

Marko Lindroos  
Saku Närhi

# Biofore-konseptiauton selektiivisen pelkistyskatalysaattorijärjestelmän suunnittelu, toteutus ja säätö

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma  
Insinöörityö  
27.4.2017

Tekijät	Marko Lindroos Saku Närhi
Otsikko	Biofore-konseptiauton selektiivisen pelkistyskatalysaattorijärjestelmän suunnittelu, toteutus ja säätö
Sivumäärä Aika	57 sivua + 1 liite 27.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaajat	Lehtori Heikki Parviainen Projekti-insinööri Sampo Kuikka
<p>Työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Biofore-konseptiautoon selektiivinen pelkistyskatalysaattorijärjestelmä sekä vähentää ajoneuvon ajovastuksia niin, että tehtyjen muutostöiden avulla ajoneuvo saadaan alittamaan EU-tyyppihyväksyntämenetelmän mukaisesti sen rekisteröintiin vaadittavat säänneltyjen päästöjen raja-arvot.</p> <p>Työssä tutustaan yleisesti dieselmoottorin pakokaasupäästöjen muodostumiseen sekä hallintaan, mutta erityisesti keskitytään typenoksidipäästöihin ja niiden selektiiviseen katalyyttiin pelkistämiseen. Lisäksi työssä kerrotaan selektiivisen pelkistyskatalysaattori- eli SCR-järjestelmän ja sen komponenttien toiminnasta autokäytössä.</p> <p>Tavoitteisiin päästiin kun ajoneuvo alitti Euro 5b -päästöraja-arvot säädösten mukaisessa päästömittauksessa. Työn tuloksena syntyi täysin säädettävissä oleva nykyaikainen dieselauton päästöjenhallintajärjestelmä, jota voidaan käyttää Metropolia Ammattikorkeakoulun opetuskäytössä. Lisäksi Biofore on nyt mahdollista rekisteröidä tieliikenteeseen.</p> <p>Kun tuoretta päästömittaustulosta verrataan ennen SCR-järjestelmän lisäystä tehtyyn mittaukseen, voidaan järjestelmän todeta olevan hyvin tehokas keino vähentää dieselauton typenoksidipäästöjä. Edelliseen mittaukseen nähden auton muutostöillä saavutettiin noin 81 % pienemmät typenoksidipäästöt.</p>	
Avainsanat	Biofore-konseptiauto, SCR, dieselpäästöt, AdBlue, NO <sub>x</sub>

Authors	Marko Lindroos Saku Närhi
Title	The Design and Implementation of a Selective Catalytic Reduction System for the Biofore Concept Car
Number of Pages Date	57 pages + 1 appendix 27 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialization Option	Automotive Design Engineering
Instructors	Heikki Parviainen, Senior Lecturer Sampo Kuikka, Project Engineer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to reduce nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) emissions of the Biofore Concept Car to a level that the car could be registered as a road legal vehicle in Europe. The means to achieve the objective were to design and engineer a selective catalytic reduction system in addition to optimize the vehicle dynamics to reduce the road load.</p> <p>The thesis discusses the regulated exhaust emissions of a diesel-powered car. The focus is on the NO<sub>x</sub> emissions and their selective catalytic reduction. The thesis describes how a selective catalytic reduction (SCR) system functions and how it can be implemented on a passenger car.</p> <p>The objective was reached as the car successfully passed an official emissions test with Euro 5b emission standard limits. The SCR system worked as expected and provided a decrease of approximately 81 % in the car's NO<sub>x</sub> emissions compared to a similar test carried out before the modifications.</p> <p>The system is fully adjustable and can be used as educational equipment in Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Also, the car is now road legal in regard to its exhaust emissions. In conclusion, the SCR system can be found as a very effective way to reduce the NO<sub>x</sub> emissions of a diesel-powered car.</p>	
Keywords	Biofore Concept Car, SCR, Diesel Emissions, AdBlue, NO <sub>x</sub>

# Sisällys

Lyhenteet

Käsitteet

Alkusanat

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoite ja sisältö	1
2	Pakokaasupäästöt	2
2.1	Typhen oksidit (NO <sub>x</sub> )	2
2.2	Hiukkaset (PM)	5
2.3	Hiilivety-yhdisteet (HC)	6
2.4	Hiilimonoksidi (CO)	7
2.5	EU-päästöluokitus dieselkäyttöisillä henkilöautoilla	7
3	Ajovastukset	9
3.1	Aerodynaaminen vastus	9
3.2	Renkaiden vierintävastus	10
3.3	Ajovastusten määrittäminen EU -päästö- ja kulutusmittaukseen	11
4	Typenoksidien selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen	12
4.1	Pelkistysaine	12
4.1.1	Ammoniakki ja sen kemialliset reaktiot	13
4.1.2	Urea ja AdBlue	15
4.2	Katalysaattorit	18
4.2.1	Platina	19
4.2.2	Vanadiini	19
4.2.3	Zeoliitti	19
4.2.4	NO-NO <sub>2</sub> -suhde sekä avustavat katalysaattorit	20
5	SCR-järjestelmä ajoneuvokäytössä	22
5.1	Järjestelmäkuvaus	22
5.2	Tärkeimmät järjestelmäkomponentit	24
5.2.1	NO <sub>x</sub> -anturi	24
5.2.2	AdBlue-säiliö ja pumppuyksikkö	26

5.2.3	AdBlue-annosteluyksikkö	28
5.2.4	Sekoitin	29
5.2.5	Pelkistyskatalysaattori	31
5.3	SCR-järjestelmän ohjaus	32
6	Muutokset Biofore-konseptiautossa	35
6.1	Ajovastusten optimointi	35
6.1.1	Renkaat	35
6.1.2	Pohjalevy	36
6.2	SCR-järjestelmä	37
6.2.1	Komponenttien valinta	37
6.2.2	Järjestelmän asennus	39
6.2.3	Järjestelmän ohjaus	42
6.2.4	Säätötoimenpiteet	47
7	Tulokset	51
7.1	Rullaustesti	51
7.2	Päästömittaus	53
8	Yhteenveto	54
	Lähteet	56
	Liitteet	
	Liite 1. Mittausraportti	

## Lyhenteet

SCR	<i>Selective Catalytic Reduction.</i> Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen.
NSC	<i>NO<sub>x</sub> Storage Catalyst.</i> NO <sub>x</sub> -varaajakatalysaattori.
PM	<i>Particulate Matter.</i> Pakokaasupäästöihin lukeutuvat hiukkaset.
DPF	<i>Diesel Particulate Filter.</i> Hiukkasuodatin, jonka avulla vähennetään pienhiukkaspäästöjä.
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst.</i> Dieselhapetuskatalysaattori.
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation.</i> Pakokaasun takaisinkierätyks.
ECU	<i>Engine Control Unit.</i> Moottorin ohjausyksikkö.
CAN	<i>Controller Area Network.</i> CAN-väylä on muun muassa ajoneuvoissa käytetty tietoliikenneväylätyyppi.
PWM	<i>Pulse-Width Modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio eli pulssisuhdesäätö on tapa säätää kuorman tehollista jännitettä katkomalla jännitettä vakiotaaajuudella.
NEDC	<i>New European Driving Cycle.</i> EU -kulutus- ja päästömittaustestiin määrätty ajo-ohjelma.

## Käsitteet

Esisekoittumispalaminen	Dieselmoottorissa työtahdin vaihe, jolloin kaikki syttymisviiveen aikana ruiskutettu polttoaine palaa nopeasti. Tässä vaiheessa sylinteripaine nousee voimakkaasti.
Diffuusiopalaminen	Dieselmoottorissa työtahdin vaihe, jolloin palaminen etenee ruiskutetun polttoaineen sekoittuessa happeen ja muodostan palamiskelpoisen seoksen. Tässä vaiheessa saadaan aikaan sylinteripaineen huippu.
Stoikiometrinen suhde	Kemiallisen reaktion lähtöaineiden keskinäinen suhde, jolla kaikki lähtöaineet osallistuvat reaktioon. Esimerkiksi yhden dieselpolttoainekilon täydelliseen palamiseen kuluu 14,6 kg ilmaa, joten stoikiometrinen suhde on 14,6:1.
Lambda ( $\lambda$ )	Ilma-polttoainesuhdetta kuvaava lukuarvo. Lambda-arvo on 1, kun ilma-polttoainesuhde on stoikiometrinen. Kun $\lambda > 1$ , jää palamisesta jäännöshappea, ja kun $\lambda < 1$ , jää jäljelle palamattonta polttoainetta.

## Alkusanat

Opinnäytetyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy:n toimeksiannosta Helsingissä vuosien 2016 ja 2017 aikana. Työn laajuuden vuoksi se päätettiin toteuttaa kahden insinööriopiskelijan toimesta.

Haluamme kiittää Henry Ford Säätiötä opinnäytetyön rahoittamisesta sekä täysipäiväisen työskentelyn mahdollistamisesta kesän 2016 aikana.

Helsingissä

27.4.2017



Marko Lindroos



Saku Närhi



# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Biofore-konseptiauto on Metropolia Ammattikorkeakoulun sekä UPM Oy:n yhteistyössä toteutettu projekti, joka aloitettiin vuonna 2010. Auton rakenteissa on käytetty puupohjaisia biomateriaaleja. Autossa on Volkswagenin valmistama kolmesylinterinen, 1200 cm<sup>3</sup>-iskutilavuuksinen turboahdettu dieselmoottori, jota ohjataan jälkiasenteisella Nira Control AB:n valmistamalla moottorinohjainlaitteella.

Projektin edetessä auton moottorille on tehty sen toiminnan kannalta tarvittavat perussäädöt sekä keskitytty päästöjenhallintaan Euro 5 -päästöraja-arvojen alittamiseksi tyyppihyväksyntäprosessin mukaista ajoneuvon rekisteröintiä varten. Suoritetussa mittauksessa auto ei kuitenkaan ole alittanut raja-arvoja typenoksidipäästöjen osalta, eikä sitä näin ollen ole saatu rekisteröityä tieliikenteeseen.

## 1.2 Työn tavoite ja sisältö

Opinnäytetyön tavoite on saada ajoneuvo alittamaan Euro 5 -raja-arvot kaikkien säänneltyjen pakokaasupäästöjen osalta lisäämällä autoon selektiivinen pelkistyskatalysaattorijärjestelmä. Järjestelmää käytetään useissa nykyaikaisissa dieselmoottorilla varustetuissa ajoneuvoissa ja sen tarkoitus on vähentää typenoksidipäästöjä. Järjestelmän toiminta perustuu pakokaasujen sekaan suihkutettavaan urea-vesiliuokseen, jonka sisältämä urea muuntuu pakoputkistossa ammoniakiksi pelkistäen typenoksideja vaarattomiksi typpimolekyyleiksi ja vesihöyryksi [1, s. 417].

Työssä tutustutaan yleisesti dieselmoottorin päästöjen syntyyn sekä niiden hallintaan, mutta keskitytään erityisesti typenoksidien muodostumiseen ja niiden vähennyskeinoihin. Työssä selvitetään selektiivisen pelkistyskatalysaattorijärjestelmän ja sen komponenttien toimintaperiaate. Lisäksi käydään läpi Bioforeen lisättävän järjestelmän suunnittelu, toteutus ja säätötoimenpiteet.

Työssä tutustutaan myös Euroopan alueella rekisteröitävän henkilöauton päästö- ja kulutusmittaustapahtumaan ja siihen valmistaviin toimenpiteisiin Bioforen ajovastusten optimoinnin osalta. Mittaus suoritetaan ajamalla autoa dynamometrissä, jolla tuotetaan auton todellisia ajovastuksia simuloiva jarrutusvoima. Voima vaikuttaa oleellisesti auton polttoaineenkulutukseen sekä moottorin tuottamiin päästöihin, minkä vuoksi auton ajovastukset pyritään optimoimaan.

## 2 Pakokaasupäästöt

Pakokaasupäästöistä puhuttaessa on tärkeää erottaa polttoaineenkulutukseen verrannolliset hiilidioksidipäästöt ja laissa säännellyt, palotapahtumasta riippuvat päästöt toisistaan. Liikenteestä syntyvien päästöjen vaikutus ympäristöön sekä ihmisten terveyteen on pakottanut säätelemään autoilun pakokaasupäästöjä. Euroopassa näihin kuuluvat tyypin oksidit, hiilimonoksidi, kaasumaiset hiilivedyt ja hiukkaset. Hiilidioksidin lisäksi nämä ovat tieliikenteen merkittävimmät päästöt.

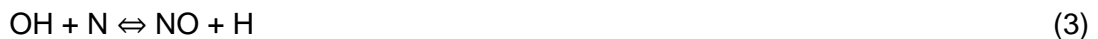
Pakokaasuista suuri osa on hiilidioksidia, joka on kasvihuoneilmiötä edistävä kaasu. EU on asettanut liikenteen hiilidioksidipäästöille päästönormin, jossa autovalmistajan kaikkien autojen CO<sub>2</sub>-päästökieskiarvotavoite on 130 g/km (noin 5–5,5 l / 100 km). Vuodelle 2020 tavoite on 95 g/km. [2.]

### 2.1 Typen oksidit (NO<sub>x</sub>)

NO<sub>x</sub> on yleisnimitys niille typen oksideille, jotka ilman saastumisen kannalta ovat oleellisiä. Näihin lukeutuvat typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO<sub>2</sub>). NO<sub>x</sub>-molekyylejä syntyy typen ja hapen reagoidessa korkeassa lämpötilassa.

Dieselmoottorin NO<sub>x</sub>-päästöistä typpimonoksidin osuus on noin 90 % ja typpioksidin osuus noin 10 %. Niitä muodostuu erityisesti maantieajossa ja kiihdytystilanteissa. NO<sub>x</sub>-päästöt vaikuttavat haitallisesti ihmisen hengityselinten toimintaan, aiheuttavat happosadetta sekä sumua. Tieliikenteen osuus Suomen typen oksidien kokonaispäästöistä on noin 48 %. [2; 3, s. 445; 4.]

Typen oksidien muodostumisreaktiot ovat endotermisiä eli lämpöä sitovia. Tästä syystä niitä voi muodostua vain korkeissa, noin 2000 asteen lämpötiloissa. Korkean lämpötilan lisäksi NO<sub>x</sub>-muodostukseen vaaditaan typpeä, happea sekä riittävä reaktioaika. Typpi-monoksidia muodostuu lähinnä Zeldovichin reaktioiden mukaan kolmella tavalla:



Ilmakehään vapautuessaan typpimonoksidi reagoi hapen kanssa muodostaen typpidioksidia. NO<sub>2</sub> on erittäin reaktioherkkää ja voimakas hapetin. NO<sub>x</sub>-päästöjen haitallisuus perustuu lähinnä typpidioksidin vaikutuksiin. [3, s. 445–446; 4.]

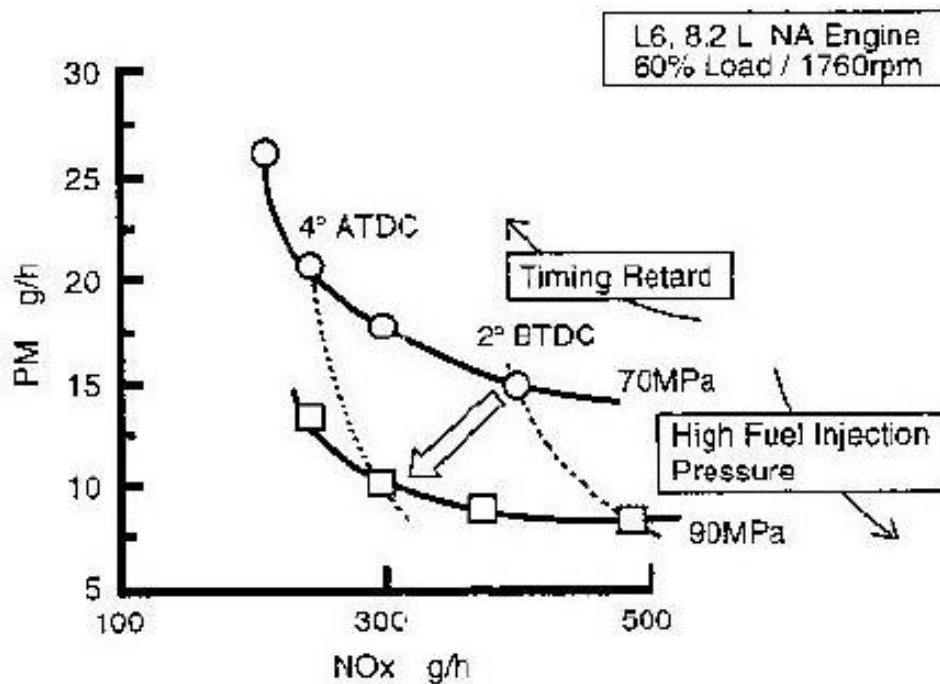
Dieselmoottorissa on NO<sub>x</sub>-päästöjen muodostumiselle edulliset olosuhteet, sillä moottori toimii ilmaylimäärällä, jolloin happea on runsaasti saatavilla koko palotapahtuman ajan. Lisäksi dieselmoottorin suuri puristussuhde tuottaa korkean paineen ja korkean lämpötilan. Tyypillisesti dieselmoottorin palotapahtumat kestävät ottomoottorin palotapahtumia pidempään, jolloin typen oksidien muodostumiselle jää enemmän aikaa.

Typen oksidien hallintaan dieselmoottorissa voidaan vaikuttaa muun muassa palotilan suunnittelulla, pienentämällä puristussuhdetta sekä muokkaamalla polttoaineen ruiskutusajoitusta ja -painetta. Pakokaasun takaisinkierrätys eli EGR (Exhaust Gas Recirculation) on tehokas tapa vähentää NO<sub>x</sub>-päästöjä. Palamisen huippulämpötilaa voidaan laskea kierrättämällä osa pakokaasuista takaisin imusarjaan. Tämä perustuu pakokaasun sisältämän vesihöyryn korkeaan ominaislämpökapasiteettiin, mikä hidastaa palamistapahtuman lämpötilannousua. Takaisin kierrätettävää pakokaasua voidaan myös jäähdyttää erillisellä jäähdyttimellä.

EGR-toiminnalla palotilaan tuodaan myös typen oksideja, mikä hidastaa niitä muodostavia reaktiota sekä vähentää reaktioiden lähdeaineita. Myös palotilan happipitoisuuden laskeminen tuottaa saman vaikutuksen. Hapen puute kuitenkin heikentää polttoaineen palotapahtumaa, mikä huonontaa moottorin hyötysuhdetta. [3 s. 445–446; 5, s. 6–7.]

Moottorin kierroslukua korottamalla voidaan vaikuttaa  $\text{NO}_x$ -muodostumiseen. Tämä nopeuttaa palotilan lämpötilavaihteluita sekä pienentää halutun tehon tuottamiseksi tarvittavaa vääntömomenttia. Nämä tarkoittavat pienempää polttoaineen ruiskutusmäärää, nopeampaa paloreaktiota pienemmällä alueella sekä useampaa palotapahtumaa aikayksikköä kohden eli vähemmän aikaa typen oksidien muodostumiselle. Ruiskutusmäärän pienentyessä myös sylinteriin imetyn hapen määrää voidaan laskea lisäämällä pakokaasun takaisinkierätyä.

Palotilan palamisolosuhteita voidaan muuttaa polttoaineruiskutuksen ajoitusta sekä tapaa säätämällä. Kun palamista saadaan siirrettyä esisekoittumispalamisesta diffuusiopalamisen puolelle,  $\text{NO}_x$ -päästöt vähenevät. Palamisen myöhästymisen seurauksena kuitenkin hiukkaspäästöt nousevat. Kuvasta 1 nähdään polttoaineen ruiskutusajankohdan vaikutus muodostuviin  $\text{NO}_x$ - ja PM-päästöihin. Polttoaineen ruiskutuspainetta kasvattamalla saadaan hiukkasmuodostusta vähennettyä huomattavasti, jolloin palamistapahtumaa voidaan myöhäistää  $\text{NO}_x$ -tuoton laskemiseksi. [6.]



Kuva 1. Polttoaineen ruiskutusparametrien vaikutus  $\text{NO}_x$ - ja PM-päästöihin [6].

Kun moottorin sisäisillä toimilla typenoksidipäästöjä ei saada tarpeeksi alhaisiksi, tarvitaan jälkikäsittelyä.  $\text{NO}_x$ -jälkikäsittely voidaan toteuttaa käytännössä kahdella tavalla,

varaajakatalysaattorilla tai selektiivisellä katalyyttisellä pelkistämisellä. Varaajakatalysaattori eli NSC (NO<sub>x</sub> Storage Catalyst) toimii kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa typen oksidit varastoituvat eli konvertoituvat katalysaattorin varausyksiköihin laihalla pakokaasulla ( $\lambda > 1$ ). Seuraavassa vaiheessa varausyksikkö regeneroidaan rikkaan seoksen ( $\lambda < 1$ ) avulla muuttaen varastoitu NO<sub>x</sub> typeksi (N<sub>2</sub>) ja hiilidioksidiksi (CO<sub>2</sub>).

Typen oksideista vain NO<sub>2</sub> voi suoraan varastoitua varausyksikköön, joten NO tulee ensin hapettaa hapetuskatalysaattorilla NO<sub>2</sub>:ksi. NO<sub>x</sub>-varaajakatalysaattorissa NO<sub>2</sub> reagoi katalysaattorin pinnoitteen sekä hapen kanssa muuntuen nitraateiksi. Varastoituminen voi tapahtua vain 250–450 °C lämpötilassa. Regenerointitilanteessa pelkistiminä toimivat rikkaan pakokaasun hiilimonoksidi (CO), vety (H<sub>2</sub>) ja eri hiilivedyt (HC). Varaajakatalysaattorin ongelmia ovat moottorin huono hyötysuhde rikkaalla pakokaasulla sekä katalysaattorin huono rikin sietokyky. Rikki varastoituu katalysaattoriin rikkidioksidin (SO<sub>2</sub>) muodossa heikentäen sen NO<sub>x</sub>-varastointikapasiteettiä. Rikkidioksidin poistava desulfatointi on tehtävä noin 5000 ajokilometrin välein. [7, s.121–123.]

Yleisemmin käytetystä typen oksidien selektiivisestä katalyyttisestä pelkistämisestä on kerrottu enemmän luvussa 4.

## 2.2 Hiukkaset (PM)

Hiukkaset eli PM (Particulate Matter) ovat epätäydellisessä palamisessa muodostuvia kiinteitä aineita pienikokoisten hiukkasten muodossa. Hiukkasten terveysvaikutuksista tiedetään vielä varsin vähän. Niihin sitoutunut orgaaninen aines saattaa kuitenkin sisältää karsinogeenisia hiilivetyjä, joiden haittavaikutuksia tunnetaan. Hiukkaspäästöjen vertailussa on monimutkaista se, että niiden vaikutukset ovat suureksi osaksi sidoksissa hiukkasen kokoon.

Dieselmoottori tuottaa noin 10-kertaisen hiukkasmassan ottomoottoriin nähden. Erittäin pienikokoisten hiukkasten kohdalla moottorityypit kuitenkin ovat tasavertaisempia. Nämä alle 1 mikronin kokoiset hiukkaset pääsevät lähes esteettä ihmisen keuhkoihin asti. Kaupunki-ilman hiukkaspitoisuudesta usein suurin osa on kadun pinnasta ilmaan noussutta ainesta. [8.]

Dieselmootorissa muodostuneet hiukkaset koostuvat pääosin runkoaineena toimivasta noesta (75 %), mutta niiden pintaan on tarttunut myös voiteluöljyä (13 %), polttoainetta (5 %), vettä (4 %) ja sulfaatteja (3 %). [3, s. 446.]

