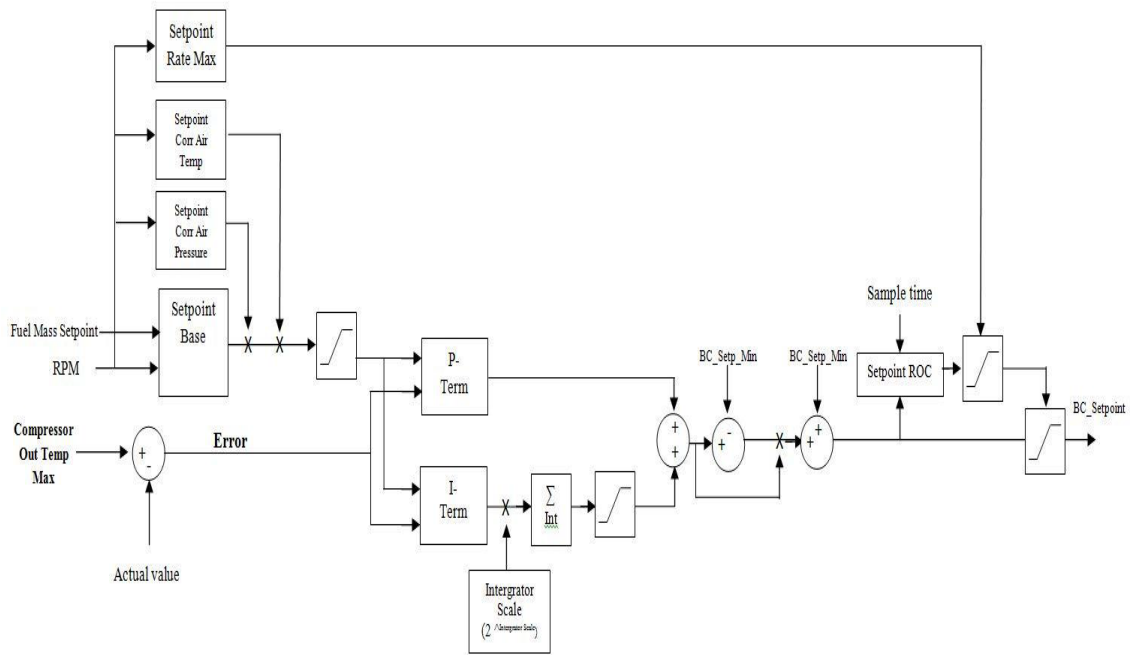
Hyötysuhteen kannalta optimaalinen ruiskutusennakon hakeminen osoittautui varsin yksinkertaiseksi. Pidettäessä ruiskutusmäärä vakiona, haettiin ruiskutuksen ajoitukselle mahdollisimman paljon tehoa tuottava arvo. Paras akseliteho sen hetkisel-lä ruiskutusmäärällä tarkoittaa sitä, että mahdollisimman suuri määrä polttoaineen kemiallisesta energiasta muuttuu mekaaniseksi energiaksi.

Koska tavoitteena oli mahdollisimman hyvä hyötysuhde vakiomoottorin suoritusarvoilla, säätö tehtiin ajamalla ensin täyskaasuasennon ruudut kuormituskartasta hakien ruiskutusennakolle mahdollisimman suuren tehon tuottavaa arvoa. Jos tehelukema kasvoi yli vakion huippuarvon, pienennettiin ruiskutusmäärää. Kun täyskaasuasennot oli säädetty, interpoloitiin osakaasuasennot uudelleen jos täyskaasun ruiskutusmäärää oli muutettu ja käytiin sen jälkeen osakaasuasentojen ruudut läpi hakien jälleen optimaalista ruiskutusennakkoa.

## 2.7 Ahtopaineen säätö

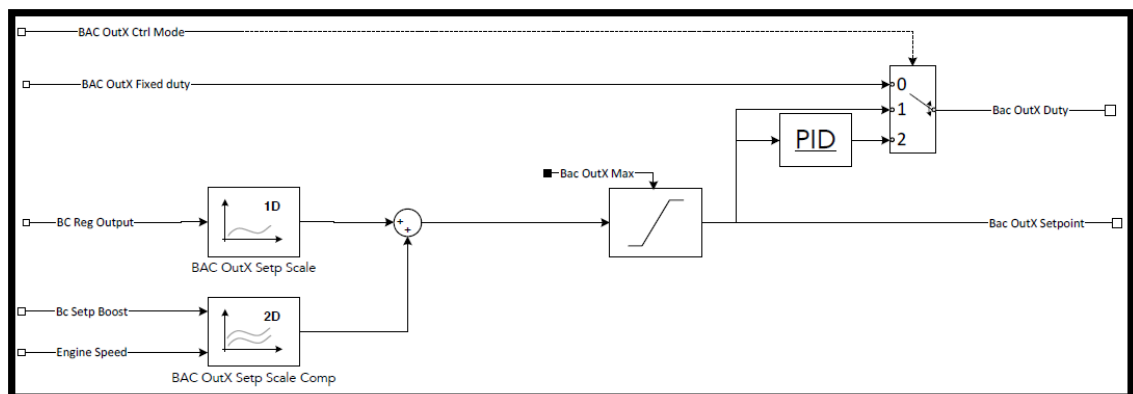
Ahtopaineen säätö tapahtuu kääntämällä VNT-ahtimen johdesiipiä moottorin alipainepumpulta käyttövoimansa saavalla painekellolla. Painekellon asentoa säädetään solenoidiventtiilillä, joka jännitteisessä tilassa kytkee pumpun tuottaman alipaineen kellolle, jolloin kello säätötangon välityksellä kääntää johdesiipiä kiinni. Jännitteettömänä solenoidi yhdistää kellon ulkoilmanpaineeseen, jolloin alipainekellon jousi pyrkii kääntämään siivet auki.

PWM-ohjatun (Pulse width modulation) solenoidin pulssisuhde määrittää, kuinka kauan alipaine vaikuttaa painekellon kalvoon ja näin säätää voimaa, jolla siipiä pyritään kääntämään kiinni. Jousen pyrkiessä samanaikaisesti avaamaan siipiä, muuttaa alipainekellon tuottama voima siipien asentoa. Solenoidia ohjaava säätölogiikka muodostuu kahdesta perättäisestä säätimestä. Kuvan 1 ensimmäinen säädin (Boost controller) huomioi olosuhteiden muutoksia ja suojaa järjestelmää häiriötiloilta. Säädin perustuu  $\text{rpm} \times \text{ruiskutusmäärä}$  -karttaan, johon tallennetaan kyseisen kuormitusosan haluttu ahtopainearvo. Kartalta lähtevää säätöarvoa korjataan ulkoilman paineen ja lämpötilan mukaan niin, että täytös pysyy mahdollisimman samanlaisena olosuhteista riippumatta. Paineen ja lämpötilan korjausarvot ohjelmoitiin laskemalla ilman tiheyden muutos ideaalikaasun tilayhtälön perusteella. Säätimessä on myös PI-säätö, joka rajaa ahtoilman liiallista lämpenemistä muuttamalla säätimeltä ulostulevaa ahtopaineppyyntöä. Näiden lisäksi säätöpiirille ohjelmoidaan ahtopaineppyynnön minimi- ja maksimiarvot. Ahtopaineppyyntö johdesiipien asentoa säättävän painekellon ohjaussolenoidia hallitsevalle piirille (Boost actuator control) lähtee prosentiarvona.



Kuva 1. Boost Controller (2, s. 69)

Johdesiipiä ohjaava säädin saa ahtopaineppyynnön prosenttimuodossa. Säädin sisältää PID-logiikan, joka pyrkii pitämään siivet halutussa asennoissa, sekä reagoimaan nopeasti muuttuvaan paineppyntöön. Kuvan 2 Bc reg output on ahtopaineen säätimen antama prosenttiarvo, joka muutetaan BAC Out1 Setp Scale -taulukossa vastaamaan PWM-pulssisuhdetta, joka tuottaa sopivan alipaineen halutulle ahtopaineelle.

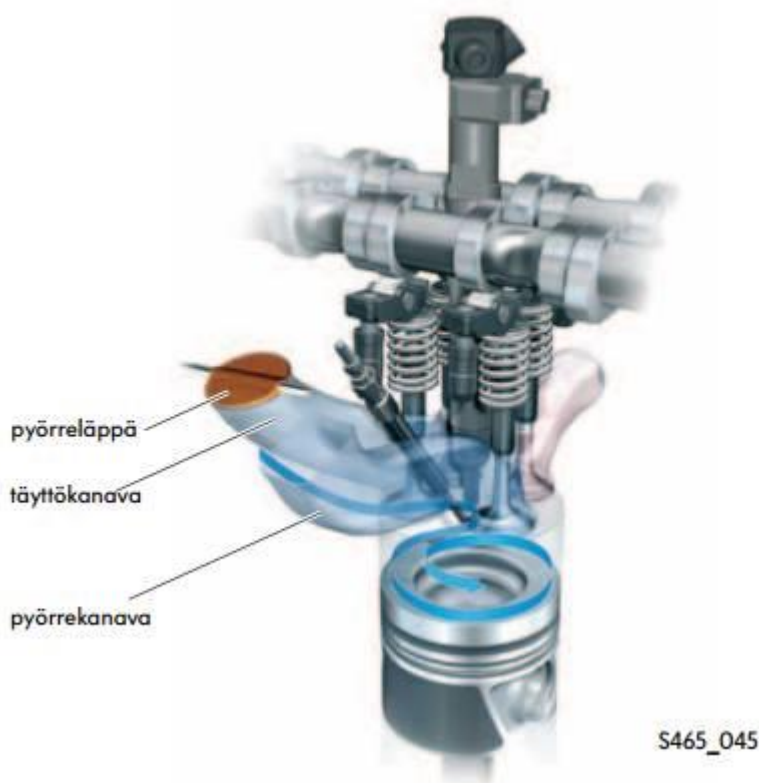


Kuva 2. Boost actuator control (2, s. 68)



## 2.8 Pyörreläppien ohjaus

Dieselmoottori kärsii luonnostaan siitä, että seoksen muodostumiselle on huomattavan vähän aikaa, koska polttoaine suihkutetaan sylinteriin vasta silloin kun halutaan palamisen alkavan. Polttoaineseoksella ei siis ole aikaa sekoittua ennen syttymistä. Tämän seurauksena moottorissa, jonka kanavat on mitoitettu tuottamaan tehoa myös korkeilla pyörimisnopeuksilla, on imuilmän virtausnopeus matalilla kierroksilla niin pieni, että savutuksen ja häikäpäästöjen vähentämiseksi joudutaan käyttämään apukeinoja riittävän pyörteilyn aikaansaamiseksi palotilaan. Käyttämässämme moottorissa tämä on toteutettu kuvan 3 kaltaisesti kahdella eri tavoin muotoilulla imukanavalla sylinteriä kohden. Pienillä kierroksilla käytetään ainoastaan pienempi halkaisijaista, voimakkaasti kaartuvaa ja täten voimakkaan swirl- eli vaakapyörteen aiheuttavaa kanavaa. Imusarjassa on moottorinohjauksen säätämät pyörreläpät, jotka sulkevat pienillä kuormilla toisen, suoran ja suurempi halkaisijaisen imukanavan.



