



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHO RANTANEN  
STX.8 IC TIER 4 FINAL PROTOTYYPPI MOOTTORIMODUULIN  
SÄHKÖISTYS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 13. tammi-  
kuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**JUHO RANTANEN:** STX.8 IC Tier 4 Final prototyyppi moottorimoduulin sähköistys

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 43 sivua

Joulukuu 2015

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: ST, mobiiliseula, dieselmoottori, sähköistys, Tier 4 Final, Stage IV

Ei-tieliikennekäytössä olevien dieselmoottoreiden päästörajoja on kiristetty 1990-luvun puolesta välistä lähtien. Pohjois-Amerikassa on noudatettava nykyisin Tier 4 Final ja Euroopassa Stage IV päästörajoituksia, jotka ovat kiristäneet erityisesti typen oksidien ja hiukkasten sallittua määrää moottoreiden pakokaasuissa. Tier 3 / Stage III moottoreissa vaaditut päästörajoitukset on mahdollista saavuttaa ainoastaan moottorin ohjausta kehittämällä mutta Tier 4 Interim / Stage IIB ja Tier 4 Final / Stage IV rajoitukset vaativat dieselmoottorit vaativat käytännössä pakokaasuille jälkikäsitelyä. DOC-hapetuskatalysaattorilla saadaan vähennettyä hiilimonoksidin ja hiilivetyjen määrää. DPF-hiukkassuodattimella kerätään pakokaasuista hiukkaset ja noki pois. Typen oksidien vähentämiseen voidaan käyttää pakokaasujen uudelleenkierrätystä sylintereihin tai ureajärjestelmää (SCR). Myös muita tekniikoita päästöjen vähentämiseen löytyy.

Tämä työ käsittelee Metson STX.8 mobiiliseulojen uuden moottorimoduulin prototyypin sähköistystä. Moottorimoduuliin asennettiin Tier 4 Final päästörajoitukset täyttävä Caterpillarin C3.4B dieselmoottori. Prototyypillä oli tarkoitus varmistaa, että kyseinen moottori on niin taloudellisesti kuin myös teknisestiärkevin vaihtoehto uuteen moduuliin. C3.4B dieselmoottorissa pakokaasujen jälkikäsitelyyn käytetään DOC-hapetuskatalysaattoria ja SCR-ureajärjestelmää. Molemmat tarvitsevat toimiakseen erilaisia antureita ja toimilaitteita. C3.4B moottorissa näiden laitteiden sähköistys jää OEM:n vastuulle. Tässä työssä suunniteltiin prototyyppiin tarvittava sähkökeskus ja johdinsarja.

Työssä suurimmaksi haasteeksi muodostui C3.4B dieselmoottorin vaatima 12 voltin ohjausjännite. Metson mobiililaitteissa käytetty ohjausjännite on 24 voltia, jonka myös automaatiojärjestelmä tarvitsee toimiakseen, joten näiden jännitteiden yhdistämiseen tarvittiin järkevä ratkaisu. Suunnittelun aikana päätettiin asentaa keskukseen hakkuriteholähteet, joilla saatiin 24 voltin jännite aikaiseksi. Moduulin testauksen aikana huomattiin dieselmoottoria käynnistettäessä, että jännite akuilla laskee liian alhaiseksi hakkureille eivätkä ne pysyneet käynnissä. Parhaimmaksi ratkaisuksi todettiin erottaa akut dieselmoottorin käynnistyksen ajaksi, jolloin toinen akusta syöttää yksinään hakkureita ja toinen starttimoottoria. Ratkaisu toimi ja moottorimoduuli voitiin asentaa asiakkaan ST358 mobiiliseulaan testaukseen.

Vaikka suunnittelun ja kokoonpanon aikana kohdattiin muutamia haasteita, saatiin työssä suunniteltua toimiva ratkaisu C3.4B dieselmoottorin sisältämän moottorimoduulin sähköistämiseksi. Kustannusten tarkastelu ja lopullinen päätös C3.4B moottorin jatkosuhteen jäi myöhempään ajankohtaan.

## ABSTRACT

**JUHO RANTANEN:** Electrification of the STX.8 IC Tier 4 Final motor module prototype

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 43 pages

December 2015

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Electronics

Examiner: Professor Teuvo Suntio

Keywords: ST, mobile screen, diesel engine, electrification, Tier 4 Final, Stage IV

Since the middle of the 1990s the pollutant emissions from nonroad diesel engines have been reduced. Currently in the North America nonroad diesel engine emissions must comply with Tier 4 Final emission standard and in Europe according to Stage IV standard. Tier 4 Final and Stage IV standards have reduced especially nitrogen oxides and particulate matter. Tier 3 / Stage III diesel engines required only changes in engines control system and engines did not require any additional aftertreatment systems for exhaust gases to fulfill the Tier and Stage standards. Tier 4 Interim / Stage IIB and Tier 4 Final / Stage IV engines require some kind of aftertreatment systems for exhaust. Diesel oxidation catalyst can be used to reduce the amount of carbon monoxide and hydrocarbons in the exhaust gases. Diesel particulate filter can be used to remove particulate matter and soot from the exhaust gases. Selective catalytic reduction (SCR) and exhaust gas recirculation can be used to remove nitrogen oxides from the exhaust gases. There are available also other technics to remove harmful matter from the exhaust gases.

This thesis is about the electrification of Metso STX.8 mobile screens' prototype of the new motor module. There is Caterpillar C3.4B diesel engine in the motor module. The selected engine fulfills the requirements of Tier 4 Final standard. The purpose of the prototype is to make sure that C3.4B is a right choice economically and technically for the new motor module. The aftertreatment system of C3.4B consists of diesel oxidation catalyst and selective catalytic reduction. Both of these systems require different kind of sensors and actuators. Electrification of this equipment is required to be made by OEM. This thesis is about designing the electric center and cable group for the prototype.

The biggest challenge with the electrification of the prototype was that C3.4B diesel engine requires 12 volts for control. Mobile equipment of Metso uses 24 volts as control voltage and automation requires 24 volts. During the designing it was decided that 24 volts would be created with power converters. During the testing of the motor module it was noticed that during start of the diesel engine the voltage on the batteries drops too low for the power converters. The solution for the problem was to separate batteries from each other during start of the diesel engine. This solution worked and the motor module was installed on customers ST358 for testing.

Even though there were a couple of challenge during the designing and assembling of the C3.4B motor module prototype, the design for the electrification works and it is practical. Whether C3.4B is the right engine for the new motor module, will be decided later.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty Metso Minerals Oy:n Tier 4 Final –projektin yhdestä osaprojektista, jossa suunniteltiin mobiiliseuloihin uudesta moottorimoduulista prototyyppi. Haluan kiittää projektissa avustaneita henkilöitä ja erityisesti Juha Kenttälää, joka mahdollisti diplomityön teon aiheesta. Haluan kiittää myös työn tarkastajaa professori Teuvo Suntiota.

Tampereella, 14.1.2016

Juho Rantanen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	SEULAT .....	2
3.	DIESELMOOTTORIT .....	7
3.1	Päästöt .....	8
3.1.1	Hiilimonoksidi (CO) .....	9
3.1.2	Hiilivedyt (HC) .....	9
3.1.3	Hiukkaset (PM) .....	10
3.1.4	Typen oksidit (NOx) .....	11
3.1.5	Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> ) .....	12
3.2	Jälkikäsitteilytekniikat .....	12
3.2.1	DOC .....	12
3.2.2	DPF .....	14
3.2.3	SCR .....	16
3.2.4	EGR .....	18
3.2.5	LNT .....	18
3.3	Tier 4 Final / Stage IV .....	20
4.	CATERPILLAR .....	26
5.	SUUNNITTELU .....	30
5.1	12V vs. 24V .....	30
5.2	Tilantarve .....	31
5.3	Würth Elektronik 9-2 Module -piirilevy .....	32
5.4	Johdinsarja .....	34
6.	KOKOONPANO .....	38
7.	YHTEENVETO .....	42
	LÄHTEET .....	44

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO	hiilimonoksidi, häkä
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
DOC	diesel oxidation catalyst, hapetuskatalysaattori
DEF	diesel exhaust fluid, urea-vesiliuos
DPF	diesel particulate filter, hiukkassuodatin
ECU	engine control unit, moottorin ohjausyksikkö
EGR	exhaust gas recirculation, pakokaasujen uudelleenkierrätys sylintereihin
EPA	Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviranomainen
EU	Euroopan unioni
HC	hiilivedyt
IC	Intelligent Control, murskaimissa ja seuloissa käytetty automaatiojärjestelmä
LNT	lean NO <sub>x</sub> trap, typen oksideja pakokaasuista poistava järjestelmä
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
OEM	original equipment manufacturer, alkuperäinen laitevalmistaja
PM	particulate matter, hiukkasmaiset epäpuhtaudet
SCR	selective catalytic reduction, pelkistyskatalysaattori
SO <sub>2</sub>	rikkidioksidi
SOF	soluble organic fraction, liukeneva orgaaninen materiaali
STX.8	Metson mobiiliseulat: ST2.8, ST3.8 ja ST4.8

# 1. JOHDANTO

1990-luvun puolenvälistä alkaen työkoneiden dieselmoottoreiden sallittuja päästöjä on pienennetty jatkuvasti. Nykyisin käytössä olevat päästörajat ovat Pohjois-Amerikan Tier 4 Final ja Euroopan Stage IV, jotka koskevat ei-tieajoneuvojen dieselmoottoreita. Säädökset ovat laskeneet uusien dieselmoottoreiden typpioksidin- ja hiukkaspäästöjä jopa 99%. Tier 4 Final / Stage IV päästörajoiuksia ei saavuteta pelkästään moottorin ohjausta kehittämällä vaan pakokaasut vaativat jälkikäsittelylaitteiston, jolla päästöt saadaan muutettua vähemmän haitalliseen muotoon.

Tässä työssä suunnitellaan Metso Minerals Oy:n mobiiliseulojen uuden moottorimoduulin prototyyppiin sähköistys. Dieselmoottorina käytetään Caterpillarin C3.4B Tier 4 Final / Stage IV moottoria. Työn toisessa luvussa esitellään seulojen toimintaa ja Metson mobiiliseuloja, joihin suunniteltava moottorimoduuli on tarkoitettu.

Luvussa kolme tarkastellaan dieselmoottoreiden toimintaa ja niissä syntyviä päästöjä. Samalla esitellään myös erilaisia pakokaasujen käsittelytekniikoita, joilla saadaan haitallisia aineita vähennettyä. Typen oksidien, hiukkasten sekä muiden myrkkujen poistamiseksi pakokaasuja voidaan käsitellä esimerkiksi hapetuskatalysaattorilla (DOC), pelkistyskatalysaattorilla (SCR) ja hiukkassuodattimella (DPF). Luvun lopussa esitellään ei-tieliikennekäyttöön tuleville dieselmoottoreille käytössä olevat Tier 4 Final ja Stage IV päästönormit. Päästörajat ovat samoja molemmissa mutta Tier 4 Final koskee kaikkia dieselmoottoreita. Stage IV ei sen sijaan koske pienimpiä ja suurimpia dieselmoottoreita.

Luvussa neljä esitellään prototyyppiin valittu Caterpillarin dieselmoottori C3.4B. Luvussa tarkastellaan myös moottorin asettamia vaatimuksia OEM:n vastuulla olevaan pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston sähköistykseen.

Luvussa viisi keskitytään sähkökeskuksen ja johdinsarjan suunnittelun aikana ilmenneisiin haasteisiin ja tehtyihin ratkaisuihin. Esimerkiksi tarkastellaan kuinka saadaan yhdistettyä moottorin 12 voltin sähköjärjestelmä ja 24 voltin automaatiojärjestelmä.

Luvussa kuusi luvussa paneudutaan moottorimoduulin kokoonpanovaiheeseen ja viimeistelyyn. Luvussa tarkastellaan kuinka suunniteltu sähköjärjestelmä saatiin toimimaan oikean moottorin kanssa. Lopuksi pohditaan vielä vähän ratkaisuja, joita voidaan hyödyntää mikäli C3.4B moottorin käyttöä päätetään jatkaa.

## 2. SEULAT

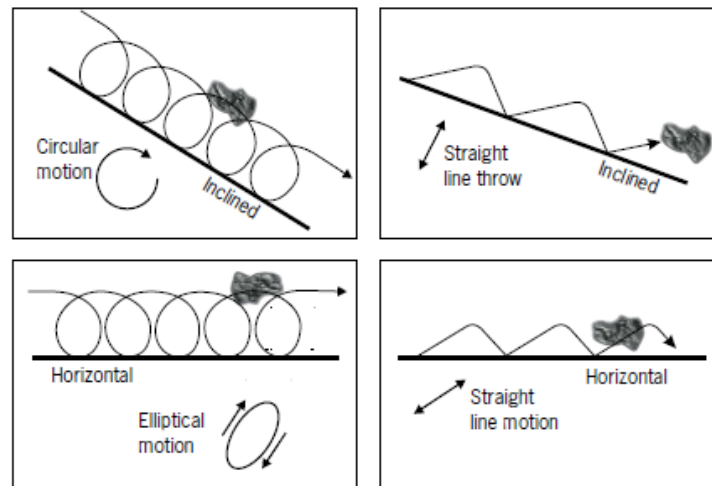
Metso Oyj on suomalainen kaivos- ja kivenmurskausalaan sekä virtauksensäätö – liiketoimintaan keskittyvä teollisuusyritys. Vuonna 2014 Metson liikevaihto oli noin 3,7 mrd. euroa ja yrityksessä työskenteli noin 14 000 työntekijää yli 50 maassa ympäri maailmaa. Liikevaihdosta kivenmurskaus muodosti 22 %. [1] Metso Minerals Oy suunnittelee ja valmistaa Tampereella muun muassa mobiiliseuloja ja mobiilimurskaimia. Kuvassa 2.1 on esitetty esimerkki mahdollisesta murskausprosessista, jossa kuvan ulkopuolella oleva LT106 syöttää kiviainesta LT200HP:lle, joka syöttää edelleen ST3.5 mobiiliseulaa. Tässä työssä suunnitellaan mobiiliseuloihin tulevan moottorimoduulin prototyyppin sähköistys.



*Kuva 2.1 LT200HP syöttää kiviainesta ST3.5:lle [2, s.59]*

Seuloilla erotellaan seulottavasta materiaalista erikokoiset kappaleet, jolloin saadaan halutun kokoisia lopputuotteita. Seuloja käytetään erilaisissa tehtävissä esimerkiksi kiertäyksessä tai osana murskausprosessia. Seulottava materiaali syötetään seuloissa olevien verkkojen päälle, jolloin materiaalin pienimmät partikkelit kulkevat verkon läpi ja suuremmat partikkelit jäävät verkon päälle. Seulojen suorituskykyyn vaikuttavat eniten seulan liike, verkkojen kaltevuuskulma ja verkon tyyppi [3, s.4:2]. Kuvassa 2.2 on esitetty erilaisia mahdollisuuksia seulan tärinän synnyttävälle liikkeelle.



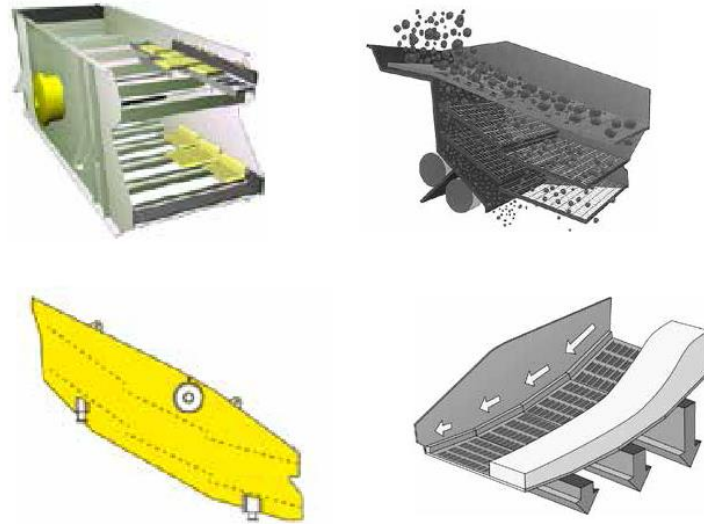


**Kuva 2.2** Liikeratoja seulan tärinän synnyttämiseen [3, s.4:2]

Tärinän aiheuttava liike synnytetään yleensä pyörittämällä epäkeskistä massaa. Mikäli seulan verkko on vaakasuorassa, täytyy tärinän kuljettaa materiaalia eteenpäin ilman maan vetovoiman apua. Käytettävä liike voi olla, joko noin 45 asteen kulmassa verkkoihin olevaa lineaarista liikettä tai elliptistä pyörivää liikettä. Jos seulan verkko on kallistettu, maan vetovoima kuljettaa materiaalia eteenpäin. Silloin seulan liike voi olla ympyränmuotoista tai lineaarista liikettä, joka on kohtisuorassa verkkoa vastaan. Pyrittäessä saamaan paras mahdollinen lopputulos seulonnasta, täytyy seulan liikkeen suuntaan ja voimakkuuteen kiinnittää huomiota. Pyrkimyksenä on, että tärinä ei pidä materiaalia samassa verkon aukossa, vaan siirtää materiaalia eteenpäin. Liike ei kuitenkaan saa olla liian voimakasta, mikä johtaisi siihen, että materiaali hyppäisi useiden verkon reikien ylitse. [4, s.4:1-4:2]

Kun seulaan syötetään materiaalia, aluksi tärinä kerrosta materiaalin siten, että suuremmat kappaleet nousevat materiaalissa päällimmäiseksi. Seulan liike pienentää materiaalin sisäistä kitkaa, jolloin erikokoiset kappaleet pystyvät erottumaan toisistaan. Kappaleiden erottuminen perustuu kerrostumiseen, kun seulan verkot ovat vaakatasossa tai lähes vaakatasossa. Tällöin materiaalista saadaan erotettua tarkasti erikokoiset kappaleet. Mikäli seulonnan tavoitteena on saada suurin osa pienistä kappaleista erotettua, on järkevämpää käyttää seulaa, jossa verkot ovat kallistettuja. Materiaali on vapaassa pudotuksessa, jolloin se ei kerrostu vaan pienet hiukkaset putoavat suoraan seulan verkkojen läpi. Samalla seulan kapasiteetti kasvaa ja seulonnan tarkkuus huononee. [3, s.4:2]

Seuloja on olemassa erityyppisiä, joista voidaan erotella neljä päätyyppiä. Kuvassa 2.3 on periaatekuvat näistä neljästä tyypistä.