Dieselmootorin hiukkaspäästöt voidaan poistaa tehokkaasti käyttäen hiukkassuodatinta. Hiukkassuodatin eli DPF (Diesel Particulate Filter) koostuu piikarbidista tai kordierii-tistä valmistetusta kennostorakenteesta. Pakokaasua johdetaan kanavia pitkin niin, että se joutuu menemään kanavien huokoisten keraamiseinien lävitse. Pakokaasun hiukkaset tarttuvat diffuusion avulla huokoiseen kennostorakenteeseen. Hiukkasten kertyessä kanavien seinälle muodostuu nokikerros, joka tehostaa suodatusta. Liiallinen täyttyminen kuitenkin lisää pakoputken vastapainetta huonontaa moottorin hyötysuhdetta. Tästä syystä hiukkassuodatin regeneroidaan sopivin väliajoin kohottamalla pakokaasujen lämpötilaa yli 600 asteeseen, jolloin hiukkasten sisältämä hiili hapettuu. [7, s. 126.]

### 2.3 Hiilivety-yhdisteet (HC)

Hiilivedyt eli HC (hydrocarbons) on yleisnimitys sadoille eri hiilivety-yhdisteille. Ne ovat epätäydellisesti palanutta tai palamatta jäänyttä polttoainetta. Hiilivety-päästöt syntyvät sellaisissa palotilan oloissa, joissa ei ole riittävän suurta lämpötilaa polttoaineen syttymiselle ja joihin palorintama ei pääse etenemään. Tällaisia paikkoja dieselmootorissa ovat esimerkiksi suuttimien kärkien suihkutusaukot. HC-päästöjä syntyy erityisesti kylmäkäynnistyksessä. Tieliikenteen osuus hiilivety-päästöistä on 47 %. Osalla hiilivety-yhdisteistä on suoria myrkyvaikutuksia. Useat orgaaniset hiilivety-yhdisteet kuuluvat myös karsinogeenien ryhmään. [3, s. 449; 9.]

HC-päästöjen muodostumista voidaan vähentää toteuttamalla sylinterin palotila siten, että se sisältää mahdollisimman vähän paikkoja, jonne palorintama ei pääse etenemään. Tästä syystä esimerkiksi ylintä männänrengasta on siirretty vuosien saatossa yhä lähemmäs männän yläosaa, jolloin männän ja sylinterinseinämän väliin jäävä rako pienee.

Hiilivety-päästöjä voidaan vähentää myös dieselhapetuskatalysaattorin eli DOC:n (Diesel Oxidation Catalyst) avulla, kunhan sen toiminnalle riittävä lämpötila on saavutettu. Sopivassa lämpötilassa katalysaattorilla saadaan poltettua pakokaasusta lähes kaikki hiili-

vety-yhdisteet. HC-päästöt ovat näin ollen ongelma lähinnä vain kylmäkäynnistystilanteissa. Käynnistystilanteen hiilivetypäästöjä voidaan dieselmotorissa pienentää hehku-  
tulppia käyttämällä. [3, s. 449.]

#### 2.4 Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidia eli häkää syntyy hiilipitoisten aineiden palaessa epätäydellisesti eli kun happea ei ole riittävästi. Dieselmotoreiden häkäpäästöt ovat tyypillisesti varsin vähäisiä ilmaylimäärällä operoinnin ansiosta. Liian vähäinen imuilman pyörteily sylinterissä ja tästä johtuva polttoaineen huono sekoittuminen voi kuitenkin johtaa hiilimonoksidin muodostumiseen.

Hiilimonoksidit voidaan dieselhapetus-  
katalysaattorissa hapettaa lähes täydellisesti hiilidioksidiksi kun katalysaattorin rajalämpötila on saavutettu. Tämä lämpötila on noin 170–200 °C. [7, s. 135.]

CO-päästöt ovat HC-päästöjen tapaan ongelma lähinnä vain kylmäkäynnistystilanteissa, kun hapetus-  
katalysaattori ei ole vielä saavuttanut toimintalämpötilaansa. Tieliikenteen osuus kokonaishäkäpäästöistä on 73 %. Hiilimonoksidi hapettuu ilmakehässä muutamassa tunnissa hiilidioksidiksi. [3, s. 449; 10.]

#### 2.5 EU-päästöluokitus dieselkäyttöisillä henkilöautoilla

Euro-päästöluokituksissa (taulukko 1) on asetettu raja-arvot säännellyille pakokaasupäästöille. Dieselautojen NO<sub>x</sub>- ja hiukkaspäästörajat ovat Euro 1–6:n aikana tiukentuneet huomattavasti. Tulossa olevan päästöluokan osalta osa ajoneuvovalmistajista on ilmoittanut lopettavansa dieselhenkilöautojen valmistamisen. [11.]

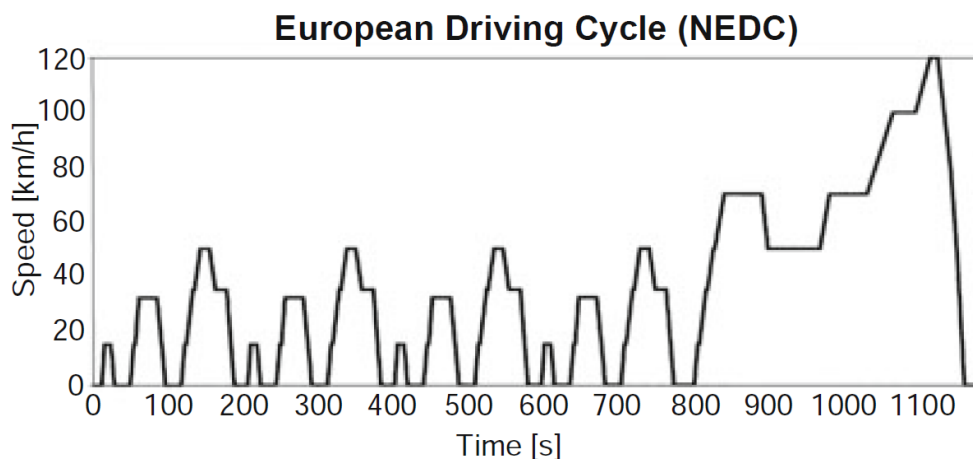
Taulukko 1. EU-päästöstandardin mukaiset dieselpäästöjen raja-arvot henkilöautoille [11].

EU Emission Standards for Passenger Cars (Category M<sub>1</sub>\*)

Stage	Date	CO	HC	HC+NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
		g/km					#/km
Compression Ignition (Diesel)							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01 <sup>a</sup>	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09 <sup>b</sup>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>f</sup>	-
Euro 5b	2011.09 <sup>c</sup>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>

EU-tyyppihyväksyntämenettelyn mukaisesti ajoneuvon rekisteröintiä varten on suoritettava direktiivin mukainen pakokaasupäästöjen mittaus. Mitattavan ajoneuvon on alitettava voimassa olevan Euro-luokituksen päästöraja-arvot.

Mittauksessa käytetään ajo-ohjelmana säädösten mukaista NEDC-ajosykliä (New European Driving Cycle), joka on esitetty kuvassa 2. Ajo-ohjelma ajetaan laboratoriossa dynamometrillä, jolla voidaan simuloida myös moottorijarrutustilannetta. Mittauksessa ajetaan tarkasti määrätyn nopeuden mukaan, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia muihin autoihin nähden. Ajotapahtuma kestää 1180 sekuntia, jonka aikana autolla ajetaan noin 11 kilometrin matka. Kaikki testin aikana muodostuneet pakokaasut kerätään talteen ja analysoidaan mittalaitteilla. [11.]



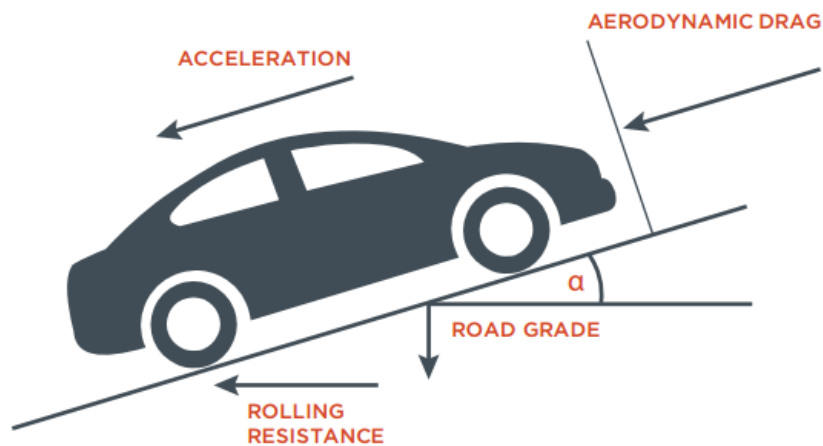
Kuva 2. NEDC-ajosyklin kaaviokuva [3, s. 426].



### 3 Ajovastukset

Pakokaasupäästöjä voidaan vähentää myös pienentämällä ajoneuvon ajovastuksia. Lisäksi autoilta vaaditaan jatkuvasti pienempää polttoaineenkulutusta. Tähän päästään vain parantamalla hyötysuhdetta tai pienentämällä auton vastusvoimia.

Autoon kohdistuu useita liikettä vastustavia voimia, joista merkittävimmät ovat aerodynaaminen vastus, renkaiden vierintävastus, nousukulmasta riippuva painovoiman vaikutus sekä voimansiirron häviöt. Autoon kohdistuvia vastusvoimia esitetään yksinkertaistettuna kuvassa 3.



Kuva 3. Auton liikettä vastustavat voimat yksinkertaistettuna [12, s. 1].

#### 3.1 Aerodynaaminen vastus

Auton liikkeessä siihen kohdistuu sen liikettä haittaava aerodynaaminen vastus, jota kutsutaan ilmanvastukseksi. Tämä voimakomponentti koostuu useasta erilaisista fysikaalisista ilmiöistä, joten ilmanvastuksen tarkka määrittäminen on työlästä ja epävarmaa [13, s. 14]. Ilmanvastus kasvaa nopeuden suhteen eksponentiaalisesti, joten kaupunkiajonepeuksissa sen osuus ajovastuksista ei ole niin merkittävä. Moottoritienopeuksissa taas ilmanvastus muodostaa suurimman osan ajovastuksista.

Osa auton aerodynaamisesta vastuksesta aiheutuu suoraan virtaavan ilman ja kappaleen ulkopintojen välisestä pinnan suuntaisesta leikkausjännityksestä eli kitkasta ( $N/m^2$ ). Suhteellinen ilman virtausnopeus auton pinnoilla on aina nolla. Pinnasta etäännyttäessä virtausnopeus kuitenkin kiihtyy suureksi lyhyellä matkalla. Tätä nopeusmuutosvyöhykettä kutsutaan rajapinnaksi. Rajakerroksessa kitkavaikutukset ovat suuria ja ilmanvastuksen kannalta oleellisia. [13, s. 14–15.]

Kitkailmiöiden aiheuttama rajakerros johtaa myös pintapainejakaumaan, josta seuraa lisävastusta. Auton etupintoihin kohdistuva painevoima tulee suuremmaksi kuin takapintoihin. Näitä vastuksia voidaan vähentää pienentämällä otsapinta-alaa sekä muotoilemalla auto mahdollisimman virtaviivaiseksi. [13, s. 15.]

Autojen käytännöllisen muotoilun vuoksi ilmapvirtausta ei kuitenkaan voida pitää kiinni auton pinnassa, mikä aiheuttaa virtauksen irtoamista eli sakkautta. Tämä taas aiheuttaa lisää painevastusta. Edellä mainittuja vastustekijöitä voidaan kutsua loisvastukseksi, josta syntyy suurin osa auton ilmanvastuksesta. [13, s. 16.]

### 3.2 Renkaiden vierintävastus

Renkaista aiheutuvat vastukset muodostavat noin 20–30 % auton polttoainekulutuksesta. Renkaan vastusvoimat syntyvät pääosin sen muodonmuutoksesta aiheutuvasta hystereesistä sekä renkaan sisäisistä ja ulkoisista kitkoista. Vierintävastus pysyy lähes vakiona auton nopeudesta riippumatta. [14; 15, s. 6.]

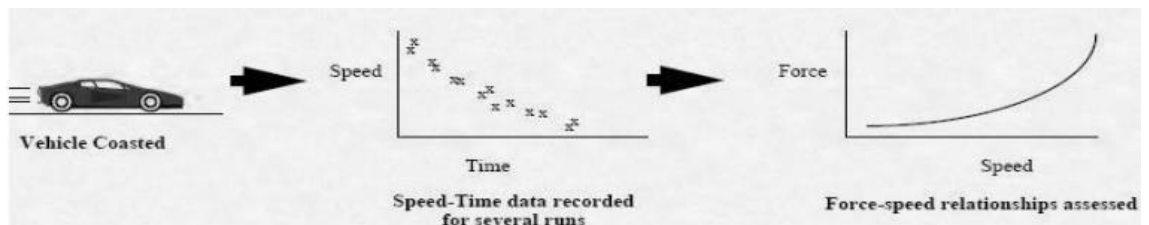
On haasteellista tehdä energiatehokas rengas samalla pitäen sen kitkaominaisuudet hyvinä. Renkaiden ominaisuuksien pitämiseksi sekä energiataloudellisena että turvallisina, on ominaisuuksille asetettu vähimmäisvaatimukset. Vaatimuksessa on luotu renkaiden energiatehokkuusluokat. [14.]

Vierintävastukseltaan parhaat A-luokan renkaat voivat vähentää polttoaineen kulutusta jopa 7–8 % verrattuna huonoimpiin, G-luokan renkaisiin. Esimerkiksi 6 l / 100 km kuluttavalla autolla yksi energialuokka merkitsee polttoaineen kulutukseen muutosta 0,1 l / 100 km. [16.]

### 3.3 Ajovastusten määrittäminen EU -päästö- ja kulutusmittaukseen

EU-päästö- ja kulutusmittauksessa tarvitaan mitattavalle ajoneuvolle ominaiset ajovastusarvot. Mittaus suoritetaan dynamometrillä, jonka avulla jarrutetaan auton ajovastuksiin perustuvalla, nopeudesta riippuvalla voimalla. Jarrutusvoima voidaan laskea autolla suoritettuna rullaustestin avulla tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää 1970-luvulta peräisin olevia taulukkoarvoja, jotka määräytyvät mitattavan ajoneuvon massan mukaan. Käytetty vastusvoima vaikuttaa merkittävästi päästö- ja kulutusmittaukseen. Mitä pienempiä vastusarvot ovat, sitä vähemmän moottoria rasitetaan mittauksen aikana. Tämä johtaa pienempään polttoaineenkulutukseen sekä pakokaasupäästöihin. Rullaustestillä tuotetut dynamometrin asetusravot ovat yleensä auton päästöjen muodostumisen kannalta edullisempia kuin vaihtoehtoisesti käytettävät taulukkoarvot. [12, s. 1–6.]

Rullaustestiin perustuvan vastusvoimien määrittämisen perusidea esitetään kuvassa 4. Ajoneuvo kiihdytetään tiettyyn nopeuteen (esimerkiksi 130 km/h), jonka jälkeen sen annetaan hidastua vaihteen ollessa vapaalla. Ajoneuvon nopeutta ajan suhteen mitataan rullauksen aikana. Nopeuden ja ajan muutoksesta sekä ajoneuvon massasta voidaan Newtonin toisen lain mukaan laskea ajoneuvoon kohdistuva ajovastuksista johtuva voima.



Kuva 4. Nopeudesta riippuvan vastusvoiman määrittämisperiaate rullaustestin avulla [15, s. 3].

Vastusvoima  $F$  esitetään kuvaajassa nopeuden  $v$  funktiona. Kun kuvaajaan asetetaan toisen asteen polynomi, saadaan määritettyä ajoneuvolle ominaiset vastuskertoimet  $f_0$ ,  $f_1$  ja  $f_2$ :

$$F(v) = f_0 + f_1 * v + f_2 * v^2 \quad (4)$$

Kertoimet kalibroidaan mittauksessa käytetyille dynamometrille siten, että niillä tuotettu jarrutusvoima aiheuttaa auton nopeudelle yhtä suuren hidastuvuuden kuin rullaustestissä. Dynamometrinen asetusarvoja merkitään tunnuksin  $F_0$ ,  $F_1$  ja  $F_2$ . Lisäksi dynamometriin asetetaan ajoneuvon massan mukainen hitausmassan arvo eli inertia kilogrammoina.

Lainsäädännön mukaan rullaustesti suoritetaan tasaisella ja suoralla tiellä, jonka kaltevuus saa olla enintään 1,5 %. Ajoradan tulee olla kuiva ja tien pinnalta mitattu tuulennopeus saa testin aikana olla korkeintaan 5 m/s. Ajoneuvon nopeustieto tallennetaan luotettavalla ja tarkalla mittalaitteella. Mittaus tulee tehdä molempiin ajosuuntiin ja niiden tulokset tulee keskiarvoistaa. [15, s. 4.]

## 4 Typenoksidien selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen

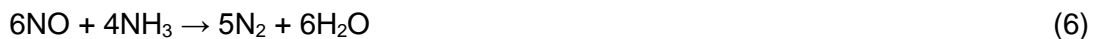
Typen oksidien selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen eli lyhyesti SCR (Selective Catalytic Reduction) on tehokas keino vähentää esimerkiksi dieselmoottorissa syntyviä  $\text{NO}_x$ -päästöjä. Järjestelmää on hyödynnetty aina 1970-luvulta lähtien paikallisissa käyttökohteissa kuten kaasuturbiineissa, jalostamoissa ja hiilivoimalaitoksissa. Aktiivisen toimintaperiaatteen takia SCR-järjestelmät ovat monimutkaisia ja kalliita, ja ne ovat siksi tulleet yleisesti ajoneuvokäyttöön vasta 2000-luvulla jatkuvasti kiristyvien päästöstandardien ajamana. EU:n alueella raskaassa kalustossa järjestelmä on vahvistanut asemansa Euro 5 -päästöstandardista lähtien ja henkilöautokäytössä Euro 6:sta lähtien. Laivakäytössä ensimmäinen SCR-järjestelmä asennettiin vuonna 1989. [1, s. 416, 423.]

### 4.1 Pelkistysaine

Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen vaatii dieselpolttoaineen lisäksi erillisen pelkistysaineen, joka ruiskutetaan suoraan pakokaasujen sekaan. Aine pelkistää valikoidusti eli selektiivisesti puhtaiden happimolekyylien sijasta typen oksideja. Ammoniakin ( $\text{NH}_3$ ) on havaittu toimivan tässä tarkoituksessa parhaiten. Näin ollen järjestelmässä käytetty pelkistysaine voisi olla puhdasta ammoniakkia tai sen vesiliuosta. Ammoniakin myrkyllisyyden takia kuitenkin käytetään kantoainetta, josta ammoniakki tuotetaan SCR-järjestelmän sisäisesti. Käytetyin kantoaine on urea-vesiliuos. Myös esimerkiksi ammoniumkarbamaatista ( $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$ ) voidaan helposti aikaansaada ammoniakkia. [7, s. 123.]

#### 4.1.1 Ammoniakki ja sen kemialliset reaktiot

Ammoniakki (NH<sub>3</sub>) aiheuttaa SCR-järjestelmässä useita eri kemiallisia reaktioita. Haluissa reaktioissa (yhtälöt 5–9) ammoniakki pelkistää NO<sub>x</sub>-molekyylejä typpikaasuksi (N<sub>2</sub>). Reaktioiden lopputuotteena syntyy myös vesihöyryä (H<sub>2</sub>O). Pelkistysreaktio vaatii käynnistyäkseen riittävän korkean lämpötilan.



Yhtälön 5 reaktio on järjestelmässä dominoiva. Siinä pelkistettävä molekyyli on typpimonoksidi (NO), jonka pitoisuus dieselmoottorien pakokaasuissa on tyypillisesti typpidioksidia (NO<sub>2</sub>) korkeampi. Typpidioksidikomponentti on mukana reaktioyhtälöissä 7–9. Näiden reaktioiden merkitys järjestelmässä kasvaa kun pakokaasujen sisältämä NO<sub>2</sub>-pitoisuus nousee suhteessa typpimonoksidiin. [1, s. 417.]

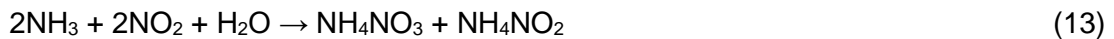
Yhtälön 9 mukainen pelkistysreaktio voi käynnistyä muita yhtälöitä matalammassa lämpötilassa. Se on siis tyypillisin reaktio alhaisissa lämpötiloissa, mikäli pakokaasu sisältää riittävästi typpidioksidia [7, s. 125].

Ammoniakki voi selektiivisyydestään huolimatta reagoida myös happimolekyylien kanssa. Nämä hapettumisreaktiot ovat ei-toivottuja, sillä ne voivat tuottaa NO-lisäpäästöjä ja heikentävät järjestelmän tehokkuutta. Ammoniakin hapettumista typeksi ja vedeksi (yhtälö 10) kuitenkin käytetään hyödyksi ammoniakkivuodon hallinnassa. [1, s. 417.]





Ammoniakki voi reagoida typpidioksidin ja veden kanssa muodostaen räjähdysherkkää ammoniumnitraattia ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) yhtälön 13 mukaan. Reaktio voidaan minimoida pitämällä kaasun lämpötila yli 200 celsiusasteen tai pitämällä kaasun sisältämän ammoniakkin ja typpidioksidin moolisuhde muuna kuin 1:1. [1, s. 417.]

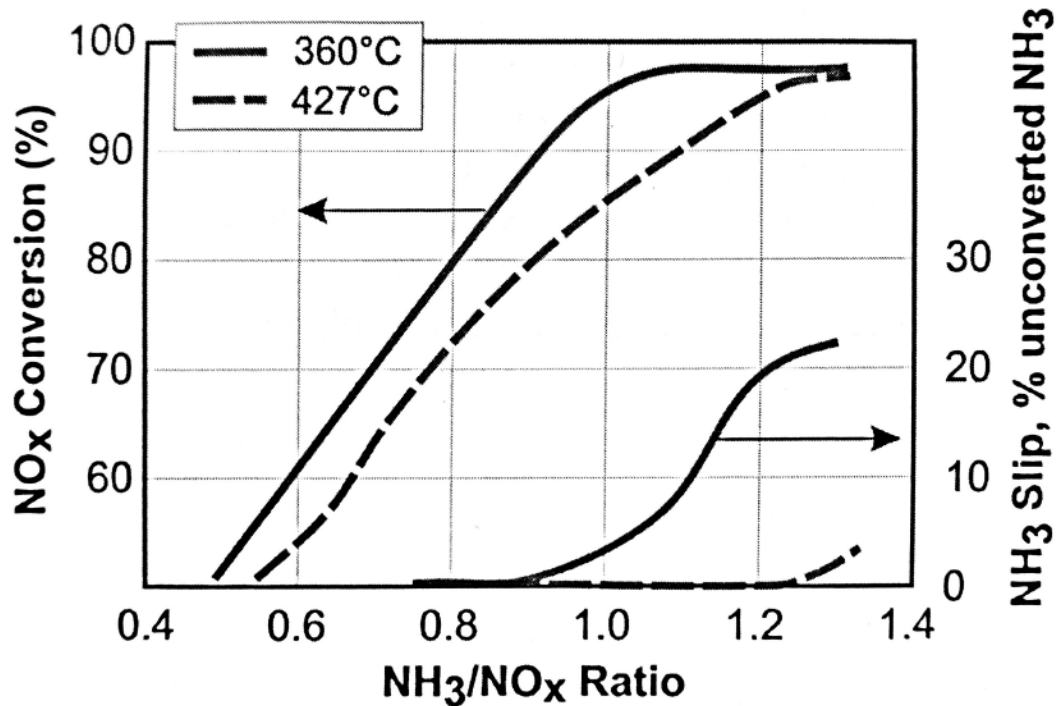


Mikäli pakokaasussa on rikkidioksidia, voi se reagoida ammoniakkin kanssa muodostaen ammoniumsulfaattia, joka voi pahimmassa tapauksessa tukkia SCR-katalysaattorin tai muita pakokaasun jälkikäsittelykomponentteja [1, s. 417].