Kuva 3. Pyörreläpät (3, s. 15)

Pyörreläppien säätö toteutettiin yksinkertaisesti. Dynamometrissä huomattiin moottorin tuottavan 37 kW tehoa 2000 rpm kohdalla täyskaasulla pyörreläppien ollessa kiinni, joten voitiin olettaa, että moottori saa riittävästi ilmaa koko NEDC-syklin kuormitusalueella, syklin huipputehon ollessa 35 kW. Täten ohjainlaitteelle tehtiin kartta, jossa läpät ovat täysin kiinni mittausalueella ja aukeavat, kun kuormitustilanne siirtyy syklin kuormitusalueen ulkopuolelle.

## 2.9 Hehkutus

Dieselmoottorin polttoaineseoksen syttyminen perustuu siihen, että puristustahdin aikana sylinterissä oleva ilma puristetaan riittävän nopeasti niin suureen paineeseen, että polttoaineen syttymislämpötila saavutetaan. Tähän vaikuttaa puristussuhde, puristusnopeus ja moottorin lämpötila. Nykyaikaisissa dieselmoottoireissa on verrattain alhainen puristussuhde typenoksidipäästöjen rajoittamiseksi. On myös todettu, että vaikka puristussuhteen kasvattaminen kasvattaa moottorin termistä hyötysuhdetta, menetetään saavutettu hyöty kasvaneisiin kitkoihin työkierron painetason kasvaessa, joten hyötysuhteenkaan kannalta ei ole tarvetta korkeisiin puristussuhteisiin. Matalasta puristussuhteesta seuraava matala puristuslämpötila kuitenkin huonontaa moottorin käynnistymistä sekä kasvattaa kylmäkäynnin hiilivetypäästöjä. Näiden ongelmien estämiseksi moottorissa on käytettävä hehkutulppia, joilla tuodaan palotilaan lisälämpöä ennen käynnistystä ja käynnin alussa.

Moottorin sähköjärjestelmässä on erillinen hehkujenohjauslaite, joka ohjaa hehkutusvirran hehkutulpille moottorinohjauslaitteen komentojen mukaan. ECU (Engine control unit) lähettää esiohjelmoitujen karttojen perusteella 5 V:n PWM-pulssia GCU:lle (glow control unit). GCU antaa vastaavalla pulssisuhteella 12 V:n jännitettä hehkutulpille. Ohjainlaitteessa on erilliset säätötaulukot ennen käynnistystä tapahtuvalle esihehkutukselle, käynnistyksen aikaiselle hehkutukselle sekä jälkihehkutukselle. Esihehkutus on se, jonka käyttäjä normaalisti huomaa kojetaulussa palavasta hehkutuksen merkkivalosta. Käynnistyksen aikainen hehkutus tuo lisälämpöä käynnistysmoottorin ollessa kytkettynä ja jälkihehkutus jatkuu käynnistymisen jälkeen kompensoiden kylmien palotilan seinien kautta pakenevaa lämpövirtaa.

## 2.10 Ajettavuus

Moottorin perussäätö tehtiin dynamometrissä. Vaikka tällä tavoin voidaankin kuormittaa moottoria monipuolisesti, vaatii moottorin reagoinnin säätö käytökseltään johdonmukaiseksi hienosäädön, joka tehdään ajamalla. Käytännössä tämä toteutettiin ajamalla autolla suljetulla alueella ja tarkkailemalla sen käytöstä sekä muuttamalla säätöjä näin saatujen havaintojen perusteella. Ajotesteissä havaittiin, että moottori tuottaa kyllä voimaa niin kuin dynamometrimittausten perusteella sopiikin odottaa, mutta sen reagointi pienillä kuormituksilla on tavattoman huonoa. Ongelmiksi osoittautuivat ohjainlaitteen savutusrajat yhdistettynä ahtopaineen hitaaseen nousuun.

Ohjainlaite laskee jatkuvasti ruiskutusmäärän ja laskennallisen ilmankulutuksen perusteella seossuhdetta. Tätä arvoa käyttää ohjainlaitteen savutusrajataulukko, johon on ohjelmoitu eri kuormitustilanteille rikkaimman sallitun seoksen raja-arvo savutuksen estämiseksi. Dynamometrisäätöjen yhteydessä raja säädettiin niin, että näkyvää savua ei pysty syntymään missään tilanteessa. Tämä yhdistettynä ahtimeen, jonka hidas reagointi hidastaa ilmamassavirran kasvua, aiheutti pahimmillaan viiden sekunnin viiveen kaasunpaineesta moottorin reagointiin.

Dynamometrisäätöä tehdessä pyrittiin myös välttämään tarpeetonta ahtamista eli ahtopaine pyrittiin säätämään niin, että ilmaa riittää palamiseen kohtuullisella ilmaylimäärällä, mutta ei kuitenkaan huononnetta hyötysuhdetta tarpeettoman korkealla ahto- ja pakopaineella. Tämä oli virhe, koska vaikka dynamometrissä nämä säädöt toimivat hyvin ajettaessa kuormitustilanteita hitaasti läpi, osoittautui käytännön ajotestissä ahtopaineen nousu tarpeettoman hitaaksi. Tästä aiheutunut viive korostui entisestään savutusrajataulukon rajatessa syöttöä. Ongelma poistui kun VNT-ahtimen ohjausta muutettiin niin, että pienillä kuormituksilla ahtimen johdinsiivet ovat täysin kiinni ja niitä raotetaan vasta, kun ahtopainetta on rajattava.

## 2.11 Pakokaasun takaisinkierätyksen ohjaus

Vaikka takaisinkierätyksen (EGR) säätö kuuluukin päästöjenhallintaosioon (luku 3), käsitellään se tässä, koska EGR:n toimintaa haluttiin työn puitteissa testata. Myös takaisinkierätystä ohjataan takaisinkytkentäsäädöllä.

Ohjainlaite laskee moottorin laskennallisen ilmamassavirran iskuilavuuden, kierrosluvun, ahtopaineen, imuilmanlämpötilan ja täytöksen funktiona. Kierrosluvusta ja iskuilavuudesta lasketaan moottorin pumppaustilavuuden vaihtelu aikayksikköä kohti. Täytös kertoo, kuinka suuren osan pumppaustilavuudesta moottori kykenee kyseisessä tilanteessa imemään ilmaa. Esimerkiksi: Täytöksen ollessa 0,8, on yhden litran sylinteriin imetty 0,8 litraa ilmaa. Kun ilman tilavuusvirta tunnetaan, lasketaan massavirta ideaalikaasun tilayhtälön mukaan paineesta ja lämpötilasta. Täytösarvot on otettu aiemmista mittaustuloksista ja niitä on verrattu silloin vielä ehjän ilmamassamittarin lukemaan ja todettu ne realistisiksi.