**Kuva 2.3** Periaatekuvat neljästä seulojen päätyypistä [3, s.4:3]

Kuvassa 2.3 vasemmassa yläkulmassa on seula, jossa verkoilla on ainoastaan yksi kallistuskulma. Tällaiset seulat ovat kaikista yleisimpiä. Oikeassa yläkulmassa on seula, jossa verkoilla on kaksi eri kallistuskulmaa. Seulan kapasiteetti on suurempi kuin yhden kallistuskulman seuloilla. Vasemmassa alakulmassa on seula, jossa verkoilla on kolme eri kallistuskulmaa. Tässä seulassa saadaan yhdistettyä edellä mainittujen seulojen hyviä puolia eli kapasiteettia ja erotuskykyä. Tyypillisesti näitä seuloja on käytössä lopputuotteiden seulonnessa, jossa halutaan saada mahdollisimman tasalaatuisia lopputuotteita mahdollisimman paljon. Oikeassa alakulmassa on seula, jossa verkoilla on useita eri kallistuskulmia. Tällaisia seuloja on käytössä hiilen ja metallien louhinnassa. [3, s.4:3]

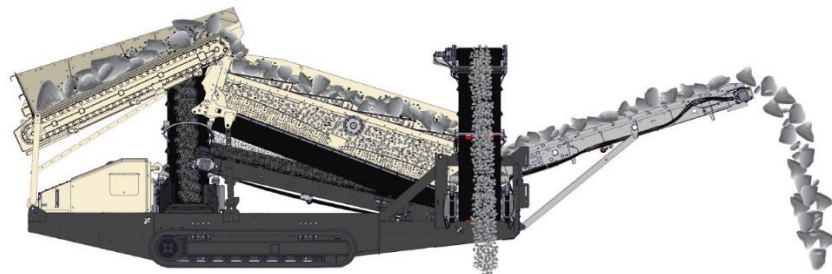
Seulan suorituskykyyn vaikuttaa merkittävästi myös käytettävän verkon tyyppi. Verkon reikien koko täytyy valita sopivaksi. Riippuen verkon tyypistä sopiva koko reille on tuotteen kokoa 5 – 30 % suurempi [3, s.4:5]. Jos verkko on tehty teräslangasta saa siinä olevat reiät olla lähempänä tuotteen kokoa kuin kumista tehdyissä. Reikien koon lisäksi vaikuttaa myös niiden muoto. Yleensä reiät ovat neliön mallisia mutta myös ympyrän ja suorakaiteen muotoisia käytetään. Esimerkiksi suorakaiteen muotoisilla reillä saadaan kasvatettua seulan kapasiteettia, jos reiän pidempi sivu on materiaalivirran suuntainen. Jos taas pidempi sivu on materiaalivirtaa vastaan kohtisuorassa, paranee seulonnan tarkkuus. Seulan verkkojen paksuus vaikuttaa lopputuotteeseen. Ohuempi verkko kasvattaa seulan kapasiteettia ja tarkkuutta sekä vähentää seulan reikien tukkeutumista. Ohuempi seulan verkko joudutaan kuitenkin vaihtamaan useammin kuin paksuampi verkko. [3, s.4:4]

Metson ST-mobiiliseulat kuuluvat Lokotrack-tuoteperheeseen. Niissä seula on asetettu telojen päälle, jolloin seulat ovat helposti ja nopeasti siirrettävissä. Kuvassa 2.4 on Metson ST3.5 mobiiliseula.



**Kuva 2.4** ST3.5 [5]

Mobiiliseulat koostuvat seulasta, syöttimestä, kuljettimista ja dieselmoottorista. Metson tarjoamat mobiiliseulamallit ovat ST2.4, ST2.8, ST3.5, ST3.8, ST4.8 ja ST620. Kahdes- sa viimeksi mainitussa seulontatasoissa on kolme ja muissa kaksi [2, s.41]. Näin ollen ST4.8 ja ST620 voivat tuottaa neljää eri lopputuotetta. Muilla malleilla voidaan tuottaa kolmea lopputuotetta. Kuvassa 2.5 on esitetty periaatteellinen kuva ST2.8 toiminnasta.



**Kuva 2.5** ST2.8:n halkileikkaus [6]

ST620 mobiiliseulaa lukuun ottamatta kaikissa malleissa voimanlähteenä on Caterpillarin C4.4 dieselmoottori. Moottori on teholtaan 75 kW ja saatavissa olevat moottorit täyttävät joko Tier 3 tai Tier 4i päästönormit. ST620 käyttää Caterpillarin C6.6 dieselmoottoria, joka on teholtaan 130 kW [2, s.41]. Tämä työ liittyy Metson projektiin, jossa ST:den moottorimoduulit päivitetään ja Tier 4i moottorit korvataan Tier 4 Final moottoreilla. Tässä työssä suunniteltava moottorimoduuli korvaa edellä mainittujen mobiiliseulojen C4.4 dieselmoottorin sisältävät moottorimoduulit. ST620 moottorimoduuli päivitetään myöhemmin. Seulat on mahdollista varustaa optiolla, jolla seulontaprosessia

voidaan käyttää ulkoisella sähköllä. Tässä tapauksessa hydrauliiikan pumppuja pyörittään kahdella sähkömoottorilla dieselmoottorin sijasta.

ST mobiiliseulat ovat sähköhydraulisia. Seulan ja kuljettimien sekä telojen käytöt ovat hydraulisia, joiden ohjaus tapahtuu sähköisesti. Myös seulan nosto, kuljettimien avaus sekä muut toimenpiteet seulan muuttamiseksi kuljetusasentoon ovat hydraulisia mutta ohjaus tapahtuu käsikäyttöisesti. Kuvassa 2.6 on ST:ssä käytettävä moottorimoduuli, jossa näkyvät sähkökeskus ja hydrauliiikan venttiileitä.

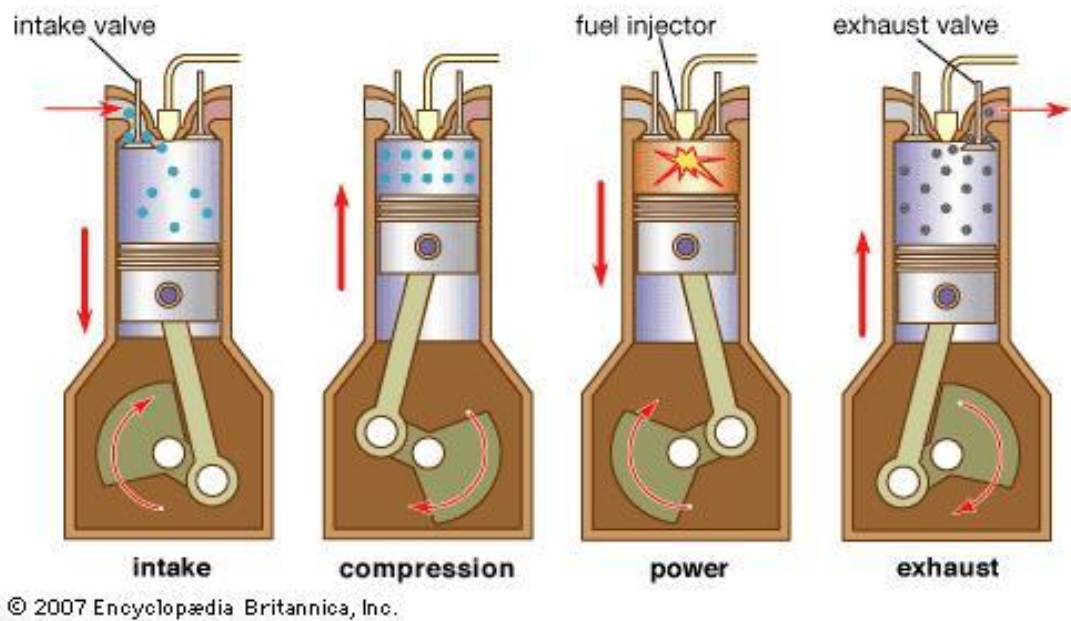


*Kuva 2.6 Mobiiliseuloissa käytetty moottorimoduuli [2, s.35]*

ST mobiiliseuloissa ohjausjärjestelmä on mahdollista saada joko automaatiolla tai releohjauksella. IC300 automaatiojärjestelmä on toteutettu Epecin koneenohjausyksiköillä.

### 3. DIESELMOOTTORIT

Dieselmoottorin keksi saksalainen Rudolf Diesel. Ensimmäisen toimivan moottorin hän valmisti vuonna 1897 ja vuotta myöhemmin hän sai moottorilleen patentin. Dieselmoottori on puristussytytteinen eli polttoaine syttyy itsestään ilman erillistä kipinää. Useimmat dieselmoottorit ovat nelitahtisia. Kuvassa 3.1 on esitetty periaatekuva nelitahtisen dieselmoottoareiden työkierrosta.



**Kuva 3.1** Nelitahtisen dieselmoottorin tahdit: imu, puristus, työ ja poisto [7]

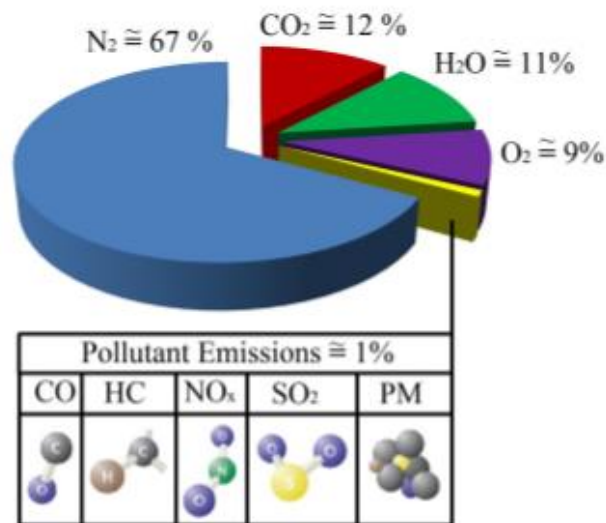
Sylintereissä on kaksi venttiiliä, joista toisesta sylinteriin tulee ilmaa ja toisesta pakokaasut poistetaan. Dieselmoottorissa imutahdin aikana mäntä liikkuu alaspäin, jolloin sylinteriin imetään ilmaa. Puristustahdin aikana molemmat venttiilit ovat kiinni ja mäntä liikkuu ylöspäin, jolloin sylinterissä oleva ilma puristuu. Sylinterissä paine nousee 30-50 bar:iin ja samalla ilman lämpötila nousee 500-800 °C. Puristustahdin loppuun sylinteriin suihkutetaan polttoainetta hienojakoisena sumuna. Polttoaine syttyy korkeassa paineessa ja lämpötilassa itsestään, jolloin räjähdysmäinen palaminen saa männän liikkumaan työtahdin aikana alaspäin. Palaminen aiheuttaa sylinterin kaasuseoksen voimakkaan laajenemisen, joka synnyttää männän kohdistuvan voiman. Poistotahdin aikana mäntä liikkuu sylinterissä ylöspäin, jolloin pakokaasut pääsevät poistumaan auenneesta pakoventtiilistä. Poistotahdin jälkeen kierto alkaa alusta jälleen imutahdilla. [8]

Polttoaineen sytyttäminen puristamalla altistaa dieselmoottorin mekaanisesti kovemmalle rasitukselle kuin bensiinimoottorin, joissa polttoaineen sytytys tapahtuu sytytys-

tulpan kipinällä. Suuremmista voimista johtuen dieselmoottorit ovat yleensä olleet raskaampia kuin vastaavat bensiinimoottorit. Dieselmoottoreiden muita huonoja puolia verrattuna bensiinimoottoriin ovat kalliimpi rakenne ja kovempi ääni. Myös dieselmoottorin käynnistysmoottorin täytyy olla suurempi, koska korkean puristussuhteen vuoksi moottorin pyörittäminen käyntiin on raskaampaa. Dieselmoottoreiden hyötyjä ovat korkeampi hyötysuhde ja vähäisempi polttoaineen kulutus. Nykyaikaisilla suunnittelumenetelmillä moottoreiden painoeroa on saatu pienennettyä merkittävästi. Dieselmoottoreiden kulutusta on myös saatu parannettua ahtamisella ja moottorinohjaustekniikalla. [8]

### 3.1 Päästöt

Mikäli dieselmoottori toimisi ideaalisesti, polttoaineen palamisreaktiossa syntyisi ainoastaan hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ) ja vettä ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Moottorit eivät kuitenkaan ole ideaalisia, joten myös muita päästöjä syntyy. Syitä päästöille ovat esimerkiksi ilman ja polttoaineen seossuhde, sytytyksen ajoitus sekä palamisreaktion lämpötila. Kuvassa 3.2 on eritelty dieselmoottoreiden tuottamat päästöt.



**Kuva 3.2** Dieselmoottoreiden pakokaasujen sisältämät yhdisteet [9, s.17]

Dieselmoottoreiden päästöistä suurin osa on typpikaasua, happea ja vettä. Niitä on ilmakehässä, joten ne eivät ole varsinaisesti haitallisia ympäristölle. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, joka aiheuttaa ilmakehään kertyessään ilmastonlämpenemistä. Hiilidioksidi on kuitenkin välttämätön kaasu kasveille eikä se pieninä määrinä aiheuta vaaraa ihmisille tai luonnolle.

Dieselmoottoreiden pakokaasujen saastuttavat päästöt muodostavat vain alle 1 % osuuden pakokaasuista. Haitallisimpia ovat hiilimonoksidi (CO), hiilivedyt (HC), typen oksidit ( $\text{NO}_x$ ) ja hiukkaset (PM). Noin puolet haitallisista päästöistä ovat typen oksideja.



Toiseksi eniten pakokaasuissa on hiukkasia. Hiilivetyjen ja hiilimonoksidin määrä on selkeästi pienempi dieselmoottoreissa. Rikkidioksidin ( $\text{SO}_2$ ) määrään vaikuttaa käytetyn polttoaineen ominaisuudet. Rikkidioksidi syntyy polttoaineessa olevista sulfaateista, joten sen määrään voidaan vaikuttaa tehokkaimmin polttoaineiden valmistuksessa. [9, s.16 - 17]

### 3.1.1 Hiilimonoksidi (CO)

Hiilimonoksidia eli häkää syntyy, kun palamisreaktio sylinterissä ei tapahdu täydellisesti. Silloin hapettumisreaktio jää kesken eli hiilidioksidin sijasta syntyy hiilimonoksidia. Syntyvän hiilimonoksidin määrään vaikuttaa erityisesti ilman ja polttoaineen määrien välinen suhde. Kun seossuhde on rikas eli polttoainetta on runsaasti, ei käytettävissä oleva ilman happi pysty hapettamaan kaikkea hiilimonoksidia hiilidioksidiksi. Seossuhde on rikkaimmillaan, kun moottori käynnistetään ja tilanteissa, joissa moottoria äkillisesti kiihdytetään. Hiilimonoksidia syntyy jatkuvasti pieniä määriä mutta edellä mainituissa tilanteissa määrät ovat suurimmillaan. [9, s.17]

Hiilimonoksidi on hajuton ja väritön kaasu, joka hengitettäessä siirtyy ihmisen verenkiertoon. Hiilimonoksidi syrjäyttää hapen veren hemoglobiinissa, jolloin se estää ihmisen hapensaannin. Hapensaannin estyminen johtaa tajuttomuuteen ja lopulta menehtymiseen. Hiilimonoksidilla ei ole varsinaisesti suoraa kasvihuonevaikutusta ilmakehässä mutta se reagoi ilmassa olevan hapen kanssa muuttuen hiilidioksidiksi. Samalla se muodostaa alailmakehään otsonia. Alailmakehässä otsoni on kasvihuonekaasu, joka ilmastonlämpiämisen lisäksi esimerkiksi vaikeuttaa kasvien yhteyttämistä. [10]

### 3.1.2 Hiilivedyt (HC)

Hiilivetyjä syntyy sylinterissä palamatta jääneestä polttoaineesta. Sylintereissä lämpötila on niiden reunoilla selkeästi matalampi kuin sylintereiden keskustassa, jolloin sylintereiden reunoilla osa polttoaineen ja ilman seoksesta ei ole riittävän kuumaa palaakseen. Pakokaasuihin jäävät hiilivedyt ovat erilaisia, kuten esimerkiksi alkaaneja, alkeeneja sekä aromaattisia hiilivetyjä. Hiilivetyjä syntyy erityisesti dieselmoottorin kevyellä kuormalla, jolloin polttoaine-ilma seoksessa on vähän polttoainetta suhteessa ilmaan. Kun polttoainetta on vähän, ei palaminen välttämättä etene sylintereissä riittävän nopeasti, jotta kaikki polttoaine ehtisi palaa työtahdin aikana. Syntyvien hiilivetyjen koostumukseen vaikuttaa käytetyn polttoaineen tyyppi, moottorin asetukset ja rakenne. Syntyvään määrään taas vaikuttaa moottorin pyörimisnopeuden äkilliset suuret muutokset, epätäydellinen polttoaineen suihkutuksen sekä suuttimien liiallinen koko ja tärinä. Päästyään sylintereistä syntyneet hiilivedyt reagoivat hapen kanssa, mikäli pakokaasujen lämpötila on yli  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . Hiilivetyjen pitoisuus on suurimmillaan heti sylintereiden jälkeen. Hiilivetyjä ei jää ainoastaan pakokaasuihin. Koko polttoainejärjestelmästä pääsee pieni-

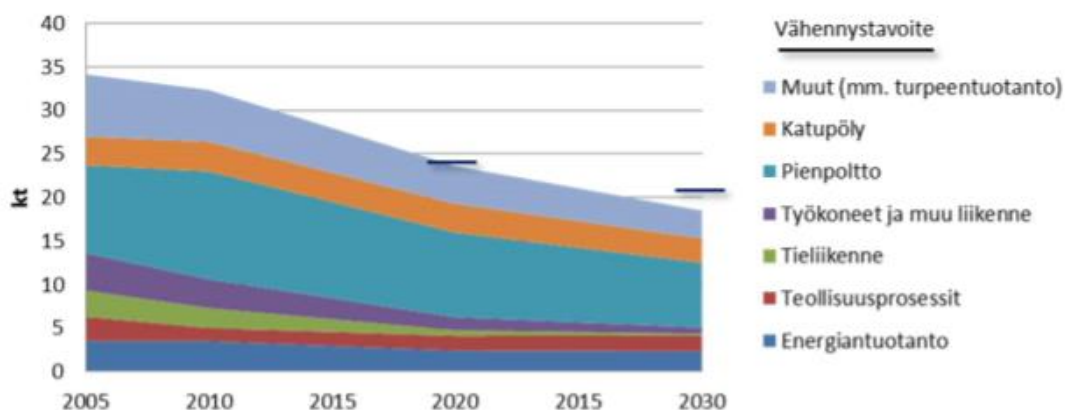
nä vuotoina ja höyryinä hiilivetyjä jatkuvasti ilmaan. Kokonaispäästöistä noin 60 % tulee pakokaasujen mukana. [9, s.17-18]

Hiilivedyt ovat haitallisia niin ihmisille kuin myös luonnollekin. Ne ovat myrkyllisiä ja saattavat aiheuttaa ihmisille esimerkiksi hengitysteiden ärsytystä ja mahdollisesti myös syöpää [9, s.18]. Luonnossa hiilivedyt muodostavat yhdessä muiden saasteiden kanssa alailmakehään haitallista otsonia.