Ammoniakin ja typen oksidien välisen suhteen pitäminen oikeana on erittäin tärkeää päästöjenhallinnan osalta. Dominoivan reaktioyhtälön 5 perusteella ammoniakkin ja typen oksidien stoikiometrinen suhde on 1:1 [1, s. 417]. Liian matala  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhde aiheuttaa puutteellisen  $\text{NO}_x$ -pelkistyksen kun taas liian korkea  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhde aiheuttaa ammoniakkimolekyylien pääsemisen ilmakehään. Tätä kutsutaan ammoniakkiavuodoksi. Vuotanut ammoniakki on ympäristölle haitallista ja kaasumaisena se ylittää ihmisen hajukynnyksen jo 15 ppm pitoisena [7, s.125].

On mielekästä ilmaista kuinka paljon pakokaasun sisältämästä  $\text{NO}_x$ -pitoisuudesta saadaan pelkistettyä. Tähän  $\text{NO}_x$ -muuntosuhteeseen vaikuttaa  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhteen lisäksi myös katalyytissa käytetyt materiaalit,  $\text{NO-NO}_2$ -suhde sekä lämpötila. Muuntosuhdeprosentti halutaan pitää mahdollisimman korkeana, mutta ilman ammoniakkin läpivuotoa. Tämä johtaa tarkkaan moottorin  $\text{NO}_x$ -tuoton arviointiin ja siten tarkkaan ammoniakkin ruiskutusmäärän hallintaan. Tilannetta voidaan helpottaa lisäämällä SCR-järjestelmän loppupäähän ammoniakkin vuotokatalysaattori, jossa typen oksidien kanssa reagoimaton ammoniakki varastoidaan tai hapetetaan typpi- ja vesimolekyyleiksi. [1, s. 417; 7, s. 125.]

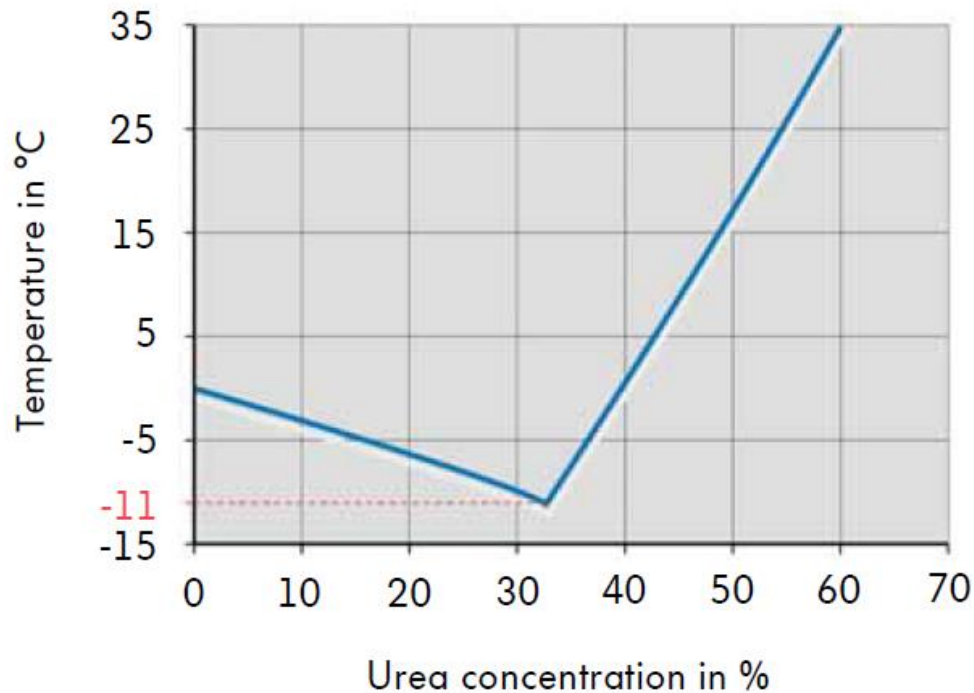
Kuva 5 esittää  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhteen vaikutusta  $\text{NO}_x$ -muuntosuhteeseen sekä ammoniakkin läpivuotoon  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2\text{-SCR}$ -katalysaattorilla 360 asteen ja 427 asteen lämpötiloissa. Kuvasta havaitaan, että ammoniakkin läpivuotoprosentti kasvaa pian  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhteen ylittäessä arvon 1. Yleensä pyritään käyttämään noin 0,9–1,0:n  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhdetta, jos järjestelmässä ei ole vuotokatalysaattoria [1, s. 417].



Kuva 5. NH<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-suhteen vaikutus NO<sub>x</sub>-muuntosuhteeseen [1, s. 417].

#### 4.1.2 Urea ja AdBlue

Turvallisuussyistä SCR-järjestelmän pelkistysreaktioissa käytettävä ammoniakki tuotetaan kantoaineesta. Tällä hetkellä käytetyin vaihtoehto on teollisesti valmistettu urea, CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. Urea on myrkytöntä ja turvallista kuljettaa. Lisäksi sitä on runsaasti saatavilla, sillä ureaa valmistetaan muun muassa lannoitteeksi. Tyypillisesti SCR-järjestelmissä käytetään urea-vesiliuosta, jonka ureapitoisuus on 32,5 massaprosenttia. Kyseisellä konsentraatiolla saavutetaan urean ja veden eutektinen seos. Tällöin liuksella on alhaisin mahdollinen kiteytymislämpötila (–11 °C), mikä vähentää järjestelmän lämmitystarvetta. Eri konsentraatioiden vaikutusta liuksen kiteytymislämpötilaan on havainnollistettu kuvassa 6. Usein autoteollisuudessa käytetty urea-vesiliuos tunnetaan sen kaupanimeillä AdBlue. [1, s. 418; 7, s. 123–124.]



Kuva 6. Ureakonsentraation vaikutus urea-vesiliuoksen kiteytymislämpötilaan [17, s. 18].

SCR-järjestelmässä ureasta muodostetaan ammoniakkia kaksivaiheisella reaktiolla pakoputkistossa. Aluksi lämmön vaikutuksesta urea hajoaa termolyyysireaktiossa ammoniakiksi ja isosyaanihapoksi (HNCO) yhtälön 14 mukaan. Reaktio vaatii noin 120 asteen lämpötilan.



Hydrolyysireaktiossa isosyaanihappo reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen lisää ammoniakkia sekä hiilidioksidia:



Urean on mahdollista myös hajota  $\cdot\text{NH}_2$ -radikaaleiksi ja hiilimonoksidiksi (CO):

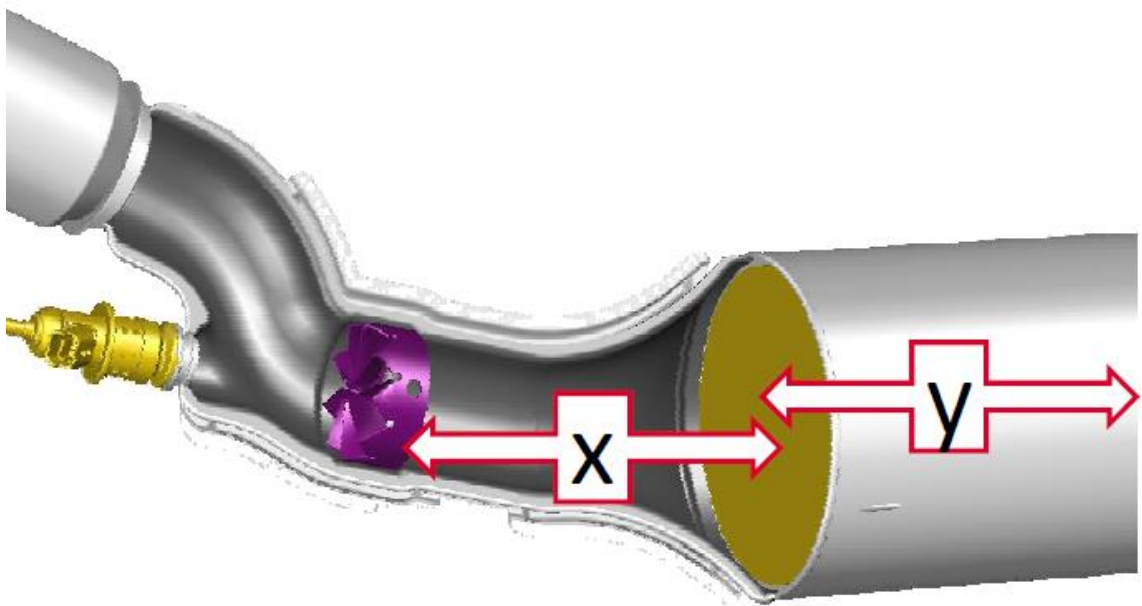


Hydrolyysireaktiot alkavat 160 °C:n lämpötilasta, mutta kiinteiden saostumien välttämiseksi tarvitaan yli 250 asteen lämpötila. Yhtälön 16 mukaisessa reaktiossa syntyy



hiilimonoksidia voidaan välttää käyttämällä SCR-järjestelmässä hydrolyysikatalysaattoria, jolloin urea hajoaa reaktioyhtälöiden 14 ja 15 mukaan. Katalysaattori myös nopeuttaa reaktiota ja siten pienentää saostumien muodostumisen riskiä. Nykyaikaisissa järjestelmissä hydrolyysikatalysaattori on usein sisällytetty SCR-katalysaattoriin. [1, s. 418; 7, s. 124; 18, s. 36.]

Kuva 7 esittää eräässä SCR-järjestelmässä tapahtuvia urean hajoamisreaktioalueita. Termolyyysialue on kuvattu x-merkinnällä ja hydrolyysialue y-merkinnällä. Kuvassa näkyy myös järjestelmän ureasuutin (keltaisena) sekä ureasekoitin (violettina).

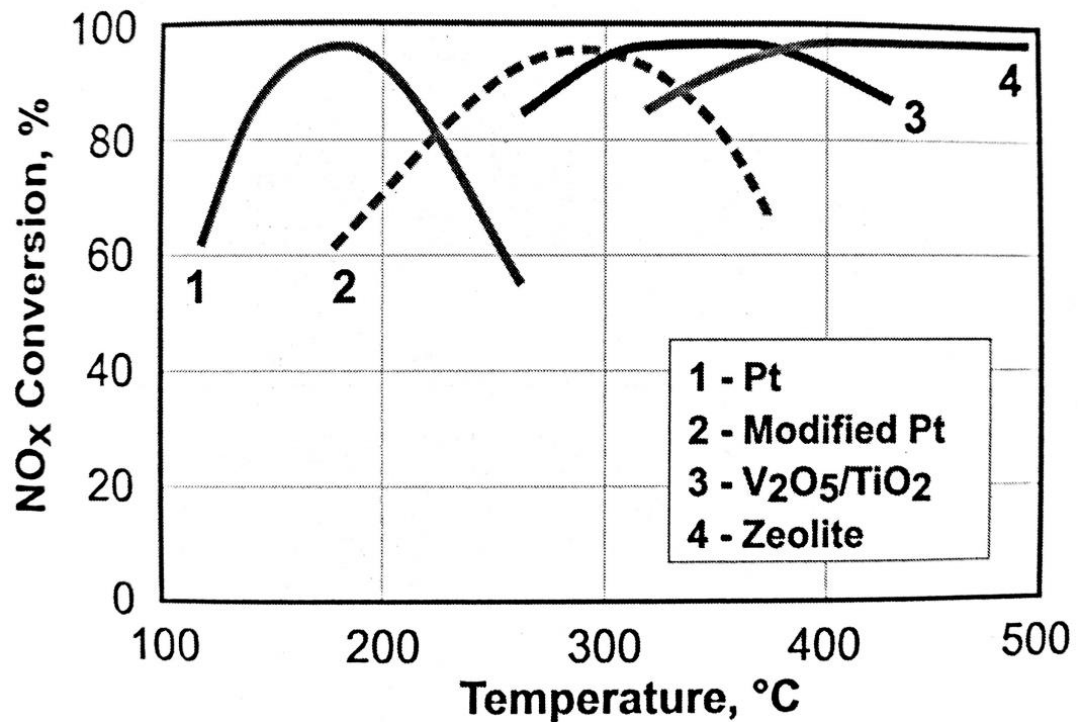


Kuva 7. Termolyyysi- ja hydrolyysireaktioiden tapahtuma-alueet [18, s. 36].

Urean hajoamisreaktioilla tuotettu ammoniakki pelkistää  $\text{NO}_x$ -molekyylejä edellisessä luvussa mainittujen reaktioyhtälöiden tavoin. Yksi kilogramma 32,5 prosenttista AdBlue-liuosta vastaa 0,184 kg puhdasta ammoniakkaa [1, s. 418]. AdBluen tarkka käyttötarve riippuu moottorin  $\text{NO}_x$ -ominaispäästöistä, mutta sen kulutus on yleensä noin 3–5 % ajoneuvon käyttämästä dieselpolttoainemäärästä [7, s. 125].

## 4.2 Katalysaattorit

SCR-järjestelmissä käytettyjä katalyyttikemioita on useita, joista tyypillisimpiä ovat platina (Pt), divanadiinipendoksidi-titaanidioksidi ( $V_2O_5$ - $TiO_2$ ) sekä zeoliittimineraalit. Ensimmäistä kertaa SCR-toiminta todettiin platinakatalyytin avulla. Kyseinen kemia on kuitenkin myöhemmin korvattu muilla katalysaattorityypeillä pienen toimintalämpötila-alueen takia. Eri katalyyttien suuntaa antavia toimintalämpötila-alueita on esitelty kuvassa 8.



Kuva 8. SCR-katalysaattorityyppien käyttölämpötila-alueet [1, s. 419].

Kaikilla SCR-katalysaattoreilla on ammoniakkia varastoiva ominaisuus. Pakokaasuihin annosteltu pelkistysaine pääsee kulkeutumaan pakokaasuvirran mukana katalysaattoriin, jossa sen huokoinen pintamateriaali sitoo muodostuneen ammoniakin tiettyyn määrään asti. Katalysaattorin pinnoitteeseen varastoitunut ammoniakki reagoi typen oksidien kanssa kun tarvittavat olosuhdekriteerit täyttyvät. Ammoniakin varastointikyky riippuu katalysaattorin materiaalista, koosta sekä kennorakenteesta.

#### 4.2.1 Platina

Ensimmäisissä SCR-katalysaattoreissa käytettiin platinakatalyyttia. Katalysaattorin toimintalämpötila-alue on noin 175–250 °C, jolloin katalysaattorissa tapahtuvat kemialliset reaktiot ovat haluttuja typenoksidien pelkistysreaktioita (yhtälöt 5–9). 250 astetta lähesyttäessä ammoniakki alkaa Pt-katalysaattorissa hapettua NO-, N<sub>2</sub>O- ja N<sub>2</sub>-molekyyleiksi (yhtälöt 10–12) heikentäen voimakkaasti NO<sub>x</sub>-muuntosuhdetta. Ammoniumnitraatin muodostumisen välttämiseksi lämpötilan tulisi kuitenkin olla yli 200 asteen. Näin katalysaattorin käyttölämpötila-alue jää hyvin kapeaksi. Nykyään SCR-käytössä platinakatalyytti on syrjäytetty muilla vaihtoehdoilla. [1, s. 419.]

#### 4.2.2 Vanadiini

Platinakatalysaattorin jälkeen kehitettiin vanadiinipohjainen V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-katalyytti korkeamman toimintalämpötilan järjestelmiin. Katalysaattorityypin alumiinioksidi (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ei kuitenkaan sopinut käytettäväksi rikkipitoisen polttoaineen kanssa alumiinisulfaatin (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) muodostumisen takia. Alumiinioksidin tilalla alettiin käyttää titaanidioksidia (TiO<sub>2</sub>) sulfaattien muodostumisen välttämiseksi. Myös muita metallioksideja, kuten volframitrioksidia (WO<sub>3</sub>) käytetään V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-katalysaattoreissa pidentämään katalysaattorin elinikää ja stabiloimaan toimivuutta korkeammissa lämpötiloissa.

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub>-katalysaattorin paras toimintalämpötila-alue on noin 250–450 °C, korkeammissa lämpötiloissa titaanidioksidista koostuva anatiisimineraali muuttuu rutiiliksi heikentäen katalysaattorin NO<sub>x</sub>-pelkistyskykyä pysyvästi. Kyseinen faasimuutos voidaan estää stabilaattorilla, jolloin katalysaattori voi säilyä toimintakykyisenä jopa 700 asteessa. Volframitrioksidilla stabiloitu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-katalyytti on yleinen katalysaattorityyppi niin paikallisissa kuin mobiileissa käyttökohteissa. [1, s. 419.]

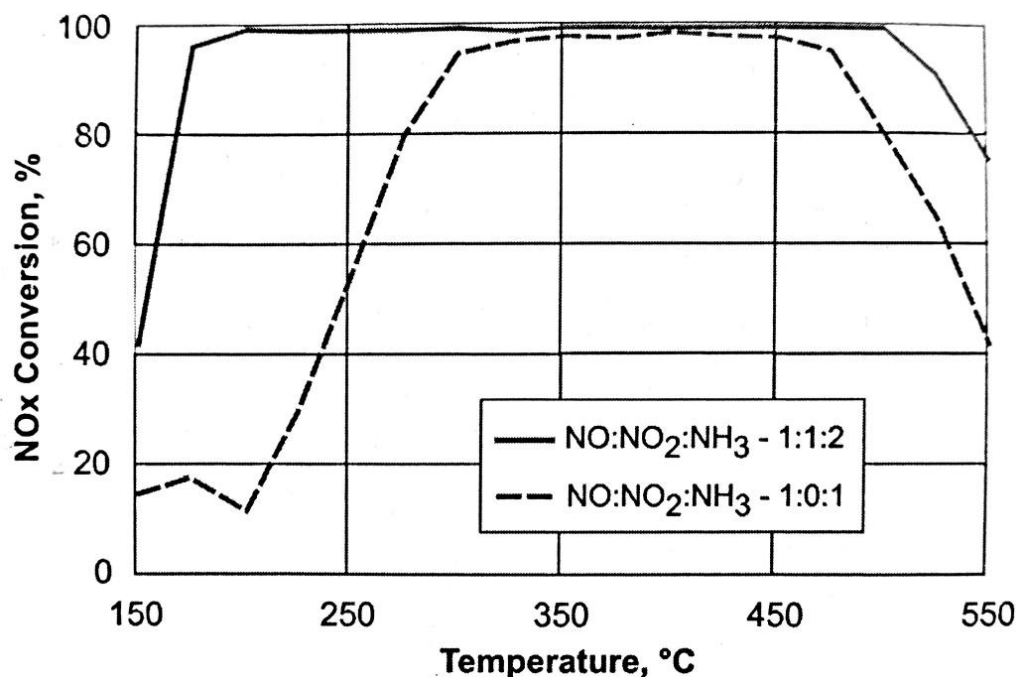
#### 4.2.3 Zeoliitti

Zeoliitit ovat alumiinisilikaateista koostuvia mineraaleja, joista mordeniitin havaittiin ensimmäisenä toimivan SCR-katalyyttinä. Zeoliitti poikkeaa Pt- ja V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-katalyyteistä siten, ettei se hapeta ammoniakkiä typpimonoksidiksi kun tarjolla on pelkistettäviä NO<sub>x</sub>-molekyylejä. Näin ollen zeoliittikatalysaattoreiden NO<sub>x</sub>-muuntosuhde pysyy korkeana aina toimintalämpötila-alueen ylärajalle asti. Vesihöyrylle altistuessaan zeoliittikatalysaattori voi deaktivoitua pysyvästi jos lämpötila on yli 600 °C. [1, s. 420.]

Zeoliittikatalysaattorin toimintalämpötila-alue riippuu käytetystä zeoliittimineraalista ja sille tehdyistä muutoksista, kuten ioninvaihdosta. Ensimmäiset zeoliittikatalysaattorit kykenivät  $\text{NO}_x$ -pelkistykseen vasta noin 350 celsiusasteesta alkaen, mutta nykyaikainen katalysaattori voi operoida jopa alle 200 °C lämpötilassa yli 90 %  $\text{NO}_x$ -muuntosuhteella pakokaasujen sisältäessä  $\text{NO}_2$ :a. Nämä matalan lämpötilan zeoliittikatalysaattorit on kehitetty etenkin ajoneuvokäyttöä varten. [1, s. 420.]

#### 4.2.4 $\text{NO}$ - $\text{NO}_2$ -suhde sekä avustavat katalysaattorit

Dieselmoottorin  $\text{NO}_x$ -päästöistä tyypillisesti noin 90 % on typpimonoksidia ja loput typpidioksidia. Tällä  $\text{NO}$ - $\text{NO}_2$ -suhteella on vaikea saavuttaa riittävää  $\text{NO}_x$ -muuntosuhdetta dieselmoottorille tyypillisissä matalissa lämpötiloissa. Erityisesti zeoliitti- ja  $\text{V}_2\text{O}_5$ -katalysaattoreilla havaitaan  $\text{NO}_x$ -pelkistyksen tehostumista alhaisissa lämpötiloissa kun typpidioksidin määrää kasvatetaan suhteessa typpimonoksidiin. Matalissa lämpötiloissa hyvän muuntosuhteen saavuttamiseksi typpidioksidia tulisi olla 50 % koko  $\text{NO}_x$ -määrästä. Tällöin katalysaattorissa tapahtuvat pelkistysreaktiot ovat pääasiallisesti yhtälön 9 mukaisia ja voivat alkaa jo noin 150 asteessa. Kuvassa 9 on esitetty  $\text{NO}$ - $\text{NO}_2$ -suhteen vaikutusta  $\text{NO}_x$ -muuntosuhteeseen eri lämpötiloissa. [1, s. 420; 7, s. 125.]



Kuva 9.  $\text{NO}$ - $\text{NO}_2$ -suhteen vaikutus  $\text{NO}_x$ -muuntosuhteeseen  $\text{V}_2\text{O}_5$ - $\text{TiO}_2$ -katalysaattorissa [1, s. 420].

Dieselmootorin tuottamaa NO-NO<sub>2</sub>-suhdetta voidaan parantaa lisäämällä järjestelmään typpimonoksidia typpidioksidiksi hapettava dieselhapetuskatalysaattori. Myös hiilivety-päästöillä on haitallinen vaikutus NO<sub>x</sub>-muuntosuhteeseen. SCR-järjestelmää ennen asennettu hapetuskatalysaattori poistaa hiilivety-päästöjä ja näin ollen tehostaa järjestelmän toimintaa usealla tavalla. Hapetuskatalysaattorissa voi muodostua lisää typpidioksidia kuitenkin vasta kun hiilimonoksidi ja suurin osa hiilivedyistä on hapetettu, sillä kaikki vapaa NO<sub>2</sub> kuluu niiden hapettumisreaktioihin. [1, s. 420; 19, s. 8.]

Pakoputkiston loppupäähän voidaan lisätä ammoniakkin vuotokatalysaattori, joka tarvittaessa hapettaa ohivuotaneen ammoniakkin N<sub>2</sub>:ksi ja H<sub>2</sub>O:ksi (yhtälö 10). Volkswagen käyttää pelkän ammoniakkin hapetuskatalysaattorin tilalla kaksivaiheista katalysaattoria. Sen kupari-zeoliittipinnoite varastoi vuotaneen ammoniakkin, joka myöhemmin hyödynnetään NO<sub>x</sub>-päästöjen pelkistämiseen SCR-katalysaattorin tavoin. Katalysaattorissa on lisäksi platina-palladium-pinnoite, jolla hapetetaan hiukkassuodattimen regeneroinnissa syntyvää hiilimonoksidia sekä loput ammoniakkivuodosta. [7, s. 125; 17, s. 13.]

Lisäksi järjestelmässä voi olla erillinen hydrolyysikatalysaattori tai se voi olla integroitu SCR-katalysaattoriin. Katalysaattori edistää urean hajoamisreaktiota ja sen toiminta perustuu yleensä metallioksideihin. Erään hydrolyysikatalysaattorin pinnoitteen on ilmoitettu sisältävän sekoituksen titaanioksidia, alumiinioksidia sekä piidioksidia [1, s. 421].

