



Toni Katila

# Ajoneuvojen pienhiukkaspäästöjen mittaaminen ja siihen vaikuttavat tekijät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

10.5.2022

# Tiivistelmä

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Tekijä:               | Toni Katila   |
| Otsikko:              | Ajoneuvojen pienhiukkaspäästöjen mittaaminen ja siihen vaikuttavat tekijät          |
| Sivumäärä:            | 29 sivua + 0 liitettä   |
| Aika:                 | 10.5.2022   |
| Tutkinto:             | Insinööri (AMK)   |
| Tutkinto-ohjelma:     | Ajoneuvotekniikka   |
| Ammatillinen pääaine: | Ajoneuvosuunnittelu   |
| Ohjaajat:             | Projektipäällikkö Aleksi Malinen<br>Toimitusjohtaja Juha Seppälä, Diagno Finland Oy |

---

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ajoneuvojen pienhiukkaspäästöjen mittaamista ja muuttujia, jotka vaikuttavat pienhiukkasten lukumäärään. Tutkimuksessa hyödynnetään uutta katsastuslainsäädäntöä, joka on otettu käyttöön Alankomaissa vuonna 2022 ja jonka käyttöönotto Saksassa tapahtuu vuonna 2023. Tässä Diagno Finland Oy:lle tehdyssä opinnäytetyössä myös pohditaan eri mittaustyyylejä ja muita mahdollisia mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, mitä haasteita voi syntyä mittaustilanteessa. Lisäksi opinnäytetyössä tarkastellaan regeneroinnin ja sähkönkuluttajien vaikutusta pienhiukkasten lukumäärään ja näiden mahdollista vaikutusta mittauksen lopputulokseen.

Insinööriyön mittaukset tehtiin Dekatin valmistamalla ePNC-mittalaitteella. Laitteella mitattiin Euro 5- sekä Euro 6 -päästöluokituksen ajoneuvoja. Tuloksia analysoitiin samoin kuin eri mittaustapoja ja mittauksen lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä. Tuloksiin yritettiin vaikuttaa muun muassa manipuloimalla pienhiukkaspäästöjä sähkönkulutusta lisäävien tekijöiden avulla. Mittaukset tehtiin Saksan ja Alankomaiden katsastuslainsäädännön asettamin ehdoin.

Euro 6 -päästöluokituksen ajoneuvoihin pienhiukkaslukumäärään ei saatu merkittävää muutosta manipuloimalla ajoneuvon toimintaa. Euro 5 -päästöluokituksen ajoneuvoissa pystyttiin toteamaan huomattavia muutoksia pienhiukkasten lukumäärässä, kun ajoneuvon pienhiukkaspäästöjä manipuloitiin sähkönkulutusta lisäävien tekijöiden avulla. Regeneroinnilla huomattiin olevan merkitystä pienhiukkaspäästöihin. Nämä seikat on otettava huomioon, jos tulevaisuudessa katsastuksen yhteydessä pienhiukkaspäästöjä mitataan. Lisäksi katsastajat on syytä perehdyttää aiheeseen huolellisesti.

Avainsanat: Pienhiukkaset, päästöt, päästöjen mittaus, katsastus, Diagno, Dekati

## Abstract

Author: Toni Katila  
Title: Measuring and Influencing of Fine Particle Emissions from Vehicles  
Number of Pages: 29 pages + 0 appendices  
Date: 10 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Professional Major: Automotive Design  
Supervisors: Aleksi Malinen, Project Manager  
Juha Seppälä, Chief Executive Officer

---

The objective of this bachelor's thesis was to measure and analyze affect the number of fine particles. The study utilizes new inspection legislation, which was introduced in Netherlands 2022 and will be introduced in Germany in 2023. This thesis for Diagno Finland Oy will also discuss different measurement styles and other possible factors that affect the measurement result.