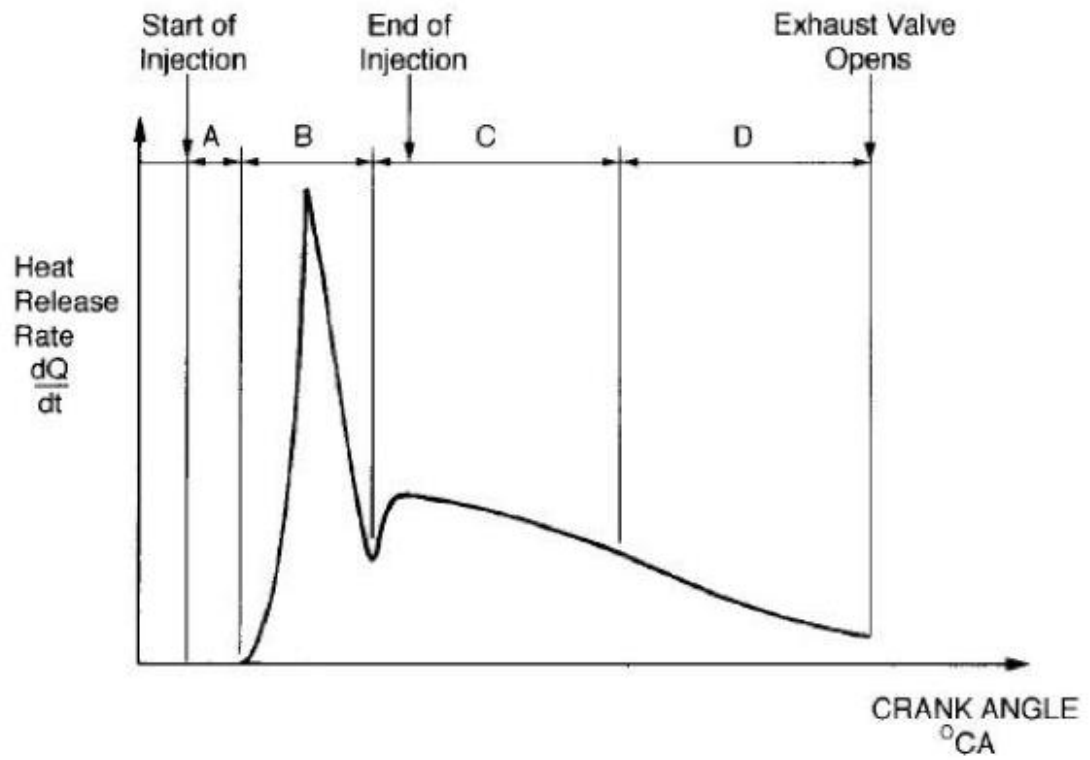
EGR:n pyydetty tuotto määritetään kilogrammoina tunnissa EGR:ää ohjaavaan kuormituskarttaan. Tuottoarvot on säädetty niin, että moottori toimii lähellä savutusrajaa aina kun EGR on toiminnassa. Ohjainlaite laskee EGR:n tuoton vertaamalla laskennallista ilmamassavirtaa ilmamassamittarin mittaamaan arvoon. Näiden arvojen erotus vastaa pakokaasun takaisinkierrätyksen virtausta, koska ilmamassamittarin näyttämä alenee samassa suhteessa imuilmaa korvaavan pakokaasun virtaukseen. Takaisinkytkentäohjaus pyrkii pitämään EGR:n lasketun tuoton kartan pyytämässä arvossa. Ohjauksen PID-säädön toteutus osoittautui varsin haastavaksi, koska kiihdytettäessä tilanteesta, jossa EGR:n virtaus on suurta, täytyy EGR-venttiili saada suljettua todella nopeasti, että moottori saisi riittävästi ilmaa lisääntyneeseen tehontarpeeseen.

### 3 Päästöjenhallinta

Liikenteen päästöjen aiheuttamia terveydellisiä ja ympäristöllisiä haittoja on jo kauan pyritty vähentämään asettamalla ajoneuvoille päästörajoituksia. Dieselmootoreissa merkittävimmin terveydelle haitallisina päästöinä pidetään typenoksidi- ja hiukkaspäästöjä. Myös vähäisiä määriä häkä- ja hiilivetypäästöjä syntyy erityisesti kylmäkäynnistyksissä. Hiilidioksidipäästöjä syntyy luonnollisesti aina poltettaessa hiiltä sisältävää polttoainetta. Niitä ei tässä työssä suoranaisesti käsitellä, koska ne ovat suoraan riippuvaisia polttoaineen kulutuksesta ja täten niitä vähennetään parhaiten parantamalla moottorin hyötysuhdetta.

#### 3.1 Dieselmootorin palotapahtuma ja seoksen muodostus

Esisekoittumispalaminen tapahtuu heti polttoaineen syttyttyä, kun syttymisjättämän aikana ruiskutettu polttoaine palaa. Esisekoittumispalaminen tapahtuu verraten vakiotilavuudessa, männän ollessa lähellä yläkuolokohtaa. Tästä johtuen palopaine nousee jyrkästi, jolloin suurimmat paikalliset palolämpötilat syntyvät kuvan 4 kuvaajan mukaisesti. Pääosa polttoaineesta palaa diffuusiopalamisen yhteydessä, sitä mukaa kun ruiskutettu polttoaine sekoittuu happeen. Diffuusiopalamisen aikana palotilan paine kestää kohtuullisen vakaana, männän loitotessa yläkuolokohdasta ruiskutuksen yhä jatkuessa. Jälkipalamisen vaihe kestää ruiskutuksen loppumisesta pakoventtiilin aukeamiseen. Tässä vaiheessa palopaine ja lämpötila laskevat jyrkästi. (4, s. 4.)

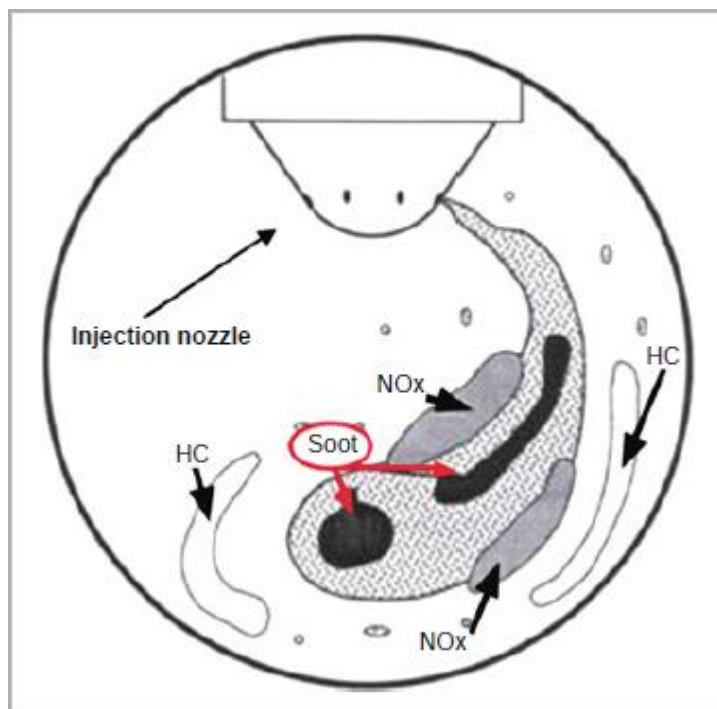


Kuva 4. Vanhanaikaisen dieselmoottorin palamislämpötilakuvaaja (5, s. 2)

- A: Syttymisjättämä
- B: Esisekoittumispalaminen (isokoorinen)
- C: Diffuusiopalaminen (isobaarinen)
- D: Jälkipalaminen

### 3.2 Päästöjen synty

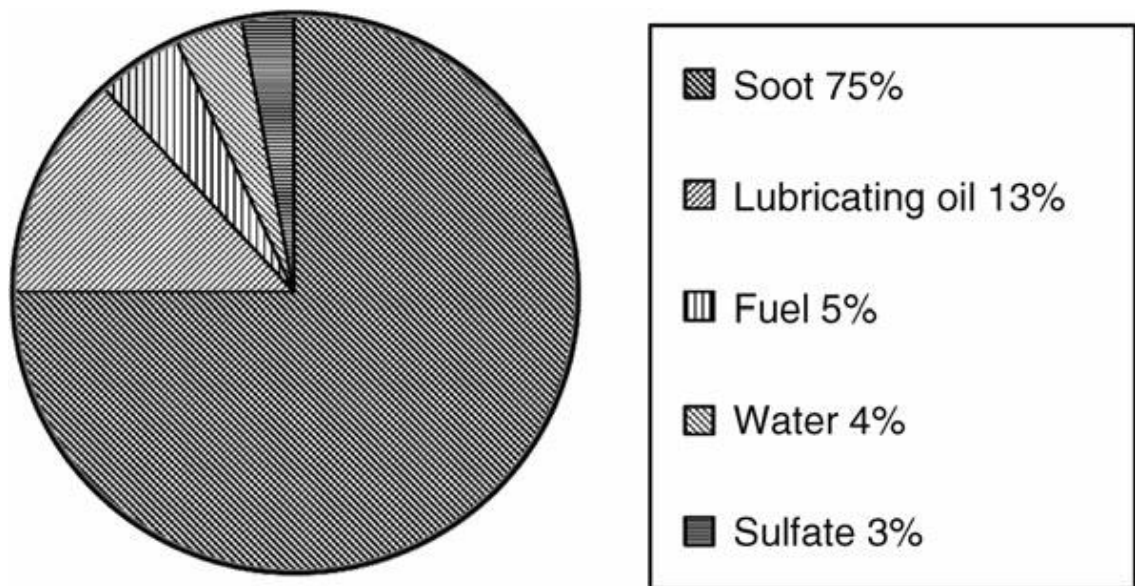
Ruiskutetun polttoaineen sekoittuessa pyörteilevään ilmaan heterogeenisessä palota-  
pahtumassa, syntyy erilaisia sekoittuneita ilma-polttoaineseosvyöhykkeitä. Kuvan 5  
suihkun sisimmällä (musta) alueella lambda-arvo on nolla, siellä ei ole ilmaa, vain polt-  
toainetta. Korkeasta lämpötilasta johtuen hiilivetyjä kuitenkin hajoaa, joten tällä alueella  
syntyy nokea (Soot). Siitä ulommalla (harmaa rasteri) palaminen tapahtuu halutusti.  
Seossuhde on lähellä lambda yhtä. Hyvän palamisen vyöhykkeen ulkoreunoilla on run-  
saasti ylimääräistä happea ja korkea lämpötila, joten alueella syntyy typenoksideja  
(NOx). HC-päästöjä syntyy palotilan suuttimesta katsoen kaukaisimmilla alueilla, koska  
siellä lämpötila on liian pieni suihkutuspilvestä karanneiden irtopisaroiden hapettumi-  
seen. Suuri osa diffuusiopalamisen aikana syntyneistä HC- ja nokijäämistä hapettuu  
jälkipalamisen aikana. (6, s. 62.)



Kuva 5. Päästöjen synty diffuusiopalamisen aikana (6, s. 62)

### 3.2.1 Hiukkaset (PM)

Hiukkaspäästöt muodostuvat pääosin noesta. Hiukkasiin sitoutuneena on myös voiteluainejäämiä, palamatonta polttoainetta, vettä ja sulfaatteja, jotka syntyvät poltto- ja voiteluaineen rikin hapettuessa. Kuvassa 6 näkyy tyypillinen päästöhiukkasen materiaalityyppi. Perushiukkaset syntyvät polttoaineen hiilivetyjen hajotessa työtahdin korkeassa lämpötilassa palotilan vähähappisilla alueilla. Vetyatomit kevyempinä liukenevat nopeammin palotilassa olevaan ilmaan ja palavat, kun taas hiiliatomeista vain osa palaa ja osa muodostaa suurempia hiilimolekyylejä. Tästä hiilestä jopa 95 % hapettuu jälkipalamisen aikana. Jäljelle jäävä osa kerää pakoputkistossa itseensä muita yllä mainittuja palamisjätteitä muodostaen lopulliset hiukkaspäästöt. (6, s. 446.)