## 5 SCR-järjestelmä ajoneuvokäytössä

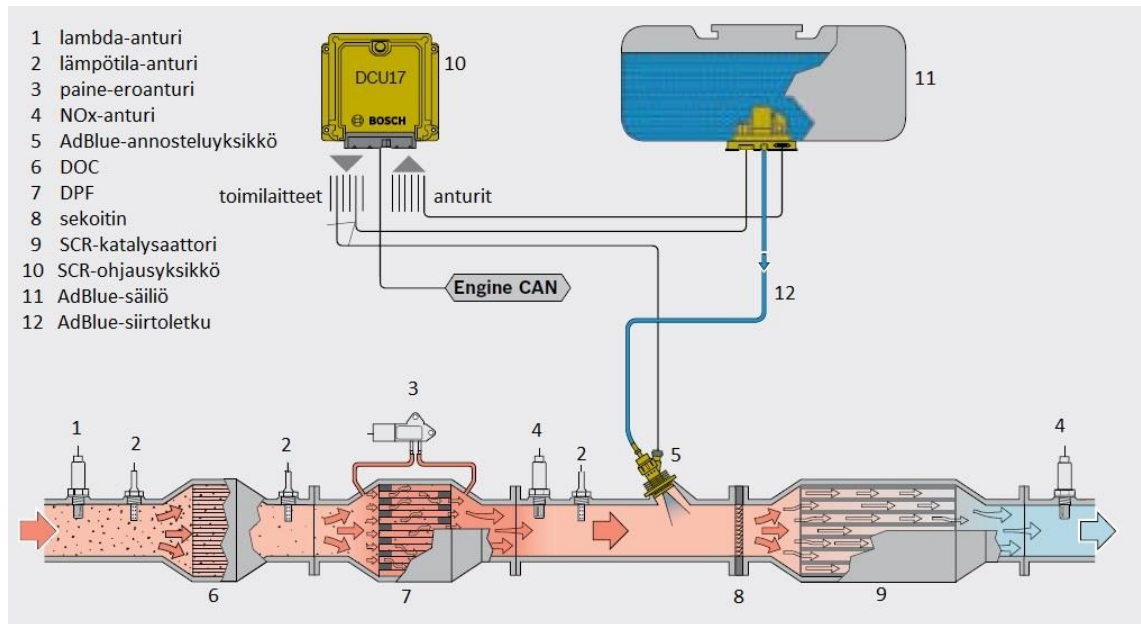
Suuri osa uusista dieselkäyttöisistä henkilöajoneuvoista on varustettu SCR-järjestelmällä. Raskaan kaluston ajoneuvoissa ja muissa hyötyajoneuvoissa järjestelmää on käytetty henkilöautoja kauemmin. SCR-järjestelmiä myös jälkiasennetaan esimerkiksi vanhempiin linja-autoihin päästöluokan korotusta varten.

Toimintaperiaatteeltaan SCR-järjestelmä on henkilöautoissa ja raskaan kaluston ajoneuvoissa samanlainen. Eroja kuitenkin tulee esimerkiksi komponenttien koossa – kuorma-auton katalysaattoriin tulee kyetä käsittelemään suurempi pakokaasun massavirta. Lisäksi raskaan kaluston ajoneuvoissa on usein paineilmajärjestelmä, jota voidaan hyödyntää pelkistysaineen ruiskutuksessa. Komponentit on myös sovitettu toimimaan henkilöautoissa 12 voltin järjestelmässä ja raskaassa kalustossa 24 voltin järjestelmässä. Tässä luvussa perehdytään tarkemmin henkilöautoon suunnattuun SCR-järjestelmään ja sen komponentteihin.

### 5.1 Järjestelmäkuvaus

Dieselhenkilöautojen SCR-järjestelmäkokonaisuudet vaihtelevat hieman niiden valmistajan ja käyttökohteen mukaan. Järjestelmä on aina liitoksissa muuhun päästöjen jälkikäsitteilylaitteistoon, johon nykyään kuuluu lähes poikkeuksetta dieselhapetus-katalysaattori (DOC) ja hiukkassuodatin (DPF). Hiukkassuodatin voi olla pakattu samaan yksikköön SCR-katalysaattorin kanssa tai se voi sopivan pinnoitteen avulla toimia itsestään sekä pelkistyskatalysaattorina että hiukkassuodattimena. SCR-järjestelmä on aktiivinen, mutta se ei puutu moottorin normaaliin toimintaan kuten  $\text{NO}_x$ -varaajakatalysaattori. Järjestelmää voidaan ohjata joko moottorin ohjausyksiköllä eli ECU:lla (Engine Control Unit) tai erillisellä SCR-ohjausyksiköllä. Erillinen ohjausyksikkö kuitenkin kommunikoi myös ECU:n kanssa yleensä CAN-väylän avulla. [7, s. 123; 17, s. 10.]

Kuva 10 esittää erästä SCR-järjestelmäkokonaisuutta. Se sisältää myös dieselhapetus-katalysaattorin sekä hiukkassuodattimen. DOC on järjestelmässä aina ennen SCR-katalysaattoria hapettamassa muun muassa typpimonoksidia typpidioksidiksi. Hiilivetyjen ja hiilimonoksidin hapettumisreaktiot ovat eksotermisiä eli lämpöä vapauttavia reaktioita, joten DOC oleellisesti auttaa pakokaasun pysymistä selektiiviselle katalyyttiselle pelkistykselle riittävässä toimintalämpötilassa.



Kuva 10. Denoxtronic 5 -SCR-järjestelmän havainnekuva.

AdBlue-annosteluyksikön ja pelkistyskatalysaattorin välissä on sekoitin sekä riittävä välimatka, jotta AdBlue-liuos voi sekoittua mahdollisimman tasaisesti pakokaasun joukkoon. AdBlue-liuosta säilytetään erillisessä säiliössä. Säiliö sisältää muun muassa nestemäärän ja lämpötilan tunnistuksen, lämmityselementtejä sekä pumppuyksikön, jolla tuotetaan riittävä paine AdBluen ruiskutukselle. Myös AdBluen siirtoletku on varustettu lämmitysvastuksella. Järjestelmän ohjausyksikkö kommunikoi ECU:n kanssa ja lukee antureilta saatua tietoa. Kerätyn tiedon avulla se ohjaa AdBluen annostelua SCR-järjestelmään.

Pakoputkistossa tulee olla lämpötilantunnistus. Kuvan 10 järjestelmässä lämpötila-antureita on yhteensä kolme kappaletta, joista kaksi ensimmäistä tarkkailevat hapetuskatalysaattorin toiminta-astetta ja viimeinen SCR-katalysaattorille menevän pakokaasun lämpötilaa. Lämpötilatietoja käytetään myös hiukkassuodattimen regenerointitilanteessa. Kuvan järjestelmässä tarkkaillaan myös pakokaasun jäännöshapen määrää lambda-anturilla sekä hiukkassuodattimen yli olevaa paine-eroa paineanturilla, joka kertoo hiukkassuodattimen keräämästä hiukkasmäärästä. Lisäksi järjestelmässä on oltava vähintään yksi NO<sub>x</sub>-anturi. Kuvan tapauksessa antureita on kaksi kappaletta, yksi pelkistyskatalysaattoria ennen ja yksi sen jälkeen.

Järjestelmässä voisi lisäksi olla ammoniakkin vuotokatalysaattori, annosteluyksikön jäähdytyslinja ja ammoniakianturi.  $\text{NH}_3$ -anturit ovat kuitenkin erittäin kalliita ja siksi hyvin harvinaisia ajoneuvokäytössä. [7, s. 123–125; 17, s. 6–23; 18.]

## 5.2 Tärkeimmät järjestelmäkomponentit

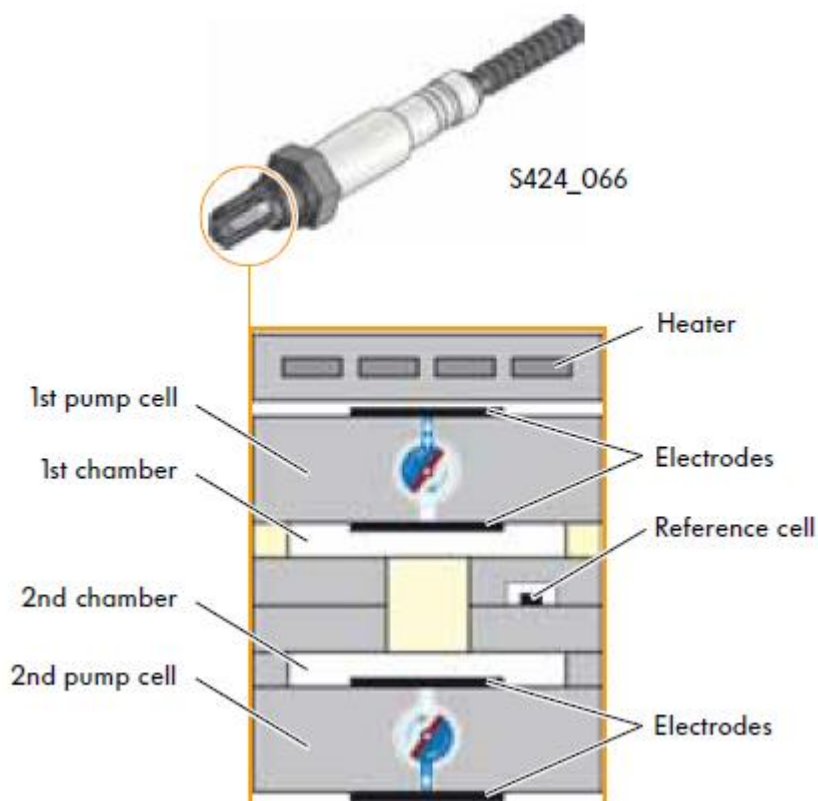
### 5.2.1 $\text{NO}_x$ -anturi

Pakokaasuvirran  $\text{NO}_x$ -pitoisuus tulee mitata sopivalla anturilla SCR-järjestelmän itse diagnostiikan sekä ohjauksen takaisinkytkennän mahdollistamiseksi. Järjestelmässä voidaan käyttää myös useampaa anturia tarkempaa  $\text{NO}_x$ -pelkistysasteen tarkkailua varten. Tämänhetkisen tekniikan  $\text{NO}_x$ -anturin reagointinopeus on melko hidaskäyttö (noin 1000 ms) eikä se toimi välittömästi auton käynnistyksen jälkeen, sillä anturin toimintalämpötilan saavuttamisessa kestää jopa muutama minuutti. Lisäksi pelkistysaineesta pakokaasuihin muodostunut ammoniakki aiheuttaa virheen anturilukemaan, jos anturi sijaitsee pakoputkistossa annosteluyksikön jälkeen. Ammoniakki nostaa mitatun  $\text{NO}_x$ -pitoisuuden todellista pitoisuutta korkeammaksi. Näistä syistä järjestelmän pelkistysaineen annostelussa ei voida luottaa täysin pelkkään  $\text{NO}_x$ -anturidataan. [5, s. 22–24.]

$\text{NO}_x$ -anturin ulostulosignaali on vain mikroampeerien luokkaa, joten riittävän mittatarkkuuden takaamiseksi anturilla on oma ohjainlaite, joka käsittelee anturisignaalin ja lähettää mitatun tiedon digitaalisena signaalina CAN-väylää pitkin SCR-ohjainlaitteelle. Anturin ohjainlaite huolehtii myös anturin lämmityksestä. Bioforessa käytetyn  $\text{NO}_x$ -anturin toimintalämpötila on noin 800 °C. Ohjainlaite suorittaa anturidiagnostiikan ja ilmoittaa mahdollisista vioista. [5, s. 22–24; 18, s. 30–40.]

$\text{NO}_x$ -anturin toiminta perustuu laajakaistalambda-anturin tapaan happimäärän mittaukseen. Anturi koostuu lämmitysvastuksesta, kahdesta kammioista, vertailusolusta sekä useasta elektrodista. Rakenne on esitetty kuvassa 11. Anturielementti on zirkoniumdioksidia ( $\text{ZrO}_2$ ), jonka läpi negatiivisesti varautuneet happi-ionit voivat kulkeutua elektrodien jännitteiden vaikutuksesta. [5, s. 23–24.]

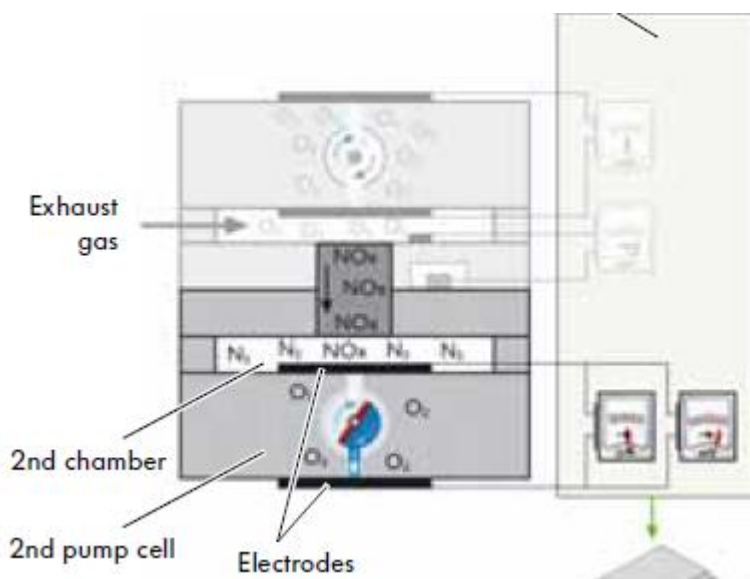




Kuva 11. NO<sub>x</sub>-anturin rakenne [5, s. 23].

Osa pakokaasuista ohjataan ensimmäiseen kammioon. Vertailusolun ja pakokaasun sisältämä happipitoisuudet eroavat toisistaan, mikä aiheuttaa vertailusolun ja kammion elektrodien välille jännite-eron. Jännite-eroa mitataan ja se pidetään vakiona pumppamalla ensimmäiseen kammioon lisää happea tai poistamalla sieltä happea kammion sisäisen ja ulkopuolisen elektrodin jännite-eroa muuttamalla. Näin ensimmäisen kammion happipitoisuus saadaan jatkuvasti pidettyä ennalta määrättyssä arvossa. [5, s. 23–24.]

Seuraavaksi pakokaasu kulkeutuu toiseen kammioon, jossa NO<sub>x</sub>-molekyylit pelkistetään katalyytin tai elektrodin avulla N<sub>2</sub>- ja O<sub>2</sub>-molekyyleiksi. Toisen kammion sisäisen ja sen ulkopuolella olevien elektrodien välillä pidetään tietty jännite-ero, jolloin happimolekyylit pyrkivät siirtymään ulommalle positiiviselle elektrodille. Hapen siirtymisestä aiheutunutta virtaa elektrodien välillä mitataan. Virta on verrannollinen siirtyvien O<sub>2</sub>-molekyyliden määrään. Koska ensimmäisen kammion happipitoisuus on ennalta määrätty, voidaan virran suuruudesta päätellä NO<sub>x</sub>-molekyyleistä tuotettu happimäärä ja siten pakokaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuus. Tilannetta havainnollistetaan kuvassa 12. [5, s. 23–24.]



Kuva 12. O<sub>2</sub>-määrän mittaustapahtuma NO<sub>x</sub>-anturissa [5, s. 24].

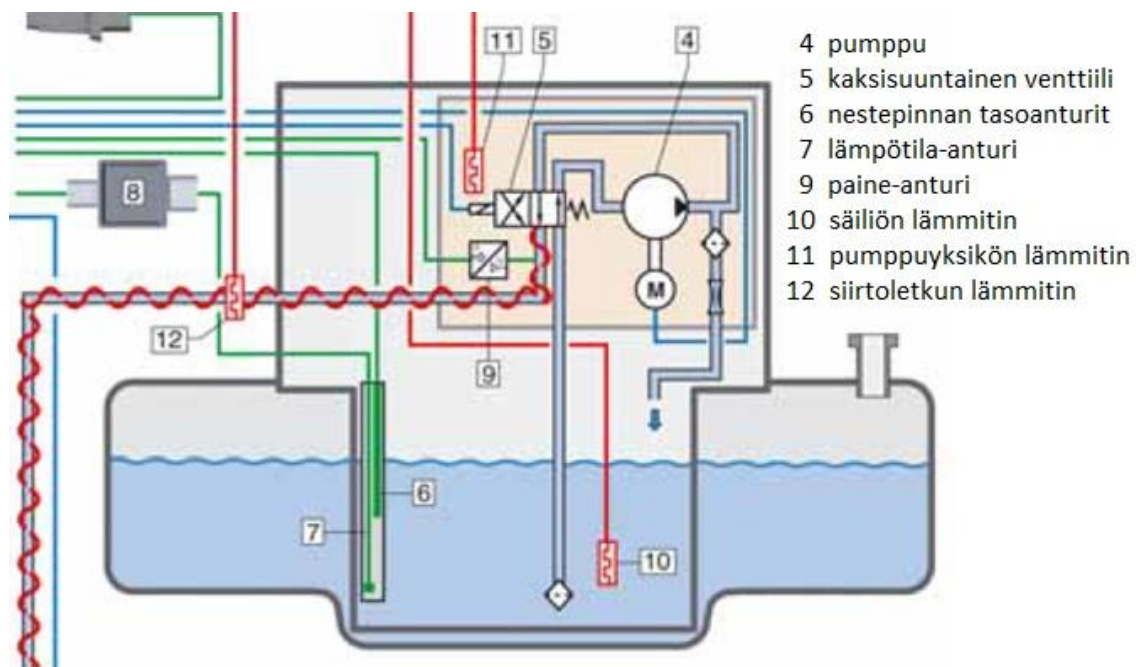
Bioforessa käytetty anturi kykenee valmistajan mukaan mittaamaan pakokaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuuden 3000 ppm:ään asti ja sen suhteellinen virhe on 0–500 ppm mittausalueella ±10 %. NO<sub>x</sub>-anturin ilmoittaa myös pakokaasun ilma-polttoainesuhteen ja toimii näin ol-  
len lambda-anturina.

### 5.2.2 AdBlue-säiliö ja pumppuyksikkö

AdBlue-liuos annostellaan pakoputkeen, joten se vaatii polttoaineesta erillisen säilytysti-  
lan ajoneuvossa. Tyypillisesti AdBlue-säiliön vetoisuus on mitoitettu aineen riittämiseen  
usean tuhannen kilometrin ajomatkalle. Säiliö voi olla sijoitettu autossa esimerkiksi taka-  
kontin pohjalevyn alle, ja sen täyttö voi tapahtua joko suoraan säiliössä olevasta täyttö-  
aukosta tai säiliöstä voi olla viety täyttöletku polttoaineentäyttöaukon viereen. Säiliön  
täyttöaukon ja AdBlue-täyttöpullon tai -kanisterin välinen liitos suunniteltu siten, että täyt-  
tötilanteessa säiliön sisältämät kaasut eivät pääse ilmakehään vaan jäävät täyttöpulloon.  
AdBluen sisältämä urea kiteytyy altistuessaan ilmalle tarpeeksi pitkäksi aikaa, joten säi-  
liön tulee olla riittävän tiivis. Lämpötilavaihtelun ja nesteen kulutuksen aiheuttamat pai-  
neenmuutokset on kuitenkin huomioitava huohotuslinjalla. [5, s. 25–52; 17, s. 20.]

Kuva 13 havainnollistaa erästä AdBlue-säiliökokonaisuutta, joka sisältää myös pumppu-  
yksikön. Pumppuyksikkö on yleensä erillinen, koteloitu kokonaisuus säiliössä (kuva 14).  
Se sisältää pumpun lisäksi suodattimen, lämpötila-anturin, lämmityksen, paine-anturin,

venttiilin ja tasoanturin. Nykyaikainen tasoanturi voi toimia esimerkiksi ultraäänellä: anturi lähettää ultraääniaaltoja nesteen pintaa kohti, mistä ääniaallot heijastuvat takaisin anturille. Kuluneesta ajasta voidaan laskea nestetason korkeus. [17, s. 26–33.]



Kuva 13. Erään Adblue-säiliön järjestelmäkuva [5, s. 54].

Pumppu voi olla tyypiltään esimerkiksi kalvo- tai hammaspyöräpumppu. Se tuottaa pelkistysaineen ruiskutukselle sopivan paineen, joka on suuruusluokaltaan noin 6 baaria. Pumpun yhteydessä voi olla paineakku varaamassa painetta ja tasaamassa sen tuottoa. Tuotettua painetta tarkkaillaan paineanturilla. [5, s. 32; 18, s. 13.]



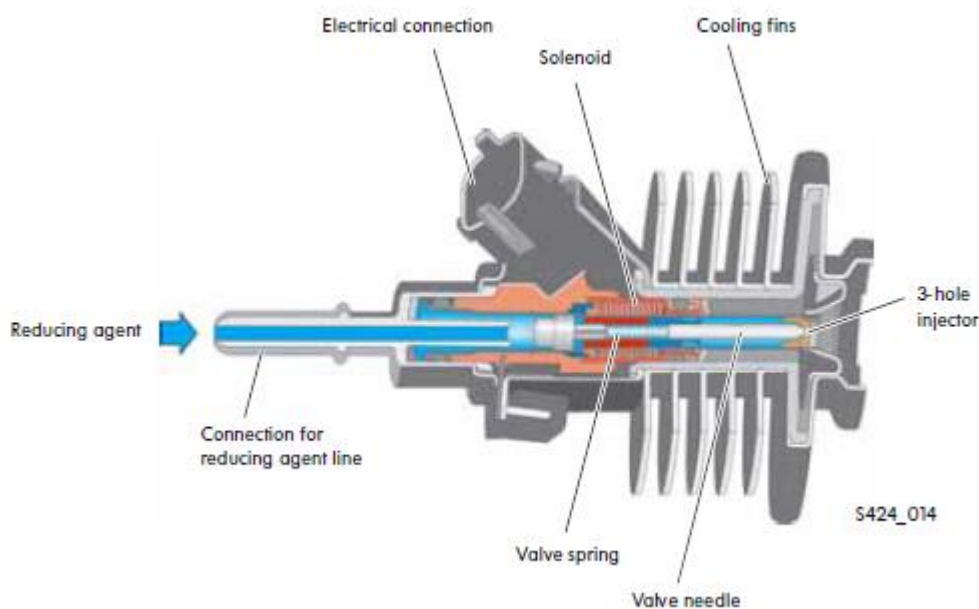
Kuva 14. Volkswagen Passatin AdBlue-pumppuyksikkö [5, s. 28].

AdBlue jäätyy  $-11$  celsiusasteessa. Aineen on oltava nestemäistä, jotta sitä voidaan ruiskuttaa pakoputkistoon. Kylmissä olosuhteissa AdBlue tulee saattaa nestemäiseksi mahdollisimman nopeasti ajoneuvon käynnistämisen jälkeen. Näin ollen säiliö, pumppuyksikkö sekä siirtoletku sisältävät sähköisen lämmityksen. Erään järjestelmän lämmityselementit kytketään päälle kun ympäröivä lämpötila alittaa  $-5$  °C. Siirtoletku tyhjenetään pelkistysaineesta moottorin sammutuksen jälkeen, jotta ruiskutussuutin ei pääsisi hajoamaan liuoksen kiteytymisestä johtuvasta laajenemisesta lämpötilan ollessa tarpeeksi alhainen. Tapahtuma voidaan toteuttaa venttiilien avulla, pumpun pyörimissuuntaa muuttamalla tai erillisellä paluupumpulla. [5, s. 46].

### 5.2.3 AdBlue-annosteluyksikkö

AdBlue kuljetetaan paineistettuna siirtoletkua pitkin annosteluyksikölle, joka on kiinnitetty pakoputkeen ennen SCR-katalysaattoria. Annosteluyksikkö on käytännössä solenoiditoiminen ruiskutussuutin. Solenoidia ohjataan SCR-ohjausyksiköllä tai ECU:lla.