The aim of the study is to find out what challenges can arise in the measurement situation. In addition, the thesis examines the impact of regeneration and electricity consumers on the number of fine particles and their possible effect on the outcome of the measurement. The results were analyzed as well as the different measurement methods and factors affecting the outcome of the measurement.

Measurement Data was collected by using an ePNC measuring device which is manufactured by Dekati. Measurement objects were Euro 5 and Euro 6 classified vehicles. The results were influenced by manipulating fine particle emissions through factors that increase electricity consumption. The measurements were made under the legislation of Germany and the Netherlands.

The study found out that there was not significant change in the amount of fine particle numbers in the Euro 6 emission classification by manipulating the vehicles operation. The Euro 5 emission classification vehicles were able to identify significant changes in the number of fine particles as the vehicle's emissions were manipulated by increasing electricity consumption. It was discovered that regeneration has a role in fine particle emissions. These factors must be taken into account if fine particle emissions are measured in the future. In addition, the inspectors should be carefully introduced to the subject.

Keywords: Particulate Matter, Emissions, Emissions Measurement, Vehicle Inspection, Diagno Finland Oy, Dekati Ltd.

# Sisällys

## Lyhenteet

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Johdanto                                       | 1  |
| 2     | Pienhiukkaspäästöt ja niiden mittaaminen       | 3  |
| 2.1   | Mitä pienhiukkaset ovat?                       | 3  |
| 2.2   | Pienhiukkaspäästöjen mittaus osana katsastusta | 4  |
| 2.2.1 | Saksan katsastuskäytäntö                       | 5  |
| 2.2.2 | Alankomaiden katsastuskäytäntö                 | 6  |
| 3     | Tutkimuksessa käytetyt mittausvälineet         | 8  |
| 3.1   | Dekati ePNC -mittauslaite                      | 8  |
| 3.2   | PEMS VI MPEC+ -mittaussovellus                 | 8  |
| 3.2.1 | Start  | 8  |
| 3.2.2 | Data   | 9  |
| 3.2.3 | ePNC Graph                                     | 11 |
| 3.2.4 | Sampler Graph                                  | 12 |
| 3.2.5 | Measurement                                    | 14 |
| 4     | Mittausvaihe                                   | 16 |
| 5     | Tutkimustulokset                               | 18 |
| 5.1   | Opel Vivaro                                    | 18 |
| 5.2   | Volkswagen Tiguan                              | 19 |
| 5.3   | Volvo V40                                      | 21 |
| 5.4   | Euro 5 -päästöluokituksen regenerointi         | 22 |
| 6     | Loppupäätelmät                                 | 26 |
|       | Lähteet  | 29 |

## Lyhenteet

- ECU: Engine Control Unit, moottorin ohjausyksikkö
- OBD: On-Board Diagnostics, ajoneuvon sisäinen valvontajärjestelmä
- ePNC: Electrical Particle Number Counter, elektroninen pienhiukkasten mitauslaite
- EU: Euroopan unioni
- RDE: Real Driving Emissions, RDE-testi, joka mittaa todellisia ajonaikaisia päästöjä
- PM: Particulate Matter, pienhiukkaspäästöt
- PN: Particle Number, pienhiukkasten lukumäärä

## 1 Johdanto

Ilmastohuoli ja -ahdistus ovat nykypäivänä suuri puheenaihe. Suomessa toimiva autotekniikan ja diagnostiikan kouluttaja Diagno Finland Oy ehdotti opinnäytetyön aiheeksi ajoneuvojen pienhiukkaspäästöjen mittaamisen sekä siihen vaikuttavat muuttajat.