Kuva 6. Hiukkasten sisältö (6, s. 446)

### 3.2.2 Typenoksidit (NO<sub>x</sub>)

Pakokaasupäästöjen typenoksideista puhuttaessa tarkoitetaan sekä typpimonoksidia (NO) että typpidioksidia (NO<sub>2</sub>). Yleisilmaisuna molemmille käytetään yleensä NO<sub>x</sub>-merkintää. Typenoksideja syntyy dieselmoottorissa ilman sisältämän typen ja hapen yhdistyessä.

Kuvan 7 kaavassa ilman sisältämä happi (O<sub>2</sub>) hajoaa yksittäisiksi atomeiksi yli 2200 K lämpötilassa. Vaikka keskimääräinen palamislämpötila ei olekaan näin korkea, esiintyy palotilassa tätäkin kuumempia alueita palamisen aikana. Happiatomien vapauduttua,



osa niistä hapettaa ilmassa olevaa typpeä ( $N_2$ ) muodostaen typpioksidia (NO) sekä jättää vapaata yksiatomista typpeä (N) palotilaan. Yksiatominen typpi reagoi kaksiatomisen hapen ( $O_2$ ) kanssa muodostaen typpidioksidia ( $NO_2$ ). Pääosa typenoksideista syntyy esisekoittumispalamisen aikana, kun syttymisjättämän aikana palotilaan ruiskutettu polttoaine palaa suurella nopeudella runsashappisessa palotilassa, tuottaen korkean lämpötilan. Kuvan 7 alimman rivin reaktioyhtälö kuvaa typpimonoksidin syntyä liekkirintaman takana esiintyvällä vähähappisella alueella. Hiilivetyjen hajotessa vähähappisilla alueilla vapautuu vetyä, joka muodostaa hapen kanssa reagoidessaan hydroksidi-ioneja (OH), jotka puolestaan reagoivat aiemmin kuvatuissa reaktioissa vapautuneen yksiatomisen typen (N) kanssa muodostaen typpimonoksidia (NO) ja vetyä (H). Typenoksidit ovat nimenomaan dieselmoottorien helmasynti, koska dieselmoottori toimii lähes poikkeuksetta ilmaylimäärällä eli typenoksidien rakennusainetta ilmaa, on runsaasti läsnä samanaikaisesti palotapahtuman paikallisten huippulämpötilojen kanssa. Typenoksideja voidaan vähentää moottorin sisäisillä keinoilla poistamalla tai vähentämällä niiden syntymisen edellyttämiä ilmaylijäämää ja yli 2200 K vyöhykkeitä palorintamasta. (6, s. 445.)



Kuva 7. Typenoksidien muodostuminen (6, s. 445)

### 3.2.3 Hiilivedyt (HC)

Hiilivety päästöjä ei dieselmoottorissa juurikaan synny. Tämä johtuu siitä, että dieselprosessissa polttoaine suihkutetaan sylinteriin vasta silloin, kun halutaan sytyttää seos. Tämän seurauksena lähes kaikki pienet palorintaman etenemiselle kelvottomat raot palotilassa, kuten venttiilien ja istukoiden tiivistyspinnan reunalle jäävät raot sekä ylimmän männänrenkaan yläpuolelle, männän ja sylinteriseinämän väliin jäävä rako on täynnä ilmaa. Ainoa paikka, jossa dieselmoottorin normaalisti toimiessa syntyy vähäisiä hiilivety päästöjä, ovat suuttimien kärkien suihkutusaукот. Niihin jää ruiskutuksen jäl-

keen vähäinen määrä polttoainetta, joka höyrystyy palamisen aikana, muttei ehdi osallistua palotapahtumaan vaan pääsee palamattomana pakoputkistoon. Tätä vähäistä päästöä autotehtaat pyrkivät estämään muotoilemaan aukot niin, että niihin jäisi mahdollisimman vähän polttoainetta. Tätä pyrkimystä on myös osaltaan auttanut palotapahtumaan tehostamiseen tähtäävä ruiskutuspainoiden nosto. Korkeammalla ruiskutus-paineella tarvitaan saman polttoainemäärän siirtämiseen pienempi virtauspinta-ala, joten jäämpolttoaineelle on vähemmän tilaa ja samalla virtausnopeus kasvaa merkittävästi, jolloin suuttimen sulkeutuessa ruiskutusannoksella on suurempi nopeus, joka parantaa suutinkärjen aukkojen tyhjentymistä. (6, s. 449.)

### 3.2.4 Häkä (CO)

Häkkää ei dieselmoottorin normaalissa toiminnassa synny. Vähäisiä määriä kuitenkin tuotetaan operoitaessa lähellä savutusrajaa. Suoraruiskutusmoottoreissa voi myös pienillä kuormituksilla ajettaessa syntyä CO-päästöjä jos palotilan pyörteilyyn ei ole kiinnitetty huomiota. Pienillä kuormilla ajettaessa palolämpö on niin matala, että osittain palaneet kaasut eivät välttämättä ehdi palaa loppuun ennen pakoventtiilin avautumista. Hyvin pyörteilevä palotila kuitenkin edesauttaa palamista ylläpitämällä sekoittumista vielä jälkipalamisen aikana. (6, s. 449.)

### 3.3 Päästömääräykset

Ennen 1.9.2014 ensirekisteröitävänä Biofore-kaupunkiauton on täytettävä EURO 5 -päästönormin mukaiset vaatimukset NEDC-syklissä (7, Liite 1).

Päästöt saavat maksimissaan olla

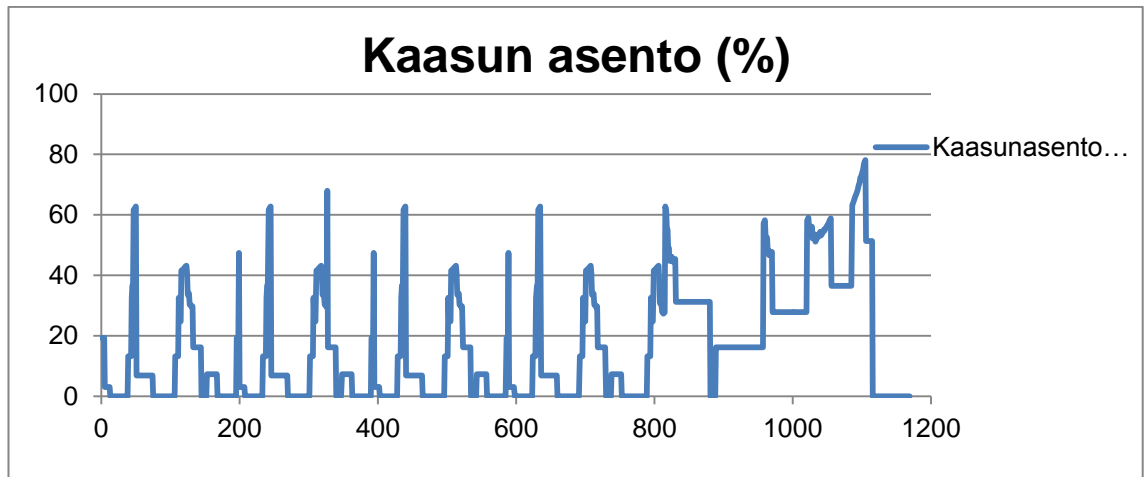
- CO 0,5 g/km
- HC+NO<sub>x</sub> 0,23 g/km
- NO<sub>x</sub> 0,18g/km
- PM 0,005 g/km.

### 3.4 NEDC (New European Driving Cycle)

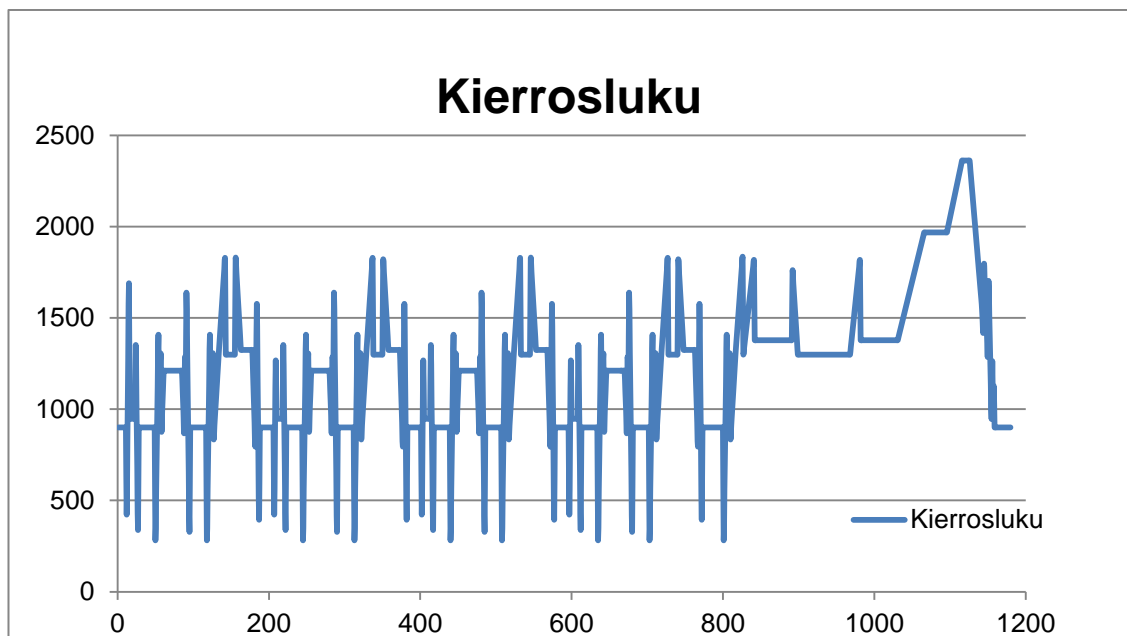
Uusi eurooppalainen ajosykli joka tunnetaan myös nimellä MVEG-B. Tällä syklillä ajetaan EURO 5 -normin määrittämät päästömittaukset. Sykli sisältää kaupunkiajo-osion, jossa nopeudet vaihtelevat tyhjäkäynnistä viiteenkymmeneen kilometriin tunnissa, sekä maantieajo-osion, jossa liikutaan nopeusalueella 70 –120 km/h. Testi kestää yhteensä 1180 sekuntia ja alkaa kylmäkäynnistyksellä 20 – 30 °C lämpötilasta. Sykli sisältää ajonopeuskäyrän, jonka määräämillä nopeuksilla autoa ajetaan testissä. Ajettaessa testiä jarrudynamometrissä kuormitus eli eri hetkillä käytettävät tehot määritetään auton ajotilapiirroksen mukaan. (1, s. 620.)