### 3.1.3 Hiukkaset (PM)

Hiukkaspäästöt voidaan jakaa kolmeen ryhmään eli nokeen, liukeneviin orgaanisiin osiin (SOF) ja epäorgaanisiin osiin (IF). Selvästi suurin osa hiukkaspäästöistä on nokea. Hiukkaset ovat peräisin palamatta jääneestä polttoaineesta ja voiteluaineista sekä polttoaineen palaessa syntyvästä tuhkasta. Noin 30 - 40 % hiukkasten materiaalista on hiiltä. Hiukkasten syntymiseen, kokoon ja materiaaliin vaikuttavat sylintereissä tapahtuva palamis- ja laajentumisvaihe, polttoaineen ja voiteluaineiden laatu sekä lämpötila. Hiukkaset ovat tyypillisesti halkaisijaltaan 15 – 40 nm palloja. Yleensä alle 1 – 2,5 µm hiukkasia kutsutaan pienhiukkasiksi. [9, s.18]

Dieselmootoreiden tuottama hiukkasmäärä on merkittävästi suurempi kuin bensiinimootoreilla. Pienhiukkaset ovat selkeästi haitallisempia kuin karkeat hiukkaset. Pienhiukkasten koosta johtuen ne voivat päätyä ilmapirran mukana syvemmälle keuhkoihin ja pääsevät keuhkorakkuloihin asti. Kuvassa 3.3 on pienhiukkaspäästöjen määrän kehitys Suomessa vuosille 2005-2030. Työkoneet ja liikenne ovat tuottaneet hiukkaspäästöistä noin neljänneksen mutta niiden suhteellinen ja absoluuttinen määrä on pienentynyt ja jatkaa pienentymistään.



**Kuva 3.3** Pienhiukkasten määrän kehitys Suomessa vuosille 2005-2030 [11, s.1]

Pienhiukkaset reagoivat muiden aineiden kanssa helpommin niiden suuresta pinta-alasta verrattuna samaan määrään samaa ainetta karkeampina hiukkasina. Pienhiukkaset kas-



vattavat riskiä sairastua hengityselinsairauksiin sekä sydän- ja verisuonisairauksiin. Suomessa pienhiukkasten arvioidaan aiheuttavan vuodessa jopa 1300 ennen aikaista kuolemaa. Suurimmat pienhiukkasten lähteet ovat liikenne ja puun pienpoltto. [12]

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

Typpioksidit syntyvät sylintereissä, kun palamisreaktioissa lämpötila nousee yli 1 600 °C. Dieselmootoreissa imutahdin aikana sylintereihin imetään ilmaa, joka koostuu pääasiassa hapestä ja typestä. Typpikaasu koostuu molekyyleistä, joissa kahden typpiatomin välillä on kovalenttinen kolmoissidos. Sidos on erittäin kestävä, joten typpi on kemiallisesti erittäin passiivinen eikä normaalisti reagoi ilmassa olevan hapen kanssa. Kun polttoaine palaa sylintereissä syntyy lämpötiloja, jotka ovat korkeampia kuin 1 600 °C, jolloin typpi pystyy reagoimaan hapen kanssa ja muodostamaan typen oksideita. Typen oksidien määrään vaikuttaa palamisen aikana käytettävissä olevan hapen määrä, syntyvä lämpötila sekä se, että kuinka kauan riittävä lämpötila on saatavilla. Kaikista eniten typen oksideja syntyy polttoaineen syttymisen jälkeen, jolloin mäntä on vielä lähes yläasennossaan ja paine on suurimmillaan, jolloin myös lämpötila on suurimmillaan. Syntyvistä typen oksideista noin 90 % on typpimonoksidia (NO) ja loput 10 % typpidioksidia (NO<sub>2</sub>). [9, s.18-19]

Typpimonoksidi on hajuton ja väritön kaasu. Se on voimakas hapetin, joka ärsyttää hengitysteitä ja silmiä. Typpimonoksidille altistuminen voi aiheuttaa keuhkopöhön tai methemoglobiinin muodostumista vereen. Pitkäaikainen altistuminen voi vahingoittaa keuhkoja. [13] Ilmassa typpimonoksidi reagoi hapen kanssa ja muodostaa reaktion (1) mukaisesti typpidioksidia.



Typpidioksidi on punertavan ruskea kaasu, jolla on pistävä haju. Se on voimakas hapetin, joka reagoi veden kanssa muodostaen typpihappoa ja typpimonoksidia reaktion (2) mukaisesti [14]. Typpimonoksidi hapettuu edelleen takaisin typpidioksidiksi reaktion (1) mukaisesti.



Typpidioksidi aiheuttaa ilmakehään päästyään haposateita ja rehevöitymistä reagoiessaan ilmankosteuden kanssa muodostaen typpihappoa. Typpidioksidi on 5 kertaa myrkyllisempää kuin typpimonoksidi. Typpidioksidi edesauttaa hengityselinsairauksia ja laskee alttiutta sairastua hengitystieinfektioihin kuten influenssaan. Alailmakehässä typpidioksidi muodostaa otsonia, joka on haitallinen kasvihuonekaasu maanpinnan ilmakehän alaosissa. Auringonsäteily pystyy hajottamaan typpidioksidimolekyylin typpimonoksidiksi ja happiatomiksi reaktion (3) mukaisesti. [14]



Syntynyt happiatomi reagoi ilman happimolekyylien kanssa muodostaen otsonia reaktion (4) mukaisesti [9, s.19].



Otsoni on kasvihuonekaasu, joka on haitallinen ihmisille. Pitkäaikainen altistuminen voi aiheuttaa pysyviä haittoja keuhkoihin. Lyhytaikainen altistuminen otsonille aiheuttaa haittaa erityisesti ihmisille, joilla keuhkot eivät ole parhaassa mahdollisessa kunnossa. Esimerkiksi astmaatikoiden ja hengityselinsairauksia sairastavien otsoni aiheuttaa helpoiten ongelmia. Suuremmalle pitoisuudelle altistuminen aiheuttaa silmien kirvelyä ja punoitusta, päänsärkyä, huonovointisuutta sekä hengitysvaikeuksia. [15]

### 3.1.5 Rikkidioksidi (SO<sub>2</sub>)

Rikkidioksidia syntyy dieselmootoreissa polttoaineen sisältämistä sulfaateista. Syntyvän rikkidioksidin määrää pyritään rajoittamaan tällä hetkellä käyttämällä polttoainetta, joka sisältää mahdollisimman vähän sulfaatteja [16, s.16]. Erillisiä jälkikäsittelylaitteita ei ole rikkidioksidia varten ole. Rikkidioksidi voi kuitenkin olla haitallinen jälkikäsittelylaitteistojen eri osille. Rikkidioksidi pystyy hapettumaan hapetuskatalysaattorissa rikkiatrioksidiksi, joka reagoi vedessä muodostaen sulfaatteja ja rikkihappoa [17]. Syntyvät yhdisteet ovat haitallisia ja voivat vahingoittaa jälkikäsittelylaitteiston osia. Ne ovat haitallisia myös ihmisille ja luonnolle päästessään ilmaan. Luontoon päästessään rikkidioksidi happamoittaa vesistöjä ja maaperää sekä synnyttää syövyttäviä happosateita.

Ihmisillä rikkidioksidi aiheuttaa silmien, kosteiden ihoalueiden ja hengitysteiden ärsytystä ja kirvelyä sekä yskää. Mikäli pitoisuus on suuri, myös hengitysvaikeudet ovat mahdollisia. Toistuva altistuminen rikkidioksidille aiheuttaa hengitystiesairauksia ja keuhkoputkentulehdusta. [18]

## 3.2 Jälkikäsittelytekniikat

Pakokaasuihin syntyvien haitallisten päästöjen määrään voidaan vaikuttaa moottorin ohjauksella ja rakenteella tiettyyn rajaan saakka. Nykyisin käytössä olevat päästöraajat ovat kuitenkin niin tiukat, että vaadittuja arvoja ei pystytä saavuttamaan ilman pakokaasujen jälkikäsittelyä. Typen oksidien, hiukkasten ja hiilivetyjen poistamiseen on kaikkiin omat tekniikkansa.

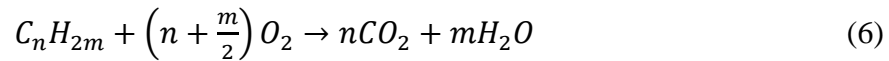
### 3.2.1 DOC

DOC (Diesel Oxidation Catalyst) on dieselmootorin pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston katalysaattori, joka nimensä mukaisesti hapettaa pakokaasujen epäpuhtauksia. DOC vähentää hiilimonoksidin (CO), hiilivetyjen (HC) ja pienhiukkasiin liuenneiden orgaa-

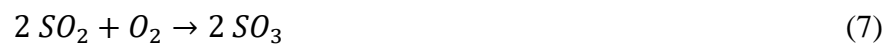
nisten aineiden (SOF) määrää pakokaasuissa [17]. Hiilimonoksidi hapettuu reaktion (5) mukaisesti hiilidioksidiksi ( $CO_2$ ) [9, s.20].



Hiilivedyt ja pienhiukkasten orgaaniset aineet hapettuvat molemmat reaktion (6) mukaisesti hiilidioksidiksi ja vedeksi.



Reaktioyhtälössä (6) kertoimilla  $n$  ja  $m$  selvennetään, että hiilivetyketjut voivat olla erimittaisia mutta silti ne hapettuvat saman reaktion kautta ainoastaan muodostaen eri määrän hiilidioksidia ja vettä [17]. Kaikki DOC:in hapetusreaktiot eivät kuitenkaan ole hyödyllisiä vaan päinvastoin jopa haitallisia. Esimerkiksi rikkidioksidin hapettuminen rikkiatrioksidiksi johtaa rikkihapon syntymiseen reaktioyhtälöiden (7) ja (8) mukaisesti [17].

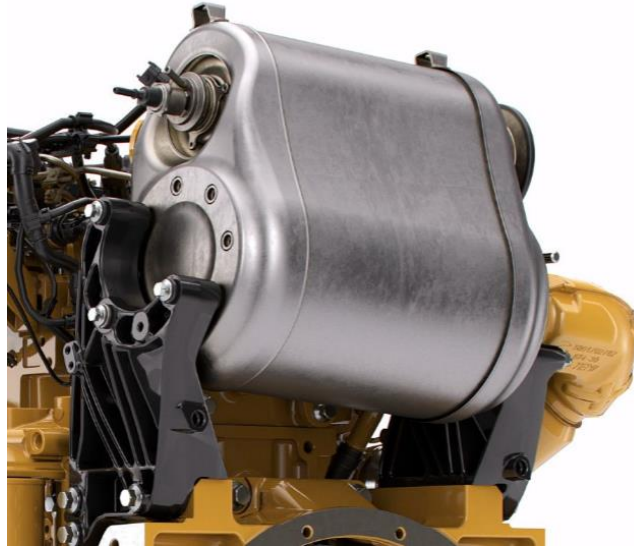


Rikkihapon syntyminen lisää moottorin pienhiukkaspäästöjä, kun kaasuna oleva rikkihappo reagoi lämpötilan laskiessa veden kanssa ja muodostaen rikkihapon suoloja. Rikkidioksidin syntyminen voidaan estää käyttämällä rikitöntä polttoainetta. [9, s.21] On myös mahdollista käyttää heikkotehoisempaa katalysaattoria mutta samalla katalysaattorin hiilimonoksidin ja hiilivetyjen hapettamiskyky heikkenee.

Toinen mahdollisesti haitallinen reaktio on typpimonoksidin hapettuminen typpidioksidiksi reaktion (9) mukaisesti [9, s.20].



Periaatteessa typpidioksidi on myrkyllisempää kuin typpimonoksidi mutta sillä voidaan parantaa DPF:n ja myös mahdollisen SCR:n tehokkuutta [9, s.20]. Kuvassa 3.4 on Caterpillar C3.4B dieselmoottorin hapetuskatalysaattori. Kuvassa näkyy myös suutin urealle SCR-järjestelmään.

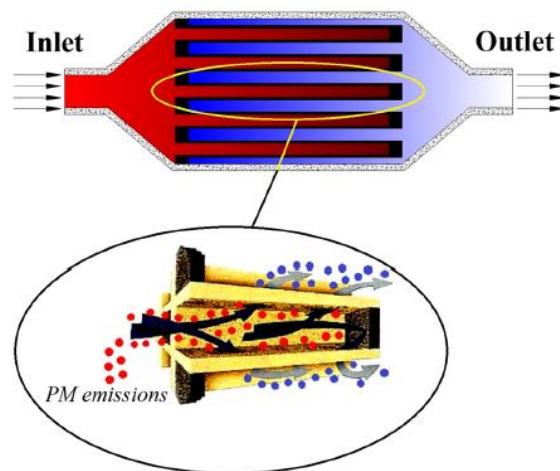


*Kuva 3.4 Caterpillar C3.4B dieselmoottorin DOC [19]*

Hapetuskatalysaattorin metallikuorien sisällä on kennomainen tiheä rakenne, jotta katalysaattorin sisälle saadaan mahdollisimman suuri pinta-ala, joka kuitenkin haittaa mahdollisimman vähän pakokaasujen kulkua [9, s.20]. Katalysaattorin kennosto on päällystetty ohuella kerroksella esimerkiksi platinalla tai palladiumilla [9, s.21].

### 3.2.2 DPF

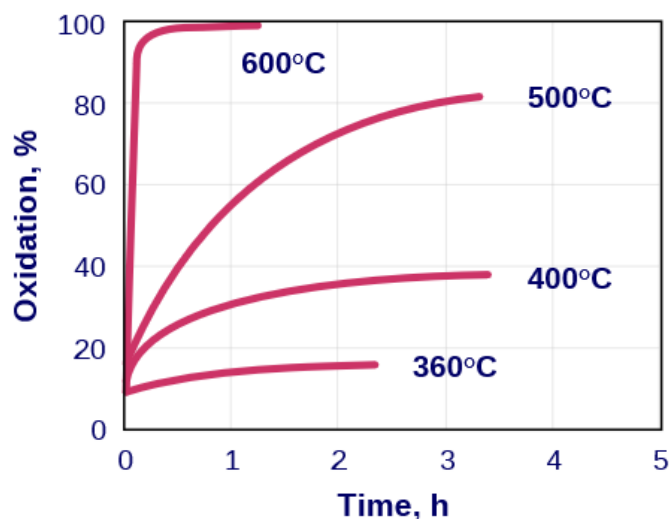
DPF (Diesel Particular Filter) on pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston osa, joka vähentää pakokaasusta partikkeleita kuten nokea. DPF on mekaaninen suodatin, joka kerää pakokaasuista hiukkaset mutta päästää kaasumaiset aineet vapaasti lävitseen [20]. Kuvassa 3.5 on periaatekuva DPF:n rakenteesta ja toiminnasta.



*Kuva 3.5 DPF:n periaatteellinen rakenne [9, s.21]*

Hiukkassuodatin koostuu periaatteessa samanlaisista yhdensuuntaisista kanavista kuin hapetuskatalysaattori mutta hiukkassuodattimissa vierekkäisten kanavien eri päät on suljettu [9, s.21]. Tästä johtuen pakokaasut eivät pääse suoraan suodattimen läpi, vaan ne joutuvat kulkemaan suodatinseinämien läpi, jolloin hiukkaset eivät pääse jatkamaan matkaa. Hiukkaset jäävät DPF-suodattimen sisälle ja lopulta tukkivat sen täysin, mikäli hiukkasia ei poisteta suodattimesta. Suodattimen tyhjentäminen tapahtuu regeneroimalla, jolloin hiukkaset poltetaan [20]. Regenerointi voi tapahtua joko passiivisesti tai aktiivisesti.

Passiivinen regenerointi tapahtuu automaattisesti ilman erillistä ohjausta, kun olosuhteet hapettumiselle ovat sopivat. Hiukkasten hapettumiseen tarvittavaa lämpötilaa lasketaan sopivalla katalyytillä. Vaihtoehtoina katalyytille ovat happi ja typenoksidit. [9, s.21] Yksi vaihtoehto katalyytin toimittamiseksi hiukkassuodattimelle on lisätä se valmiiksi polttoaineeseen, jolloin katalyytti kulkeutuu pakokaasujen mukana hiukkassuodattimelle. Hiukkassuodattimen pinta voidaan päällystää sopivalla katalyytillä, jolloin pakokaasujen saavuttaessa suodattimen, katalyytti on jo valmiina. Jos pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistossa käytetään hapetuskatalysaattoria, voidaan sen tuottamaa typpidioksidia käyttää katalyyttinä hapetusreaktiossa. [9, s.22] Dieselmootoreiden pakokaasujen lämpötila asettuu 400 °C tuntumaan, joka ei kuvan 3.6 mukaisesti riitä nokihiukkasten täydelliseen hapettumiseen [21].



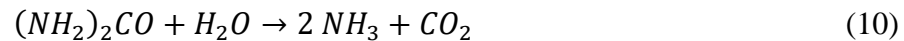
**Kuva 3.6** Nokihiukkasten hapettuminen eri lämpötiloissa [21]

Kuvasta 3.6 nähdään, että hapettuaakseen täydellisesti ja nopeasti, noki tarvitsee noin 600 °C olevan lämpötilan. Passiivisessa regeneroinnissa täydelliseen hapettumiseen tarvittavaa lämpötilaa alennetaan katalyyteilla [22]. Aktiivisessa regeneroinnissa hiukkassuodattimen lämpötila nostetaan riittävän korkeaksi, jolloin regenerointi tapahtuu nopeasti ja täydellisesti. Lämpötilan nostamiseen tarvittava lisäenergia saadaan usein polttoaineesta. Pakokaasujen lämpötilaa ohjaa moottorin ECU, joka antaa ohjauskäskyn regeneroinnille tarpeen vaatiessa. Lämpötilaa voidaan nostaa sylintereiden sytytyksen

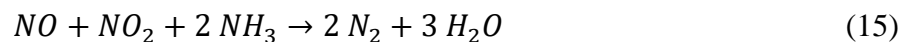
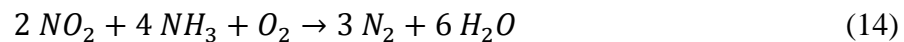
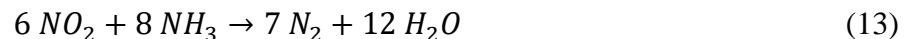
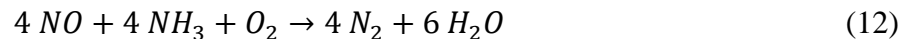
ajoitusta muuttamalla myöhäisemmäksi, jolloin sylinteriin ehtii enemmän polttoainetta ja lämpöä syntyy enemmän. Toinen vaihtoehto on polttaa polttoainetta pakokaasujen joukossa tai ohjata lämpö erillisestä polttimesta pakokaasuihin. Sähköä on myös mahdollista käyttää pakokaasujen lämmittämiseen. Esimerkiksi suodattimen kennorakenne voidaan valmistaa sähköä johtavasta materiaalista, jolloin se toimii sekä suodattimena että regeneroinnin vaatimana lämmönlähteenä. [22]

### 3.2.3 SCR

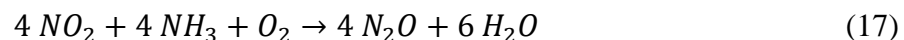
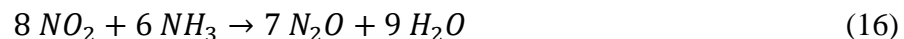
SCR (Selective Catalytic Reduction) on pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteiston osa, joka laskee pakokaasujen typen oksidien (NO<sub>x</sub>) määrän hyväksytylle tasolle. SCR pelkistää typen oksideista typpeä ja vettä. Reaktiossa käytetään katalyyttina urea-vesiliuosta (DEF, Diesel Emissions Fluid). Urean reagoi vedessä veden kanssa syntyy reaktion (10) mukaisesti ammoniakkia ja hiilidioksidia [9, s.22].



Urealiuos suihkutetaan pakokaasuihin, jolloin liuoksen ammoniakki reagoi pakokaasujen typen oksidien kanssa muodostaen typpeä ja vettä. Reaktiot (11)-(15) esittävät eri tavat, joilla pelkistyminen voi tapahtua [23].