Suomessa käytetään nykyisin OBD-mittausta, joka tehdään 1.9.2016 jälkeen käyttöönotetuille dieselajoneuvoille. Vanhemmista dieselajoneuvoista otetaan savutusmittaus. Siitä saadaan absorptiokerroin eli k-kerroin, joka määrittää sen, pääseekö ajoneuvo katsastuksesta läpi. OBD-mittaus ja savutusmittaus eivät kuitenkaan ole tarpeeksi luotettavia kokonaisvaltaiseen päästöjen mittaukseen, sillä pienhiukkasia mitataan tällä hetkellä hiukkasmassana. Pienhiukkasmittauksella pyritään havaitsemaan vioittuneet ja päästömanipuloidut ajoneuvot jo katsastusasemilla. Tällainen katsastusmenetelmä on otettu jo käyttöön Saksassa ja Alankomaissa. CITAn mukaan pienhiukkasmittauksesta on tultava EU-säännös, jonka perusteella Suomessakin katsastuksessa olisi hyvä suorittaa pienhiukkaspäästöjen mittaus, jossa mitataan pakokaasun mukana ilmaan välittyvien pienhiukkasten lukumäärää (Mayer 2019).

Pienhiukkaspäästöjen vaikutukset ilmenevät pääasiallisesti terveyshaittoina, ympäristön kuormittumisena ja ilmanlaadun heikkenemisenä (Riipinen 2011: 2). Monet tutkimukset ovat osoittaneet, että pienhiukkaspäästöt ovat huomattavasti haitallisempia terveydelle kuin kaasupäästöt, sillä pienhiukkaset pääsevät pienen kokonsa vuoksi tunkeutumaan ihmisen elimistöön, muun muassa keuhkoihin (Hamanaka & Mutlu 2018). Pakokaasupäästöjä on viime vuosina tiukentuneiden päästölakien ja uusien ajoneuvotekniikoiden avulla saatu vähennettyä huomattavasti. Hiukkaspäästöihin on kiinnitetty erityisesti huomiota, sillä niiden terveysvaikutuksia ei vielä tunneta kunnolla. (Riipinen 2011.)

Ajoneuvokatsastuksessa suoritettava pienhiukkasmittaus varmistaisi sen, että ajoneuvovalmistajan ja katsastuslainsäädännön asettamat vaatimukset

täytyisivät. Pienhiukkasmittauksessa suoritetaan testi ajoneuvon käydessä jou-  
tokäynnillä, jolloin mittalaite havaitsee pienhiukkasten määrän pakokaasussa.  
Tämä mittaustyyli on käyttäjäystävällisempi kuin nykyinen niin sanottu ryntäy-  
tystesti eli kaasupolkimen painaminen pohjaan, koska esimerkiksi käyntinopeu-  
den rajoitin saattaa olla epäkunnossa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää mittaustulokseen vaikuttavia teki-  
jöitä ja löytää perusteluja katsastuksen yhteydessä tehtävälle pienhiukkasmitt-  
taukselle. Miten eri tilanteet vaikuttavat mittaustulokseen? Mitä mittauksessa on  
otettava huomioon? Millaisilla keinoilla pyritään saamaan luotettava mittaustulos  
ja millaisia toimenpiteitä ja asioita tulisi välttää mittausvaiheen aikana? Huomi-  
oon otettavia asioita mittaustilanteessa ovat esimerkiksi eri moottoriparametrit,  
ajoneuvon toimintalämpötila, sähkökuluttajien, kuten takalasinlämmittimen tai  
ilmastoinnin, vaikutus sekä moottorin kuormitus. Sähkökuluttajilla pyritään vai-  
kuttamaan generaattorin kautta moottorin kuorman nousuun sekä pakokaasun  
lämpötilaan ja pienhiukkasten lukumäärään.

Työssä käytetään menetelmänä testiä, jolla mitataan pienhiukkasten lukumääriä  
kolmesta eri ajoneuvosta. Kirjallisuuslähteenä hyödynnetään aiheeseen liittyviä  
tutkimuksia sekä opinnäytetöitä.

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii autotekniikan ja diagnostiikan kouluttaja  
Diagno Finland Oy, joka toimii lisäksi korjaamolaitteiden maahantuojana. Opin-  
näytetyö antaa Diagnolle arvokasta tietoa pienhiukkaspäästöjen mittauksista.  
Opinnäytetyön tavoitteena Diagnolle on kehittää katsastustoimialaa Suomessa.