Valitsemalla järkevästi testissä käytettävät vaihteet voidaan syklin kuormitustilanteet rajata kattamaan hyvin vähäinen osa moottorin käyttökelpoisesta kuormitusalueesta. Tämän alueen ulkopuolella syntyvillä päästöillä ei ole päästöhyväksynnän kannalta mitään merkitystä. Tämä helpottaa säätötyötä huomattavasti, mutta toisaalta kertoo siitä, että ajettaessa kuormituksilla, joita syklissä ei käytetä, ei pakokaasupäästöjä kontrolloida millään tavoin.

Kuvat 8 ja 9 kuvaavat mittaussyklissä käytettäviä kierroslukuja ja kaasun asentoja. Arvot on laskettu auton ajotilapiirroksen perusteella. Arvojen laskennassa on pyritty siihen, että autoa ajettaisiin mittaussyklissä mahdollisimman suppealla kuormitusalueella, jolloin päästörajat voidaan alittaa mahdollisimman pienellä säätötyöllä. Mittauksessa käytetyn alueen ulkopuolella moottori säädetään tuottamaan mahdollisimman hyvä hyötysuhde.



Kuva 8. Kaasupolkimen asento syklin aikana



Kuva 9. Kierrosliku syklin aikana. Alle 900 rpm kuvaa tilannetta, jossa luistatetaan kytkintä liikkeellelähdössä.

### 3.5 Päästöjen vähentämiseen käytettävät keinot

#### 3.5.1 Välijäähdytin

Välijäähdytin on ahtimen ja imusarjan väliin sijoitettu jäähdytyskenno, jossa ahtimen lämmön ja paineen nousun kuumentamaa imuilmaa jäähdytetään. Jäähdyttämällä

saavutetaan ilman tiivistymisen myötä suurempi massavirta ja matalampi palotapahtuman lämpötila. Lämpötilan lasku auttaa vähentämään typenoksidien muodostumista ja massavirran kasvulla saadaan parannettua täytöstä ja sitä kautta lisättyä tehoa. (6, s. 455.)

### 3.5.2 EGR eli pakokaasujen takaisinkierätyks

EGR on venttiili, joka päästää pakosarjasta palanutta pakokaasua imusarjaan, josta se imetään imuilman mukana palotilaan, jolloin se on läsnä seuraavassa työkierrrossa. Pakokaasu palotilassa vaikuttaa kahdella tavalla. Koska imuilman sekaan syötetty pakokaasu vie tilaa tuoreelta ilmalta, pääsee palotilaan vähemmän typenoksidien syntymiselle välttämätöntä happea ja typpeä. Enimmäkseen kolmiatomisista kaasuista H<sub>2</sub>O ja CO<sub>2</sub> koostuvan vähähappisen ja inertin kaasumassan ominaislämpökapasiteetti on korkeampi ja erityisesti jäähdytettyä EGR:ää käytettäessä lämpötila on huomattavasti matalampi kuin palamislämpö. Näin ollen palotilassa oleva pakokaasu sitoo palamisen lämpöenergiaa itseensä alentaen palamisprosessin lämpötilaa. (6, s. 452.)

### 3.5.3 Ruiskutusennakon pienentäminen

Pienentämällä ruiskutusennakkoa saadaan myös rajoitettua typenoksidien syntymistä. Mitä myöhäisemmässä vaiheessa puristustahtia polttoaine ruiskutetaan moottoriin, sitä korkeammaksi on palotilassa olevan ilman lämpötila ehtinyt nousta ja sitä nopeammin ruiskutettava polttoaine syttyy, jolloin esisekoittumispalaminen jää vähäisemmäksi. Myöhäisen ennakon varjopuolena on hyötysuhteen heikkeneminen, koska palamispaikkeen huippu sijoittuu pidemmälle työtahtiin eikä vapautunutta energiaa saada tehokkaasti hyödynnettyä. (6, s. 450.)

### 3.5.4 Hapetuskatalysaattori (DOC)

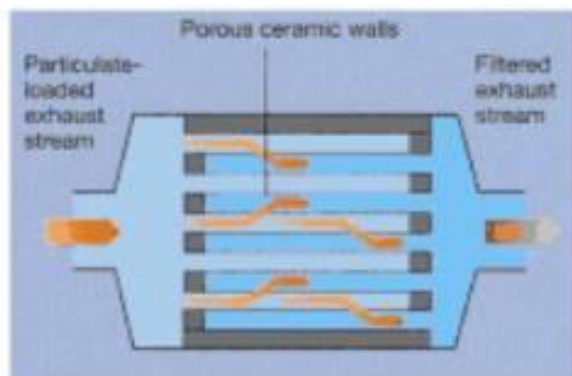
Hapettava katalysaattori hapettaa CO:n (häkä), HC:n (hiilivedyt) sekä hiukkasten haihtuvat osat CO<sub>2</sub>:ksi eli hiilidioksidiksi ja vedeksi(6, s. 457).

### 3.5.5 Esiruiskutus

Esiruiskutuksella pyritään pienentämään syttymisjättämää ja sitä kautta vähentämään esisekoittumispalamista. Tästä seuraa loivempi paineen- ja lämpötilannousu seoksen syttyessä. Moottorin käyntiäni hiljenee myös merkittävästi. (6, s. 453.)

### 3.5.6 Hiukkasloukku (DPF)

Hiukkasloukku on nimensä mukaisesti suodatin, johon pakokaasujen hiukkaset jäävät. Loukun seinät ovat huokoista keraamista materiaalia, joka sallii kaasumaisten aineiden läpivirtauksen mutta suodattaa pääosan hiukkasista pois. Pääosa loukkuun kerääntyvästä materiaalista on hiiltä, joka täytyy vaihtelevin väliajoin regeneroida eli polttaa hiilidioksidiksi. Loukkuun kerääntyy myös tuhkaa, jota syntyy moottorista irronneista metallihiukkasista sekä palaneesta moottoriöljystä. Tätä tuhkaa ei voida regeneroida, ja siksi loukulla onkin rajattu käyttöikä. (6, s. 458.)



Kuva 10. Hiukkasloukun rakenne

## 4 Mittaukset

Mittaukset toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Kalevankadun -toimipisteen emissiolaboratoriossa marras-joulukuussa 2013. Mittauksien alkuperäinen tarkoitus oli säätää ja mitata moottorin typenoksidipäästöt kaikissa NEDC-syklin kuormitusilanteissa (käsitellään tarkemmin luvussa 5). Teknisistä ongelmista johtuen mittaukset jäivät varsin suppeiksi eikä 138:sta kuormituspisteestä ehditty käydä läpi kuin neljä. Nämä neljä pistettä valittiin kattamaan mahdollisimman laajalti syklin eri alueita. Mittaustuloksista saadaan kuitenkin suuntaa jatkotoimille.

### 4.1 Mittausjärjestelyt

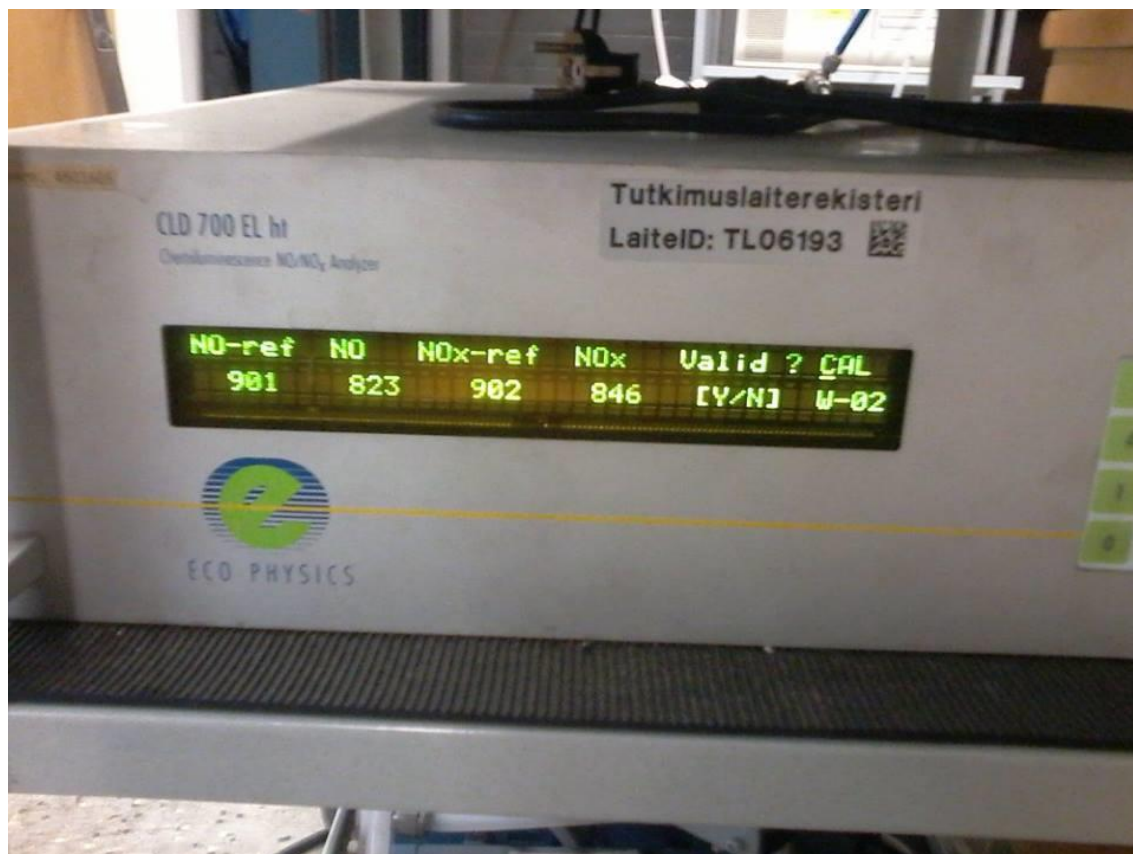
Koska emissiolaboratorion kylmäkoneisto ei toiminut, oli testissä vaaditun 20–30 °C:n lämpötilan tarkka ylläpito mahdotonta. Tästä syystä mittauslämpötila pyrittiin pitämään mahdollisimman tarkasti vaaditulla alueella lämmittämällä tilaa moottorin hukkalämmöllä ja tuulettamalla liikalämpö tuuletuskanavien kautta ulos.