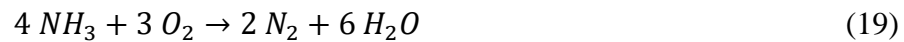


Reaktioiden (11)-(15) esittämät pelkistymisreaktiot ovat SCR-järjestelmässä halutut reaktiot mutta mikäli pakokaasuissa on runsaasti typpidioksidia, on mahdollista, että reaktioiden (16) ja (17) mukaisesti syntyy dityppioksidia eli ilokaasua [23].

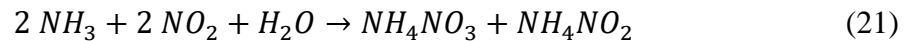


Myös reaktiot, jossa ammoniakki hapettuu, ovat mahdollisia SCR-järjestelmässä, koska läsnä on aina runsaasti happea. Ammoniakin hapettuessa siitä syntyy reaktioiden (18)-(20) mukaisesti joko dityppioksidia, typpeä tai typpimonoksidia sekä vettä [23].

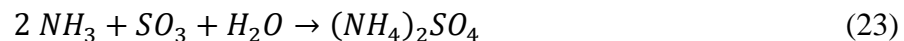
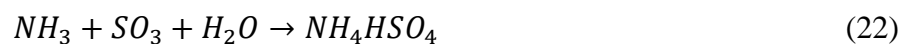




Matalissa lämpötiloissa (alle 200 °C) ammoniakista, typpiidioksidista ja vedestä saattaa muodostua ammoniumnitriittiä sekä ammoniumnitraattia reaktion (21) mukaisesti [23].

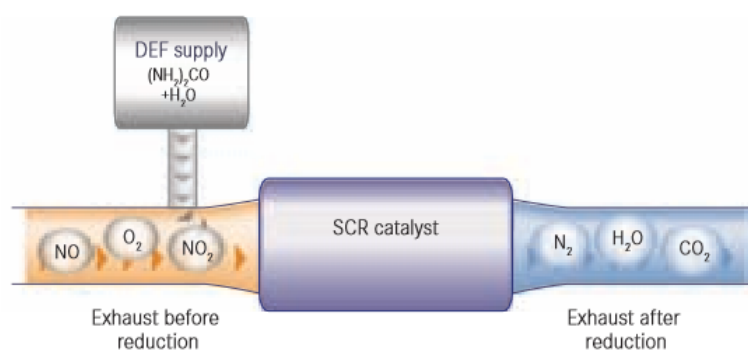


Dieselin pakokaasut sisältävät rikinyhdisteitä, jotka voivat reagoida ammoniakin ja veden kanssa muodostaen ammoniumsulfaattia ja ammoniumvetysulfaattia reaktioiden (22) ja (23) mukaisesti [23].



Matalissa lämpötiloissa (alle 250 °C) erityisesti ammoniumsulfaatti saattaa tukkia SCR-järjestelmän ja estää moottorin käyttämisen [23].

SCR-järjestelmä vaatii toimiakseen tehokkaasti sopivan lämpötilan ja oikean määrän urea-liuosta. Dieselmootoreiden jälkikäsitteilylaitteistoissa on useita erilaisia antureita, joilla taataan, että ilmaan pääsevät pakokaasut täyttävät vaatimukset. Jälkikäsitteilyn eri vaiheissa voidaan mitata kaasujen lämpötilaa, typpioksidi-pitoisuutta ja SCR-laitteiston lopuksi vielä ammoniakki-pitoisuutta. Mittausten perusteella ECU ohjaa urean suihkutusta siten, että vaaditut NO<sub>x</sub>-pitoisuudet toteutuvat mutta ylimääräistä ammoniakkaa ei poistu pakokaasujen mukana. Anturoinnit ja mittaukset vaihtelevat eri moottorivalmistajilla, erilaisilla jälkikäsitteilylaitteistokokoonpanoilla sekä eri teholuokan moottoreilla. SCR-laitteisto vähentää pakokaasujen typpioksideista jopa 90 % [9, s.23]. Kuvassa 3.7 on esitetty SCR-järjestelmän periaatteellinen rakenne.



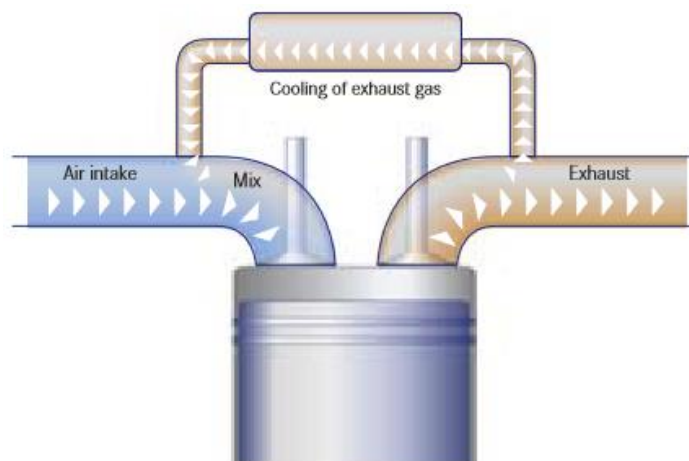
**Kuva 3.7** SCR-järjestelmän periaatteellinen rakenne ja toiminta [24, s.5]

SCR-järjestelmään kuuluu olennaisena osana urea-liuos ja suihkutus pakokaasuihin. Liuoksessa urean pitoisuus on 32,5% ja sitä myydään kaupanimellä AdBlue [25]. Ureaa tarvitaan vajaa 5 % käytetystä polttoaineen määrästä, joten käytännössä diesel- ja

ureatankit mitoitetaan siten, että urea riittää vähintään yhtä pitkään kuin tankillinen dieseliä [24, s.5]. Urea johdetaan tankistaan letkuja pitkin moottorille. Letkut ovat lämmitettäviä, koska urea jäätyy lämpötilassa  $-11\text{ °C}$  [25]. Myös tankissa oleva urea täytyy olla mahdollista sulattaa, joten sitäkin täytyy lämmitellä. Ureatankin lämmitys voidaan hoitaa esimerkiksi kierrättämällä tarvittaessa dieselmoottorin jäähdytysnestettä tankissa.

### 3.2.4 EGR

EGR (Exhaust Gas Recirculation) on järjestelmä, jolla osa pakokaasuista ohjataan takaisin sylintereihin. Ennen kuin pakokaasuja johdetaan takaisin sylintereihin, sitä jäähdytetään, jolloin palamisreaktio tapahtuu sylintereissä alhaisemmassa lämpötilassa. Pakokaasut myös korvaavat osan hapesta, joka vaikuttaa alentavasti palolämpötilaan. [24, s.5] Kuvassa 3.8 on esitetty EGR:n periaatteellinen toiminta.



*Kuva 3.8 EGR:n periaatteellinen toiminta [24, s.5]*

EGR-järjestelmää käytetään alentamaan typpioksidi-pitoisuuksia. Alemmassa lämpötilassa tapahtuva palaminen alentaa merkittävästi  $\text{NO}_x$ -pitoisuuksia eli tekniikka on tehokas eikä sen kanssa tarvitse välttämättä käyttää SCR-järjestelmää. EGR-tekniikan huono puoli on kuitenkin pienhiukkasten määrän kasvaminen pakokaasuissa, joten DPF-suodatin on usein välttämätöntä asentaa, jotta pienhiukkasrajat eivät ylity. [24, s.5]

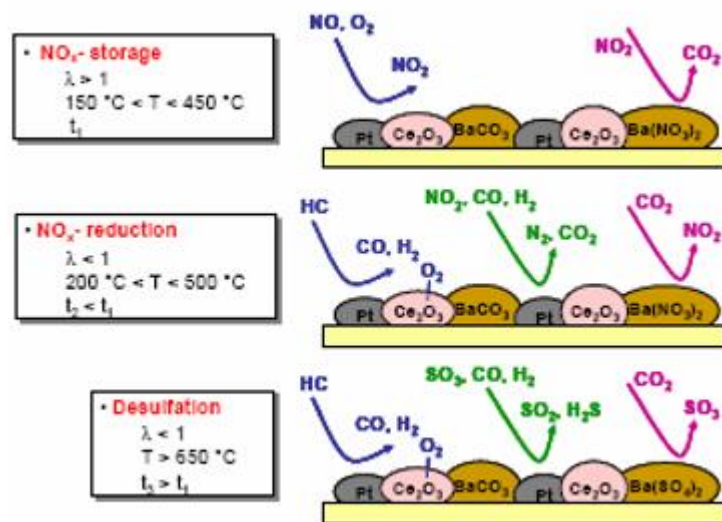
### 3.2.5 LNT

LNT (Lean  $\text{NO}_x$  Trap) on järjestelmä, jolla voidaan vähentää typpioksidien määrää pakokaasuissa. Järjestelmää voidaan kutsua myös nimillä NSR ( $\text{NO}_x$  Storage Reduction) tai NAC ( $\text{NO}_x$  Absorber Catalyst) [26]. Järjestelmä koostuu kolmesta pääkomponentista. Osat ovat hapetuskatalysaattori, joka on platinaa, adsorbentti, joka on bariumia ja/tai muita oksideja sekä pelkistyskatalysaattori, joka on rodiumia [26]. Kun moottori toimii laihalla polttoaineseoksella, syntyvä typpimonoksidi reagoi hapen kanssa hapetuskatalysaattorissa ja muodostaa typpidioksidia [27, s. 2]. Pakokaasuissa jo valmiina oleva ja



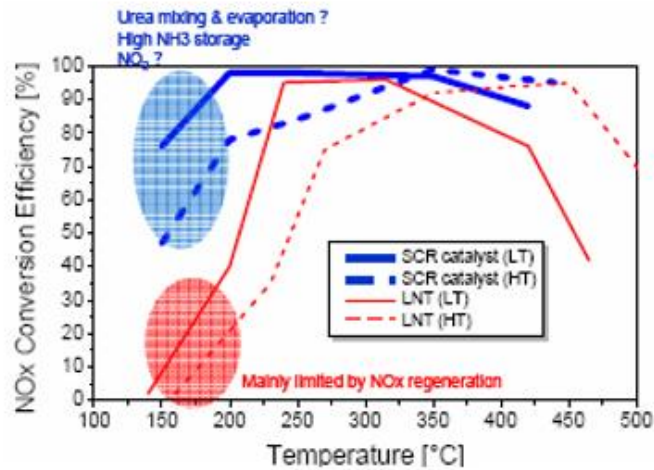
hapetuskatalysaattorissa syntyvä typpidioksidi sitoutuu kemiallisesti adsorbenttiin bariumnitraattina.

Kun adsorbentti ei pysty sitoa enempää typpidioksidia, täytyy adsorbentti puhdistaa regeneroinnilla. Regenerointi vaatii pakokaasujen happipitoisuuden laskemista, joka voidaan saavuttaa muuttamalla moottorin polttoaineseos rikkaammaksi, jolloin happi korvautuu hiilivedyillä. Vaihtoehtoisesti pakokaasuihin voidaan lisätä dieseliä tai hiilimonoksidia ja vetyä. Regeneroinnin aikana adsorbenttiin sitoutunut typpidioksidi reagoi muodostaen typpikaasua ja esimerkiksi vettä tai hiilidioksidia. Kuvassa 3.9 on kuvattu LNT-järjestelmän kolme toimintavaihetta: typenoksidien varastointi polttoaineseoksen ollessa köyhää, rikkaan polttoaineseoksen aikainen puhdistus ja rikkiyhdisteiden poistaminen.



**Kuva 3.9** LNT-järjestelmän kolme eri toiminta vaihetta [27, s.3]

LNT-järjestelmän heikkous verrattuna SRC-tekniikkaan on sen rajoittuneempi käyttölämpötila-alue. Kuvasta 3.10 nähdään, että sekä SCR- että LNT-järjestelmien tehokkuus laskee selkeästi, kun lämpötila laskee.



*Kuva 3.10 LNT ja SCR tekniikoiden vertailu [27, s.4]*

LNT-järjestelmissä käyttölämpötilaa rajoittaa regenerointi. Regenerointi tarvitsee riittävän korkean lämpötilan, jotta bariumnitraatti tulee epävakaaksi ja hajoaa bariumoksidiksi ja typpimonoksidiksi tai -dioksidiksi sekä hapeksi ennen typenoksidien muutosta typeksi. [27, s.5]

### 3.3 Tier 4 Final / Stage IV

Vuonna 1994 Yhdysvaltain ympäristösuojeluvirasto EPA (United States Environmental Protection Agency) esitteli ensimmäisen ei-tieliikenneajoneuvojen dieselmootoreiden päästöjä rajoittavan Tier 1 standardin. Tier 1 astui voimaan vuonna 1996. [28] Kuvassa 3.10 taulukko, jossa on eri väreillä esitetty Tier päästörajoiden voimaantulo dieselmootoreiden eri teholuokissa 2000-luvulla.

kW	hp	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0-7	0-10					7.5 0.80			7.5 0.40							
8-18	11-24					7.5 0.80			7.5 0.40							
19-36	25-49				7.5 0.60				7.5 0.30					4.7 0.03		
37-55	50-74				7.5 0.40				4.7 0.30	Option 1*				4.7 0.03		
									4.7 0.40	Option 2*			4.7 0.03			
56-74	75-99				7.5 0.40				4.7 0.40							0.40 0.19 0.02
75-129	100-174			6.6 0.30				4.0 0.30					3.4 0.19 0.02			0.40 0.19 0.02
130-224	175-299			6.6 0.20												
225-449	300-599	6.4 0.20						4.0 0.20				2.0 0.19 0.02			0.40 0.19 0.02	
450-559	600-749		6.4 0.20													
≥ 560	≥ 750						6.4 0.20						3.5 0.19 0.10			3.5 0.19 0.04

\*In the 50 to 75 horsepower category there are two options. Option 1 requires a reduced PM level (.30 vs .40) but allows Final Tier 4 to be delayed one year (2013)  
NOTE: The vertical dashed lines separating the years show when the seven-year life of the Tier 2/3 Equipment Flexibility Provision ends and engines can no longer be placed in vehicle production.

#### Legend

EPA	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Interim Tier 4	Final Tier 4
EU	Stage I	Stage II	Stage III A	Stage III B	Stage IV

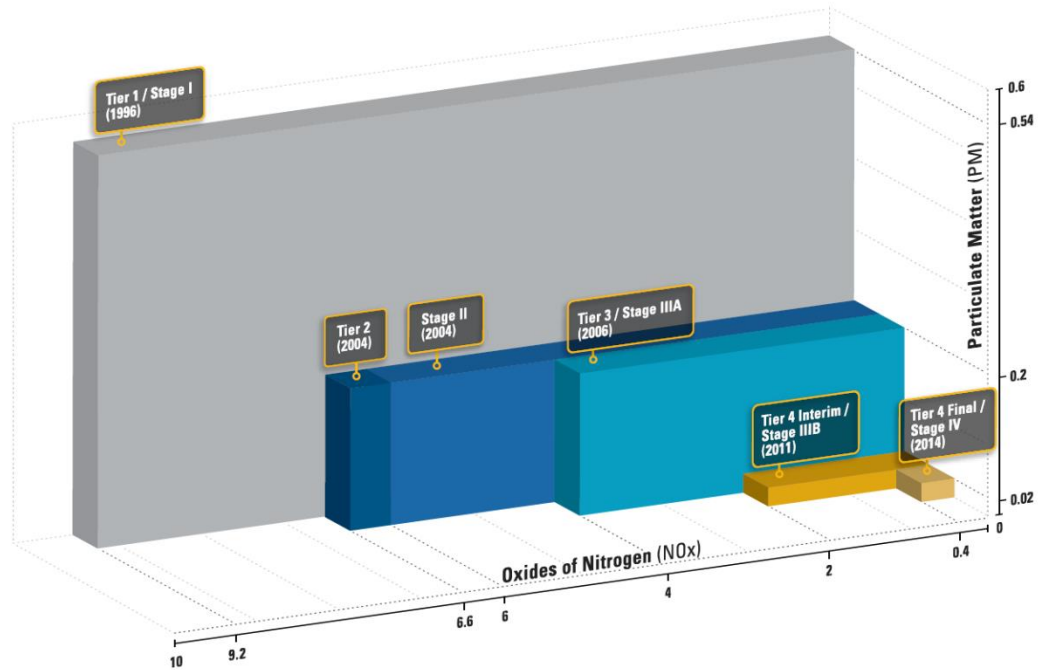
#### Examples

NO <sub>x</sub>	2.0
NMHC	0.19
PM	0.025
NMHC + NO <sub>x</sub>	7.5
PM	0.80

2.0, the maximum amount of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) allowed in g/kWh.  
0.19, the maximum amount of nonmethane hydrocarbons (NMHC) allowed in g/kWh.  
0.025, the maximum amount of particulate matter (PM) allowed in g/kWh.  
7.5, the maximum amount of NMHC + NO<sub>x</sub> allowed in g/kWh.  
0.80, the maximum amount of PM allowed in g/kWh.

### Kuva 3.11 Tier päästörajojen voimaantulo 2000-luvulla eri teholuokissa [29, s.5]

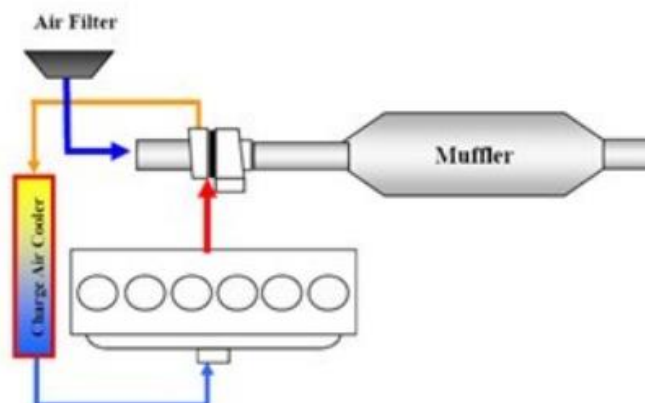
Tier päästörajoitukset ovat tulleet voimaan moottorin teholuokasta riippuen hieman eriaikoina. Tier 2 rajoitukset astuivat voimaan vuosien 2001-2005 välisenä aikana [28]. Tier 2 kiristi selvästi sallittuja päästöjä. Päästörajoitukset koskevat pakokaasujen sisältämien typen oksidien (NO<sub>x</sub>) ja hiukkasten (PM) määrää. Myös hiilivetyjen (HC) ja hiilimonoksidin (CO) määrää rajoitetaan mutta merkittävimmät rajoitukset kohdistuvat typen oksideihin ja hiukkasiin [29]. Kuvassa 3.12 on eri Tier normeissa sallitut määrät sekä typen oksideille että hiukkasille dieselmootoreille teholtaan 130-560 kW (175-750 hp).



**Kuva 3.12** Tier ja Stage päästörajoitusten NO<sub>x</sub> ja hiukkasrajat 130-560 kW dieselmootoreille [30, s.3]

Tier 3 astui voimaan vuosien 2006 ja 2008 välisenä aikana. Se kiristi ainoastaan typen oksidien määrän rajaa. Tier 1-3 normien päästörajat pystytään saavuttamaan ilman erilisiä jälkikäsittelylaitteita pelkästään moottoritekniikan hyvällä suunnittelulla [24, s.5]. Moottorin polttoaineen syöttöä ja palotapahtumaa säätämällä päästään haluttuihin tavoitteisiin. Kuvassa 3.13 on esimerkki moottoriarkkitehtuurista, jolla Tier 3 päästörajat on mahdollista saavuttaa.