## 2 Pienhiukkaspäästöt ja niiden mittaaminen

Opasiteettimittarilla mitataan hiukkasmassaa valonläpäisymenetelmällä. Uuden sukupolven opasiteettimittarit käyttävät valonsirontaan perustuvaa teknologiaa. Uuden sukupolven opasiteettimittarit kykenevät laskemaan mitatusta valonsironta-arvosta vastaavan massavirta arvon. (Pakarinen 2015: 6.) Opasiteettimittarit ovat kehittyneet vuosien varrella entistä tarkemmiksi, mutta nykyaikaisten dieselajoneuvojen mittaamiseen ne ovat kuitenkin riittämättömiä, sillä dieselajoneuvojen nokipäästöt ovat matalia. Oikein toimivan Euro 6 -päästöluokituksen dieselmoottorin päästöt ovat hyvin alhaiset, osittain hiukkassuodattimen takia. Ihmissilmä ei pysty havaitsemaan partikkeleita niiden pienen koon vuoksi. Tarvitaan partikkelimittauslaite, joka pystyy havaitsemaan nämä partikkelit ja osoittaa, että dieselajoneuvo täyttää valmistajalle asetetut vaatimukset.

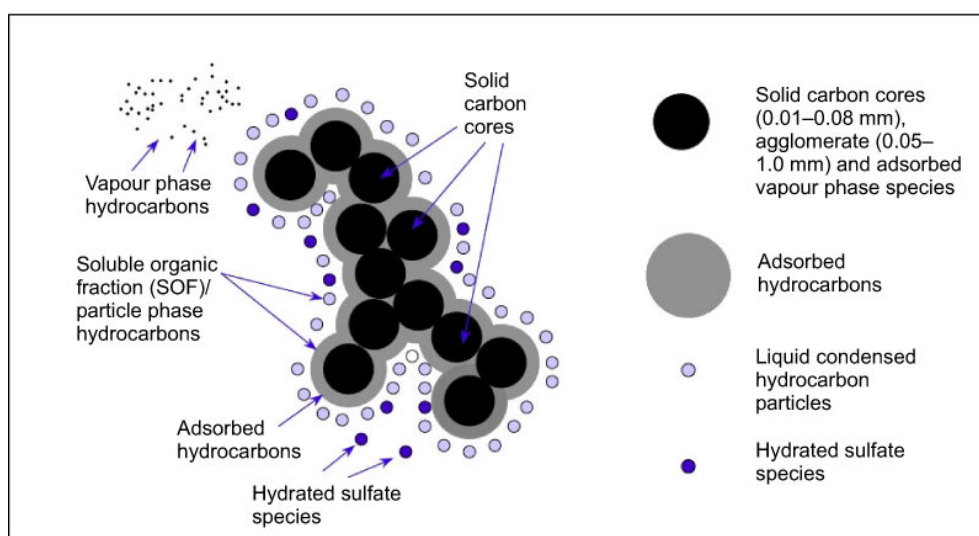
Täysin kunnossa oleva dieselmoottori ja partikkelisuodatin päästävät alle 20 000 nanopartikkelia pakokaasun mukana ulos. Vastaavasti epäkunnossa oleva tai päästömanipuloitu ajoneuvo voi päästää miljoonia partikkeleita pakokaasun mukana ilmaan. (Giechaskiel ym. 2022: 11.)

Kansainväliseen tieturvallisuuden edistämiseen keskittyvä yhteisö CITA on toteuttanut useita tutkimuksia päästömanipulaatiosta ja sen mittaluokasta (Mayer 2019). Erään tutkimuksen mukaan jopa yli 10 % maailman ajoneuvokannasta oli viallisia – joko partikkelisuodatin oli viallinen tai se puuttui. Tutkimuksessa myös todettiin, että tämä 10 % tuottaa 90 % pakokaasujen hiukkaspäästöistä. (Buekenhoudt 2019: 16.) Tämän perusteella voidaan olettaa, että viallisia tai päästömanipuloituja ajoneuvoja olisi Suomen tieliikenteessä 40 000–50 000 kappaletta.