Kuvassa 15 on esitetty erään AdBlue-annosteluyksikön rakenne. Kun solenoidi saateetaan jännitteelliseksi, siinä kulkevan virran tuottama magneettikenttä nostaa suuttimen neulan. AdBlue ruiskutetaan neulan alta avautuneista suutinrei'istä pakokaasujen sekaan. Kun solenoidin virransaanti lopetetaan, suuttimessa oleva jousi painaa neulan takaisin lepoasentoon ja ruiskutustapahtuma lakkaa. Ruiskutusmäärää voidaan hallita pulssinleveysmoduloidulla eli PWM-signaalilla (Pulse-Width Modulation). Ruiskutetun AdBlue-liuoksen halutaan sekoittuvan mahdollisimman hyvin ja tasaisesti pakokaasuvirtaan, joten suutinreikien toteutus ja yksikön oikeanlainen sijoitus pakoputkistoon on tärkeää. Pakoputken aiheuttaman lämmön takia suuttimelle tulee taata riittävä jäähdytys, jotta se toimisi halutulla tavalla. Jäähdytys voidaan toteuttaa ilmavirralla tai nestekierrolla moottorin jäähdytysjärjestelmästä. [5, s. 18–19; 17, s. 12.]

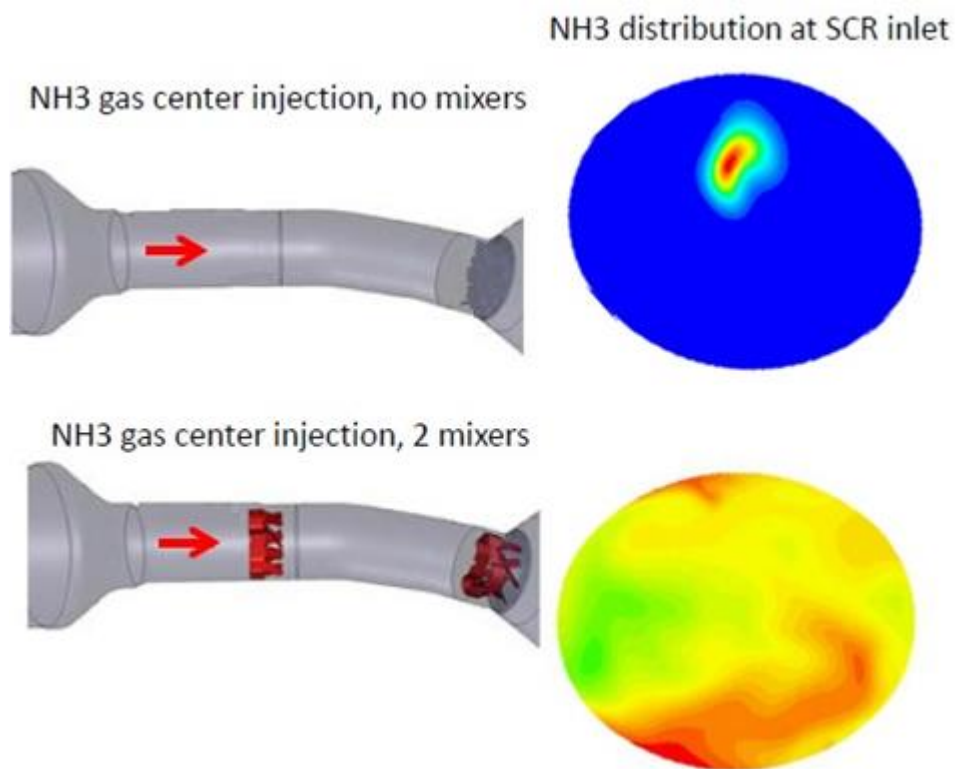


Kuva 15. AdBlue-annosteluyksikkö [5, s. 19].

#### 5.2.4 Sekoitin

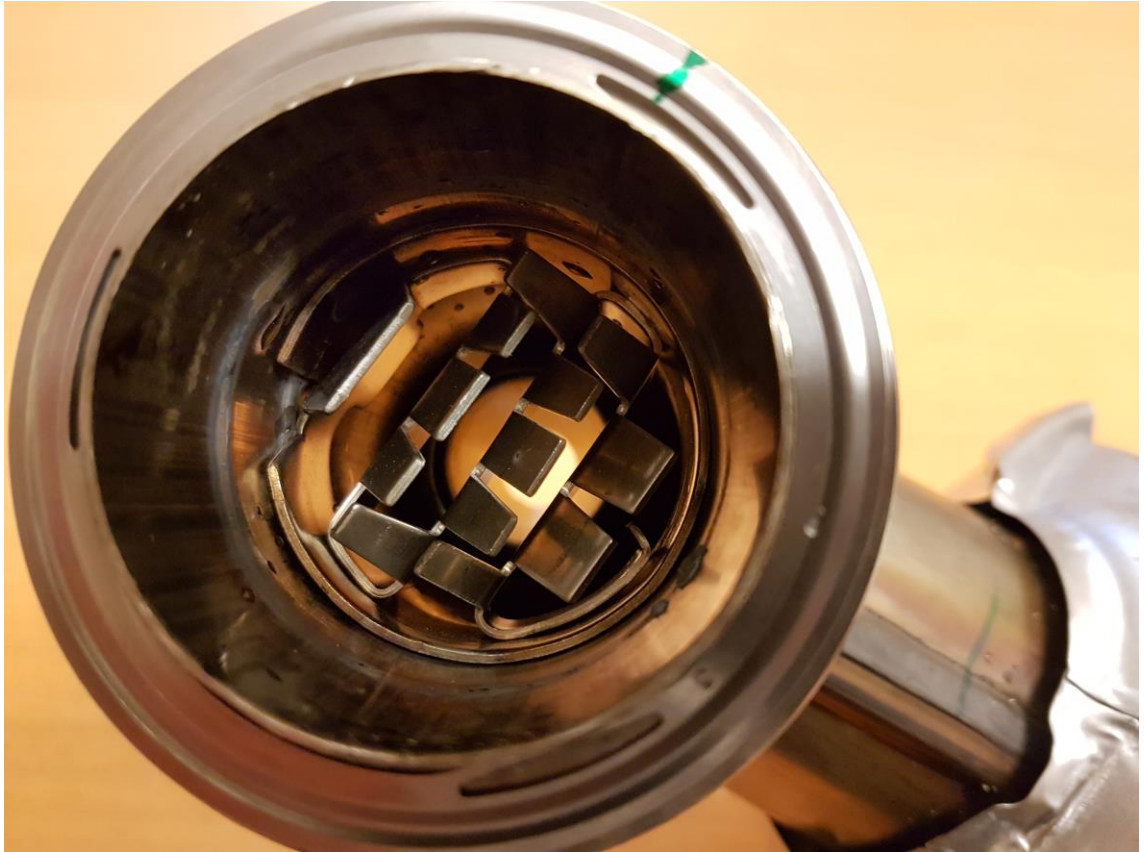
$\text{NO}_x$ -pelkistyksen tehokkuuteen vaikuttaa oleellisesti  $\text{NH}_3$ - $\text{NO}_x$ -suhde, kuten luvussa 4.1 kerrotaan. Ammoniaki kulkeutuu SCR-katalysaattorille pakokaasun mukana. Jos ammoniaki ei ole sekoittunut tasaisesti pakokaasuihin, osassa katalysaattorin pinta-alasta paikallinen  $\text{NH}_3$ - $\text{NO}_x$ -suhde on huono ja koko SCR-järjestelmän hyötysuhde heikkenee. Sekoittimen tarkoitus on taata pelkistysaineen mahdollisimman homogeeninen sekoittuminen pakokaasuihin.

Ruiskutetun AdBluen pisarakoko pienenee sen osuessa sekoittimeen, jolloin aine höyryytyy pakokaasujen sekaan tehokkaammin ja tasaisemmin. Tämä osaltaan myös nopeuttaa ureasta termolyysi- ja hydrolyysireaktioiden avulla syntyvän ammoniakkin muodostumista. Lisäksi sekoitin aiheuttaa pakokaasun pyörteilyä. Sekoittumisen tehokkuuteen vaikuttaa myös käytetty ruiskutussuutin, ruiskutuskulma suhteessa pakokaasuvirtaan, suuttimen ja sekoittimen sijainti sekä pakoputkiston geometriasta aiheutuva pakokaasuvirran turbulentsisuus. Kuva 16 esittää sekoittimien vaikutusta SCR-katalysaattorille saapuvan pakokaasun ammoniakkijakaumaan Chevrolet Silverado 2500HD:n pakoputkistossa. [17, s. 12; 20, s. 3–4.]



Kuva 16. Kahden sekoittimen vaikutus ammoniakkijakaumaan [20, s. 11]. Punertavaksi muuttuva väri esittää korkeampaa ammoniakkipitoisuutta.

Sekoitintyyppejä ja -geometrioita on useita erilaisia valmistajasta ja pakoputkistosta riippuen. Kuvassa 17 näkyy Bioforeen asennettu Citroën C4:ssä käytetty sekoitin.



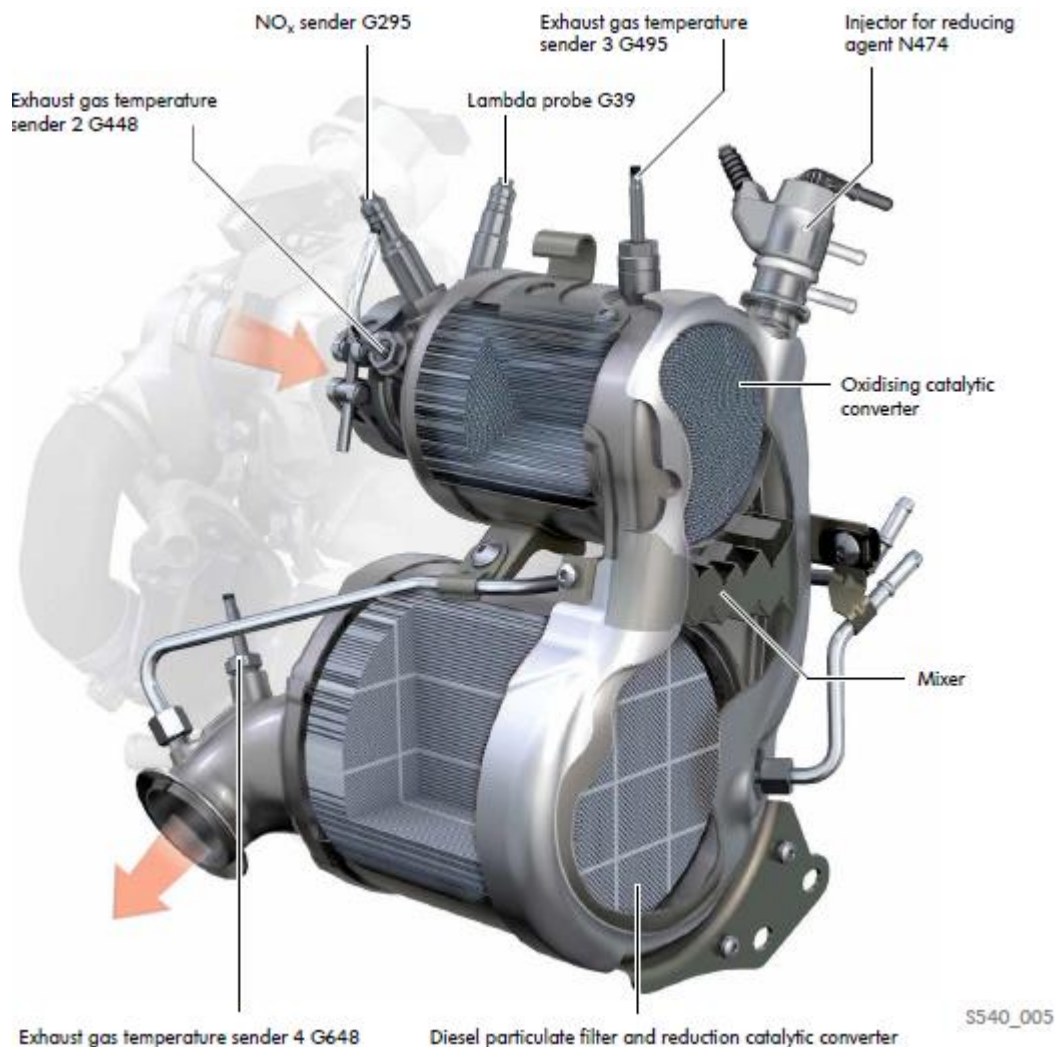
Kuva 17. Citroen C4 Picasso 1.6 HDi:n SCR-järjestelmän sekoitin.

#### 5.2.5 Pelkistyskatalysaattori

Ajoneuvoissa käytetyt SCR- eli pelkistyskatalysaattorit ovat nykyään usein zeoliittipohjaisia [1, s. 420; 5, s. 13; 17, s. 13; 18, s. 36]. Myös  $V_2O_5$ - $TiO_2$ -katalysaattori soveltuu ajoneuvokäyttöön toimintalämpötilojensa puolesta. Eri katalysaattoreista on kerrottu tarkemmin luvussa 4.2.

Typenoksidien pelkistysreaktiot vaativat katalysaattorista riippuen vähintään noin 150–200 asteen lämpötilan, joten on edullista sijoittaa katalysaattori mahdollisimman lähelle moottoria riittävän lämpötilan saavuttamiseksi lyhyessä ajassa. Katalysaattori on mahdollista lämmittää myös sähköisesti lämmitysvastuksen avulla [19, s. 10]. Kuva 18 esittää vuoden 2015 Volkswagen Passatin SCR-katalysaattoria, jossa hiukkassuodatin, hapeuskatalysaattori sekä SCR-katalysaattori on pakattu yhdeksi kokonaisuudeksi. Näin SCR-katalysaattori saadaan mahtumaan ajoneuvon moottoritilaan lyhyen matkan päähän pakosarjasta nopean lämpiämisen mahdollistamiseksi. Tästä on erityisesti hyötyä

EU:n vaatimassa päästömittaustestissä, jossa mittaus aloitetaan heti moottorin kylmäkäynnistystilanteesta. Hiukkassuodattimen ja SCR-katalysaattorin yhdistäminen myös vähentää järjestelmän erillisten komponenttien määrää ja siten laskee valmistuskustannuksia.



Kuva 18. Volkswagenin SCR-katalysaattorikonaisuus [17, s.10].

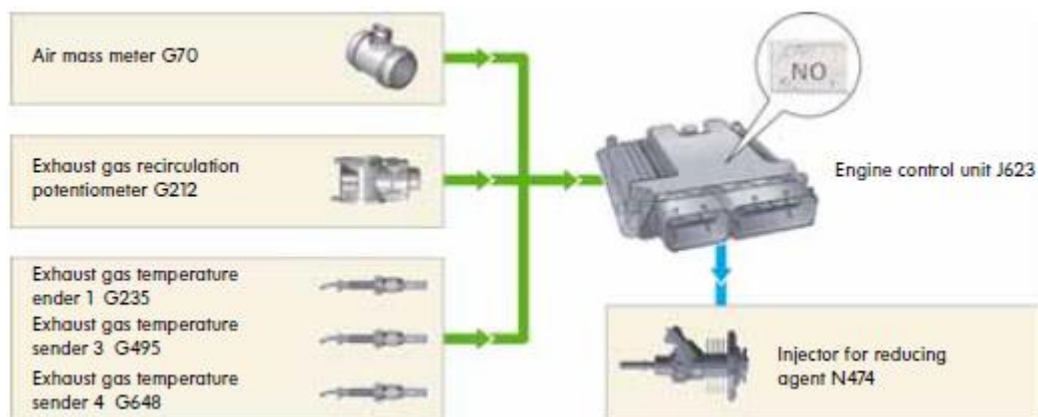
### 5.3 SCR-järjestelmän ohjaus

SCR-järjestelmä vaatii toimiakseen ohjauksen. Ohjaus voidaan suorittaa joko ECU:lla tai erillisellä ohjausyksiköllä. ECU:n ohjaamissa järjestelmissä on erillinen ohjainlaite lämmitystä vaativille komponenteille, joiden virrankulutus on suuri.



Järjestelmän tärkein säädettävä suure on pelkistysaineen ruiskutusmäärä. Ohjausyksikkö arvioi moottorin tuottaman  $\text{NO}_x$ -määrän tyypillisesti kartastoihin perustuvalla laskentamallilla. Laskennallisen  $\text{NO}_x$ -tuoton perusteella ohjataan ruiskutettavan AdBluen määrää pakoputkistoon. Ohjaus tapahtuu annosteluyksikön solenoidille syötettävän PWM-signaalin pulssisuhdetta muuttamalla. [13, s. 21; 17, s. 11.]

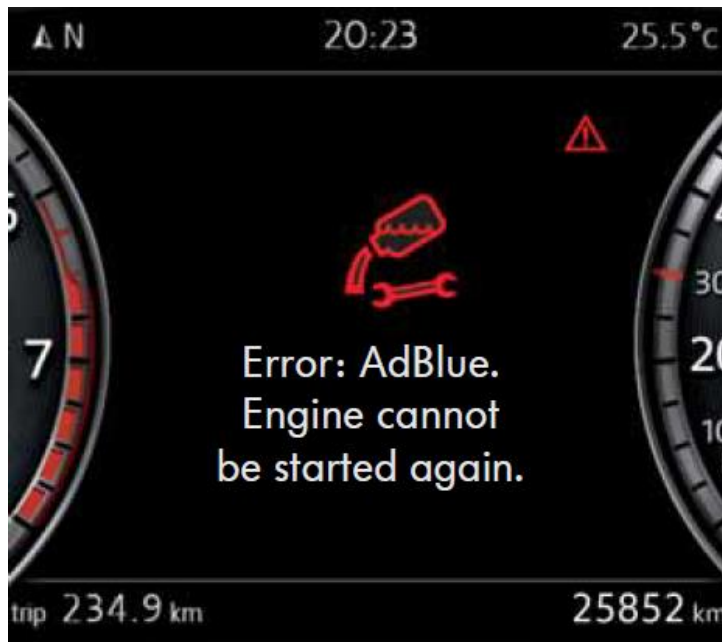
Pakokaasujen sisältämän  $\text{NO}_x$ -määrän laskenta perustuu imusarjassa liikkuvaan ilmassaan, EGR-venttiilin asentoon ja polttoaineen ruiskutusmäärään. Lisäksi ohjausyksikkö tarkkailee pakoputkistossa olevia lämpötila-antureita. Pakokaasun lämpötila vaikuttaa oleellisesti järjestelmissä tapahtuviin hydrolyysi- ja pelkistysreaktioihin. Näin ollen pelkistysainetta voidaan annostella pakoputkeen vasta kun riittävä lämpötila on saavutettu. Ohjausyksikköön voi olla ohjelmoitu katalysaattorille ominainen ammoniakkin varastointikyky, joka huomioidaan pelkistysaineen annostelumäärän laskennassa. Annosteluyksikön ohjausperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 19. [5, s. 21.]



Kuva 19. AdBlue-annosteluyksikön ohjausperiaate [5, s. 21].

Järjestelmässä olevan  $\text{NO}_x$ -anturin avulla voidaan ruiskutusmäärän säätöön tehdä takaisinkytkentä. Takaisinkytkennän toteuttamisessa tulee kuitenkin huomioida se, että  $\text{NO}_x$ -anturi reagoi virheellisesti myös ammoniakkiin. Tämä voi aiheuttaa itseään ruokkivan kierteen, jonka seurauksena on ammoniakkivuotoa: vuotava ammoniakki tulkitaan kohonneena  $\text{NO}_x$ -pitoisuutena, jolloin pelkistysainetta annostellaan lisää kompensoimaan pitoisuuden nousu. Anturin mittaama  $\text{NO}_x$ -pitoisuus kohoaa ammoniakkin takia entisestään, ja pelkistysainetta annostellaan takaisinkytkennän takia taas lisää.

NO<sub>x</sub>-anturi mahdollistaa myös SCR-järjestelmän toimivuusasteen tarkkailun. Jos ohjausyksikkö havaitsee liian heikon typenoksidien pelkistykseen tai muun vian järjestelmässä, se sytyttää päästöjenhallintajärjestelmän merkkivalon ajoneuvon mittaristossa. Vikatilanteessa ajoneuvo tulee toimittaa huoltoon. Jos tätä ei tehdä ajoissa, ohjausyksikkö estää moottorin käynnistämisen uudelleen (kuva 20). Diagnostiikkatesterillä voidaan ohittaa moottorinkäynnistyksen esto siksi aikaa, että ajoneuvo saadaan siirrettyä korjaamolle. [17, s. 34.]



Kuva 20. Viimeinen SCR-järjestelmän vikailmoitus ajoneuvon mittaristossa [17, s. 34].

Myös säiliössä olevan AdBluen määrää tarkkaillaan ohjausyksikön toimesta. Mitatusta määrästä arvioidaan sen riittävyys kilometrilukemana, joka ilmoitetaan mittaristossa. Kuljettajaa varoitetaan liian vähäisestä AdBlue-määrästä. Myös AdBluen loppuessa ohjausyksikkö estää moottorin uudelleenkäynnistyksen [17, s. 32]. Näiden toimintojen lisäksi ohjausyksikkö päättää komponenttien lämmitystarpeesta sekä tarkkailee ja säätää pumppun paineentuottoa.

## 6 Muutokset Biofore-konseptiautossa

Bioforen typenoksidipäästöt olivat autolle vuonna 2015 suoritetussa päästömittauksessa ylittäneet niille säädetyn raja-arvon. Päästöjen vähentämiseksi autoon päätettiin lisätä SCR-järjestelmä sekä pienentää ajovastuksia. Muutostyöt aloitettiin kesällä 2016, jolloin keskityttiin ajovastusten optimointiin. Muutoksilla aikaansaadut ajovastukset mitattiin EU:n asettamien ohjeiden mukaisesti rullaustestillä.

Tämän jälkeen siirryttiin SCR-järjestelmän toteutukseen, joka aloitettiin tutustumalla järjestelmän toimintaan, tutkimalla ja vertailemalla valmiita järjestelmiä sekä valitsemalla sopivat komponentit. Muutamista järkevistä vaihtoehdoista päädyttiin PSA-konsernin valmistamaan järjestelmään, joka muokattiin sopivaksi Bioforeen. Järjestelmään luotiin täysin säädettävä ohjaus. Järjestelmän toimintaa säädettiin sekä koulun dynamometreissä että liikenteessä vähentämään NO<sub>x</sub>-päästöjä mahdollisimman tehokkaasti. Pakokaasupäästöjen muutos mitattiin lopuksi VTT:n toimesta EU-säädöksen mukaisella päästömittauksella.

Toteutetut muutostyöt ja niillä saavutetut tulokset on selvitetty seuraavissa luvuissa.

### 6.1 Ajovastusten optimointi

#### 6.1.1 Renkaat

Autossa on ulkonäkösyistä käytetty leveitä ja matalaprofiilisia renkaita suurikokoisilla alumiinivanteilla. Näiden tuottaman ajovastuksen pienentämiseksi autoon vaihdettiin kapeammat, halkaisijaltaan pienemmät sekä hyvällä energiatehokkuusmerkinnällä varustetut renkaat. Kapeampi ja pienempi rengas tuottaa vähemmän ilmanvastusta ja hyvä energiatehokkuusluokitus korreloi pienen vierintävastuskertoimen kanssa. Lisäksi kaikkiin vanteisiin asennettiin muoviset vannelevyt vähentämään ilman pyörteilyn tuottamaa vastusta. Vanhat sekä uudet renkaat on esiteltyä kuvassa 21.



Kuva 21. Bioforen vanhat renkaat vasemmalla sekä uudet oikealla.