Koska moottorissa on hiukkasloukku, voitiin todeta, että mitattavia hiukkaspäästöjä ei juurikaan synny. Dieselmoottori ei hyvin toimiessaan myöskään tuota HC- eikä CO-päästöjä niin paljon, että niillä olisi merkitystä päästörajoitusten kannalta. Täten olennaisimmaksi säätökohteeksi päästöjen osalta jäivät typenoksidipäästöt.

Tehonmittauksessa käytettiin emissiolaboratorion Superflow -dynamometriä. Typenoksidipäästöjen mittaamiseksi vuokrattiin VTT:ltä Eco Physics CLD 700 EL ht, kemoluminesenssi- NOx -analysointilaitteita, joka näkyy kuvassa 11. Laite mittaa pakokaasujen typenoksidipitoisuutta. Koska päästönormin rajat on määritetty muotoon grammaa kilometrille, jouduttiin pakokaasun massavirta laskemaan moottoriin käyttämän ilma- ja polttoainemassatiedon perusteella sekä laskemaan typenoksidien massavirta siitä.

Sekuntia kohden ruiskutetun polttoaineen määrän moottorinohjaus laskee suuttimien tuoton ja ruiskutuspaineen perusteella ja ilmamassatieto saadaan ilmamassamittarilta. Bosch ilmoittaa ilmamassamittarin tarkkuudeksi käytetyllä mittausalueella 2 %, mutta mittauksien loppuvaiheessa huomattiin ilmamassamittarin nokeentuneen ja siksi mittarin tarkkuus on tuskin valmistajan ilmoittamissa rajoissa. Kuitenkin verrattaessa mittarin näyttämiä arvoja moottorinohjauksen laskettuihin arvoihin, voidaan sanoa tulosten olevan realistisia. Koska sekä ilmamassamittarin tarkkudesta ja suuttimien tuotoista oli

epäilyksiä, tarkistettiin tulos vielä vertaamalla mittauksien perusteella laskettua seossuhdetta lambda-anturilla mitattuun. Laskennallinen ja mitattu seossuhde seuraavat pääsääntöisesti toisiaan pienellä marginaalilla, joten tuloksia voidaan pitää totuudenmukaisina. Lopulliseen päästömittaukseen tarkkuus ei kuitenkaan riitä, ja ilmamassamittari tullaan siksi uusimaan.



Kuva 11. NOx-analysaattori CLD 700 EL ht

#### 4.2 Tulokset

Mittauksien tarkoitus oli selvittää, kuinka paljon EGR todellisuudessa leikkaa typenoksideja ja samalla perehtyä EGR:n ohjauksen säätämiseen niin, että sitä voidaan käyttää mahdollisimman tehokkaasti.

Mittauksia ehdittiin suorittamaan valitettavan vähän. Tarkat tulokset saatiin ajettua vain neljässä syklin eri kuormituspisteessä. Pisteet valittiin niin, että niistä saataisiin mahdollisimman laaja näyte syklin eri alueilta. Jokainen kuormituspiste mitattiin kolme kertaa aloittaen joka kerta tyhjäkäynniltä.



Taulukossa 1 näkyy kolmen mittauksen keskiarvo. Ei EGR -merkityt tulokset on mitattu EGR-venttiili kiinni, EGR -merkityt tulokset on mitattu säätämällä pakokaasun takaisinkierätyksiä niin suurelle kuin mahdollista, ilman että moottori tuottaa näkyvää savua.

Taulukko 1. Tulokset

Ei EGR									
MAF g/s	Fuel g/s	Noxm g/s	Lask MAF	MAP	ExP	O2	IAT	kW	rpm
14,07	0,35	0,00923	12,78	1,18	1,43	3,15	19,70	3	1299
16,76	0,44	0,01598	15,19	1,25	1,67	2,63	23,70	6	1378
16,48	0,81	0,04085	15,65	1,33	1,77	1,40	24,27	11	1299
23,15	1,04	0,04929	25,00	1,60	2,00	1,85	31,43	15	1818
EGR									
5,69	0,35	0,00012	11,39	1,00	1,00	1,08	16,73	3	1299
6,87	0,43	0,00042	12,69	1,05	1,10	1,15	21,67	6	1378
13,13	0,82	0,00858	14,63	1,26	1,57	1,12	21,57	11	1299
14,86	1,16	0,00616	23,80	1,48	2,07	1,17	29,80	15	1818

### 4.3 Analyysi

Tuloksista nähdään, että raja jossa näkyvää savua alkaa tulla on hyvin lähellä arvoa  $\lambda = 1$ . Tämä kertoo seoksen hyvästä sekoittumisesta ja on todennäköisesti pyörreläppien ansiota.

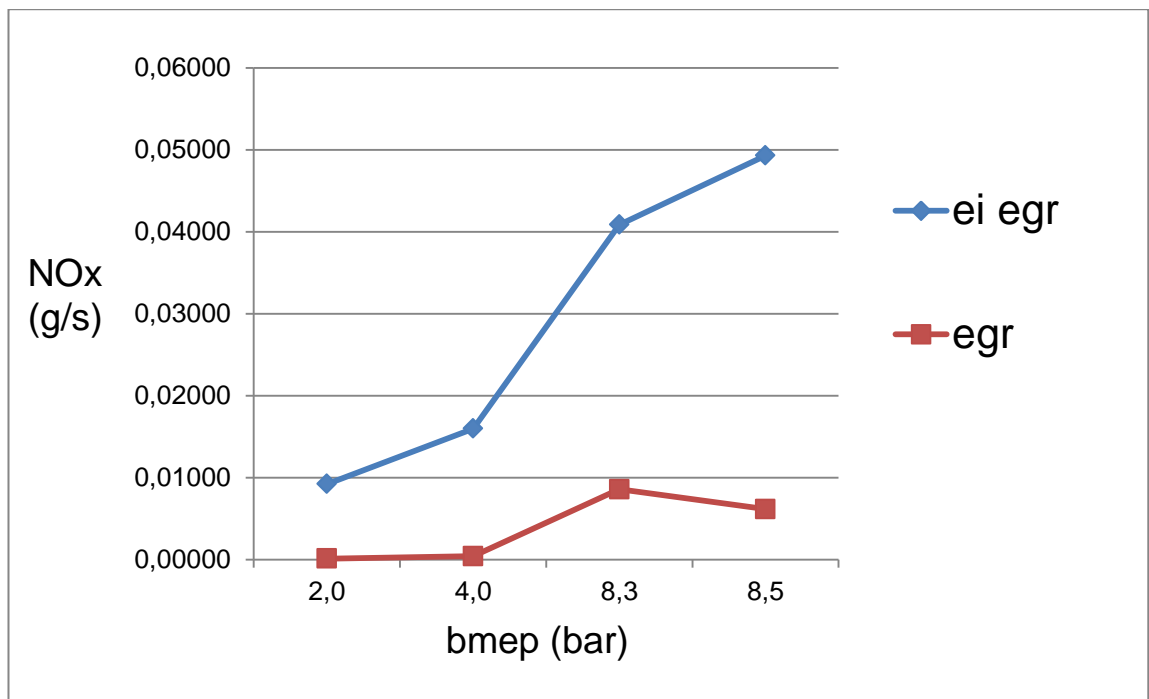
Suoraa verrannollisuutta tuloksista haettaessa ainoa yhteys löytyi teholliseen keskipaineeseen (bmep), joka kuvaa sitä keskimääräistä tehollista painetta, joka kohdistuu mäntään työtahdin aikana tietyllä kuormituksella.

Tehollinen keskipaine ei ole suoraan riippuvainen palamisen huippupaineista, ja sama bmep voidaan saavuttaa joko lyhyempikestoisella korkealla paineella tai pitempikestoisella matalalla paineella. Se on kuitenkin paras tapa kuvata moottorin kuormitusta yksittäistä työtahtia kohti.

Kuvasta 12 nähdään, että ilman pakokaasun takaisinkierätyksiä, NOx:n määrä kasvaa jyrkästi painetta nostettaessa, koska vapaata happea on paljon läsnä ja paineen kasvamisesta seuraa sen reagointi ilman typen kanssa. Käytettäessä EGR:ää korrelaatio paineeseen yhä säilyy, mutta NOx:a syntyy murto-osia verrattuna ilman takaisinkierätyksiä suoritettuihin mittauksiin.