### 2.1 Mitä pienhiukkaset ovat?

Halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin ( $\mu\text{m}$ ) hiukkasia kutsutaan pienhiukkasiksi. Mitä pienempiä hiukkaset ovat, sitä helpommin ne kulkeutuvat hengityksen mukana ihmisen hengitystiehyeihin. (Hamanaka & Mutlu: 2018.)

Pienhiukkaset muodostuvat dieselmootorissa epähomogeenisen palamisen vuoksi, minkä seurauksena syntyy kiinteitä aineita, partikkeleita. Partikkeleiksi luetaan yleisimmin palamattomat hiiliketjut eli noki. (Kuva 1.) Partikkeleiden on epäilty myös olevan karsinogeenia. (Tanskanen 2018: 11.) Noen muoto määrittyy palotapahtumasta sekä moottorin toimintapisteestä. Liikenteen pienhiukkaset koostuvat suurimmaksi osaksi polttoaine- ja voiteluaineperäisestä hiilestä, orgaanisista hiilyhdisteistä sekä rikin yhdisteistä. (Seppälä 2003: 4.)



Kuva 1. Partikkelin koostumus (Twigg & Philips 2009).

## 2.2 Pienhiukkaspäästöjen mittaus osana katsastusta

Pienhiukkaspäästöt ovat tällä hetkellä ajankohtaisempia kuin koskaan, sillä Euro 5 ja Euro 6 -päästöluokituksen dieselajoneuvojen hiukkaspäästöt ovat kasvaneet edellä mainittujen tutkimuksien perusteella. Lisäksi ajoneuvokannan sähköistyminen tuo omat haasteensa hiukkaspäästöille, sillä tie-, rengas- ja jarrupäästöt ovat sähköautojen huolenaiheena.

Pienhiukkasmittaukset olisivat hyvä lisä ajoneuvojen katsastukseen muun muassa pienhiukkasten negatiivisten terveysvaikutusten sekä ympäristön kuormittumisen takia. Toistaiseksi pienhiukkasia mitataan Suomessa ainoastaan pienhiukkasmassana (PM), ei pienhiukkaslukumäärinä (PN). Tällä

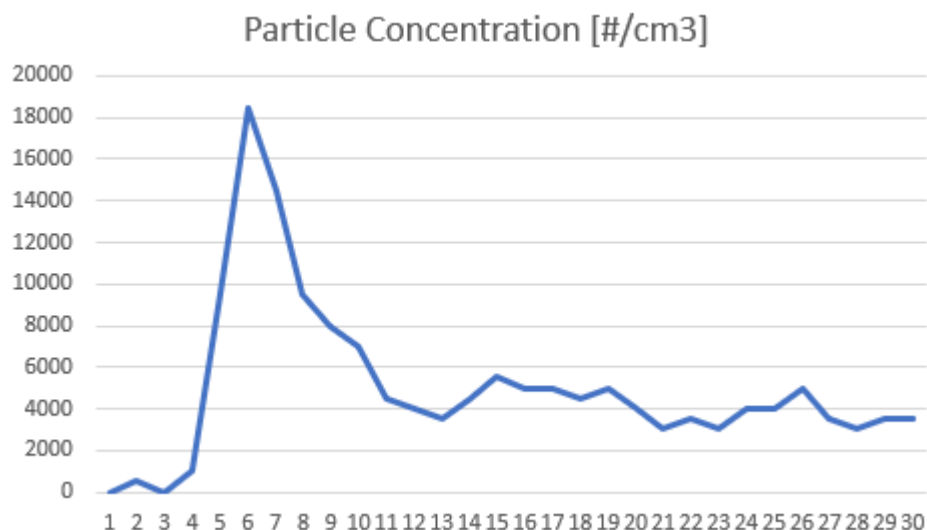
mittausmenetelmällä saataisiin tieto päästömanipuloiduista sekä epäkunnossa olevista ajoneuvoista Suomen tieliikenteessä. (Non-exhaust Particulate Emissions From Road Transport 2020.)