Etupyörien aurausta säädettiin pienemmäksi, jolloin pyörien sortokulmasta aiheutuvaa vastusta saatiin pienennettyä. Auton jarruja herkistettiin niistä aiheutuvan laahauksen vähentämiseksi. Lisäksi renkaiden ilmanpainetta nostettiin renkaan muodonmuutoksesta johtuvan energiahäviön pienentämiseksi.

#### 6.1.2 Pohjalevy

Biofore-konseptiauton pohja on hyvin epätasainen. Tämä tuottaa loisvastusta sekä turbulenssia, aiheuttaen suuren osan auton ilmanvastuksesta. Pohjalevyn asennus on verrattain helppo tapa pienentää ilmanvastusta muuttamatta suuresti autoa rakennetta. Tässä tapauksessa edustuskäytössä olevan auton ulkonäköä ei voitu muuttaa, joten pohjalevyn asentaminen oli ainoita vaihtoehtoja parantaa auton aerodynaamisia ominaisuuksia merkittävästi. Kuvassa 22 näkyy Bioforeen asennettu pohjalevy.



Kuva 22. Bioforeen asennettu pohjalevy.

Pohjalevy on valmistettu 5 mm paksusta yhtenäisestä polypropeenilevystä. Se on vahvistettu alumiiniprofiililla, jonka avulla levy on saatettu auton pohjarakennetta mukailevaan muotoon. Pohjalevy on kiinnitetty paikalleen korin helmarakenteista sekä auton pohjassa olevista poikkipalkeista.

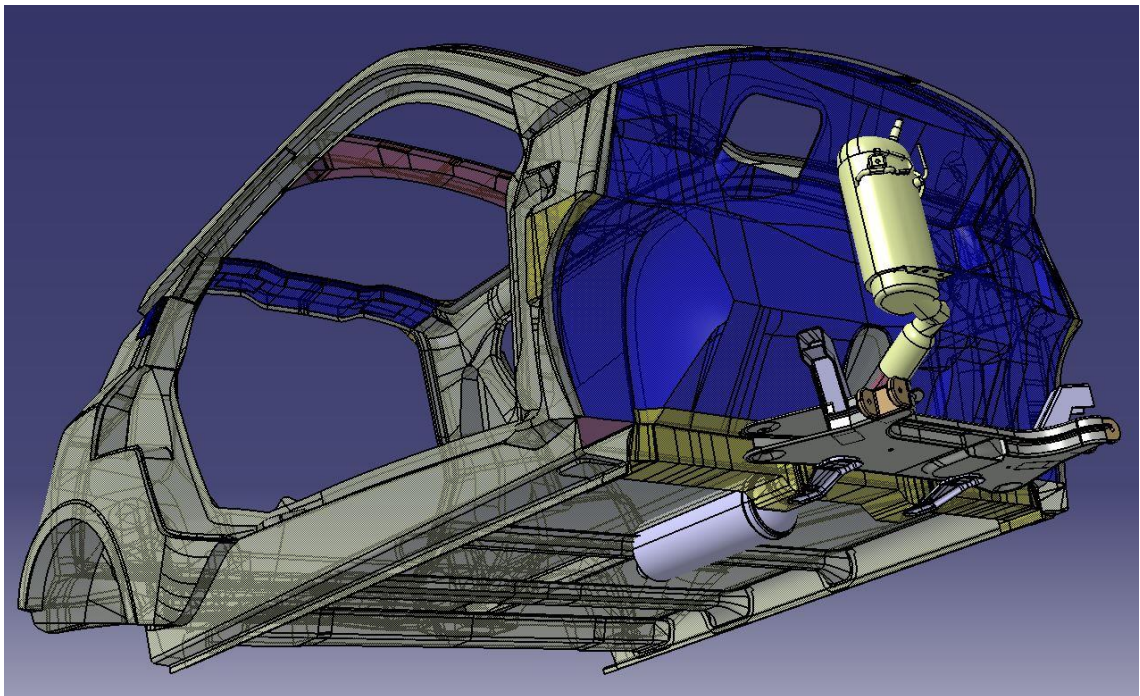
## 6.2 SCR-järjestelmä

### 6.2.1 Komponenttien valinta

Bioforeen asennettävien komponenttien valinnassa suurin ongelma oli niiden vaatima tilantarve. SCR-komponentit ovat yleensä suurikokoisia ja tarkoitettu suuremmille kuin Bioforen iskutilavuudeltaan 1,2-litraiselle moottorille. Autoon ei alun perin ollut suunniteltu SCR-järjestelmän asennusta, joten osille ei ollut varattu auton rakenteissa sopivaa tilaa. Suurimmat yksittäiset järjestelmäkomponentit ovat SCR-katalysaattori sekä Ad-Blue-säiliö.

Eri automallien SCR-järjestelmiin perehdyttiin tarkemmin ja niiden komponentteja vertailtiin keskenään. Vaihtoehtoja karsittiin lähinnä liian suurien katalysaattorikokojen sekä hinnan vuoksi. Lopulta autoon päädyttiin asentamaan Citroën C4 Picasso 1.6 HDi:ssä käytetty katalysaattori, joka mahtuu myös Bioforen pohjassa olevaan tilaan. Saman automallin SCR-järjestelmästä päädyttiin käyttämään myös AdBlue-ruiskutusyksikköä, sekoitinta, säiliötä ja sen pumppuyksikköä sekä siirtoletkua.

Valittua katalysaattoria sovitettiin 3D-mallin avulla Bioforen pohjaan ja samalla suunniteltiin pakoputkistoon tehtävät muutostyöt. 3D-malli on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Uuden pakoputkiston sovitus autoon Catia V5 -3D-mallinnusohjelmalla.

Loput SCR-järjestelmään kuuluvista komponenteista joko löytyivät ajoneuvosta valmiiksi tai ne hankittiin muualta. Esimerkiksi NO<sub>x</sub>-anturi päädyttiin hankkimaan Valtra-traktorin SCR-järjestelmästä, sillä kyseisen anturin ohjaukseen ja lukemiseen tarvittavat tiedot saatiin anturin maahantuojalta. Citroënin oman ohjausyksikön sijasta järjestelmän ohjaukseen käytettiin ohjelmoitavissa olevaa Epec 3606 -ohjausyksikköä.

## 6.2.2 Järjestelmän asennus

Bioforen pakoputkistoon kuului jo valmiiksi dieselhapetuskatalysaattori sekä hiukkasuodatin. Nämä näkyvät kuvan 23 mallissa keltaisella värillä. Alkuperäiseen pakoputkistoon sovitettiin uudet SCR-järjestelmäkomponentit. SCR-katalysaattori jouduttiin tilanpuutteen vuoksi asentamaan järjestelmän lämpiämisen kannalta epäedullisesti keskelle auton pohjaa. Auton pohjassa oleva SCR-katalysaattori mahdollistaa kuitenkin pitkän etäisyyden AdBlue-ruiskutusyksikköön, mikä auttaa AdBlue-pakokaasu-seoksen sekoittumisessa.

Kuva 24 on otettu auton alapuolelta konehuoneen kohdalta. Kuvassa vasemmalla näkyy myös 3D-mallissa esitetty hiukkasloukku, johon on TIG-hitsaamalla kiinnitetty Citroënin pakoputkiston AdBlue-annosteluysikön paikka. Yksikköä ei ole kuvassa vielä kiinnitetty paikalleen. Lisäksi kuvassa näkyvä putkiosuus pitää sisällään AdBlue-sekoittimen. Sekoitin on tarkemmin kuvattu luvussa 5.2.4.



Kuva 24. Hiukkasloukkuun hitsattu AdBlue-annosteluysikön paikka.

Citroënin SCR-katalysaattoriin valmistettiin sopivat liitoskappaleet sen pakoputkistoon asennusta varten. Lopputulos näkyy kuvassa 25. Katalysaattorin kotelointi sisältää myös hiukkassuodattimen. Se päätettiin jättää kokoonpanoon.



Kuva 25. Muokattu SCR-katalysaattori.

Kuvassa 26 näkyy SCR-katalysaattori auton pohjaan asennettuna vaimennuskumien varaan sekä NO<sub>x</sub>-anturi. Anturi asennettiin valmistajan ilmoittamien ohjeiden mukaan oikeaan kulmaan pakokaasuvirtaan nähden. Anturi on järjestelmässä katalysaattorin jälkeen, joten sillä voidaan mitata SCR-järjestelmän toimintaa sekä säätää AdBluen annostelua.

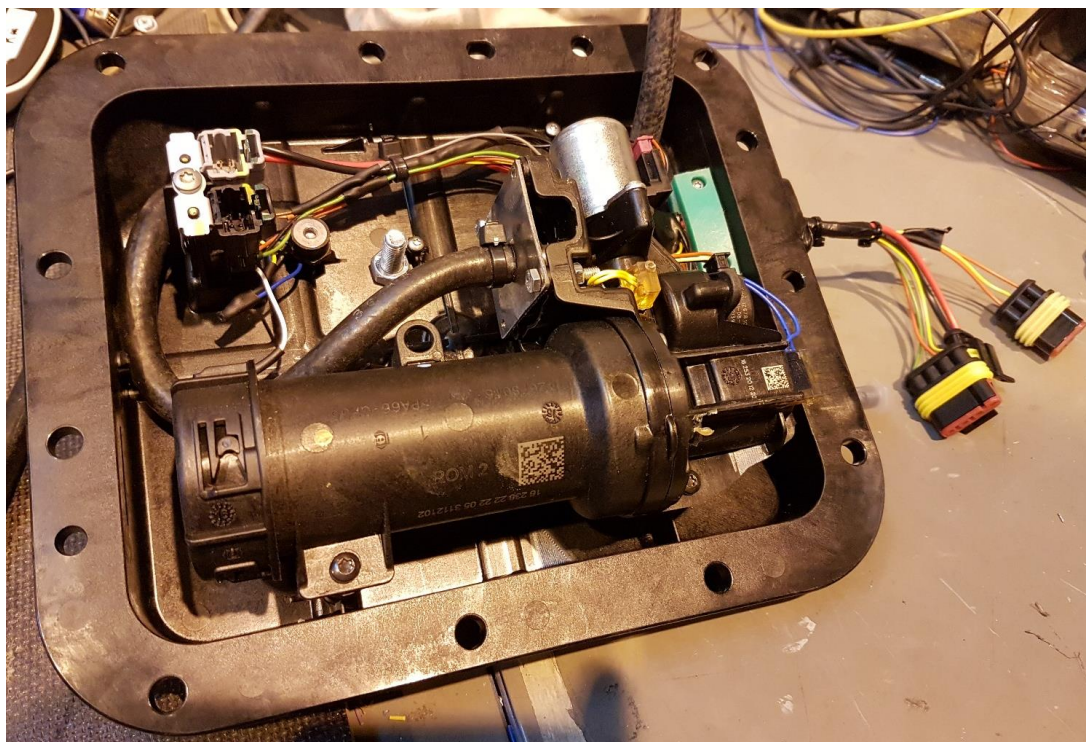


Kuva 26. SCR-katalysaattori sekä NO<sub>x</sub>-anturi asennettuna autoon.



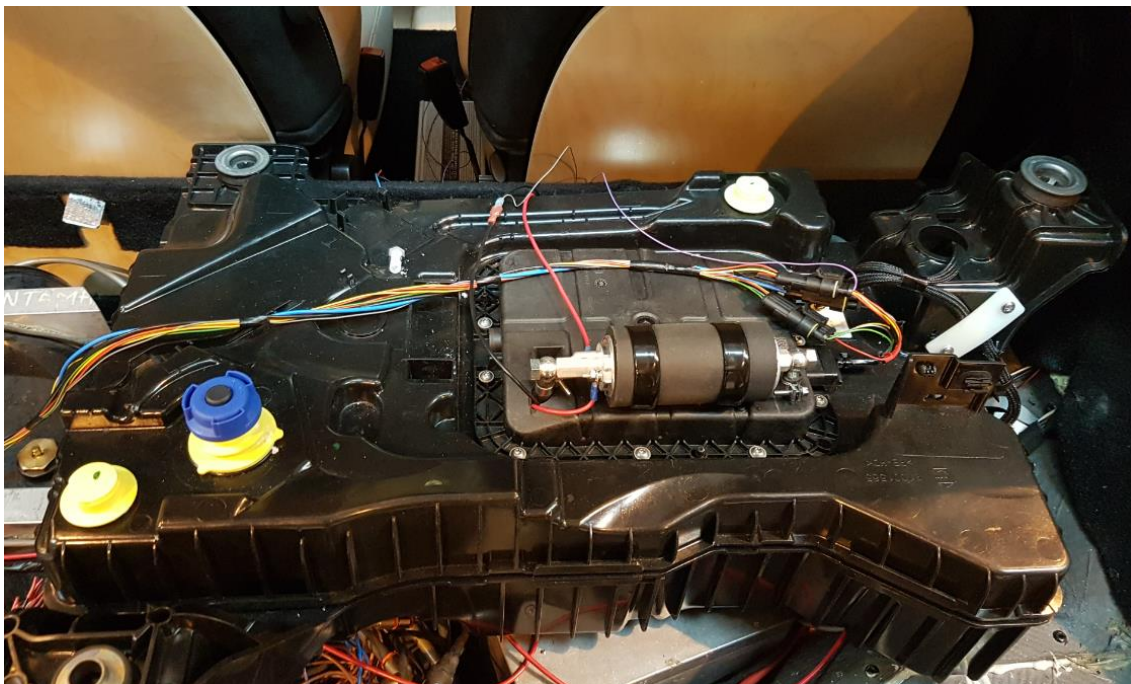
Citroënin AdBlue-säiliö sisältää pumppuyksikön sekä sen ohjausyksikön. Kyseinen ohjausyksikkö poistettiin, sillä koko järjestelmän toimintaa haluttiin säätömahdollisuuksien vuoksi ohjata toisella ohjausyksiköllä (kuva 29). Alkuperäisen pumpun kanssa koettiin testivaiheessa paineentuotto-ongelmia, joten se päätettiin korvata tehokkaammalla mallilla.

Pumppuyksikön mitta- ja toimilaitteet johdotettiin uudelleen uutta ohjausyksikköä varten. Kuvassa 27 näkyy muutostöiden jäljiltä oleva pumppuyksikkö ennen sen sijoittamista säiliöön. Vaihdettu pumppu jää kuvassa kotelon toiselle puolelle. Pumpun tuottama paine tuodaan letkulla solenoidin kautta paineakulle, joka näkyy kuvan alalaidassa. Paineakun jälkeen yksikössä on paineanturi sekä liitinpaikka AdBlue-siirtoletkulle. Säiliössä olevien taso- ja lämpötila-anturien johdot yhdistetään kuvan vasemmassa ylälaudassa näkyviin liittimiin.



Kuva 27. Modifioitu AdBlue-pumppuyksikkö.

Kuvassa 28 näkyy pumppuyksikkö asennettuna säiliöön. Kotelon ulkopuolelle jäänyt uusi AdBlue-pumppu näkyy myös kuvassa. Säiliökokonaisuus sijoitettiin auton tavaratilaan väliaikaisesti huolto- ja säätötöiden helpottamisen vuoksi. Laitteisto on suunniteltu sijoitettavaksi tavaratilan alle auton pohjaan.



Kuva 28. Modifioitu AdBlue-säiliö sekä pumppuyksikkö auton takakonttiin asennettuna.

### 6.2.3 Järjestelmän ohjaus

Järjestelmän toimilaitteita ohjataan Epec 3606 -ohjausyksiköllä, joka näkyy kuvassa 29. Sillä myös tarkkaillaan järjestelmässä olevia antureita. Ohjausyksikössä on niin digitaalisia kuin analogisia signaalien sisäänuloja sekä lähtöjä. Lisäksi siinä on useita PWM-signaalilähtöjä ja se voidaan yhdistää ajoneuvon CAN-väylään. [21.] Ominaisuus on ehdottoman tärkeä, jotta yksikkö voi kommunikoida ECU:n kanssa. ECU:lta saadaan tieto moottoriin imetystä ilmamassasta, polttoaineen ruiskutusmäärästä, pakoputkiston lämpötiloista, kierrosluvusta ja muista järjestelmän toimintaan oleellisista arvoista. Myös NO<sub>x</sub>-anturin oma ohjausyksikkö liitettiin CAN-väylään.



Kuva 29. Epec 3606 -ohjausyksikkö [21].

Ennen SCR-järjestelmän asennusta autoon sen mitta- ja toimilaitteita testattiin ohjausyksikön avulla. Testikokoonpano näkyy kuvassa 30. Kuvan etualalla on AdBluen ruisku-tussuutin.



Kuva 30. SCR-toimilaitteiden ja -antureiden testausta.

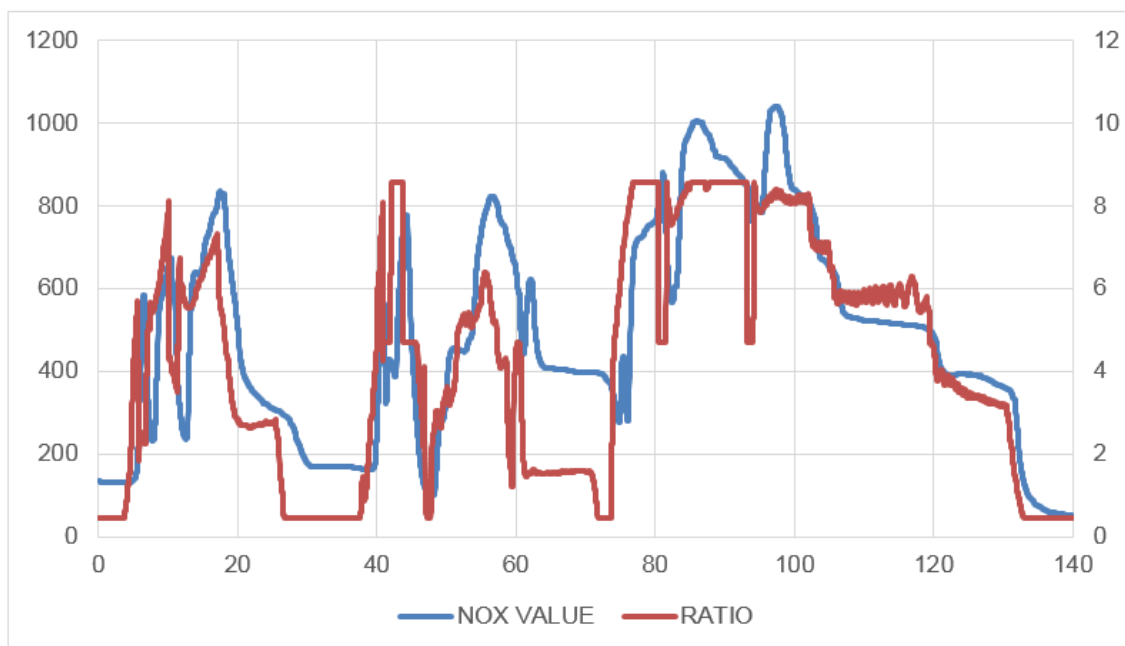
Testikokoonpanossa tutkittiin muun muassa pumpun paineentuottokykyä, kalibroitiin paine-, lämpötila- ja nestetasoanturit sekä selvitettiin AdBlue-ruiskutuslaitteen tuotto eri paineilla ja PWM-signaalin pulssisuhteilla. Kun komponenttien toiminta oli varmistettu ja testeillä tuotettu mittaus- sekä ohjaustieto tallennettu, asennettiin ne omille paikoilleen Bioforeen.

NO<sub>x</sub>-anturin toiminta varmistettiin asentamalla se VTT:n tiloissa olevaan testimootoriin, jonka pakokaasujen NO<sub>x</sub>-pitoisuutta mitattiin toimivaksi todistetulla anturilla. Anturien lukemia verrattiin keskenään ja ne havaittiin lähes identtisiksi. Anturin toiminnan varmistaminen oli erittäin tärkeää, sillä järjestelmän kalibrointi toteutettiin täysin sen ilmoittaman NO<sub>x</sub>-pitoisuuden avulla. Lisäksi anturia käytetään ohjauksen takaisinkytkennässä.

Järjestelmän ohjauslogiikan toteuttaminen aloitettiin ajamalla autoa dynamometrissä ja mittaamalla pakokaasujen sisältämää NO<sub>x</sub>-pitoisuutta eri kuormituksen ja kierrosluvun ajotilanteissa niin, ettei AdBlue-liuosta annosteltu järjestelmään. NO<sub>x</sub>-ohjausyksikön CAN-väylään ilmoittama NO<sub>x</sub>-pitoisuus sekä ECU:n ilmoittamat moottoritiedot tallennettiin Dewetronin valmistamalla mittalaitteella. Mitatut tiedot vietiin Excel-taulukkoon.

Mittaustiedosta pyrittiin selvittämään sopiva yhteys polttoaineen ruiskutusmäärän ja moottoriin imetyn ilmassan sekä pakokaasuista mitatun NO<sub>x</sub>-pitoisuuden välille eri ajotilanteissa, jotta moottorin NO<sub>x</sub>-tuotto voitaisiin arvioida ja siten ohjelmoida sopiva AdBluen ruiskutusmäärä. Etukäteen tiedettiin, että NO<sub>x</sub>-tuotto arvioidaan näiden moottori-parametrien avulla, mutta täysin tarkkaa arviointiperiaatetta ei tunnettu.

Kokeilemalla kuitenkin havaittiin, että eräs ilmassaan ja polttoaineruiskutusmäärään perustuva funktio korreloi pakokaasuista mitatun NO<sub>x</sub>-pitoisuuden kanssa melko hyvin. Tätä funktiota päädyttiin käyttämään AdBluen ruiskutusmäärän säädön pohjana. Lopulliseksi muotoutunut yhtälö (17) esitetään myöhemmin. Kuva 31 esittää funktiolla lasketua ruiskutusmäärää verrattuna anturilla mitattuun pakokaasujen NO<sub>x</sub>-pitoisuuteen. Punainen käyrä kuvaa laskettua arvoa ja sininen pakoputkesta mitattua NO<sub>x</sub>-pitoisuutta.



Kuva 31. ECU:n ilmoittamista arvoista laskettu AdBluen ruiskutusmäärän säätö sekä pakoputkesta mitattu NO<sub>x</sub>-pitoisuus samassa kuvaajassa.

Kuten kuvaajasta havaitaan, laskettu ruiskutusmäärä mukailee pakokaasuista mitattua NO<sub>x</sub>-pitoisuutta. Näin järjestelmään saadaan annosteltua pelkistysainetta typenoksidien muodostumisen mukaan jopa pelkän moottoritiedon perusteella.

Laskentayhtälöä varten on määritetty minimi- ja maksimiarvot ECU:n ilmoittamalle polttoaineen ruiskutusmäärälle sekä ilmassamittarin lukemalle. Rajatut arvot kerrotaan funktiossa painokertoimilla ja summataan yhteen. Saatuun arvoon lisätään vielä vakioarvo nimitykseltään "offset". Valitsemalla sopivat painokerroinlukuarvot, minimi- ja maksimiarvot sekä offset-luku, voidaan funktiolla määrittää suoraan AdBlue-ruiskutussuuttimelle viedyn PWM-signaalin pulssisuhde. Aiemmissa testeissä havaittiin, että pulssisuhde on lähes lineaarisesti verrannollinen todelliseen AdBluen ruiskutusmäärään.

NO<sub>x</sub>-anturin takaisinkytkentä päätettiin toteuttaa lisäämällä funktioon korjauskerroin, joka pienenee kun mitattu NO<sub>x</sub>-pitoisuus pienenee ja suurenee NO<sub>x</sub>-pitoisuuden kasvaessa. Kun pulssisuhteen määräävässä funktiossa huomioidaan vielä pakokaasun lämpötilasta johdettu korjauskerroin, saadaan se muotoon

$$PWMRatio = TempMul * (FuelMul * FUELMASS + EGFRMul * EGFR + Offset) * NoxMul, (17)$$

jossa PWMRatio on pulssisuhde, TempMul on lämpötilan korjauskerroin, FuelMul on polttoaineruiskutusmäärän painokerroin, FUELMASS on polttoaineruiskutusmäärä (mg/isku), EGFRMul on ilmassan painokerroin, EGFR on ilmassamittarin lukema (kg/h) ja NoxMul on NO<sub>x</sub>-anturin mittaamasta NO<sub>x</sub>-pitoisuudesta johdettu korjauskerroin. Muuttujille FUELMASS ja EGFR on ohjelmistossa asetettu säädettävät minimi- ja maksimiarvot, kuten aiemmin jo mainittiin.