### Tier 3 Architecture

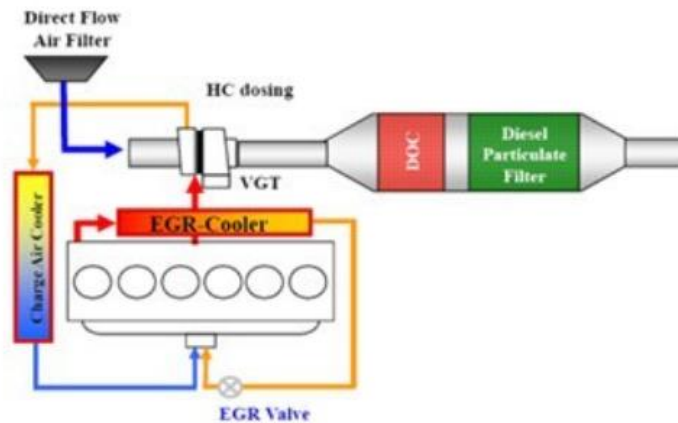


**Kuva 3.13** Esimerkki Tier 3 dieselmootorin rakenteesta [31]

Tier 4 Interim otettiin käyttöön vuosien 2011 ja 2012 välisenä aikana ja se laskee merkittävästi sekä typenoksideiden ja hiukkasten sallittua määrää. Tier 4i dieselmootoreissa

päästönormien täyttämiseen vaaditaan pakokaasujen jälkikäsittelyä. Kuvassa 3.14 on esitetty yksi mahdollinen moottoriarkkitehtuuri, jolla normit voidaan täyttää. Kyseisessä esimerkissä DOC:lla pidetään hiilivetyjen ja hiilimonoksidin määrät sallituissa rajoissa. Hiukkasten määrää rajoitetaan DPF:llä ja typenoksidien syntymistä vähennetään EGR:llä.

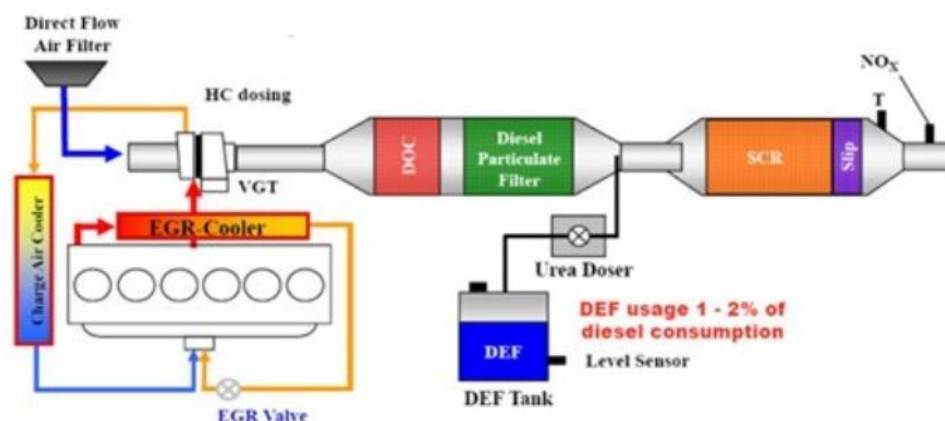
#### Tier 4 Interim: EGR/DPF



*Kuva 3.14 Esimerkki Tier 4 Interim dieselmoottorin rakenteesta [31]*

Vuosien 2013 ja 2015 välisenä aikana otettiin käyttöön Tier 4 Final normien mukaiset päästörajat dieselmoottoreille. Tier 4 Final normit laskivat ainoastaan sallittua typenoksidien määrää. Tier 4i dieselmoottoreissa käytetyllä EGR-tekniikalla ei saada poistettua typenoksideja yleensä riittävän hyvin, joten Tier 4 Final moottoreissa tarvitaan SCR-järjestelmä [24, s.5]. Kuvassa 3.15 on esitetty yksi mahdollinen Tier 4 Final moottoriarkkitehtuuri.

#### Tier 4 Final: (Presumed) EGR/DPF/SCR



*Kuva 3.15 Esimerkki Tier 4 Interim dieselmoottorin rakenteesta [31]*

Tier 1-3 normit eivät puuttuneet polttoaineiden rikkipitoisuuksiin. Tier 4 normit sen sijaan rajoittavat rikin määrää, koska pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistot eivät kestä

rikistä muodostuvia yhdisteitä. [32] Kuvassa 3.16 on esitetty polttoaineille sallitut rikkipitoisuudet 2000-luvulla.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EPA	5000 ppm						500 ppm			15 ppm					
EU	2000 ppm						1000 ppm			10 ppm					

**Kuva 3.16** Polttoaineiden sallitut rikkipitoisuudet 2000-luvulla [29, s.7]

Stage normit ovat Euroopan vastaavat standardit kuin Pohjois-Amerikan Tier normit. Euroopassa ensimmäiset Stage I päästörajoitukset otettiin käyttöön vuonna 1999 eli hieman myöhemmin kuin Tier 1 [33]. Päästörajat ovat vastaavat Tier- ja Stage-normeissa mutta moottoreiden teholuokat, joihin ne vaikuttavat, ovat erilaiset. Kuvassa 3.17 taulukko, jossa on eri väreillä esitetty Stage päästörajojen voimaantulo dieselmootoreiden eri teholuokissa 2000-luvulla.

kW	hp	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0-7	0-10	Not regulated in EU														
8-18	11-24	Not regulated in EU														
19-36	25-49	8.0 1.5 0.80						7.5 0.60								
37-55	50-74				7.0 1.3 0.40				4.7 0.40					4.7 0.025		
56-74	75-99				7.0 1.3 0.40				4.7 0.40				3.3 0.19 0.025			0.40 0.19 0.025
75-129	100-174			6.0 1.0 0.30				4.0 0.30					3.3 0.19 0.025			0.40 0.19 0.025
130-559	175-749		6.0 1.0 0.20				4.0 0.20					2.0 0.19 0.025			0.40 0.19 0.025	
≥560	≥750	Not regulated in EU														

\*October 1, 2014

#### Legend

EPA	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Interim Tier 4	Final Tier 4
EU	Stage I	Stage II	Stage III A	Stage III B	Stage IV

New emissions regulations take effect January 1 of the year indicated by color change unless otherwise noted.

#### Examples

NO <sub>x</sub>	2.0
NMHC	0.19
PM	0.025
NMHC+NO <sub>x</sub>	7.5
PM	0.80

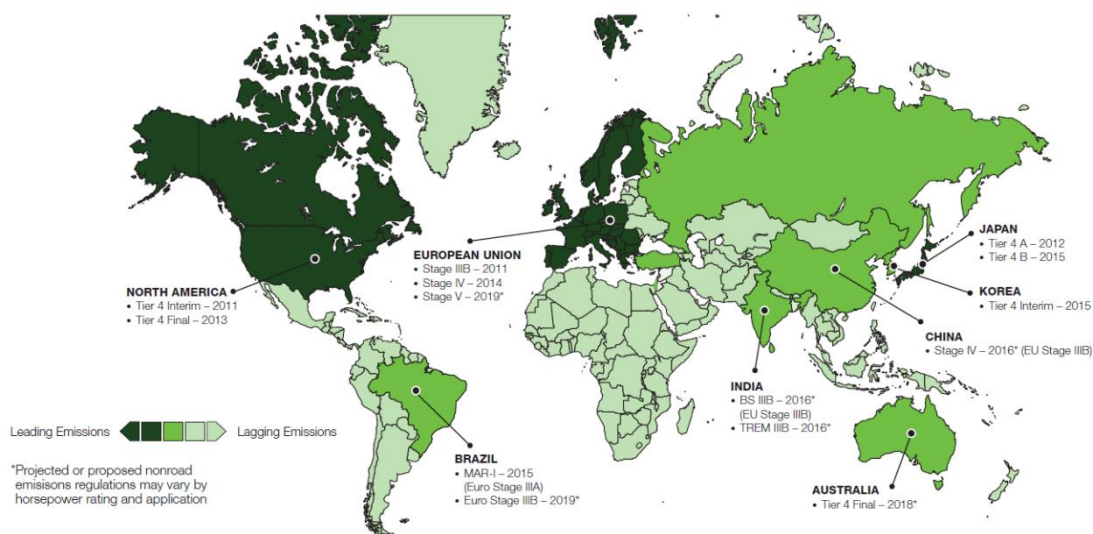
2.0, the maximum amount of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) allowed in g/kWh.  
0.19, the maximum amount of nonmethane hydrocarbons (NMHC) allowed in g/kWh.  
0.025, the maximum amount of particulate matter (PM) allowed in g/kWh.  
7.5, the maximum amount of NMHC + NO<sub>x</sub> allowed in g/kWh.  
0.80, the maximum amount of PM allowed in g/kWh.

**Kuva 3.17** Stage päästörajojen voimaantulo 2000-luvulla eri teholuokissa [29, s.6]

Euroopassa suunnitellaan Stage V päästönormeja, jotka ovat mahdollisesti tulossa voimaan 2019. Niissä päästörajoitukset ollaan laajentamassa koskemaan koko dieselmootoreiden tehoaluetta. [33] Samalla myös sallittua hiukkasten määrää ollaan laskemassa. Pohjois-Amerikassa myös EPA saattaa julkaista Tier 5 päästörajoitukset. Myös Tier 5

rajoittaisi hiukkasten määrää entisestään [34]. Tier 4 Final ja Stage IV päästörajoitukset rajoittavat ainoastaan hiukkasten massaa eikä hiukkasten koolla ole merkitystä. Pienemmät hiukkaset ovat kuitenkin vaarallisempia ihmisille, joten niiden määrää saatetaan rajoittaa. Moottoreiden valmistajille mahdolliset uudet Tier 5 / Stage V päästörajoitukset eivät aiheuttaisi samanlaista laitteistojen lisäystä moottoreihin kuin hyppäys Tier 3 / Stage 3 moottoreista Tier 4 Final / Stage IV moottoreihin [34].

Tier 4 Final / Stage IV päästönormit ovat voimassa Pohjois-Amerikassa, Japanissa sekä Euroopassa pois lukien Ukraina ja Valko-Venäjä. Kuvassa 3.18 on esitetty kartta, jossa on eroteltu maat, joissa on käytössä Tier 4 Final, Stage IV ja muut päästörajoitukset voimassa.



**Kuva 3.18** Maailman eri maiden voimassa olevat päästörajoitukset [35]

Brasilia, Intia, Kiina ja Koreat ottavat Tier 4 Interim / Stage III B päästönormit käyttöön lähivuosina. Lisäksi Australia ottaa käyttöön Tier 4 Final / Stage IV päästönormit käyttöön. On kuitenkin paljon maita, joissa ei ole voimassa mitään päästörajoituksia tai käytössä ovat vasta Tier 2 / Stage 2 normit. [35]



## 4. CATERPILLAR

Caterpillar on yhdysvaltalainen yritys, joka on yksi maailman suurimpia maarakennus- ja kaivoskoneiden, diesel- ja maakaasumoottoreiden, teollisten kaasuturbiinien sekä diesel/sähkö vetureiden valmistajia. Caterpillar tunnetaan erityisen hyvin maanrakennuskoneistaan, joita ovat esimerkiksi kaivinkoneet, puskutraktorit sekä maansiirtoautot. Caterpillarin liikevaihto vuonna 2014 oli 55,2 miljardia dollaria, josta liikevoittoa kertyi 3,7 miljardia dollaria. Liikevaihdosta noin 40 % kertyi Yhdysvalloista. Vuonna 2014 Caterpillar työllisti maailmanlaajuisesti noin 115 000 ihmistä. [35]

Yli 85 vuoden ajan Caterpillar on tarjonnut asiakkailleen erilaisia moottori- ja voimansiirtoratkaisuja. Asiakkaina ovat eri teollisuuden alat muun muassa maatalous, metsä- ja kaivosteollisuus, maanrakennus sekä voimantuotanto. Moottoriratkaisut voidaan jakaa neljään pääryhmään: generaattorit, teollisuuden dieselmoottorit, laivojen dieselmoottorit sekä öljy- ja kaasuteollisuudenmoottorit. Moottoreiden teho vaihtelee 5 ja 16 000 kW:n välillä ja moottoreita käytetään ympäri maailmaa ääriolosuhteissa. [37] Kuvassa 4.1 on Caterpillarin tarjoama C3.4B diesel-voimayksikkö, jossa moottorin mukana tulee muun muassa jäähdytinsyöttö ja ECU valmiiksi asennettuina.

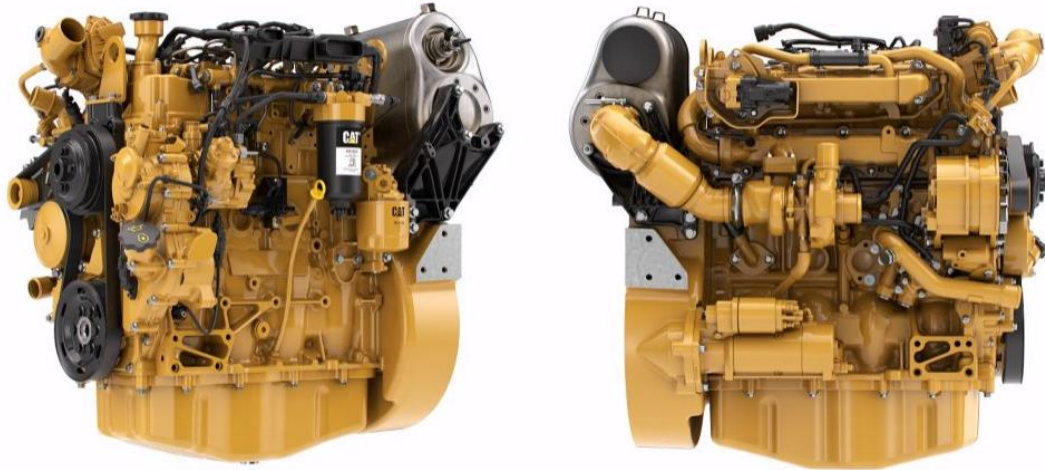


**Kuva 4.1** Caterpillar C3.4B diesel-voimayksikkö [38]

Caterpillarin edustajana Suomessa toimii Wihuri Oy. Wihuri toimii kolmella eri toimialalla, jotka ovat päivittäistavaratukkutoiminta, tekninen tukkukauppa sekä liikelento-toiminta. Wihurin liikevaihto vuonna 2012 oli noin 1,8 miljardia euroa ja työntekijöitä oli noin 5 000. [39]



Metson valitsema dieselmoottori uuteen ST-moottorimoduuliin on C3.4B. C3.4B on Caterpillarin 45 - 90 kW:n (60 – 120.7 hp) suora 4-sylinterinen 3,4 litrainen dieselmoottori. Moottori täyttää Tier 4 Final ja Stage IV päästönormit. [40] Kuvassa 4.2 on yli 56 kW:n C3.4B dieselmoottori.



*Kuva 4.2 Caterpillar C3.4B dieselmoottori [40]*

C3.4B Tier 4 Final moottorista on oikeastaan kaksi erilaista versiota: teholtaan alle 56 kilowattinen ja yli 56 kilowattinen. Alle 56 kW:n moottori on kooltaan noin 610 mm pitkä, 650 mm leveä ja 830 mm korkea. Se painaa ilman nesteitä noin 250 kg. Tarkat mitat ja paino riippuvat moottoriin valituista optioista. [41] Moottori on saatavana teholtaan joko 45, 47, 50 tai 55,4 kilowattisena. 55,4 kW:n moottori saavuttaa huipputehonsa joko moottorin pyörimisnopeudella 2200 rpm tai 2500 rpm. 2200 rpm:n versiossa huippuvääntö saavutetaan 1400 rpm:llä, jolloin vääntöä saadaan 318 Nm. 2500 rpm:n versiossa huippuvääntö saavutetaan 1600 rpm:llä, jolloin vääntöä saadaan 291 Nm. 45 ja 50 kW:n moottorit saavuttavat huipputehonsa 2200 rpm:llä ja 47 kW:n moottori 2500 rpm:llä. [42, s.22] Pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteistossa on DOC ja DPF [41].

Yli 56 kilowattinen moottori on mitoiltaan noin 610 mm pitkä, 620 mm leveä ja 800 mm korkea. Moottori painaa noin 270 kg ilman nesteitä. Tarkat mitat ja paino riippuvat moottoriin valituista optioista. [40] Moottori on saatavana teholtaan joko 63, 66, 70, 75, 83, 86 tai 90 kilowattisena. 83 kW:n moottori saavuttaa huipputehonsa moottorin pyörimisnopeudella 2200 rpm. Huippuvääntö saavutetaan 1400 rpm:llä, jolloin vääntöä saadaan 450 Nm. 86 kW:n moottori saavuttaa huipputehonsa moottorin pyörimisnopeudella 2500 rpm. Huippuvääntö saavutetaan 1600 rpm:llä, jolloin vääntöä saadaan 420 Nm. 63, 70, 83 ja 90 kilowatin moottorit saavuttavat huipputehonsa 2200 rpm:llä. 66 ja 86 kilowatin moottorit saavuttavat huipputehonsa 2500 rpm:llä. 75 kW:n moottorista on sekä 2200 että 2500 rpm:n versiot. [42, s.23] Päästöt pidetään säännösten määräämissä

rajoissa DOC:lla ja SCR:llä. Metson valitsema moottori prototyyppiin on 75 kW versio C3.4B:stä, jonka maksimi kierrosluku on 2200 rpm:ää.

Moottorin standarditoimitus sisältää seuraavat komponentit:

- Ilmanottojärjestelmä
  - Imusarja
  - Pakosarja
- Ohjausjärjestelmä
  - Starttimoottori
  - Laturi
  - Moottorin ohjausyksikkö (ECU)
  - Antureita
    - Moottorin nopeus
    - Öljyn paine
    - Jäähdytysnesteen lämpötila
- Jäähdytysjärjestelmä
  - Jäähdytysyksikkö
- Vauhtipyörä ja vauhtipyörän kotelointi
  - Vauhtipyörän kotelo
  - Vauhtipyörä ja startin hammasratas
- Polttoainejärjestelmä
  - Polttoaineen suodattimet
  - Yhteispaineruiskutuksen polttoainepumppu ja suuttimet
- Voitelujärjestelmä
  - Voiteluöljyn suodattimet
- Yleistä
  - Kylmäkäynnistys -20 °C asti
  - Maalaus Caterpillarin keltaisella
- Tier 4 Final / Stage IV jälkikäsittelylaitteisto
  - Hapetuskatalysaattori (DOC)
  - SCR-järjestelmä
  - SCR-järjestelmän apulaitteet [40]

Yli 56 kW:n ja alle 56 kW:n C3.4B moottorit ovat sähköisesti huomattavan erilaisia. Molemmista itse dieselmoottoreiden vaatimat sähköistykset ovat vastaavat mutta pakokaasujen jälkikäsittelylaitteistojen sähköistykset ovat täysin erilaiset. DPF vaatii erilaisen anturoinnin ja ohjauksen kuin SCR, joka tarvitsee ureaa toimiakseen.