### 2.2.1 Saksan katsastuskäytäntö

Saksassa katsastusdirektiivi on määrittänyt mittausajanjaksoksi 30 sekuntia ilman esistabilointia. Euro 6 -päästöluokitukseen luokitellun ajoneuvon partikkeli- raja on 250 000 partikkelia per kuutiosenttimetri. Lisäksi ajoneuvon on täytettävä tietyt parametrit ennen kuin mittaus suoritetaan, esimerkiksi moottorin lämpötilan täytyy olla vähintään 60 astetta. Ajoneuvon joutokäynti ja lämpötila on kirjattava. Lisäksi ajoneuville tehdään moottorin ohjainlaitteen vikadiagnostiikkatesti sekä mittariston vikavalojen visuaalinen tarkastus.

Tämän jälkeen suoritetaan stabilointi, jossa ajoneuvoa käytetään 15 sekuntia joutokäynnillä ja 30 sekuntia korotetulla kierrosnopeudella (1000 rpm). Stabilointivaiheen jälkeen ajoneuvoa käytetään 30 sekuntia joutokäyntiä, minkä jälkeen mittaus voidaan suorittaa. Laitetta ei tarvitse esistabiloida. Jos ensimmäinen mittaustulos on alle 100 000 partikkelia per kuutiosenttimetri, mittausta ei tarvitse suorittaa uudestaan. (Verkehrsblatt 2021.)

Tämän tutkimuksen mittauksissa (ks. luvut 3 ja 4) huomattiin, että kun laitteen esistabilointi Saksan mittausmenetelmän mukaisesti jätettiin pois, hiukkasmäärä nousi mittauksen alussa (kuva 2). Hiukkasmäärä voi nousta alussa hyvin korkeaksi, mikä voi johtaa epäluotettavaan tulokseen. Täysin toimivassa ajoneuvossa tämä ei kuitenkaan aiheuta keskiarvillisesti suurta vaikutusta, mutta rajatapausautoissa tämä voi olla ratkaiseva tekijä. Mittauksen alkupiikki voi siis joissakin tapauksissa johtaa väärään positiiviseen tulokseen, jolloin ajoneuvo hylätään katsastuksesta perusteettomasti.



Kuva 2. Saksan mittaustavan alkupiikki.

### 2.2.2 Alankomaiden katsastuskäytäntö

Alankomaiden katsastusdirektiivi on määrittänyt laitteelle 15 sekunnin esistabilointiajan sekä 15 sekunnin mittausajan. Partikkelien määrän raja on joutokäynnillä Alankomaissa 1 000 000 partikkelia per kuutiosenttimetri, jos ajoneuvo on tilattu tehtaalta ennen 1.1.2015, kun taas 31.12.2014 jälkeen tilattujen ajoneuvojen partikkeliraja Alankomaissa on 250 000 partikkelia per kuutiosenttimetri.

Ennen mittausta on kirjattava ylös ajoneuvon rekisteröintitiedot ja päästöraja. Kun sondi on asetettu pakoputkeen, suoritetaan aiemmin mainittu 15 sekunnin esistabilointi moottorin käydessä joutokäyntiä. Tämän jälkeen tehdään 15 sekunnin mittausvaihe, jonka tuloksen keskiarvo kertoo, meneekö ajoneuvo päästöluokituksen asettamiin rajoihin. Mittauksen alussa on huomioitava se, että jos partikkelimäärä kaksinkertaistuu, niin tulos luokitellaan hylätyksi. (NL regulations for checking DPF with PN counter 2019.)