Lämpötilan korjauskertoimen minimiarvo on 0 ja maksimiarvo 1. Jos pakoputkesta mitattu lämpötila on alhaisempi kuin ohjausyksikköön ohjelmoitu AdBluen alin ruiskutuslämpötila, on korjauskerroin arvoltaan 0 eikä AdBlue-liuosta ruiskuteta lainkaan, sillä pulssisuhde on yhtälön 17 mukaan myös 0. Kun alin ruiskutuslämpötila ylitetään, korjauskerroin muuttuu lämpötilan mukana lineaarisesti aina arvoon 1 asti. Lämpötila, jossa korjauskerroin saavuttaa arvon 1, on alimman lämpötilan tavoin säädettävissä ohjausyksikön ohjelmistossa. Näin AdBluen annostelua voidaan hallita myös pakokaasun lämpötilasta riippuen.

NO<sub>x</sub>-korjauskerroin saa arvon 1, kun pakokaasusta mitattu NO<sub>x</sub>-pitoisuus on halutun suuruinen. Jos mitattu NO<sub>x</sub>-pitoisuus kasvaa, korjauskerroin kasvaa sen mukana ja vastaavasti kerroin pienenee kun haluttu pitoisuus alitetaan. Tämän takaisinkytkentämekanismiin aggressiivisuus ja tavoitearvot voidaan myös säätää helposti ohjelmistossa. Ohjelmistossa on lisäksi huomioitu luvussa 5.3 selitetty takaisinkytkennän mahdollistama ammoniakkiuotokierre siten, että AdBlue-ruiskutuslaitteen pulssisuhdetta pienennetään jos mitattu NO<sub>x</sub>-pitoisuus kasvaa niin suureksi, ettei se normaaliolosuhteissa ole enää looginen.

Lisäksi ohjelmistossa on määritetty useita muita oleellisia järjestelmän säätöarvoja, kuten pulssisuhteen minimi- ja maksimiarvot, haluttu pumpun paineentuohto sekä NO<sub>x</sub>-anturin käynnistys- ja sammutusajankohdat. Ohjausyksikön ohjelmointi toteutettiin Codesys 2.3 -ohjelmointiympäristöllä. Kuva 32 esittää pientä osuutta kirjoitetusta SCR-järjestelmän ohjelmointikielestä.

```

IF ExhTemp2 < Temp1 THEN
    TempMul := 0;
ELSIF ExhTemp2 >= Temp1 AND ExhTemp2 <= Temp2 THEN
    TempMul := (ExhTemp2-Temp1) / (Temp2-Temp1);
ELSE
    TempMul := 1;
END_IF

IF (*ExhTemp2 > KäynnistysLampotila AND*) kaynnissa THEN
    DEWPOINT := TRUE;
ELSIF NOT kaynnissa THEN
    DEWPOINT := FALSE;
END_IF

NoxMul := (INT_TO_REAL(NOX_VALUE)-TargetNox)/(NoxLimit-TargetNox)+1.0;

IF NoxMul > 2.0 THEN
    NoxMul := 2.0;
ELSIF NoxMul < 0.0 THEN
    NoxMul := 0.0;
END_IF

PWM_RATIO := NoxMul * TempMul * ( FuelMul * FUELMASS_ + EGFRMul * EGFR_ + Offset);
PWM_RATIO := PWM_RATIO * 10.0;
NOX_RATIO := REAL_TO_WORD(PWM_RATIO);

IF PWM_RATIO > PWM_MAX_RATIO THEN
    PWM_RATIO := PWM_MAX_RATIO;
ELSIF PWM_RATIO < 0 THEN
    PWM_RATIO := 0;

```

Kuva 32. Ote SCR-järjestelmän ohjausyksikön ohjelmointikielestä.

#### 6.2.4 Säättöimenpiteet

Riittävän NO<sub>x</sub>-muuntosuhteen saavuttamiseksi ilman merkittävää ammoniakkiavuotoa on erittäin tärkeää annostella AdBlue-liuosta oikea määrä kussakin ajotilanteessa. Kun riittävät valmiudet järjestelmän ohjaukseen oli saavutettu, aloitettiin AdBluen annostelun säättöimenpiteet.

Aluksi AdBluen ruiskutusmäärää säättävää laskentamallia ohjaavat rajasuureet ja kertoimet arvioitiin suurinpiirtein sopiviksi ja ne syötettiin ohjausyksikköön. Tämän jälkeen autolla ajettiin dynamometrissä samalla tarkkaillen pakokaasujen NO<sub>x</sub>-pitoisuuden kehitystä. Kaikki mittaus- ja ohjaustieto tallennettiin, jotta sitä voitiin testin jälkeen arvioida. Dynamometritestejä suoritettiin useita kymmeniä ja niiden välissä tehtiin sopivaksi katsottuja muutoksia säätöarvoihin. Välillä säätötestejä tehtiin myös tieliikenteessä, jotta saatiin varmuus ohjauksen toiminnasta dynamometrin lisäksi oikeassa ajotilanteessa.

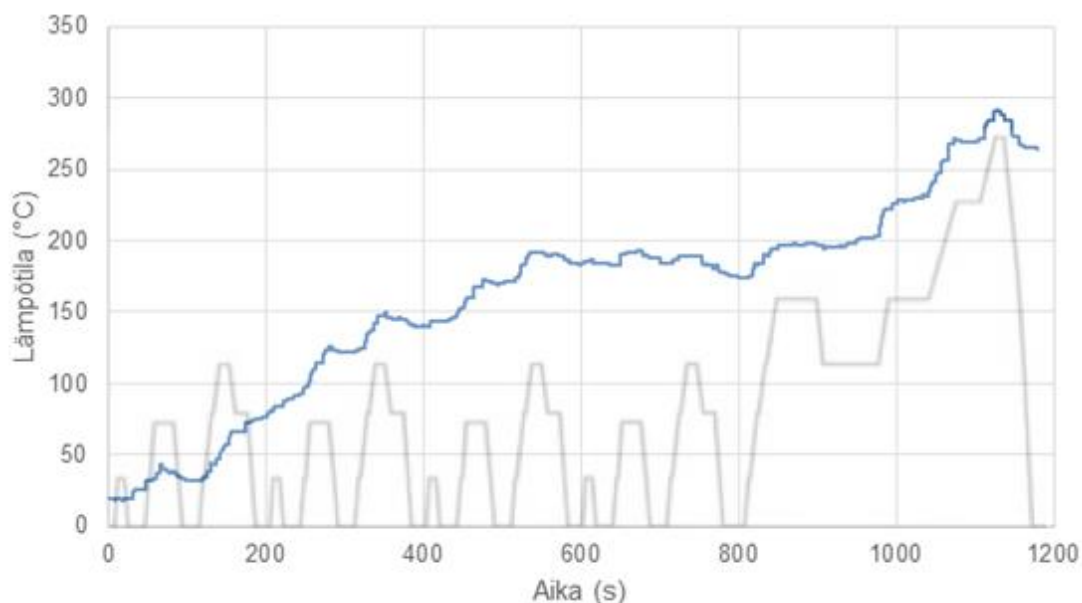
Kuvassa 33 näkyy tilanne, jossa dynamometrissä ajatun testin jälkeen tehdään SCR-järjestelmän säättöimenpiteitä. Ohjausyksikköä säädetään ajoneuvon CAN-väylään liitettyllä tietokoneella. Kuvassa auton tuulilasiin on kiinnitetty Dewetron-mittalaitteen näyttöpaneeli. Laitteella tallennettiin jokaisesta testistä SCR-järjestelmän toiminnan kannalta oleelliset mittatiedot.



Kuva 33. SCR-järjestelmän ohjaukselle tehdään säätötoimenpiteitä dynamometrissä ajetun testin perusteella.

Kun AdBluen ruiskutusmäärän säädön perusohjaukseen oltiin tyytyväisiä, auto siirrettiin toiselle dynamometrille, jolla pystyttiin ajamaan NEDC-päästömittauksessa käytettävää ajosykliä. Tällä pyrittiin imitoimaan autolle suoritettavaa virallista päästömittaustoimenpidettä. Seuraavissa testeissä tutkittiin etenkin pakokaasujen lämpötilan kehittymistä ajosyklin aikana kylmäkäynnistyksen jälkeen. Ongelmaksi osoittautuikin pelkistysreaktioille riittävän lämpötilan saavuttaminen lyhyessä ajassa. Tilannetta pyrittiin parantamaan muun muassa päällystämällä pakoputkistoa lämpöeristeellä. Myös moottorinohjaukseen puututtiin lähinnä polttoaineen ruiskutusennakkoja myöhäistämällä. Myöhäisempi polttoaineen ruiskutushetki nostaa pakokaasun lämpötilaa sekä vähentää itsessään NO<sub>x</sub>-päästöjä. Kuvassa 34 on esitetty pakoputkesta mitattu lämpötilan kehitys erään NEDC-ajosyklin aikana.

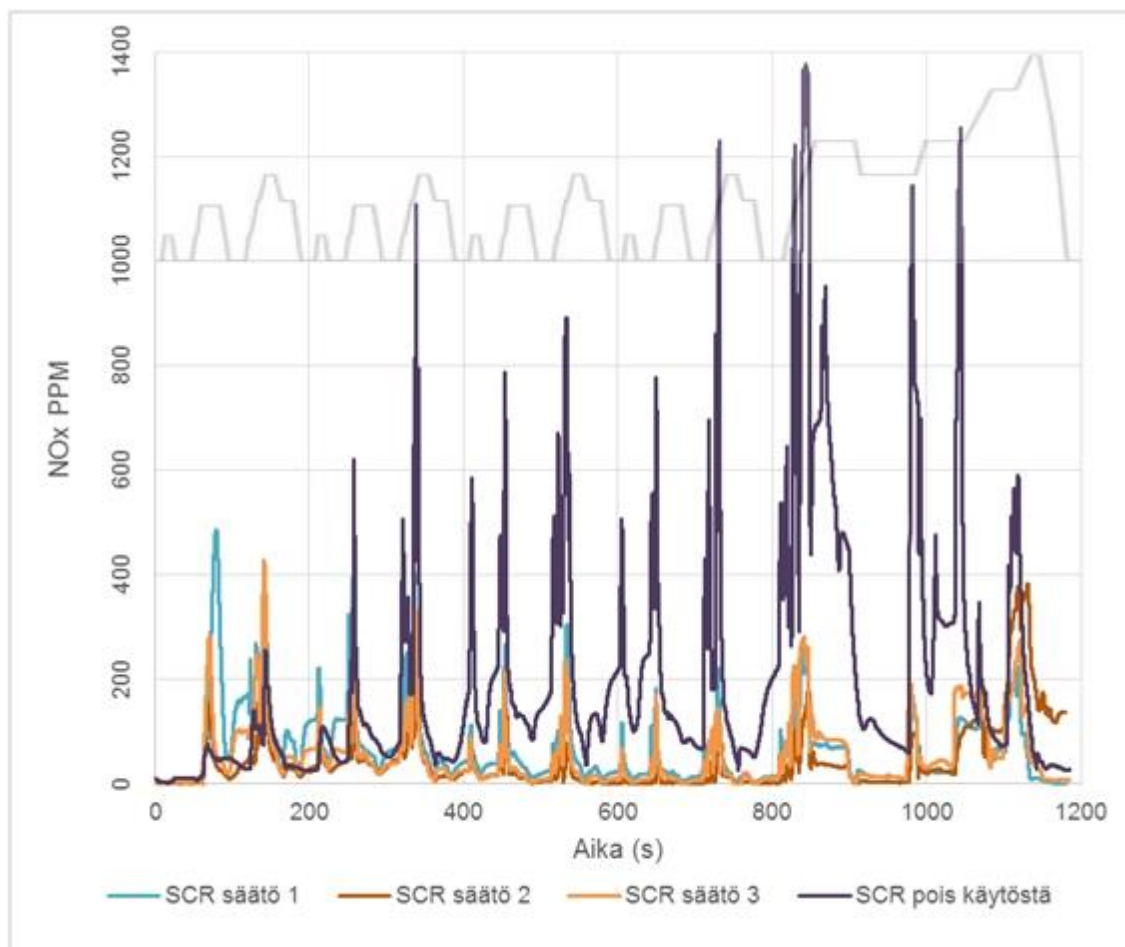




Kuva 34. Erään Bioforella ajetun NEDC-syklin aikana tallennettu pakoputken lämpötilä. Syklin ajonopeutta on hahmotettu kuvaajassa harmaalla värillä.

Viimeisissä testeissä SCR-järjestelmälle ja moottorinohjaukselle tehtiin lähinnä vain pieniä hienosäätöjä ja tutkittiin niiden vaikutusta mitattuun  $\text{NO}_x$ -pitoisuuteen. Hienosäädöillä pyrittiin saamaan AdBluen annostelu toimimaan mahdollisimman hyvin ilman aggressiivista takaisinkytkentää. Lopputuloksena tuotetussa SCR-järjestelmän ohjauksessa takaisinkytkennällä on vain hyvin pieni vaikutus AdBluen ruiskutusmäärän säätöön.

Kuvassa 35 on vertailtu mitattua pakokaasujen  $\text{NO}_x$ -pitoisuutta pienillä SCR-ohjauksen säätömuutoksilla. Mittaukset on suoritettu ajamalla dynamometrissä NEDC-ajosykliä samoilla dynamometrin asetusarvoilla. Jokainen ajotapahtuma on aloitettu kylmäkäynnistystilanteesta. Vertailun vuoksi mukana on myös mitattu  $\text{NO}_x$ -pitoisuus ilman SCR-järjestelmän käyttöä. Kuvaajasta voidaan helposti todeta, että SCR-järjestelmä on tehokas typenoksidipäästöjen vähentämiskeino.



Kuva 35. Vertailua mitatusta pakokaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuudesta eri SCR-säädöillä. Mittaukset on suoritettu kylmäkäynnistyksen jälkeen ajamalla NEDC-sykli, jonka ajonopeutta on hahmotettu kuvaajassa harmaalla värillä. Alun (0–100 s) matala NO<sub>x</sub>-pitoisuus johtuu siitä, että NO<sub>x</sub>-anturi on vielä lämpenemässä toimintalämpötilaansa, jolloin sen ilmoittama lukema on virheellinen.

Lisäksi SCR-katalysaattorin ammoniakkin varastointikykyä tutkittiin. Pakokaasuun annosteltiin riittävässä lämpötilassa paljon AdBlue-liuosta, josta muodostuneen ammoniakkin katalysaattori varastoi. Tämän jälkeen AdBluen ruiskutus lopetettiin ja mitattiin, kuinka kauan katalysaattorin jälkeisestä pakokaasuvirrasta mitattu NO<sub>x</sub>-pitoisuus pysyy alhaisena. Kerätyn tiedon avulla pyrittiin optimoimaan AdBluen ruiskutuksen aloitus- ja lopetushetket. Aikaansaaduilla muutoksilla pystyttiin vähentämään järjestelmän AdBluen kulutusta. Esimerkiksi moottorijarrutuksen aikana pelkistysainetta ei kulu lainkaan.

Kokeilemalla havaittiin myös, että ammoniakki säilyy varastoituna katalysaattorissa vaikka moottori sammutetaan ja auton annetaan seistä useita tunteja. Näin ollen AdBlue-liuosta ei ole välttämätöntä annostella ennen kuin pelkistysreaktioille riittävä lämpötila on

uudelleenkäynnistyksen yhteydessä saavutettu. Matalammassa lämpötilassa ruiskutetun AdBluen tarkoituksena olisi juurikin täyttää katalysaattorin ammoniakkivarasto. Kun AdBlue ruiskutetaan vasta korkeassa lämpötilassa, saadaan kiinteiden saostumien muodostumisen riskiä pienennettyä kuten luvussa 4.1.2 kerrotaan.

## 7 Tulokset

### 7.1 Rullaustesti

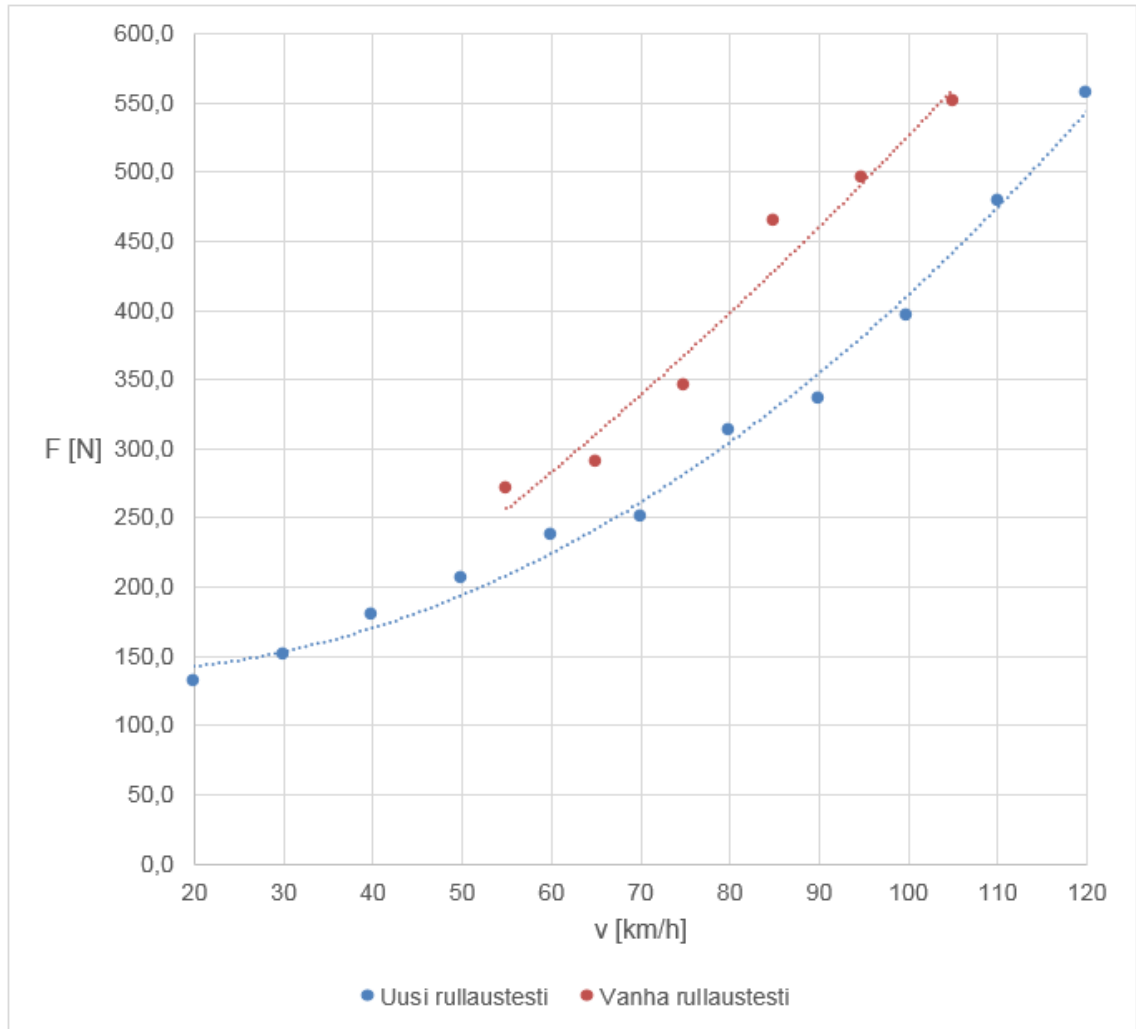
Bioforelle tehtyjen ajovastusoptimointien jälkeen sillä ajettiin rullaustesti. Testissä auto kiihdytettiin tasaisella tieosuudella nopeuteen 130 km/h, josta sen annettiin rullata vaihde vapaalla lähes pysähdyksiin asti. Ajosuorite toistettiin kuusi kertaa, kolme kumpaankin ajosuuntaan. Testissä mitataan ajoneuvon nopeus ajan funktiona. Nopeustieto tallennettiin Racelogic PerformanceBox -GPS-paikantimella.

Jokaisesta rullauksesta taulukoitiin ajoneuvon hidastumiseen kulunut aika  $\Delta t$  10 km/h nopeusmuutosvälein. Tarkastelu aloitettiin 125 km/h nopeudesta, jolloin auton nopeus oli ehtinyt jo hieman laskea ja se oli siten varmasti vapaassa hidastumisliikkeessä. Hidastumisajoista laskettiin kaikkien kuuden rullauksen keskiarvot. Kun ajoneuvon massa tunnetaan, voidaan Newtonin toisen lain mukaan laskea kullakin nopeusvälillä autoon kohdistunut keskimääräinen ajovastusvoima. Tulokset on esitelty taulukossa 2 auton massalla 1130 kg.

Taulukko 2. Rullaustestistä lasketut keskimääräiset ajovastusvoimat eri nopeuksille.

nopeusväli [km/h]	keskinopeus v [km/h]	$\Delta v$ [km/h]	$\Delta t$ rullausten keskiarvo [s]	$F =  m \cdot (\Delta v / \Delta t) $ [N]
125...115	120	10	5,6	557,2
115...105	110	10	6,6	478,0
105...95	100	10	7,9	396,5
95...85	90	10	9,4	335,7
85...75	80	10	10,0	312,6
75...65	70	10	12,5	250,8
65...55	60	10	13,2	237,8
55...45	50	10	15,2	206,1
45...35	40	10	17,4	180,2
35...25	30	10	20,7	151,8
25...15	20	10	23,9	131,3

Kun tulokset esitetään  $(v, F)$ -koordinaatistossa, jossa mittapisteille on sovitettu toisen asteen polynomi, saadaan kuvan 36 mukainen kuvaaja. Kuvaaja kertoo auton ajovastuksista muodostuvan voiman nopeuden suhteen.



Kuva 36. Rullaustestillä mitatut ajovastusvoimat nopeuden suhteen. Kuvaaja sisältää tulokset vuodelta 2015 sekä vuodelta 2016 autolle tehtyjen ajovastusoptimointien jälkeen.

Kuvaajassa esitetään vertailun vuoksi myös ennen muutostöitä tehdyn rullaustestin mitaustulos, joka on peräisin vuodelta 2015. Aiemmassa testissä autolla rullattiin pienempi nopeusväli, joten sen mittapisteet asettuvat pienemmälle alueelle. Kuvaajasta havaitaan, että muutostöillä on saavutettu pienemmät vastusvoimat koko vertailtavalla nopeusalueella. Esimerkiksi 100 km/h nopeudella vanhan rullaustestin mukainen vastusvoima on noin 526 N ja uuden testin noin 411 N. Kyseisellä nopeudella saavutettiin siis 115 N eli noin 22 % pienemmät ajovastusvoimat ajoneuvolle tehtyjen optimointien avulla.

## 7.2 Päästömittaus

SCR-järjestelmän testaus- ja säätöprosessin jälkeen Bioforesta mitattiin säännellyt pakokaasupäästöt EU-tyyppihyväksymismenettelyn mukaista rekisteröintiä varten. Kulutus- ja päästömittaus suoritettiin VTT:n toimesta. VTT:lle ilmoitettiin rullaustestin tulokset, joiden avulla määritettiin mittauksessa käytetyt dynamometrin asetusarvot. VTT:n toimittama mittausraportti löytyy liitteestä 1.

Suoritetulla mittauksella saavutettiin tavoitteena ollut Euro 5b -raja-arvot alittava tulos. Typenoksidipäästöjen raja-arvo on suuruudeltaan 0,180 g/km ja autosta mitattiin 0,105 g/km.