EGR:n virtausmäärä ei sinänsä ole suoraan kytköksissä NOx:n syntyyn, sitä on vain oltava riittävästi, että ylimääräinen ilma saadaan korvattua. Käytännössä lambda-arvosta voitaisiin löytää korrelaatiota, koska se kuvaa seossuhteen kautta myös ilmaylijäämää. Näissä mittauksissa ei nähty tarpeelliseksi mitata tätä korrelaatiota, vaan pyrittiin mahdollisimman suureen takaisinkierrätykseen. Säättöä haettaessa kuitenkin nähtiin, että EGR:n virtausta kasvatettaessa NOx-määrä putosi.

Tuloksista näkyy myös se, että pakopaineen (Exp) ja imusarjan paineen (MAP) välinen ero jää joissakin pisteissä niin pieneksi, että imuilman kuristaminen kaasuläpällä on tarpeellista. Esimerkiksi tilanteessa 3 kW, 1299 rpm EGR on tasannut imusarjan ja pakosarjan välisen paine-eron täysin eikä tuottoa saada enää lisää EGR:ää avaamalla. Kyseisessä tilanteessa paine-ero riitti täpärästi, mutta joitakin mittapisteitä jouduttiin jättämään tässä vaiheessa mittaamatta, koska aika ei riittänyt EGR:n ja kaasuläpän keskinäisen toiminnan riittävän tarkkaan säätöön.



Kuva 12. Typenoksidien massavirta tehollisen keskipaineen funktiona

## 5 Jatkoimenpiteet

Moottorin säätötyö jatkuu tämän insinööri työn valmistumisen jälkeen. Seuraavassa käsitellään yleisiä suuntalinjoja jatkotoimille.

### 5.1 EURO 5

Moottorin tiedetään olevan mekaaniselta toteutukseltaan kykenevä EURO 5 -normin täyttämiseen; kysymys on siis siitä, saadaanko sitä ohjattua riittävän tarkasti. NEDC-syklin ajotilanteet on purettu säätökelpoiseen muotoon laskemalla syklin nopeuskäyrästä ja auton ajotilapiirroksesta tehontarve jokaiselle syklin sekunnille. Eri tilanteissa käytetyt vaihteet on valittu niin, että mittauksessa operoidaan mahdollisimman suppealla kierroslukualueella. Kun vaihde, kierrosluku ja teho jokaiselle syklin sekunnille oli tiedossa, haarukoitiin teho-kierroslukuyhdistelmistä (kuormituspiste) toistuvat parit ja kokonaisesekuntimäärä, jonka verran syklin aikana missäkin kuormituspisteessä ollaan taulukon 2 tavoin. Näin valituista pisteistä poistettiin kaikki moottorijarrutustilanteet, koska polttoaineensyöttö katkaistaan moottorijarrutuksessa eikä näin ollen päästöjä synny. Jäljelle jääneistä 138 pisteestä muodostettiin taulukko, jossa näkyy teho, kierrosluku ja aika, kuinka kauan kyseistä kuormitusta syklin aikana käytetään. Ajamalla nämä pisteet läpi ja mittaamalla niiden päästöt, saadaan taulukosta kohtalaisella tarkkuudella laskettua, kuinka paljon päästöjä koko syklissä tulee syntymään. Päästömittauksiin liittyvät säätötoimet tullaan kohdistamaan ainoastaan näiden pisteiden alueelle.

Eri kuormituspisteiden esiintymistiheydestä voidaan päätellä mihin alueelle säätötoimia kannattaa painottaa, jotkin kuormitustilanteet esiintyvät syklissä yli 100 sekunnin ajan, kun taas useat tilanteet ovat vain yhden sekunnin kestoisia. Monet syklin tilanteista ovat myös niin lähellä toisiaan, että ne osuvat moottorin säätökartastoissa samaan ruutuun, näin ollen niitä ei tarvitse erikseen säätää.

Taulukko 2. Esimerkki kuormituspisteestä. Syklissä ajetaan tasakaasulla 120 km/h 10 s:n ajan, jolloin teho on 21,3 kW ja kierros-luku 2361 rpm

P kW	rpm	s/sykli
21,2606	2361,6	10

PM- HC- ja CO- päästöjen osalta tullaan luottamaan siihen, että riittävän pitkällä jälki-hehkuksella, pyörreläpillä, hapetuskatalysaattorilla ja hiukkasloukulla ne pysyvät ku-  
rissa. Näin ollen ainoa todellinen haaste syntyy typenoksideista. Niiden vähentäminen  
aloitetaan säätämällä EGR toimimaan maksimaalisella virtauksella koko mittausalueel-  
la. Jos tämä ei riitä, lähdetään vähennystä hakemaan pienentämällä ruiskutusennak-  
koa ja hakemalla esiruiskutukselle optimaalisempaa ajoitusta NOx-analysaattorin tulost-  
ten perusteella. Suuri osa työmäärästä tulee olemaan sopivan kompromissin löytämi-  
sessä moottorin toimivuuden ja päästöjen välille.

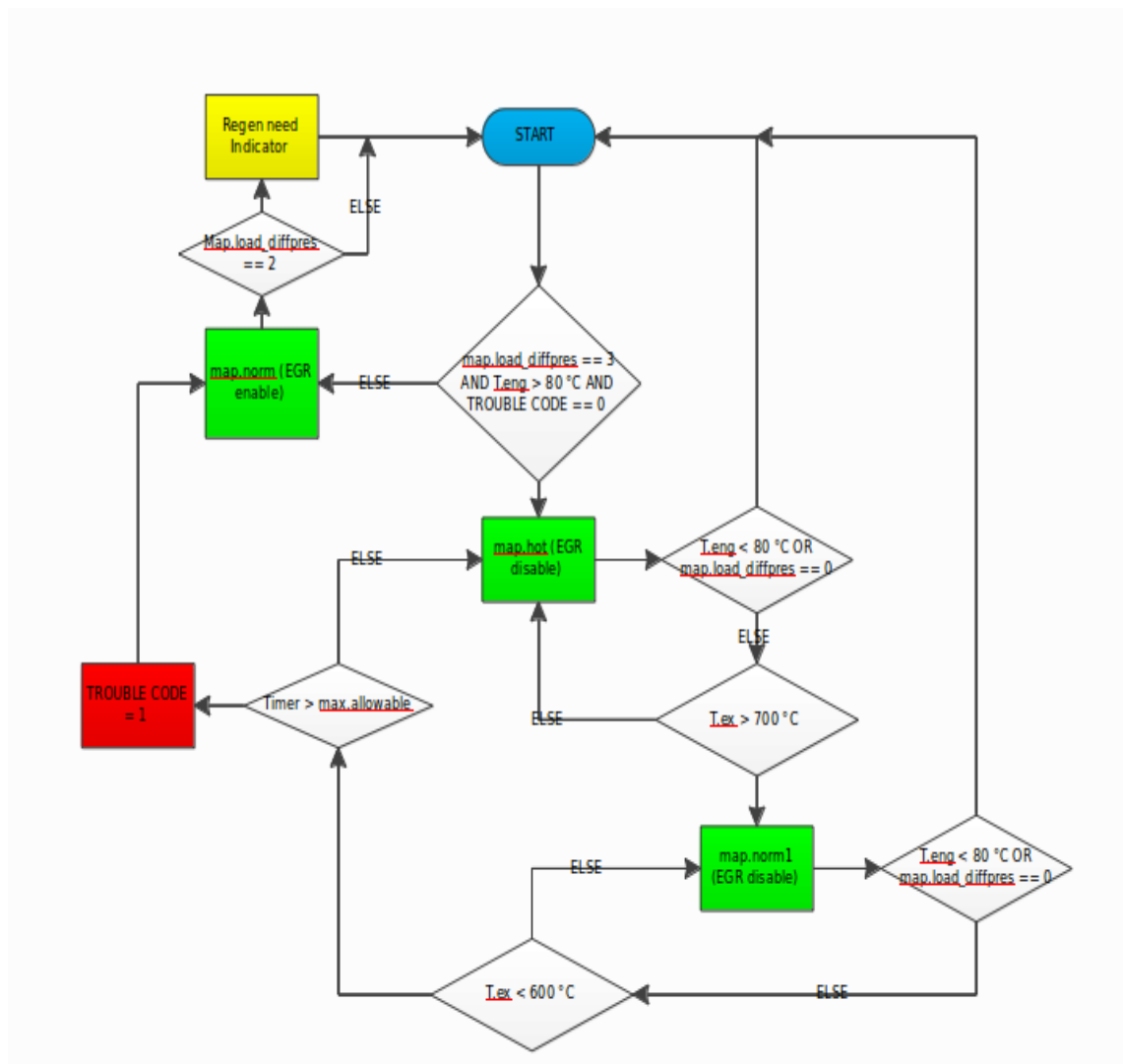
## 5.2 Hiukkasloukun regeneraation ohjaus

Hiukkasloukun pitkäaikaisen toimivuuden takaamiseksi loukku on pystyttävä re-  
generoimaan, kun loukkuun on kerääntynyt hiiltä niin paljon, että se haittaa pakokaasun  
virtausta. Dieselmoottorin matalista pakokaasun lämpötiloista johtuen loukun pas-  
siiviseen regeneraatioon riittävän korkea lämpötila (> 550 °C) saavutetaan ainoastaan  
käytettäessä moottoria pitkiä aikoja lähellä huipputehoa. Tämä on normaalissa liiken-  
nekäytössä käytännössä mahdotonta. Tästä johtuen tarvitaan menetelmä loukun läm-  
pötilan nostamiseksi riittävän korkealle normaali kuormituksilla. Ohjainlaitevalmistajalta  
ei ollut saatavilla valmista järjestelmää aktiivisen regeneraation toteuttamiseksi, joten  
sen logiikka päätettiin suunnitella itse.