OEM:n vastuulla on asentaa moottoriin seuraavat pakolliset sähköiset komponentit yli 56 kW:n moottoreissa:

- Sulakesuojaus kytkennöille

- Avainkytkin moottorin käynnistykseen
- Moottorin varoituslamppu
- Moottorin sammutuslamppu
- Moottorin käynnistysvalmiuden osoittava lamppu
- Jälkikäsitteilylaitteiston toimintakunnon osoittava lamppu
- Alhaisen DEF tason ilmoittava lamppu
- DEF tason mittari
- ECU:n kaksi liitintä
- Moottorissa valmiina olevan sähköistyksen liittäminen OEM:n sähköihin kahdella liittimellä
- Moottorin hehkun liitin
- Moottorin diagnostiikkaliitin
- Ilmanoton lämpötila-anturi
- Anturi polttoaineen veden määrälle
- Anturi mittaamaan NOx:n määrää ennen SCR:ää
- DOC:n sisäänmenon pakokaasujen lämpötila-anturi
- DEF-suutin
- SCR:n sisäänmenon pakokaasujen lämpötila-anturi
- Anturi mittaamaan NOx:n määrää SCR:n jälkeen
- Ammoniakkianturi
- SCR:n ulostulon pakokaasujen lämpötila-anturi
- DEF-pumpun syöttö
- Lämmittimien ohjausyksikön liitin
- DEF-tankin antureiden ja ohjauksen liittäminen
- DEF-tankissa kiertävän jäähdytysnesteen määrää ohjaava venttiili
- DEF-letkujen lämmitys (3 kpl) [43]

Edellä mainitut komponentit ovat pakollisia asennettavia mutta koska moottori on sähköisesti ohjattu, on ECU:lla CAN-väylä, johon OEM:n järjestelmästä voidaan liittyä. Esimerkiksi pakollisissa komponenteissa oleva lamppuilla näytettävä tieto voidaan siirtää väylää pitkin OEM:n koneen automaatiojärjestelmään, jolloin lamppuja ei enää tarvitse asentaa. Moottorin ECU:lla on myös toimintoja, joiden asentamien on OEM:n valittavissa. [43]

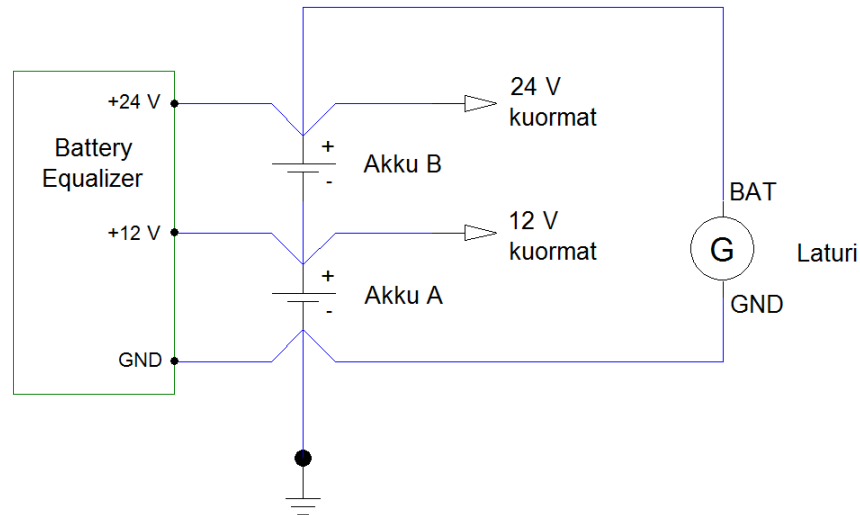
## 5. SUUNNITTELU

Metso päätti toteuttaa prototyypin uudesta mobiiliseulojen moottorimoduulista, jossa dieselmoottorina on Caterpillarin C3.4B Tier 4 Final. Tarkoituksena oli käyttää mahdollisimman paljon jo olemassa olevia osia ja rakenteita. Myöskin seulan sähköjärjestelmään pyrittiin tekemään mahdollisimman vähän muutoksia. Hyvin erilaisen moottorin johdosta sähköjä jouduttiin kuitenkin suunnittelemaan paljon uudestaan. Tässä työssä perehdytään suunnittelussa ilmenneisiin haasteisiin ja vaatimuksiin. Työssä suunniteltiin aiemmin käytössä olleen sähkökeskuksen pohjalta uusi keskus prototyyppiin sekä uusi johdinsarja. Sähkökeskuksen (Keskus: MM0431488 Kaavio: MM0431489) ja johdinsarjan (MM0431487) dokumentit on tallennettu Metson PDM-järjestelmään. Koska tämä työ on julkinen, suunnittelussa syntyneitä dokumentteja ei tähän liitetä.

### 5.1 12V vs. 24V

Moottorin sähköistyksessä ensimmäiseksi haasteeksi muodostui moottorin vaatima jännite. Moottorin ECU on saatavilla ainoastaan 12 voltisena mutta Metson mobiiliseuloissa käytettävä ohjausjännite on 24 volttia. Periaatteessa koko ohjausjärjestelmä olisi mahdollista muuttaa 12 voltiseksi mutta se ei kuitenkaan ollut järkevää tässä tapauksessa. Automaatiojärjestelmään käytettyjen Epecin moduulien nimellinen jännite on 12/24V ja toiminta-alue 10 – 30V [44]. Normaalissa käyttötilanteessa akuista ja moottorin laturilta tuleva jännite riittäisi pitämään automaatiojärjestelmän toiminnassa. Dieselmoottorin käynnistyksen aikana starttimoottorin ottama suuri virta kuitenkin laskee järjestelmän jännitettä niin paljon, että erittäin todennäköisesti automaatiojärjestelmä olisi käynnistynyt uudelleen aina moottorin käynnistyksen yhteydessä. Ratkaisu ei antaisi hyvää kuvaa laitteen laadusta ja toiminnasta.

24 voltin järjestelmissä on kaksi 12 voltin akkua sarjassa. Periaatteessa C3.4B moottorin tarvitsema 12 volttia saataisiin ottamalla jännite vain toisesta akusta. Tilanne johtaa kuitenkin siihen, että akkuja kuormitetaan ja ladataan epätasapainoisesti. Kuvan 5.1 mukainen akku A kuormittuu enemmän ja purkaantuu nopeammin. Kun akkuja ladataan yhdellä 24 voltin laturilla, akku B latautuu täyteen ennen akkua A. Lataus jatkuu edelleen, jolloin akku B kuormittuu latauksesta turhaan ja akku A jää vajaaksi. Jotta akut kuormittuvat ja latautuvat tasapainoisesti tarvitaan laite, joka tasaa akkujen jännitteet.



**Kuva 5.1** Kuva kytkennästä, jos käytetään akkujen jännitteen tasaajaa

Jännitteen tasaaja seuraa molempien akkujen jännitettä ja lataa kuvan 5.1 mukaisesti akkua A. Sopivaa laitetta etsiessä kiinnitettiin huomiota siihen, että laitteen teho riittää tasaamaan dieselmoottorin ja sen pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston vaatiman virran. Murskaus- ja seulontalaitteissa on tärkeää myös, että komponentit, joita ei voida sijoittaa sähkökeskukseen kestävä mahdollisimman hyvin pölyä ja suuriakin lämpötilamuutoksia. Teknisiltä ominaisuuksiltaan sopiva laite löydettiin mutta laitteen kustannukset olivat liian suuret, joten ratkaisua mietittiin uudelleen.

Kolmas ja valittu ratkaisu on tehdä sähköjärjestelmästä muuten 12 voltin paitsi Epecin ja hätäseispiirin osalta. Näin toimittaessa ECU:n ja jälkikäsittelylaitteiston syöttö saadaan edelleen suoraan akuilta eikä jälkikäsittelylaitteiston eri osien ottamat käynnistysvirrat aiheuta ongelmia. 24 voltia saadaan aikaiseksi hakkuriteholähteillä. Epecille riittävän virran tuottamiseksi tarvitaan kaksi 5 ampeerin teholahtetta. Tämä ratkaisu oli tarkastelluista vaihtoehdoista paras, kun tarkasteltiin sekä teknistä että taloudellista osiota yhtenä kokonaisuutena. Hakkuriteholähteet toimivat pienemmällä jännitteellä kuin Epecin moduulit, joten ne pitävät automaatiojärjestelmän käynnissä dieselmoottorin käynnistyksen aikana. Hakkuriteholähteet tuovat silti merkittäviä lisäkustannuksia sähköistykseen. Aiemmissa ST-ohjauskeskuksissa olleesta hätäseisreleestä on saatavilla ainoastaan 24 voltin versio, joten järkevin ratkaisu oli käyttää nykyistä relettä yhdessä Epecin moduulien kanssa 24 voltilla. Releen ja hätäseispiirin virran kulutus Epecin rinnalla on merkityksetön.

## 5.2 Tilantarve

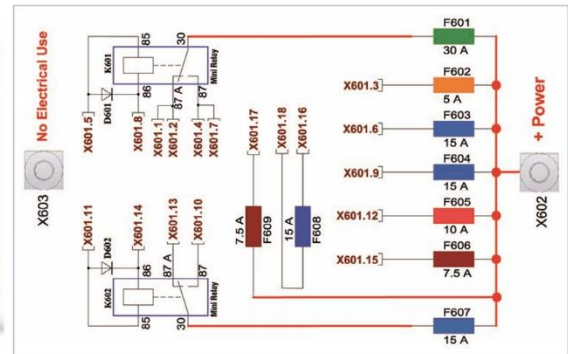
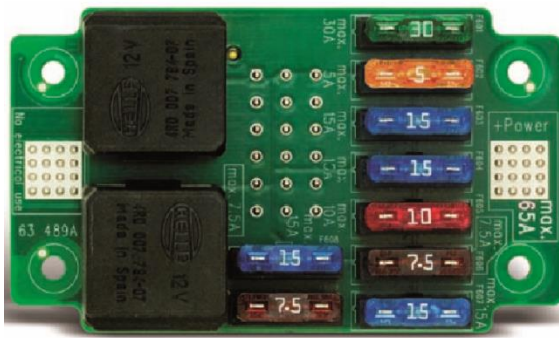
Prototyypin pohja olleisiin ST:den IC-versioiden sähkökeskukseen ja kaapelisarjaan haluttiin tehdä vain tarvittavat vähimmäismuutokset. Sähkökeskus kuitenkin oli jo valmiiksi täynnä komponentteja. Myös sivuseinillä oli jo liitinlaipan ja Epecin moduulin

lisäksi riviliittimiä ja releitä. Uusi C3.4B moottori vaatii suojakseen enemmän sulakkeita ja releitä kuin C4.4. Suunniteltavaan keskukseen tarvittavia komponentteja ei ollut mahdollista saada siististi sopimaan pohjana olleeseen keskukseen. Yhtenä vaihtoehtona prototyyppiä varten harkittiin vanhan keskuksen käyttämistä sellaisenaan ja erillistä pienempää keskusta, johon olisi sijoitettu tarvittavat komponentit. Tila on kuitenkin erittäin rajallinen myös moottorimoduulissa eikä lisäkeskukselle ollut mahdollista löytää järkevää paikkaa moduulista. Myös vanhan keskuksen ja lisäkeskuksen yhdistäminen olisi tuonut ylimääräisiä haasteita kaapelisarjaan, koska keskukset olisi pitänyt yhdistää sähköisesti.

Keskukseen tilaa saatiin muuttamalla käytettyjen riviliitinten tyyppiä. Pohjana olleessa keskuksessa on käytetty yksikerroksisia riviliittimiä, joissa yhteen liittimeen voidaan kytkeä neljä johdinta ja ne kaikki ovat toisiinsa kytkettyinä riviliittimen sisällä. Tilan säästämiseksi suurin osa riviliittimistä korvattiin nelikerroksisilla. Periaatteessa nelikerrosriviliittimet vähentävät riviliitinten tilantarpeen neljäsosaan. Käytännössä tilaa ei kuitenkaan säästy niin paljon vaan hieman vähemmän. Suuremman virran kestäviä riviliittimiä ei voida korvata vaan ne täytyy pitää ennallaan. Nelikerrosriviliittimiä käytettiin kahta eri tyyppiä. Toisessa liittintyyppissä eri kerrokset eivät olleet galvaanisesti yhteydessä toisiinsa eli käytännössä siinä on neljä perinteistä yksikerrosriviliittintä päällekkäin. Pelkästään tällaisillakin riviliittimillä olisi pärjännyt mutta käyttöjännitteen ja maan jakaminen on helpompaa, kun käytetään liittimiä, joissa eri kerrokset on yhdistetty liittimessä sisäisesti. Tällaiseen riviliittimeen voidaan kytkeä yhteensä 16 johdinta, jotka kaikki ovat galvaanisesti yhteydessä toisiinsa. Nelikerrosriviliittimet tuovat myös haasteita. Vaikka keskukseen periaatteessa syntyy lisää tilaa, niin keskuksen kaapelikourut ovat entistäkin täydemmät. Täydet kaapelikourut eivät ole haaste vain keskusvalmistajalle vaan myös huoltoon ja vianetsintään. Satunnaisesti osassa keskuksista ilmenee virheellisiä kytkentöjä tai muita muutostarpeita, jolloin kytkentöjä täytyy muokata ST:n kokoonpanovaiheessa. Mittausten ja johdotuksen helpottamiseksi jokaiseen riviliittimeen ja niiden eri kerroksiin pyrittiin jättämään vähintään yksi vapaa johdinpaikka. Vaikka vianhausta ja samalla keskuksen johdotuksesta pyrittiin tekemään mahdollisuuksien rajoissa mahdollisimman yksinkertaista, ovat riviliittimet silti erittäin tiiviisti. Näin suuria määriä nelikerrosriviliittimiä ei ole ennen Metson mobiililaitteiden sähkökeskuksissa ennen käytetty. Keskuksista saadaan samalla lisätietoa siitä, että kuinka paljon lisähaasteita kasvanut nelikerrosriviliitinten määrä tuo niin keskusvalmistajalle kuin myös kokoonpanoon.

### **5.3 Würth Elektronik 9-2 Module -piirilevy**

Suunniteltavaan keskukseen päätettiin laittaa testiin Würth Elektronikin piirilevy. Sopivimmaksi Würth Elektronikin vakiotarjonnasta todettiin 9-2 Module –piirilevy. Kuvassa 5.2 on 9-2 Module –piirilevy sekä kyseisen levyn piirikaavio.



**Kuva 5.2** 9-2 Module –piirilevy [45, s.1,3]

Piirilevylle tuodaan syöttö yhteen liittimeen kaapelikengällä ja syöttöjännitteeksi kelpaavat sekä 12 voltia että 24 voltia. Riippumatta jännitteestä levyn maksimi virta on 65 ampeeria. Levyssä on paikat 9 sulakkeelle ja kahdelle releelle. Releiden kärjille ja 8 sulakkeelle tuodaan kaikille sama syöttö. Yhden sulakkeen syöttö tuodaan piirilevyn takana olevan liittimen kautta. Liitin on 3 rivinen, 18 pinninen ja JPT/MCP yhteensopiva. [45, s.3] Liittimen kautta sekä sulakkeet että releet yhdistetään muuhun sähköjärjestelmään. Myös releiden ohjaus tuodaan liittimen kautta. Piirilevyyn sopivat sulakkeet ovat ATO-sulakkeita. ATO-sulakkeet ovat lattasulakkeita, jotka on kehittänyt Littelfuse vuonna 1976. Ne ovat edelleen ajoneuvojen standardisulakkeita. ATO-sulakkeet noudattavat värikoodausta. Pelkästään sulakkeen värin perusteella tiedetään sen virrankesto. Esimerkiksi 10 ampeerin sulake on punainen ja 15 ampeerin sininen, joita on kuvassa 5.3. [46]



**Kuva 5.3** ATO sulakkeita [46, s.1]

Piirilevyn relekantoihin sopivat releet ovat minireleitä. Myös ne ovat yleisesti käytettyjä ajoneuvoteollisuudessa. Piirilevyyn sopivia releitä on kahta tyyppiä: 4- ja 5-pinnisiä. 4-pinnisessä versiossa yhdelle pinnille tuodaan ohjausjännite releen kelalle ja toiseen nolapotentiaali kelan toiseen päähän. Kahden muun pinnin väliin on kytketty katkaisija, jota ohjataan kelalle tuotavalla ohjausjännitteellä. 5-pinnisessä versiossa kela on kytket-

ty samoin kuin 4-pinnisessä mutta minireleiden on pohjassa muiden pinnien keskellä yksi lisäpinni. Tämän pinnin ansiosta katkaisijalla on kaksi mahdollista asentoa, joissa molemmissa kärjen läpi voi kulkea virtaa. Pinniä, johon katkaisija on yhteydessä ilman kelan ohjausjännitettä, nimitetään nimellä NC (normally closed). Pinni, johon katkaisija yhdistyy kelan saadessa ohjausjännitteen, nimitetään nimellä NO (normally opened).

Piirilevyn valmiit kytkennät rajoittavat sen käyttömahdollisuuksia. Suurin rajoittava tekijä on releiden ja sulakkeiden yhteinen syöttö. Sähköisesti sopivan käyttökohteen löytäminen keskuksesta on hankalaa, sillä suurin osa sulakkeista ei ole saman syötön takana Metson mobiiliseulojen sähkökeskuksissa. Potentiaalinen kohta kuitenkin löydettiin ja koska piirilevyä haluttiin testata, se päätettiin laittaa keskukseen. Levyn molemmat releet ovat käytössä ja lisäksi 5 sulaketta saadaan hyödynnettyä. KytKentöjä jouduttiin kuitenkin suunnittelemaan hieman uudelleen, jolloin sulakkeiden kokonaismäärä kasvoi yhdellä entiseen verrattuna. Käytännössä keskuksesta saatiin säästettyä hieman tilaa käyttämällä piirilevyä. Piirilevyn kiinnitys on myös hieman haasteellinen. Koska levyn liitin on sen pohjassa, täytyy levy saada irti seinästä vähintään 50mm. Kiinnityksessä kuitenkin luotettiin keskusvalmistajan löytävän parhaan mahdollisen kiinnitystavan. Vaikka liitintä ei ole tarkoitus ottaakaan irti päivittäin, myös kytkentöjen muokkaaminen ja lisääminen on haasteellista, koska levy täytyy mahdollisesti ruuvata tarpeen vaatiessa irti kokonaan.

## 5.4 Johdinsarja

Uusi dieselmoottori vaati myös uuden kaapelisarjan. Pohjana käytettiin aiempaa C4.4 moottorin sähköistyksen IC-version kanssa käytettyä sarjaa. Käytännössä pohjana ollut sarjaa ei saatu moottorin osalta hyödynnettyä lainkaan. Myös muut Metson käyttämät Caterpillarin dieselmoottorit ovat sähköisesti hyvin erilaisia, joten moottori vaati paljon uudistetun sarjan. Moottorimoduulissa olevat hydraulikanventtiilit ja anturit sekä hätäseispainikkeet pysyivät protossa ennallaan, joten osa mallina olleesta sarjasta kävi lähes entisellään, kun siitä poistettiin kaikki moottoriin liittyvät osiot. Aiemmin moottorin vaatima johdotus oli kiinteä osa moottorimoduulin muuta johdotusta mutta C3.4B T4F vaatii huomattavasti enemmän johdotusta kuin C4.4 T3/T4i, joten sarja päätettiin muuttaa kaksi osaiseksi, jolloin asentaminen helpottuu. Samassa sarjassa tulee johdotus myös akuille, pääkytkimille ja tehonsyötölle sekä keskukseen että jälkikäsitteilylaitteistolle. Myös näitä osia sarjasta jouduttiin suunnittelemaan uudelleen.