Autolle oli tehty ennen SCR-järjestelmän asennusta vastaava mittaus vuonna 2015. Tähän mittaukseen verrattuna NO<sub>x</sub>-päästöjä saatiin vähennettyä noin 81 %. Sekä uuden että vanhan mittauksen tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Vertailu Bioforen kulutus- ja päästömittauksen kokonaistuloksista vuosilta 2015 ja 2017.

Ainesosa	Yksikkö	2015	2017	Muutos	Muutos-%
Typen oksidit (NO <sub>x</sub> )	g/km	0,548	0,105	-0,443	-80,8 %
Hiilimonoksidi (CO)	g/km	0,04	0,045	0,005	13,4 %
Kokonaishiilivedyt (THC)	g/km	0,023	0,020	-0,003	-13,0 %
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	g/km	140,3	137,0	-3,300	-2,4 %
Hiukkasmassa (PM)	g/km	n/a	0,00009	n/a	n/a
Hiukkaslukumäärä (PN)	kpl/km	n/a	0,496*10 <sup>11</sup>	n/a	n/a

Typenoksidipäästöjen lisäksi myös HC- ja CO<sub>2</sub>-päästöjä saatiin pienennettyä joitain prosentteja. Vastaavasti kuitenkin auton CO-päästöt kasvoivat hieman. Tuloksista voidaan todeta, että SCR-järjestelmä on erittäin tehokas tapa vähentää dieselauton tuottamia NO<sub>x</sub>-päästöjä.

Mittaustuloksista havaitaan myös, että järjestelmässä olevalla kahdella hiukkassuodattimella saadaan pakokaasusta poistettua lähes kaikki moottorin tuottamat hiukkaspäästöt. PM-päästöraja-arvo on 0,005 g/km, joten mitatulla 0,00009 g/km tuloksella saavutettiin 98,2 % raja-arvoa pienemmät hiukkaspäästöt.

## 8 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoite oli saada ajoneuvo alittamaan direktiivin mukaiset päästöraja-arvot lisäämällä autoon selektiivinen pelkistyskatalysaattorijärjestelmä. Tavoitteeseen päästiin onnistuneesti. Opinnäytetyön tuloksena Biofore-konseptiautossa on täysin säädettävissä oleva nykyaikainen dieselauton päästöjenhallintajärjestelmä. Lisäksi sen tie- liikenteeseen rekisteröinti on nyt mahdollista.

Työssä tutustuttiin yleisesti dieselmoottorin pakokaasupäästöjen muodostumiseen sekä hallintaan, mutta erityisesti keskityttiin typenoksidipäästöihin ja niiden selektiiviseen katalyyttiseen pelkistämiseen. Lisäksi käytiin läpi SCR-järjestelmän toiminta ajoneuvokäytössä. Työ konkretisoitui Biofore-konseptiautoon tehtyihin muutostöihin, joilla ajovastuksia sekä typenoksidipäästöjä saatiin pienennettyä.

Opinnäytetyö aloitettiin kesällä 2016 ajovastusten optimoinnilla. Ajovastuksissa kiinnitettiin huomiota auton aerodynamiikkaan sekä renkaiden vierintävastukseen. Auton pohjaan asennettiin koko pohjan kokoinen polypropeenista valmistettu levy. Tällä vähennettiin auton epätasaisesta pohjasta johtuvaa ilman pyörteilyä sekä loisvastusta. Myös van-teisiin asennettiin vastaavat levyt vähentämään ilman pyörteilyä auton kyljissä. Bioforen ajovastukset oli mitattu ennen muutoksia rullaustestillä. Testi suoritettiin myös muutosten jälkeen ja koko vertailtavissa olevalla nopeusalueella havaittiin pienentyneet ajovastusvoimat. Esimerkiksi nopeudella 100 km/h vastusvoimat pienenevät noin 115 N.

Tämän jälkeen autoon alettiin kehittää SCR-järjestelmää. Sen toteutuksessa päätettiin käyttää lähinnä PSA-konsernin tuottamia Citroën C4 -auton osia. Bioforen omia ja uusia komponentteja yhdistämällä autoon rakennettiin itsenäisesti toimiva ja säädettävissä oleva SCR-järjestelmä. Järjestelmän ohjaus toteutettiin erillisellä, ohjelmoitavissa olevalla ohjausyksiköllä. Sen toimintaa säädettiin dynamometrissä sekä liikenteessä useiden viikkojen ajan, jonka jälkeen keväällä 2017 suoritettiin virallinen päästömittaus VTT:n toimesta. Järjestelmä toimi odotusten mukaisesti. Aiemmin suoritettuun mittaukseen verrattuna ajoneuvon typenoksidipäästöt pienenevät noin 81 %.

Päästömittauksessa käytettävä NEDC-ajosykli alkaa ajoneuvon kylmäkäynnistystilanteesta ja syklin aikana auton annetaan käydä joutokäyntiä pitkiä aikoja. Järjestelmän mahdollisimman tehokkaan toiminnan kannalta haasteellisinta on saada SCR-kataly-

saattori toimintalämpötilaansa nopeasti. Näin ollen tulosta voitaisiin parantaa entisestään siirtämällä SCR-katalysaattori lähemmäksi pakosarjaa tai lisäämällä siihen erillinen sähkölämmitys.

Järjestelmään voitaisiin myös lisätä ammoniakkin vuotokatalysaattori, jolloin pelkistysainetta voitaisiin annostella runsaammin ilman ammoniakkivuotoa. Tämä kohottaisi SCR-katalysaattorin  $\text{NH}_3\text{-NO}_x$ -suhdetta ja siten tehostaisi järjestelmän  $\text{NO}_x$ -muuntosuhdetta. Vuotokatalysaattorin lisäämiselle ei kuitenkaan nähty tarvetta, sillä järjestelmän säätövaiheessa  $\text{NO}_x$ -muuntosuhde saatiin pidettyä riittävän hyvänä ilman havaittavaa ammoniakkivuotoa.

## Lähteet

- 1 Majewski, Addy W. & Khair, Magdi K. 2006. Diesel Emissions and Their Control. Warrendale, PA. SAE International.
- 2 Liikenteen päästöt. Verkkodokumentti. Autoalan tiedotuskeskus. <[http://autoalantiedotuskeskus.fi/ymparisto/liikenteen\\_paastot](http://autoalantiedotuskeskus.fi/ymparisto/liikenteen_paastot)>. Luettu 27.4.2017.
- 3 Mollenhauer, Klaus & Tschoeke, Helmut. 2010. Handbook of Diesel Engines. Berlin. Springer.
- 4 Tieliikenne, Typen oksidit NOX. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<http://lipasto.vtt.fi/liisa/noxs.htm>>. Luettu 27.4.2017.
- 5 Self-study Programme 424, Exhaust Gas Aftertreatment System Selective Catalytic Reduction Design and Function. 2009. Huoltokoulutuksen itseopiskelumateriaali. Wolfsburg. Volkswagen.
- 6 Parviainen, Heikki. 2011. Moottoritekniikka, järjestelmät, Päästöjen synty otto- ja dieselmoottorissa. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 7 Bosch, Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät. 2. painos. 2007. Plochingen. Robert Bosch GmbH.
- 8 Tieliikenne, Hiukkaset PM. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<http://lipasto.vtt.fi/liisa/pms.htm>>. Luettu 27.4.2017.
- 9 Tieliikenne, Hiilivedyt. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<http://lipasto.vtt.fi/liisa/hcs.htm>>. Luettu 27.4.2017.
- 10 Tieliikenne, Hiilimonoksidi CO. Verkkodokumentti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<http://lipasto.vtt.fi/liisa/cos.htm>>. Luettu 27.4.2017.
- 11 Emission Standards, EU: Cars and Light Trucks. 2016. Verkkodokumentti. Dieselnet <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>>. Luettu 27.4.2017.
- 12 Kühlwein, Jörg. 2016. The Impact of Official versus Real-World Road Loads on CO2 Emissions and Fuel Consumption of European Passenger Cars. International Council on Clean Transportation. <[http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_Coastdowns-EU\\_201605.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Coastdowns-EU_201605.pdf)>. Luettu 27.4.2017.
- 13 Hoffren, Jaakko & Saarela, Olli. 2008. Lentokonetekniikan perusteet. Helsinki. Opetushallitus.
- 14 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1222/2009. <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32009R1222>>.



- 15 Norrby, Peter. 2012. Prediction of Coast-Down Test Results, a Statistical Study of Environmental Influences. Master of Science Thesis. <<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/160184.pdf>>. Luettu 27.4.2017.
- 16 Rengastietoa, Polttoainetaloudellisuus. Verkkodokumentti. Nokian Renkaat. <<https://www.nokianrenkaat.fi/innovatiivisuus/rengastietoa/eu-uudet-rengasmerkinnat/rengasmerkinnan-kolme-luokittelukriteeria/polttoainetaloudellisuus/>>. Luettu 27.4.2017.
- 17 Self-study Programme 540, SCR Exhaust Gas Treatment in the Passat 2015. 2015. Huoltokoulutuksen itseopiskelumateriaali. Wolfsburg. Volkswagen.
- 18 La Reduction Catalytique Selective Formation Technique Apres-vente. 2013. Huoltokoulutuksen itseopiskelumateriaali. PSA Peugeot Citroën.
- 19 Harder, Hans-Dieter. Bryccer, Marc. Brück, Rolf. Verkkodokumentti. Continental Emitec GmbH. <[http://www.emitec.com/fileadmin/user\\_upload/Bibliothek/Vortraege/20110127\\_SCR\\_EU\\_6\\_Stuttgart\\_Harder\\_et.pdf](http://www.emitec.com/fileadmin/user_upload/Bibliothek/Vortraege/20110127_SCR_EU_6_Stuttgart_Harder_et.pdf)>. Luettu 27.4.2017.
- 20 Miao, Yong & Smith, Stuart R. Urea Mixing Design. Verkkodokumentti. General Motors Company, Integrations and Emissions. <[https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/deer12\\_miao.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/deer12_miao.pdf)>. Luettu 27.4.2017.
- 21 Epec 3606 Control Unit. Verkkodokumentti. Epec Oy. <<http://epec-fi-bin.aldone.fi/@Bin/5c5408ded37e62a861875b6a781453a6/1493883006/application/pdf/51523/Epec%203606%20Control%20Unit.pdf>>. Luettu 27.4.2017.

## Mittausraportti



ASIAKASRAPORTTI

VTT-CR-02012-17 | 22.4.2017

# Mittausraportti

## Biofore-auton säänneltyt pakokaasupäästöt

Kirjoittajat: Jan Rautalin

Luottamuksellisuus: Luottamuksellinen





<b>Raportin nimi</b> Mittausraportti, Biofore-auton säännellyt pakokaasupäästöt	
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b> Metropolia AMK Harri Santamala	<b>Asiakkaan viite</b>
<b>Projektin nimi</b> Biofore-auton pakokaasupäästöjen mittaaminen	<b>Projektin numero/lyhytnimi</b> 115198, LD-BioForeExh-3
<b>Tiivistelmä</b> Tilaaajan (Metropolia AMK) toimeksiannosta mitattiin Biofore-auton säännellyt pakokaasupäästöt EU-tyyppihyvaksymismenettelyn mukaisesti ajoneuvon rekisteröintiä varten.  Mittauksilla tuli osoittaa, että tutkittava ajoneuvo täyttää säänneltyjen pakokaasupäästöjen osalta tieliikennekäyttöön rekisteröitävän M <sub>1</sub> -luokan ajoneuvolle säädetyt vaatimukset siten, kun ne on asetettu ns. Euro 5-säädöksissä, jotka on yksilöity Euroopan parlamentin ja Neuvoston asetuksella (EY) N:O 715/2007.  Mittauksissa käytetyt laitteet ja menetelmät sekä mittauksen suoritustapa perustui VTT:n menetelmäkuvaukseen (MK01ec4v9) ja sitä vastaavaan mittausohjeeseen (M01.01.v10), joiden perusteella FINAS on myöntänyt VTT:lle henkilöautojen pakokaasupäästöjen em. säädöksen mukaisille mittauksille, jotka on kuvattu säädöksen E-sääntö n:o 83, Revisio 3, lisäys 2 (Supplement 7 to the 05 series of amendments – Date of entry into force: 26 February 2009) lisäyksessä Annex 4.  Suoritetun mittauksen tulokset olivat riittävät alittamaan Euro 5b-raja-arvot.	
Espossa 22.4.2017	
<b>Laatija</b>  Jan Rautalin Tutkija	<b>Tarkastaja</b>  Juhani Laurikko Johtava tutkija
	<b>Hyväksyjä</b>  Jukka Lehtomäki Tutkimustiimin päällikkö
<b>VTT:n yhteystiedot</b> Jan Rautalin, <a href="mailto:jan.rautalin@vtt.fi">jan.rautalin@vtt.fi</a> , Puh. 040-5784597	
<b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b> VTT 2 kpl, Metropolia AMK 1 kpl	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	



## 1. Toimeksiannon kuvaus

Tilaajan (Metropolia AMK) toimeksiannosta mitattiin Biofore-auton säännellyt pakokaasupäästöt EU-tyyppihyväksymismenettelyn mukaisesti ajoneuvon rekisteröintiä varten.

## 2. Tutkimuksen kohteet ja menetelmät

### 2.1 Tutkimuksen kohde

Toimeksiantoa varten tilaaja toimitti mitattavan ajoneuvon sekä dynametrimittausten ajovastusten laskentaa varten tarpeelliset (coast-down) rullauskokeiden tulokset, jotka tilaaja ilmoittaa mitanneensa 11.8.2016.

Mitattu ajoneuvo on yksilöity taulukossa 1.

*Taulukko 1: Mitatun ajoneuvon yksilöinti*

Merkki/malli	"Biofore"
Moottorityyppi	puristussytytys (CI)
Omamassa* (kg)	1130
Valmistenumero	YKBM11410E21L0003
Rengaskoko	165/65R15

\* tankattuna ilman kuljettajaa, tilaajan ilmoittama

### 2.2 Mittauksessa käytetyt menetelmät ja laitteet

#### Mittauksen tarkoitus ja menetelmät

Mittauksilla tuli osoittaa, että tutkittava ajoneuvo täyttää säänneltyjen pakokaasupäästöjen osalta tieliikennekäyttöön rekisteröitävän M<sub>1</sub>-luokan ajoneuvolle säädetyt vaatimukset siten, kun ne on asetettu ns. Euro 5-säädöksissä, jotka on yksilöity Euroopan parlamentin ja Neuvoston asetuksella (EY) N:o 715/2007.

Tutkimusmenetelmä ja mittausten suoritustapa perustui VTT:n menetelmäkuvaukseen (MKD1ec4v9) ja sitä vastaavaan mittausohjeeseen (M01.01.v10), joiden perusteella FINAS on myöntänyt VTT:lle henkilöautojen pakokaasupäästöjen em. säädöksen mukaisille mittauksille, jotka on kuvattu säädöksen E-sääntö n:o 83, Revisio 3, lisäys 2 (Supplement 7 to the 05 series of amendments – Date of entry into force: 26 February 2009) lisäyksessä Annex 4.

Tästä on todisteena FINASin pätevyysalueen voimassa oleva kuvaus (Akkreditoitu testauslaboratorio, tunnus T259, /1/).

#### Mittauksessa käytetyt laitteet

Mittaukseen liittyvä ajokoe suoritettiin VTT:n alustadynamometrillä (valm. Froude&Consine, UK)

Ajo-ohjelmalla käytettiin NEDC-ajosykliä, joka on Euro 5-säädöksen mukainen ajo-ohjelma.



Näytteen laimennus, näytteenotto ja pakokaasun massavirtamääritys suoritettiin AVL CVS i60 –laitteistolla (laimennustunneli + CFV-tyyppinen CVS).

Pakokaasun kaasumaisten ainesosasten määrittäminen näytteestä suoritettiin AVL AMA i60 –analysointilaitteistolla.

Pakokaasun hiukkasmassan määrittäminen tehtiin keräämällä näyte AVL PSS i60 –laitteistolla, sekä punnitukset Sartorius SE2-F –tarkkuusvaa’alla, joka sijaitsi erityisesti tähän tarkoitukseen tarkoitettussa vaakahuoneessa, jonka ilman lämpötilan ja –kosteuden säätö sekä niiden jatkuva valvonta vastaa tyypihyväksymismittauksien mukaisia vaatimuksia.

Pakokaasun hiukkaslukumäärä mitattiin Airmodus A23-laitteistolla, joka on toimintaperiaatteiltaan ns. *Butanol Condensation Particle Counter* (bCPC).

Edellä luettellut laitteet muodostavat kokonaisuuden, joka täyttää tyypihyväksymismittauksen asettamat vaatimukset, mikä on todettu em. akkreditoinnin myöntämisen yhteydessä.

## 2.3 Mittauksen suorittaminen

### Mittaustapahtuman tiedot

Mittaukset suoritettiin 30.3.2017 Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ajoneuvolaboratoriossa, os. Biologinkuja 5, 02150 ESPOO.

Ajoneuvon esivalmistelu ennen mittausta suoritettiin menetelmäkuvauksen mukaisesti.

Mittauksen suoritti VTT:n henkilökunta, joka on pätevä suorittamaan tämän tyyppisiä mittauksia.

### Mittauksessa käytetyt dynamometrin asetusarvot

Autolle käytettiin tilaajan ilmoittaman omamassan mukaista hitausmassan arvoa (inertia).

Dynamometrin asetusarvot ja niistä syntyvät vastusarvot valittiin perustuen tilaajan ilmoittamiin maantiellä tehtyihin rullauskokeisiin, sekä tämän mittauksen aluksi dynamometrillä tehtyihin ns. nollavastusmittauksiin, joilla kompensoidaan niiden fyysisten vastusten osuus, jotka toistuvat mittaustilanteessa, ja joita ei tarvitse simuloida.

Dynamometrin asetusarvot, joita käytettiin mittausten yhteydessä on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Dynamometrin asetusarvot

Inertia (kg)	1130
F0	69
F1	-0.962
F2	0.00342

\*omamassa tankattuna (1130 kg) + kuljettaja (75 kg)

### Mittauksissa käytetty polttoaine

Mittauksissa käytetty polttoaine oli dieselpolttoainetta CAF-G14/325, jonka oli valmistanut Coryton. Polttoaineen analyysitodistus liitteenä 1, ja sen mukaan se täyttää referenssipolttoaineen CEC RF-06-03 mukaiset vaatimukset.



### 3. Tulokset

---

Mittauksen (tunniste 17089ED) tulokset on esitetty taulukossa 3.

Samassa taulukossa on myös esitetty Euro 5-tason mukaiset raja-arvot, sekä niistä johdetut viitearvot, jotka ECE-R-85-säännön mukaan (kohta 5.3.1.4.) mittaustuloksen tulee alittaa, jotta yhden mittauksen tulos on riittävä näyttö. Sen mukaan viitearvot ovat 70% asetetuista raja-arvoista.

*Taulukko 3: Mittauksen tulokset.*

Ainesosa	Tulos [yksikkö]	Euro 5a-raja-arvo [yksikkö]	Viitearvo <sup>1</sup> [yksikkö]	PASS/FAIL
Hiilimonoksidi (CO)	45 [mg/km]	500	350 [mg/km]	PASS
Kokonaishiilivedyt (THC)	20 [mg/km]	n/a	n/a	n/a
Typen oksidit (NOx)	105 [mg/km]	180	126 [mg/km]	PASS
THC+NOx	125 [mg/km]	230	161 [mg/km]	PASS
Hiukkasmassa (PM)	0,09 [mg/km]	5	4 [mg/km]	PASS
Hiukkaslukumäärä <sup>2</sup>	0.496*10 <sup>11</sup> [kpl/km]	n/a	n/a	n/a
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> ) <sup>3</sup>	137 [g/km]	n/a	n/a	n/a

<sup>1</sup> puristussytyssmoottoriselle (CI) autolle

<sup>2</sup> kuulu Euro 5c -vaatimukseen

<sup>3</sup> ei kuulu Euro 5-vaatimukseen

Kuten Tauloksta 3. Ilmenee, suoritettujen mittauksen tulokset olivat riittävät alittamaan Euro 5a-mukaiset raja-arvot.

### Liitteet /viitteet

---

#### Viitteet

/1/ FINAS Akkreditointi, Testilaboration tunnus T259  
[https://www.finas.fi/Documents/T259\\_M09\\_2016.pdf](https://www.finas.fi/Documents/T259_M09_2016.pdf)

#### Liitteet

Liite 1, Polttoaineen analyysitodistus



### Certificate of Analysis

Fuel Blend No: CAF-G14/325      Contact: -  
 Fuel Type: CEC RF-06-03      Order No: -  
 Customer: -      Date: 01/07/2014

Test	Method	Unit	Limit		Result
			Min	Max	
Appearance	Visual		Report		C&B
Cetane Number	EN ISO 5165		52.0	54.0	52.8
Cetane Index	EN ISO 4264		Report		51.1
Density @ 15°C	EN ISO 12185	kg/L	0.8330	0.8370	0.8335
CFPP	EN 118	°C	-	-5	-30
Carbon Residue (10% Dis. Res)	EN ISO 10370	% m/m	-	0.20	<0.01
Flash Point	EN ISO 2719	°C	55.0	-	56.5
Lubricity, corrected wear scar diameter (wsd 1.4) @ 60°C	EN ISO 12156-1	µm	-	400	355
Strong Acid Number	ASTM D974	mgKOH/g	-	0.02	0.00
Sulfur	ASTM D5453	mg/kg	-	10.0	8.3
Strong Acid Number	ISO 6618	mgKOH/g	-	0.10	0.00
Viscosity at 40°C	EN ISO 3104	mm <sup>2</sup> /s	2.300	3.300	2.469
Water Content	EN ISO 12937	mg/kg	-	0	0
FAME Content	EN 14078	% v/v	Report		<0.1
Polycyclic Aromatics Content	IP 391 mod	% m/m	3.0	6.0	3.3
Total Aromatics	IP 391 mod	% m/m	Report		26.6
Oxidation Stability (16h)	EN ISO 12205	mg/100mL	-	2.5	0.2
Ash Content	EN ISO 6245	% m/m	-	0.010	<0.001
Copper Corrosion (3h at 50°C)	EN ISO 2180	Rating	1	-	1A
Total Contamination	EN 12662	mg/kg	-	24	11
Carbon	ASTM D3343 mod	% m/m	Report		86.57
Hydrogen	ASTM D3343	% m/m	Report		13.43
Oxygen	EN 14078	% m/m	Report		0.00
Gross Calorific Value	IP 12	MJ/kg	Report		45.86
Net Calorific Value	IP 12	MJ/kg	Report		43.01




### Certificate of Analysis

Fuel Blend No: CAF-G14/325      Contact: -  
 Fuel Type: CEC RF-06-03      Order No: -  
 Customer: -      Date: 01/07/2014

Test	Method	Unit	Limit		Result
			Min	Max	
Distillation (Evaporated)					
E250	EN ISO 3405	% v/v	Report		40.0
E350	EN ISO 3405	% v/v	Report		95.8
IBP	EN ISO 3405	°C	Report		154.6
10% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		185.5
20% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		206.8
30% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		230.8
40% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		250.0
50% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	245.0	-	266.1
60% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		280.6
70% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		295.1
80% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		311.1
90% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	Report		331.5
95% Volume Evaporated	EN ISO 3405	°C	345.0	350.0	347.6
FBP	EN ISO 3405	°C	-	370.0	357.6
Residue	EN ISO 3405	% v/v	Report		1.3

Notes:

Date: 03/07/2014  
 Authorised by:  
 C L Goodfellow  
 Operations Director



Coryton Advanced Fuels Ltd      Tel: +44 (0)1375 665707  
 The Manorway      Fax: + 44 (0)1375 678904  
 Stanford-le-Hope      Email: admin@corytonfuels.co.uk  
 Essex SS17 9LN, UK      Website: www.corytonfuels.co.uk

Registered in England & Wales  
 Registered Company No. 7232066  
 Registered Office Address: The Manorway, Stanford-le-Hope, Essex. SS17 9LN