Alankomaiden mittauksessa laitteen esistabilointi ennen mittausta poistaa alkupiikin, jonka vaikutus Saksan mittauksessa voi vaikuttaa lopputulokseen. Alankomaiden mittauksen lyhyempi aikaväli kuitenkin voi joissain tapauksissa olla liian lyhyt mittauksen tulokinnan kannalta. Kuvaajasta voi olla vaikea analysoida

ajoneuvon tilaa. Ajoneuvossa voi olla esimerkiksi käynnissä regenerointi, joka tarkoittaa partikkelimäärän väliaikaista nousemista, tai ajoneuvossa voi olla käynnissä jokin moottorinohjauksen ohjaama toiminto tai tekijä. Lisäksi moottorin kuorman vaikutus voi olla ratkaiseva vanhemmissa Euro 5 -päästöluokituksen autoissa.

### 3 Tutkimuksessa käytetyt mittausvälineet

#### 3.1 Dekati ePNC -mittauslaite

Dekati ePNC – Electrical Particle Number Counter -laite on helppokäyttöinen PN-PEMS-mittauksiin suunniteltu laite, jossa on patentoitu, nopeisiin mittauksiin kehitetty Dekatin partikkelien laskentateknologia. Laite täyttää RDE-vaatimukset, ja se on testattu niin, että sen mittaolosuhteet eivät vaikuta mittaustehoon.

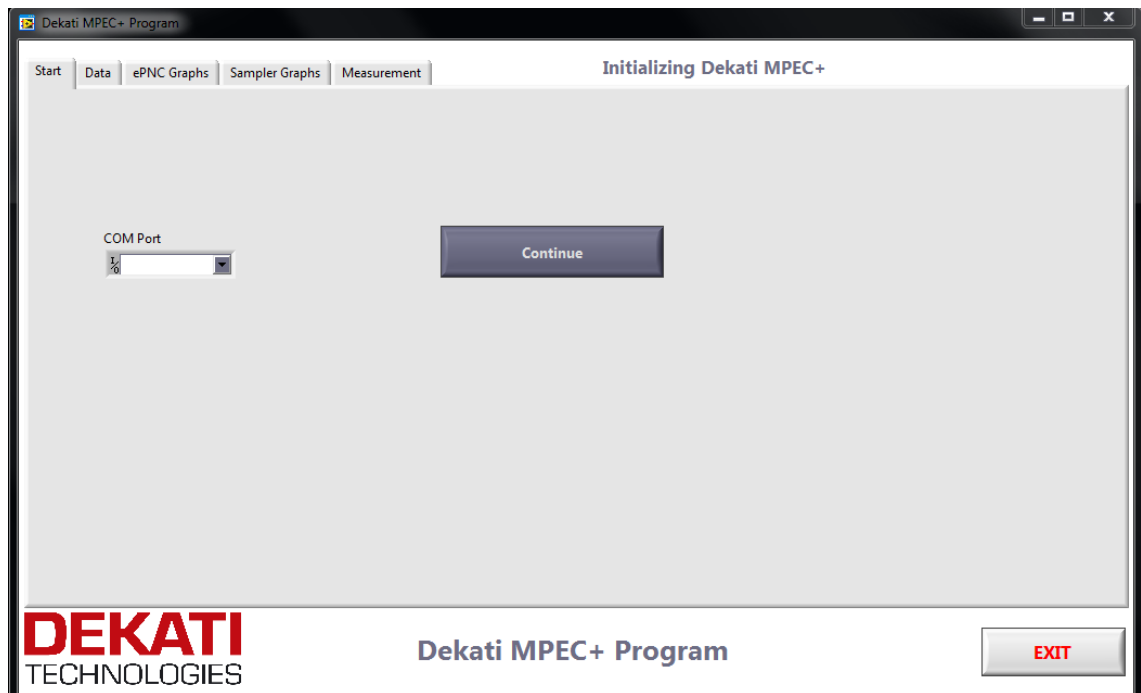
Dekatin partikkelimittalaite pystyy mittaamaan laajalla dynaamisella arvoalueella 1000–15 000 000 partikkelia per kuutiosenttimetri. Mittaus tapahtuu syöttämällä pakokaasua ePNC-anturin läpi, jossa partikkelit elektronisesti varataan. Laske-malla tämä varaus voidaan määrittellä partikkelien konsentraatio eli partikkeleita per kuutiosenttimetri. (Dekati ePNC at PTI station: 2021; Dekati MPEC+ Brochure: 2021.)