Johdotus on periaatteessa mahdollista toteuttaa kahdella eri tavalla. On mahdollista suunnitella tarvittava sähköistys kaapelisarjana tai johdinsarjana. Kaapelisarjassa käytetään kaapeleita yhdistämään sarjan eri liittimet. Kaapelisarja sopii tilanteisiin, joissa kaapelin molempien päiden kaikki käytössä olevat johtimet on kytketty lähelle toisiaan. Esimerkiksi kaapelille olisi hyvä käyttökohde tilanne, jossa anturin ja sähkökeskuksen välille, jolloin kaapelin toinen pää olisi kytketty anturin liittimeen ja toinen keskuksen kyljessä olevaan liittimeen. Tilanne muuttuisi hankalammaksi, jos anturin syöttö ja sig-



naalitieto pitäisi viedä eri keskuksille. Tällöin kaapelin käyttö olisi hankalampaa, koska silloin johtimia jouduttaisiin jatkamaan, jotta anturi saataisiin kytkettyä oikein. Toki muutama jatkos on hyväksyttävä. Jos jatkoksia joudutaan tekemään useita, se lisää mahdollisia vikapaikkoja sarjaan ja myös kustannuksia, koska jatkokset vaativat sarjan valmistajalta ylimääräistä työtä.

Johdinsarjoissa kytkentöjen tekemiseen käytetään yksittäisiä johtimia, jolloin ei periaatteessa ole väliä vaikka liittimeltä lähtevät kytkennät menevät kaikki eri kohteeseen. Johdinsarjat ovat hyviä ja erittäin käyttökelpoisia tilanteissa, joissa sarjassa on useita haaroja ja kytkennät menevät eri haarojen välillä joka suuntaan. Johtimia käytettäessä ne kulkevat suojaputkissa tai kudossukissa, jolloin ne saadaan siististi kulkemaan haarasta toiseen. Johdinsarjat ovat hinnaltaan usein edullisempia kuin vastaava sarjat kaapeleina mutta kaapeleilla toteutetut sarjat ovat kestävämpiä. Johtimet hinkkautuvat toisiaan ja suojaputkia vasten ja aiheuttavat helpommin oikosulkuja eristeen hieroutuessa pois. Kaapeleissa on enemmän eristettä, jolloin niiden johtimien johteen paljastuminen kestää merkittävästi kauemmin kuin pelkkien johtimien. Monissa tilanteissa ei kuitenkaan käytetä tiukasti pelkästään joko kaapeleita tai johtimia, vaan monissa sarjoissa käytetään molempia yhtä aikaa.

Sähkösarjaa yritettiin ensin saada toteutettua järkevästi kaapelisarjana, koska myös mallina ollut sarja oli saatu toimimaan kaapeleilla. Suunnittelun edetessä kävi kuitenkin selväksi, että pelkillä kaapeleilla toteutettuna sarjasta tulisi liian monimutkainen. Hankaluuksia aiheutti erityisesti dieselmoottorin vaatimat anturit. Antureilta saatava tieto täytyy viedä moottorin ECU:lle mutta syöttöä ei ole mahdollista saada ECU:lta vaan se täytyy saada ohjauskeskukselta. Parhaaksi vaihtoehdoksi todettiin pääasiassa johtimien käyttäminen. Myös kaapeleita sarjaan laitettiin mahdollisuuksien ja tarpeen mukaan. Suurin osa johdinsarjan liittimistä ei ollut vapaasti valittavissa, vaan dieselmoottoriin liittyvät anturit, ECU ja muut toimilaitteet määräsivät liittinten tyyppin. Suurin osa Caterpillarin määrittämistä liittimistä olivat uusia sekä Metsolle että myös johdinsarjavalmistajalle. Muutaman liittimen komponentin kohdalla hankaluudeksi muodostui niiden saatavuus tai minimiostoerä. Kyseisiä liittimiä ei käytetty muissa sarjoissa ja suunniteltava sarjakin oli ainoastaan protosarja, joten takeita liittinten tulevaisuuden käytöstä ei ollut. Suurista ostoeristä selvittiin kuitenkin ottamalla yhteyttä suoraan liittint valmistajiin, jotka suostuivat lähettämään näytteitä hankaluuksia tuottaneista komponenteista. Osalle liittimistä luvattu toimitusaika olisi ollut liian pitkä, mikä olisi viivästyttänyt moottorimoduulin kokoonpanon alkuperäistä aikataulua. C3.4B dieselmoottorin toimittaminen kuitenkin myöhästyi sen verran, että liittimet ehdittiin toimittamaan ennen kokoonpanon alkua. Vaikka suunniteltavassa sarjassa suurin osa johdotuksesta liittyykin itse dieselmoottoriin, täytyy sarja yhdistää myös ohjauskeskukseen. Koska moottorin osuus sarjasta haluttiin pitää oman osana, selkein vaihtoehto oli lisätä sähkökeskuksen kylkeen tarvittava määrä liittimiä, joilla moottorin tarvitsemat syöttö- ja ohjausjännitteet saadaan välitettyä moottorin ja keskuksen välillä. Metso käyttää mobiililaitteiden keskusten ja

kaapelisarjojen rajapintoina yleensä Deutschin liittimiä, joita on kuvassa 5.4. Deutschin liittimet ovat erittäin yleisiä niin ajoneuvoissa kuin työkoneissakin, joten niiden saatavuus on hyvä ympäri maailmaa.



*Kuva 5.4 Deutsch liittimiä [47]*

Useimpien Deutschin liittimien tiiveysluokka on IP67, joka edellyttää niiden oikeaoppista asennustekniikkaa. Käyttämättömät pinnit täytyy tulpata ja lisäksi liittimet olisi hyvä asentaa vaakatasoon, jolloin johtimia pitkin mahdollisesti valuva vesi ei pääse liittimen sisälle. Neljä Deutschin DT-sarjan 12-pinnistä liittintä tarvittiin lisää keskuksen dieselmoottorille menevien ohjauksien ja syöttöjen takaamiseksi.

Kaapeleita käytetään sarjassa ainoastaan lämpötila-antureille, jotka tarvitsee yhdistää ainoastaan ECU:lle. Osa antureista ja toimilaitteista vaativat toimiakseen oikein myös Can-väylän, jotka yhdistettiin ECU:lle. ECU:lla on myös toinen Can-väylä, joka yhdistetään ST:n automaatiojärjestelmään. Väylän johdotukseen käytetään aina suojattua ja parikierrettyä kaapelia, jolla saadaan minimoitua mahdolliset häiriöt. Caterpillar vaatii myös osan johdotuksesta ECU:n ja moottorin välillä parikierrettyinä johtimina. Suurin osa myös näistä kohteista toteutettiin suojatulla parikierretyllä kaapelilla mutta käytetyn kaapelityypin suurin johdinpoikkipinta-ala on  $1 \text{ mm}^2$  ja Caterpillar vaatii dieselmoottorin suuttimille vähintään  $1.5 \text{ mm}^2$  johdinta. Suuttimille menevään johdotukseen johdin-sarjavalmistajaa pyydettiin tekemään itse parikierrettyjä johtimia.

C3.4B dieselmoottorin jälkikäsitteilylaitteiston komponenttien asennukset jäävät OEM:n vastuulle. Asennettavia komponentteja ovat:

- ECU
- SCR
- DEF-tankki
- DEF-letkut + lämmittimet
- DEF-pumppu ja -venttiili

- DEF-suutin
- NOx-anturit (2 kpl)
- Ammoniakkianturi
- Pakokaasujen lämpötila-anturit (3 kpl)
- Polttoaineesta kertyneen veden määrää ilmaiseva anturi
- Diagnostiikkaliitin
- Liitin hehkun ohjaukseen
- Liitin DEF-letkujen lämmityksen ohjaamiseksi

Edellä mainituista komponenteista osa vaatii mekaanista sovittamista moottorimoduuliin ja osa vaatii ainoastaan liittimen kytkemisen. Lisäksi listassa ovat ainoastaan komponentit, jotka vaativat sähkönsyötön ja sähköisenojauksen. Komponenttien sijoittaminen tehtiin yhteistyössä mekaanisen suunnittelun kanssa, jolloin voitiin samalla miettiä myös johdotusreitit. Komponenteilla on myös vaatimuksia niiden asennuspaikalle. Monilla asennussuunta on määrätty tarkasti, koska vesi halutaan pitää mahdollisimman hyvin poissa liittimistä. Pelkästään oikea suunta ei välttämättä riitä vaan materiaali, johon komponentti asennetaan, täytyy olla jotain tiettyä, jotta esimerkiksi komponentin maadoitus on kunnossa. Usein myös komponenttien värinänkestolle ja maksimi käyttölämpötilalle on annettu rajat, joiden sisällä pitää pysyä. Värinävaatimukset on hyvä pitää mielessä, koska seula on loppujen lopuksi laite, jonka toiminta perustuu värinään.

Johdinsarjan mitoittamista varten eri sähkökomponenttien paikat ja johdotuksen alustavat reitit sovittiin mekaanisen suunnittelun kanssa. Sähkösarjan reititystä ei kuitenkaan ole järkevää mallintaa 3D-malliin pelkkää prototyypin varten. Sähköt voidaan mallintaa sitten, kun moottorimoduulissa käytettävä dieselmoottorin valinta saadaan varmistettua. Tässä projektissa ei myöskään olisi ollut aikaa tai resursseja sähköjen tarkkaan mallintamiseen. 3D-mallista olisi helppo saada tarkat mitat johdinsarjan eri haaroille mutta tässä tapauksessa se ei ollut mahdollista. Tarkkoja mittoja ei edes lähdetty lopulta arvioimaan, vaan sarjan haarat tilattiin selkeästi ylipitkinä ja liittimet irtonaisina, jolloin kokoonpanovaiheessa saadaan katkaistua haarat täsmälleen oikean pituisiksi. Toki tämä lisää työtä kokoonpanovaiheeseen mutta protosarjoissa on aina paljon epävarmuutta aiheuttavia asioita ja johtimien jatkaminen tai ylimääräisen pituuden hukkaaminen asennukseen aiheuttaa myös ylimääräistä työtä. Sähkösarjassa kulkee paljon johtimia ECU:lta dieselmoottorissa kiinteästi oleviin liittimiin, jotka ovat erittäin ahtaita ja työläitä kytkeä. Näiden liittinten välimatka päätettiin määrittää tarkemmin, jotta kyseiset liittimet saadaan valmiiksi kytkettyinä johdinsarjavalmistajalta.

## 6. KOKOONPANO

Moottorimoduulin kokoonpano alkoi syyskuun loppupuolella. Alkuperäisen aikataulun mukaisesta aloitusajankohdasta myöhästettiin yli kuukaudella, koska dieselmoottorin toimitus myöhästyi. Valitettavasti saapuessaan moottori ei aivan vastannut tilausvaiheessa tehtyjä valintoja, mikä aiheutti kokoonpanon alkuun hieman ylimääräisiä haasteita mekaanisesti. Sähköisesti ainoa eroavaisuus oli suurempi laturi mutta suunnitteluvaiheessa määritetyt poikkipinta-alat laturin johtimille riittivät myös suuremmalle laturille.

Moottorimoduulin kokoonpano onnistui kokonaisuutena hyvin. Niin mekaaniset osat kuin myös sähköistyksen eri osat saatiin sopimaan paikalleen. Sähkökeskus oli täysi, kuten jo suunnitteluvaiheessa tiedettiin. Keskusvalmistaja oli kuitenkin saanut kaikki komponentit ja johdotuksen mahtumaan siististi keskukseen. Johdinsarja saatiin kokoonpanopaikalle samoihin aikoihin sähkökeskuksen kanssa. Myös johdinsarja oli tehty siististi ja suunnittelussa arvioidut mitat osoittautuivat sopiviksi prototyyppiin. Johdinsarjojen haarojen halkaisijoita on hankala arvioida sarjaa piirrettäessä ja tässä sarjassa yllätyksen aiheutti ECU:lle menevän johdotuksen haaroituskohdan paksuus. Vaikka johtimia ja kaapeleita oli kyseisessä kohdassa kudossukan sisällä paljon, ei sen asentaminen tuottanut hankaluuksia ja sarja sopi paikalleen hyvin.

Kokoonpano sujui suurimmaksi osaksi hyvin mutta haasteita aiheuttivat NO<sub>x</sub>- ja ammoniakkiantureiden liittimet. Suunnittelun aluksi tehtyyn dokumenttiin uusista liittimistä oli jäänyt kyseisille liittimille väärät pinnit. Puolet kyseisille liittimille tulevista johdimmista olivat poikkipinnaltaan 1,5 mm<sup>2</sup> ja loput 0,75 mm<sup>2</sup>. Liittimelle varatut pinnit olivat kuitenkin kaikki tarkoitettu johtimille, joiden poikkipinta-ala on 0,50 – 0,75 mm<sup>2</sup>. Ammoniakkiliitimeen tarvittavat pinnit saatiin tilattua johdinsarjavalmistajalta. NO<sub>x</sub>-antureille puuttuvat pinnit saatiin tilattua näytteinä suoraan liittinten valmistajalta. NO<sub>x</sub>-antureiden liittimet tuottivat myös lisää ongelmia. Siihen tarkoitettuja pinnejä ei saatu lukittua paikalleen, vaikka käytettyjen pinnien ja liitinrunon pitäisi olla yhteensopivia. Haasteet aiheutuivat vääristä puristustyökaluista. Kokoonpanossa ei ollut juuri kyseisille pinneille tarkoitettuja puristustyökaluja, jolloin pinnien puristuskohta jäi hieman leveämmäksi kuin mikä liitinkoteloon sopi. Kuvassa 6.1 on moottorimoduuli kokoonpanon loppuvaiheessa.



**Kuva 6.1** STX.8 IC Tier 4 Final moottorimoduuli kokoonpanon loppuvaiheessa

Kokoonpanon aikana selvisi, että moottorissa kampikammioista tulevat päästöt lasketaan moottorin kokonaispäästöihin. Tästä johtuen kampikammio tarvitsee huohottimen, joka tarvitsee lämmityksen. Tarvittavaan liittintä ei ollut heti saatavilla johdinsarjavalmistajalta eikä myöskään Wihurilta. Sopiva liitin löydettiin Metsolta kaapelisarjasta, joka oli tarkoitettu Webaston asennukseen. Lämmitin voitiin kytkeä suoraan sähkökeskuksen riviliittimille, joten kytkentä oli suhteellisen helppo toteuttaa.

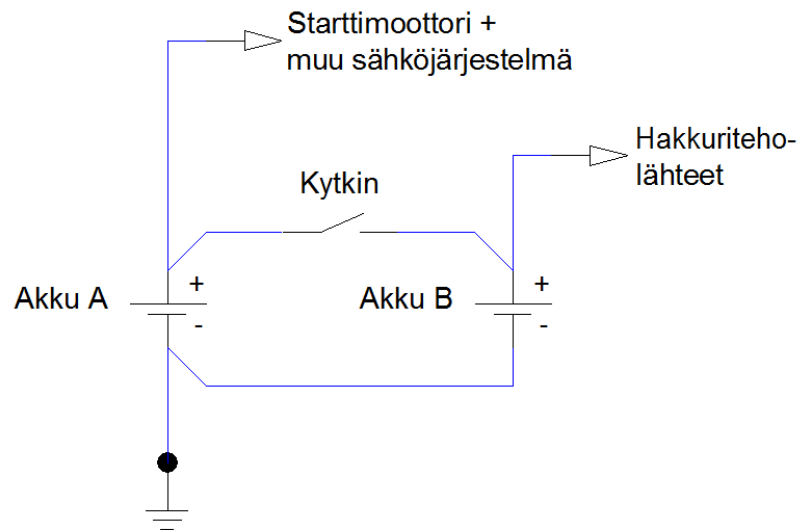
Lokakuun lopussa moottorimoduulin kokoonpano saatiin valmiiksi ja moottorin käynnistämistä päästiin kokeilemaan. Valitettavasti moottori ei käynnistynyt ilman muutoksia sähköjärjestelmään. Automaatiojärjestelmää syöttävät hakkuriteholähteet eivät kestäneet starttimoottorin aiheuttamaa akkujen jännitteenlaskua. Automaatiojärjestelmä ohjaa starttimoottoria, joten järjestelmän kaatuessa dieselmoottori ei lähde käyntiin. Vika oli kuitenkin selkeä eikä sen aiheuttajasta ollut epäselvyyttä, joten vian etsimiseen ei tarvinnut käyttää aikaa. Vika huomattiin moottorin auditoinnin alussa. Auditoinnissa varmistetaan Wihurin toimesta, että moottori toimii oikein esimerkiksi eri osien lämpötiloja mittaamalla. Havaittu ongelma oli helppo korjata auditoinnin ajaksi ja testit saatiin suoritettua. Auditoinnin ajaksi hakkureita syötettiin ylimääräisellä akulla, jolloin starttimoottorin ottama käynnistysvirta ei vaikuttanut lisätyn akun jännitteeseen. Edellä mainitulla muutoksella moottori saatiin käyntiin. Muilta osin suunniteltu sähköjärjestelmä vastasi vaatimuksia eikä virheellisiä kytkentöjä ilmennyt. Moottorin auditointi saatiin suoritettua onnistuneesti mutta sähköjärjestelmään täytyi edelleen tehdä muutokset, joilla moottori saadaan käyntiin ilman ylimääräistä akkua.

Moottorin käynnistämiseen löydettiin useita erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Käytännössä osa vaihtoehtoista oli samoja kuin jo suunnittelun aikana mietityt vaihtoehdot sähköjär-

jestelmän toteuttamiseen. Yksi vaihtoehto oli ohittaa automaatiojärjestelmä käynnistyksen ajaksi. Ratkaisussa automaatiojärjestelmä olisi käynnistynyt uudelleen starttimoottorin aiheuttaman jännitteen laskun jälkeen. Ratkaisu ei kuitenkaan olisi toiminut, sillä automaatiojärjestelmä olisi käynnistyttyään sammuttanut heti moottorin. Myös hätäseispiiri olisi aiheuttanut ongelmia, koska hakkuriteholähteet syöttivät hätäseisrelettä. Jännitteen lasku olisi sammuttanut myös hätäseisreleen, joten käytännössä startin ajaksi se olisi pitänyt ohittaa, mikä ei olisi ollut hyvä ratkaisu. Kävi selväksi, että hakkuriteholähteet täytyi saada pysymään toiminnassa dieselmoottorin käynnistyksen ajan.

Mahdollisuutta muuttaa järjestelmä 24 voltiseksi harkittiin yhtenä vaihtoehtona. Tässä tapauksessa akkujen rinnankytkentä olisi muutettu sarjaankytkennäksi ja 12 voltia olisi otettu ainoastaan toiselta akulta. Järjestelmään olisi lisätty myös akkujen jännitteen tassaaja. Tähän ei ryhdytty, koska muutoksista johtuen myös dieselmoottorin starttimoottori ja laturi olisi pitänyt vaihtaa. Muutostyössä olisi myös tarvittu komponentteja, joiden toimitusaika olisivat voineet tuoda ylimääräisiä haasteita.