Monet autonvalmistajat käyttävät puhdistustarpeen määrittämiseen myöhemmin kuva-  
tun paine-eromittauksen lisäksi myös laskennallista regeneraatioväliä. Laskennallinen  
väli todennäköisesti määritellään dynamometritestillä tutkien, kuinka paljon autolla voi  
eri kuormituksilla ajaa, ennen kuin loukku on regeneroitava. Tällaisen mittauksen to-  
teuttamiseen olisi vaatinut liikaa aikaa, joten logiikka päätettiin tehdä pelkkään paine-  
eromittaukseen perustuvana. Kuvan 13 logiikka mittaa loukun ja ahtimen välistä painet-

ta ja vertaa sitä ulkoilmanpaineeseen. Paine-eroa verrataan esiohjelmoituun karttaan, johon määritetään eri kuormituksille sallittu paine-ero. Paine-erosta päätellään loukun puhdistustarve, eli kun loukku vastustaa pakokaasunvirtausta liikaa, on se merkki siitä, että loukussa oleva hiilikertymä on poltettava pois.

Regenerointi toteutetaan yksinkertaisella takaisinkytkentäkierrolla. Ohjainlaitteeseen tallennetaan normaaliajossa käytettävien ruiskutusmäärä-ruiskutusennakkokarttojen lisäksi toiset kartat regeneraatiota varten. Näihin karttoihin lisätään jälkiruiskutus kohotamaan pakokaasujen lämpötilaa ja pääruiskutusta vastaavasti vähennetään niin, että pystytään tuottamaan sama vääntömomentti samalla kaasunasennolla kuin normaaliajon kartoissa. Näin vältetään siltä, että regeneraation kytkeytyminen haittaisi autolla ajoa. Regeneraatiotilassa EGR kytketään pois. Logiikka tarkkailee loukun ja ulkoilman paine-eroa (map.load diffpres), sekä moottorin käyntilämpötilaa (Teng). Jos moottori on alle 80-asteinen, regeneraatiota ei kytketä, koska riski palamattoman polttoaineen joutumisesta öljyn joukkoon on liian suuri. Jos moottori on riittävän lämmin ja loukun vastapaine ylittää raja-arvon, kytkeytyy regeneraatiokartta (map hot) ja loukun lämpötila alkaa nousta. Kun loukun lämpötila (Tex) nousee 700 asteeseen, logiikka kytkee normaaliajon kartan (map norm1) käyttöön, kunnes loukun lämpötila on laskenut 600 asteeseen. Jos regeneraation ehdot yhä täyttyvät eli vastapainetta on liikaa, kytketään regeneraatiokartta uudelleen päälle. Tätä kiertoa pyöritetään niin kauan kunnes loukun vastapaine alittaa regeneroinnin lopettamiselle asetettavan raja-arvon. Jos regenerointi kierto kestää liian kauan eli on syytä olettaa loukun olevan viallinen, logiikka antaa viikailmoituksen.



Kuva 13. Logiikkakaavio hiukkasloukun regeneraation ohjaukselle

Jotkut valmistajat kytkevät hehkutuksen toimintaan regeneraation aikana. Sillä todennäköisesti halutaan varmistaa palamisen loppuvaiheessa, matalassa lämpötilassa ruis-kutetun polttoaineen syttyminen. Syinä luonnollisesti se, että saadaan tuotettua lämpöä regeneroimiseen, mutta myös siksi, ettei palamatonta polttoainetta jäisi sylinteriin, josta se pääsisi männänrenkaiden ohitse laimentamaan moottoriöljyä. Regeneraatioehkuk-tuksen lisäämistä ohjauslogiikkaan tullaan harkitsemaan, kun nykyistä logiikkaa pääs-tään testaamaan. Jos moottori savuttaa kytkettäessä regeneraatio päälle ilman hiuk-kasloukkuun, tiedetään, että jälkiruiskutusannos ei pala kunnolla ja tällöin hehkutulpat on otettava käyttöön regeneraation yhteydessä. Jos näin käy, tullaan ohjauslogiikkaan lisäämään osa, joka estää regeneraation hehkutulppien ollessa vialliset, palamattoman polttoaineen pääsyn hiukkasloukkuun estämiseksi.

## 6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli säätää Biofore-konseptiauton moottorinohjainlaite niin, että moottori vastaa käytökseltään ja teholtaan normaalia nykyaikaista dieselmoottoria sekä suunnitella jatkotoimenpiteet EURO 5 -normin päästövaatimusten saavuttamiseksi. Tehtyjen mittauksien tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon EGR todellisuudessa leikkaa typenoksideja. Näiden lisäksi hiukkasloukun regeneraatiolle suunniteltiin ohjauslogiikka, jonka toteutus tullaan tilaamaan ohjainlaitteen valmistajalta.

Ohjainlaitteen säätö aloitettiin laskemalla tarvittavat ruiskutusmäärät riittävien suoritusarvojen saavuttamiseksi ja sen jälkeen säätämällä ruiskutusennakko ja ahtopaine sopiviksi dynamometrissä. Säätö viimeisteltiin ajamalla testiajoa suljetulla alueella ja hienosäätämällä moottorinohjausta niin, että moottori saatiin reagoimaan johdonmukaisesti vaihtelevissa ajotilanteissa. Testiajossa havaittiin, että dynamometrimittauksissa toimivalta vaikuttanut ahtopaineen pito mahdollisimman alhaisena ei toimi käytännössä, vaan aiheuttaa sen, että moottori ei saa äkillisesti kiihdytettäessä tarpeeksi ilmaa ahtoviiveen vuoksi. Tästä johtuen testiajon aikana ahtopainetta jouduttiin kasvattamaan lähes koko osakuorma-alueella.

Jatkotoimenpiteiden valmistelussa laskettiin auton ajotilapiirroksen, syklin nopeuksien ja vaihteiston välitysten perusteella syklin jokaiselle sekunnille hetkellinen teho ja kierrosluku. Teho/kierrosluku -pareista haettiin uniikit yhdistelmät ja sekuntimäärä, eli kuinka monta kertaa kukin yhdistelmä toistuu. Kun uniikit parit ja kunkin parin kokonaiskesto oli tiedossa, luotiin laskentataulukko johon säätötyön yhteydessä kirjataan jokaisen kW/rpm parin kertamittauksen päästömäärät ja taulukko laskee näistä tiedoista kokonaispäästön koko syklin ajalle. Tämän tyyppisen laskennan käyttö huonontaa väistämättä kokonaistuloksen tarkkuutta, mutta on välttämätöntä, jotta säätötyö olisi mahdollista saada valmiiksi ennen EURO 6 -normin voimaantuloa. Jos jokaisen säätömuutoksen vaikutus syklin kokonaispäästöön mitattaisiin ajamalla koko sykli läpi, kasvaisi työhön tarvittava aika toteutuskelvottoman pitkäksi. Moottori jouduttaisiin jäähdyttämään mittauksen aloituslämpötilaan ja ajamaan jarrussa 1200 sekuntia. Käytännössä siis jokainen säätömuutos ja sen vaikutuksen todentaminen veisi tunteja, kun nyt jokaisen mittapisteen säätöjä voidaan muokata ja todentaa muutos minuuteissa.

EGR-mittauksissa mitattiin moottorin tuottaman typenoksidin määrä neljästä erilaisesta kuormitustilanteesta, ilman takaisinkierätystä ja takaisinkierätyksen kanssa. Mittapis-

teiden määrä jäi valitettavan vähäiseksi johtuen mittausjärjestelmän teknisistä ongelmista. Saadut tulokset osoittavat kuitenkin selvästi, että järjestelmä toimii tehokkaasti. Takaisinkiertäystä käytettäessä typenoksidipäästöt putosivat murto-osaan verrattuna ilman takaisinkiertäystä mitattuihin tuloksiin. Mittauksissa havaittiin myös, että runsaalla takaisinkiertäyksellä muodostuu nopeassa kiihdytyksessä ongelmaksi saada EGR-venttiili suljettua riittävän nopeasti, jotta moottori saisi riittävästi ilmaa nopeasti kasvaneeseen tehon tarpeeseen.

Regeneraation ohjauslogiikka suunniteltiin niin, että moottorinohjainlaite mittaa ahtimen ja hiukkasloukun välistä vastapainetta ja sen perusteella määrittää loukun puhdistustarpeen. Vastapaineen noustessa riittävän suureksi moottorinohjainlaite ottaa käyttöön jälkiruiskutuksella varustetut ruiskutuskartat, jolloin pakolämpötila lähtee nousuun. Loukkuun kertynyt noki alkaa regeneroitumaan noin 600 C° lämpötilassa, lämpötilan nostoa jatketaan 700 C° saakka. Lämpötilan noustua tähän, ohjainlaite vaihtaa takaisin normaalikartoille, kunnes lämpötila laskee 600 C° saakka, jolloin kytketään taas jälkiruiskutukselliset kartat käyttöön. Tällä tavoin loukun lämpötila pidetään 600-700 C° välillä kunnes vastapaine on pudonnut niin pieneksi, että ohjainlaite päättelee loukun olevan taas toimintakuntoinen. Ohjauslogiikasta on lähetetty kaavio ohjainlaitevalmistajalle ja sen tarkempaan toteutukseen tullaan paneutumaan kun moottorin säätö on saatu muilta osin valmiiksi.



## Lähteet

- 1 Bosch, Autotekninen taskukirja. 6. painos. 2002. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- 2 NIRA i7r Handbook version A. 2012. Nira Control AB.
- 3 Huoltokoulutuksen itseopiskeluohjelma 465. 2010. Volkswagen.
- 4 Parviainen, Heikki. 2013. Moottoritekniikan perusteet, Palaminen sylinterissä -luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 5 Parviainen, Heikki. 2013. Moottoritekniikka, järjestelmät, Päästöjen synty otto- ja dieselmoottorissa. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 6 Mollenhauer Klaus & Tschoeke Helmut. 2010. Handbook of diesel engines. Berliini: Springer.
- 7 EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EY) N:o 715/2007. 2007