Toimivimmaksi ratkaisuksi todettiin rinnankytkettyjen akkujen erotus toisistaan dieselmoottorin käynnistyksen ajaksi. Tässä ratkaisussa kuvan 6.2 akku A syöttää starttimoottoria sekä muuta 12 voltin järjestelmää ja akku B syöttää ainoastaan hakkuriteholähteitä.



**Kuva 6.2** Prototyyppiin tehty kytkentöjen muutos

Tässä vaihtoehdossa ainoastaan akun A jännite laskee merkittävästi käynnistyksen aikana, mikä ei hakkuriteholähteille aiheuta ongelmia. Kun dieselmoottori on käynnistynyt, akkujen plus-napojen välissä oleva kytkin suljetaan, jolloin laturi lataa molempia akkuja. Muutostyön tekemiseksi tarvittiin ainoastaan muutama rele. Prototyyppiin tehtiin suunnitellut muutokset, jonka jälkeen moottori voitiin käynnistää ilman ylimääräistä



akkua ja moduuli oli valmis asennettavaksi testiin asiakkaan ST358 mobiiliseulaan. Kuvassa 6.3 moottori moduuli on asennettuna ja valmiina käyttöön.



**Kuva 6.3** Suunniteltu moottori moduuli asennettuna ST358:aan

Kun moottorimoduuli oli saatu testiin asiakkaalle, tarkasteltiin sähköistykseen tehtyjä muutoksia tulevaisuuden kannalta. Jo suunnittelun aluksi tiedettiin, että 12 voltin ja 24 voltin järjestelmien yhdistäminen on yksi haastavimmista asioista moottorimoduulissa. Suunnitteluvaiheessa tehty ratkaisu ei lopulta toiminut, vaan muutoksia tarvittiin. Prototyyppiin tehty muutos, jossa starttimoottoria ja automaatiojärjestelmää syötetään käynnistyksen ajan eri akuilta, on yksi vaihtoehto lopulliseen moottorimoduuliin. Prototyypissä käytettiin akkujen välisenä kytkimenä relettä. Rele voisi olla mahdollista korvata diodilla, jolloin kytkin ei tarvitsisi erillistä ohjausta. Diodi kuitenkin laskisi kynnysjännitteen verran toisen akun jännitettä mutta siitä ei välttämättä olisi haittaa. Jos akut irrotetaan toisistaan käynnistyksen ajaksi, voidaan myös automaatiojärjestelmä muuttaa 12 voltiseksi. Muutoksia vaadittaisiin toimilaitteisiin kuten antureihin ja hydraulikkaan mutta muutokset olisivat melko pieniä ja täysin mahdollisia. Lopullinen ratkaisu tehdään kuitenkin vasta sitten, jos C3.4B dieselmoottoria päätetään asentaa jatkossa mobiiliseulojen voimanlähteeksi.

## 7. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella Metson mobiiliseulojen moottorimoduulin prototyypin tarvitsema sähköistys. Käytännössä suunniteltiin uusi sähkökeskus ja johdinsarja. Muutoksia aiemmin käytössä olleeseen moottorimoduuliin aiheutti uusi Caterpillarin C3.4B Tier 4 Final dieselmoottori.

Dieselmoottoreiden tuottamia päästöjä on rajoitettu 1990-luvun puolivälistä saakka. Pohjois-Amerikassa uusien ei-liikenneajoneuvojen dieselmoottoreiden päästöjen täytyy noudattaa vuodesta 2014 lähtien Tier 4 Final päästönormeja. Euroopassa on voimassa päästörajoiltaan vastaavat Stage IV normit. Kun päästöjä alettiin kiristämään, aluksi riitti, että moottorinohjaustekniikan kehittäminen. Tier 4i / Stage IIIB normeja ei kuitenkaan enää pystytty saavuttamaan ilman pakokaasujen jälkikäsittelyä. Typen oksidit, hiukkaset ja hiilivedyt ovat pakokaasujen haitallisia osia, joiden poistaminen vaatii kaikille omat tekniikkansa. Käytettyjä tekniikoita ovat hapetuskatalysaattori (DOC), hiukkassuodatin (DPF), pelkistyskatalysaattori ureajärjestelmän kanssa (SCR), pakokaasujen uudelleenkierrätys sylintereihin (EGR) sekä typpioksidien kerääjä (LNT).

Sähköisesti moottorit ovat monimutkaistuneet samalla, kun erilaisia jälkikäsittelylaitteita on lisätty. Moottorit tarvitsevat yhä enemmän erilaisia antureita, kuten pakokaasujen typen oksidien ja ammoniakkin määrän sekä lämpötilan mittausta. Merkittävästi lisäkomponentteja tuo SCR-järjestelmä, joka tarvitsee toimiakseen ureaa. Ureajärjestelmä tarvitsee muun muassa pumpun, lämmityksen sekä järjestelmän ohjuksen, jotka tuovat lisää johdotusta johdinsarjoihin. Sähköjärjestelmien kasvaessa kasvaa myös mahdollisuus kytkentävirheisiin ja vianhaku vaikeutuu.

Dieselmoottorit ovat erilaisia eri valmistajilla ja myös saman valmistajan erikokoiset moottorit ovat hyvin erilaisia sähköisesti. Moottorista riippuen OEM:n vastuulle jäävä johdotus vaihtelee. Caterpillarin C3.4B dieselmoottorissa pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston sähköistys jää kokonaan OEM:n vastuulle. Myöskään ECU:n ja moottorissa valmiina olevien toimilaitteiden välistä johdotusta ei moottorissa ole valmiina. Tässä työssä suunniteltuun moottorin sähköistykseen ei saatu apua muista Metsolla käytössä olevista moottoreista, joissa moottorin mukana tulee enemmän johdotusta valmiina.

Suunnittelussa suurimmaksi haasteeksi muodostui dieselmoottorin vaatimus 12 voltin jännitetasosta, vaikka Metson ohjausjärjestelmä on 24 voltin. Paras ratkaisu ongelmaan todettiin olevan ohjausjärjestelmän muuttaminen 12 voltiseksi muuten paitsi automaatiojärjestelmän ja hätäseispiirin osalta. Tarvittu 24 voltia tuotettiin kahdella hakuriteholähteellä. Sähkökeskusta suunniteltaessa ongelmaksi muodostui keskuksen ah-



taus. Jotta kaikki komponentit saatiin keskuksen mahtumaan, täytyi käytettyjen riviliitinten tyyppi muuttaa nelikerroksiseksi. Näin säästettiin keskukselta tilaa, mutta samalla keskuksen sisäinen johdotus ja vianhaku muuttuivat haasteellisemmiksi.

Kokoonpanon aikana haasteita aiheuttivat liittimet, joita ei ennen ollut käytetty Metsolalla. Suunnitteluvaiheessa oli jäänyt huomioimatta muutamien johdinten poikkipinta-alat, jolloin tilattujen liitinten kontaktit olivat väärälle poikkipinta-alalle. Ongelmat saatiin ratkaistua ja tarvittavat kontaktit saatiin riittävän nopeasti paikalle. Moottorimoduulin auditoinnin aluksi ilmeni vielä ongelma sähköistyksen kanssa. Jännite laski liian alhaiseksi automaatiojärjestelmää syöttäville hakkuriteholähteille, mikä esti moottorin käynnistymisen. Auditointi saatiin suoritettua syöttämällä hakkuriteholähteitä erillisellä akulla. Moduulin sähköistystä muutettiin siten, että dieselmootorin käynnistykseen ajan toinen akku syöttää starttimoottoria ja toinen hakkuriteholähteitä. Käynnistykseen jälkeen akut kytketään rinnan, jolloin molemmat akut lataantuivat. Näillä muutoksilla moottori saatiin toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla. Vaikka kokoonpanon aikana kohdattiin haasteita, moduulin sähköistys onnistui hyvin ja kohdatut haasteet olivat pieniä.

Työn tarkoituksena oli suunnitella sähköistys mobiiliseulojen moottorimoduulin prototyypille. Työn tavoite saavutettiin, sillä prototyyppi saatiin toimimaan. Tässä työssä ei kuitenkaan tarkasteltu moottorimoduulin kustannuksia eikä niitä tulla tähän työhön liittämään. Kustannuksia tarkastellaan myöhemmin, jotta voidaan varmistua C3.4B dieselmoottori, on oikea valinta mobiiliseulojen uudeksi Tier 4 Final päästönormit täyttäväksi moottoriksi.

## LÄHTEET

- [1] Metso lyhyesti, 2015, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/yritys/metso-yrityksena/metso-lyhyesti/>
- [2] Lokotrack Liikuteltavat murskaus- ja seulontalaitokset, Metso Minerals Oy, 2014, 67 s., [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/1E13E2B4F15BFFADC2257D3C001FB13D/\\$File/Lokotrack%C2%AE\\_Liikuteltavat\\_murskaus\\_ja\\_seulontalaitokset\\_Finnish.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/1E13E2B4F15BFFADC2257D3C001FB13D/$File/Lokotrack%C2%AE_Liikuteltavat_murskaus_ja_seulontalaitokset_Finnish.pdf)
- [3] Basic in Minerals Processing, Metso Corporation, 2015, 354 s., [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/EAE6CA3B8E216295C2257E4B003FBBA6/\\$File/Basics-in-minerals-processing.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/EAE6CA3B8E216295C2257E4B003FBBA6/$File/Basics-in-minerals-processing.pdf)
- [4] Metso Minerals. Crushing and Screening Handbook. 4. painos. Tampere 2009. 322 p.
- [5] Lokotrack ST3.5, 2015, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/tuotteet/lokotrack-mobile-plants/lokotrack-st3.5--mobiiliseula/>
- [6] Lokotrack ST2.8, 2015, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/tuotteet/lokotrack-mobile-plants/lokotrack-st2.8--mobiiliseula/>
- [7] Diesel engine, Encyclopedia Britannica, 2007, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://global.britannica.com/technology/diesel-engine>
- [8] Dieselmoottori, Motiva, 2014, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: [http://www.motiva.fi/liikenne/henkilautoilu/valitse\\_auto\\_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/dieselmoottori](http://www.motiva.fi/liikenne/henkilautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/dieselmoottori)
- [9] Ibrahim Aslan Resitoglu, Kemal Altinisik, Ali Keskin, The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems, Clean Techn Environ Policy, 11.06.2014. 13 s., [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10098-014-0793-9>
- [10] Hiilimonoksidi, IPCS, CEC, 2007, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0023.htm>
- [11] Mikko Savolahti, Niko Karvosenoja, Kaarle Kupiainen, Ville-Veikko Paunu, Pienpolton päästövähennyskeinojen kustannustehokkuus ja vaikutukset väestöl-

- tistukseen, Suomen ympäristökeskus, 02.02.2015, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://www.syke.fi/download/noname/%7B5395FEC7-1D72-4C65-A1F5-AB9914F2D9A7%7D/111841>
- [12] Hiukkasten vaikutus terveyteen, Hiukkastieto, 2015, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://www.hiukkastieto.fi/node/25>
- [13] Typpimonoksidi, IPCS, CEC, 2005, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin1311.htm>
- [14] Typpidioksidi, IPCS, CEC, 1999, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0930.htm>
- [15] Otsoni, IPCS, CEC, 2009, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0068.htm>
- [16] Dieselpolttoaineopas, Neste Oil, 2007, 46 s., [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <https://www.neste.fi/binary.aspx?path=2589;2655;2710;2821;2944;3361;3558;3559&page=3559&field=FileAttachment&version=4>
- [17] W. Addy Majewski, Diesel Oxidation Catalyst, DieselNet, 2012, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: [https://www.dieselnets.com/tech/cat\\_doc.php](https://www.dieselnets.com/tech/cat_doc.php)
- [18] Rikkidioksidi, Hengityслиitto, [WWW]. [viitattu 22.11.2015] Saatavissa: <http://www.hengityслиitto.fi/fi/sisailma/ulkoilma/ilmansaasteet/rikkidioksidi>
- [19] C3.4B, Greater than 56kW (75Hp), Caterpillar, 2015, [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [http://www.cat.com/en\\_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-highly-regulated/1000003137.html](http://www.cat.com/en_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-highly-regulated/1000003137.html)
- [20] W. Addy Majewski, Diesel Particulate Filters, 2011, [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: <https://www.dieselnets.com/tech/dpf.php>
- [21] W. Addy Majewski, Diesel Filter Regeneration, DieselNet, 2005, [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [https://www.dieselnets.com/tech/dpf\\_regen.php](https://www.dieselnets.com/tech/dpf_regen.php)
- [22] W. Addy Majewski, Diesel Filter Systems, DieselNet, 2015, [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [https://www.dieselnets.com/tech/dpf\\_sys.php](https://www.dieselnets.com/tech/dpf_sys.php)
- [23] W. Addy Majewski, Selective Catalytic Reduction, DieselNet, 2005, [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [https://www.dieselnets.com/tech/cat\\_scr.php](https://www.dieselnets.com/tech/cat_scr.php)
- [24] Christine Ueno, Understanding Tier 4 Interim and Tier 4 Final EPA regulations for generator set applications, MTU Onsite Energy Corporation, 2010, 6 s.,

- [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [http://www.mtu-online.com/uploads/tx\\_templavoila/WhitePaper\\_Tier4i\\_and\\_Tier4\\_02.pdf](http://www.mtu-online.com/uploads/tx_templavoila/WhitePaper_Tier4i_and_Tier4_02.pdf)
- [25] Käyttöturvallisuustiedote Adblue, Neste Oil, 2006, 4 s., [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: <https://www.neste.fi/artikkeli.aspx?path=2589;2655;2710;2772;6842>
- [26] W. Addy Majewski, NOx Adsorbers, DieselNet, 2015, [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [https://www.dieseln.net.com/tech/cat\\_nox-trap.php](https://www.dieseln.net.com/tech/cat_nox-trap.php)
- [27] Jürgen Schnitzler, Particulate Matter and NOx Exhaust Aftertreatment Systems, FEV Motorentchnik GmbH, 11s., [WWW]. [viitattu 26.11.2015] Saatavissa: [http://www.fev.com/fileadmin/user\\_upload/Media/TechnicalPublications/Diesel\\_Systems/ParticulateMatterAndNOxExhaustAftertreatmentSystems.pdf](http://www.fev.com/fileadmin/user_upload/Media/TechnicalPublications/Diesel_Systems/ParticulateMatterAndNOxExhaustAftertreatmentSystems.pdf)
- [28] Mitch Ingram, EPA Tier 4 Emissions Regulations and the Resultant Impact on Heavy Duty Heat Exchangers, ThermaSys Technical Center, 2011, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://narsa.org/wp-content/uploads/2011/05/ingram.pdf>
- [29] Interim Tier 4/Stage III B frequently asked questions, John Deere, 2010, 39 s., [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://bellpower.com/uploads/product\\_brochures/4\\_IT4\\_FAQ%5B1%5D.pdf](http://bellpower.com/uploads/product_brochures/4_IT4_FAQ%5B1%5D.pdf)
- [30] Frequently Asked Questions, Tier 4 Interim/Stage IIIB Products, Caterpillar, 2010, 10 s., [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10166485>
- [31] Lindsay Whiffen, Tier 4 Interim emissions explained: Greener Diesel Engines Technology, 2012, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.aalhysterforklifts.com.au/index.php/about/blog-post/tier\\_4\\_interim\\_emissions\\_explained\\_greener\\_diesel\\_engines\\_technology](http://www.aalhysterforklifts.com.au/index.php/about/blog-post/tier_4_interim_emissions_explained_greener_diesel_engines_technology)
- [32] Nonroad Diesel Engines, DieselNet, 2013, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <https://www.dieseln.net.com/standards/us/nonroad.php>
- [33] Nonroad Engines, DieselNet, 2014, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <https://www.dieseln.net.com/standards/eu/nonroad.php>
- [34] Tom Jackson, Perkins discusses “Tier 5” planning, impact; announces new engine to be built in US, 2015, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://www.equipmentworld.com/perkins-discusses-tier-5-planning-impact-announces-new-engine-to-be-built-in-us/>

- [35] Off-Highway Emissions Regulations, Cummins, 2012, [WWW]. [viitattu 17.11.2015] Saatavissa: [http://www.cumminsemissionsolutions.com/sites/default/files/Final\\_CES\\_Pocketcard\\_Off-Hwy\\_Rev2014\\_0.pdf](http://www.cumminsemissionsolutions.com/sites/default/files/Final_CES_Pocketcard_Off-Hwy_Rev2014_0.pdf)
- [36] Global Team Working Together for Mutual Success 2014 Year in Review, Caterpillar, 2015, s.59, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10428589>
- [37] Power Systems, Caterpillar, 2015, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.cat.com/en\\_GB/products/new/power-systems.html](http://www.cat.com/en_GB/products/new/power-systems.html)
- [38] C3.4B, Greater Than 56kW (75 Hp), Caterpillar, 2015, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.cat.com/en\\_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-power-units-highly-regulated/1000003138.html](http://www.cat.com/en_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-power-units-highly-regulated/1000003138.html)
- [39] Yritysesittely, Metro Pikatukku, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.metrotukku.com/yritys/fi\\_FI/yritys/](http://www.metrotukku.com/yritys/fi_FI/yritys/)
- [40] C3.4B, Greater Than 56kW (75 Hp), Caterpillar, 2015, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.cat.com/en\\_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-highly-regulated/1000003137.html](http://www.cat.com/en_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-highly-regulated/1000003137.html)
- [41] C3.4B, Less Than 56kW (75 Hp), Caterpillar, 2015, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.cat.com/en\\_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-highly-regulated/18374262.html](http://www.cat.com/en_GB/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-highly-regulated/18374262.html)
- [42] Industrial Engine Ratings Guide, Caterpillar, 2014, 92 s., [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10116252>
- [43] Application & Installation Guide Electrical & Electronic Cat® C3.4B U.S. EPA Tier 4 Final/ EU Stage IV Engines, Caterpillar, 2015
- [44] Epec 2000 series control units, Epec, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://epec-fabin.aldone.fi/@Bin/0be5b0e8f92dc401d7ff8b4fce9be357/1448658852/application/pdf/80475/Epec%202000%20series%20control%20units.pdf>
- [45] Central Electrical Unit 9-2 Module, Würth Elektronik, 3 s. [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.werth-electronic.com/web/en/index.php/show/media/05\\_intelligente\\_systeme/produkte\\_6/powermanagement/redline/englisch\\_franz\\_sisch/Produkt\\_info\\_9F2R\\_EN.pdf](http://www.werth-electronic.com/web/en/index.php/show/media/05_intelligente_systeme/produkte_6/powermanagement/redline/englisch_franz_sisch/Produkt_info_9F2R_EN.pdf)

- [46] Blade Fuses, Littelfuse, 2010, 2s., [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: [http://www.littelfuse.com/~media/automotive/datasheets/fuses/passenger-car-and-commercial-vehicle/blade-fuses/littelfuse\\_ato\\_blade\\_fuses.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/automotive/datasheets/fuses/passenger-car-and-commercial-vehicle/blade-fuses/littelfuse_ato_blade_fuses.pdf)
- [47] Tiiviit Deutsch liittimet, Tampereen SähköPalvelu, 2015, [WWW]. [viitattu 27.11.2015] Saatavissa: <http://www.tsp.fi/tuotteet/tuoteryhma/tiiviit-deutsch-liittimet/action/list/>