#### 3.2 PEMS VI MPEC+ -mittaussovellus

Dekatin kehittelemä sovellus on hyvin käyttäjäystävällinen, ja toiminta on helppo sisäistää. Sovellus on yhteensopiva mittauksissa käytetyn laitteen kanssa.

##### 3.2.1 Start

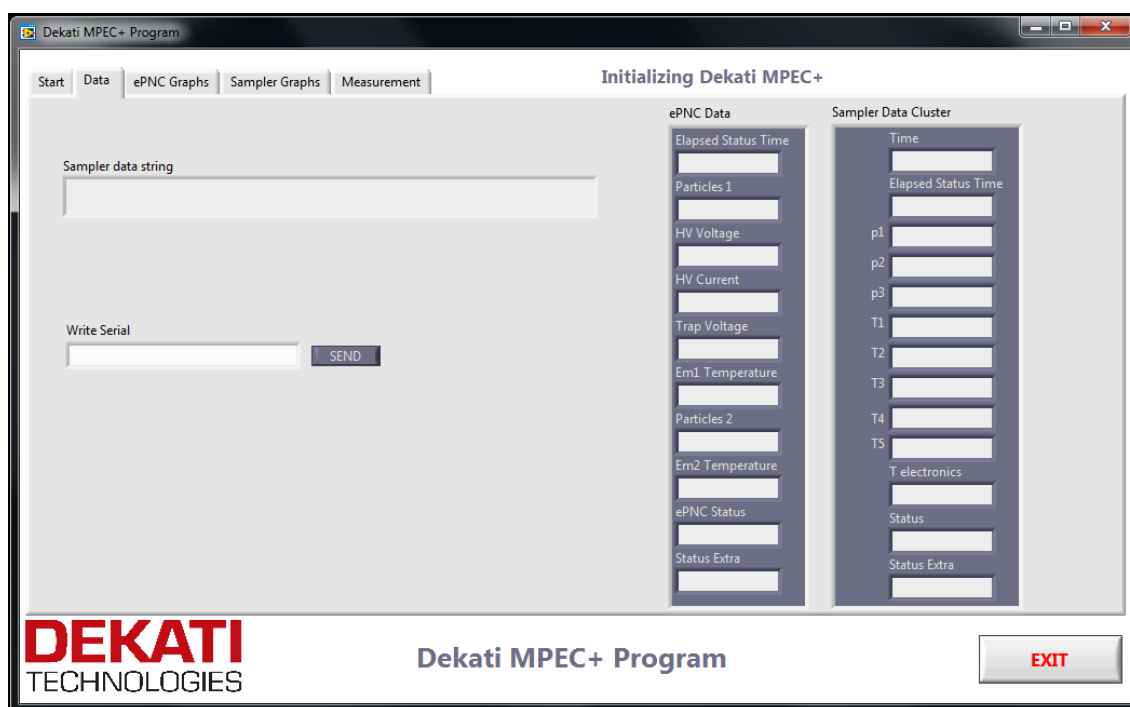
Sovelluksen ensimmäisessä välilehdessä eli Start-kohdassa (kuva 3) valitaan käytettävä COM-portti eli USB-portti, johon Serial-To-USB-kaapeli on kytketty.



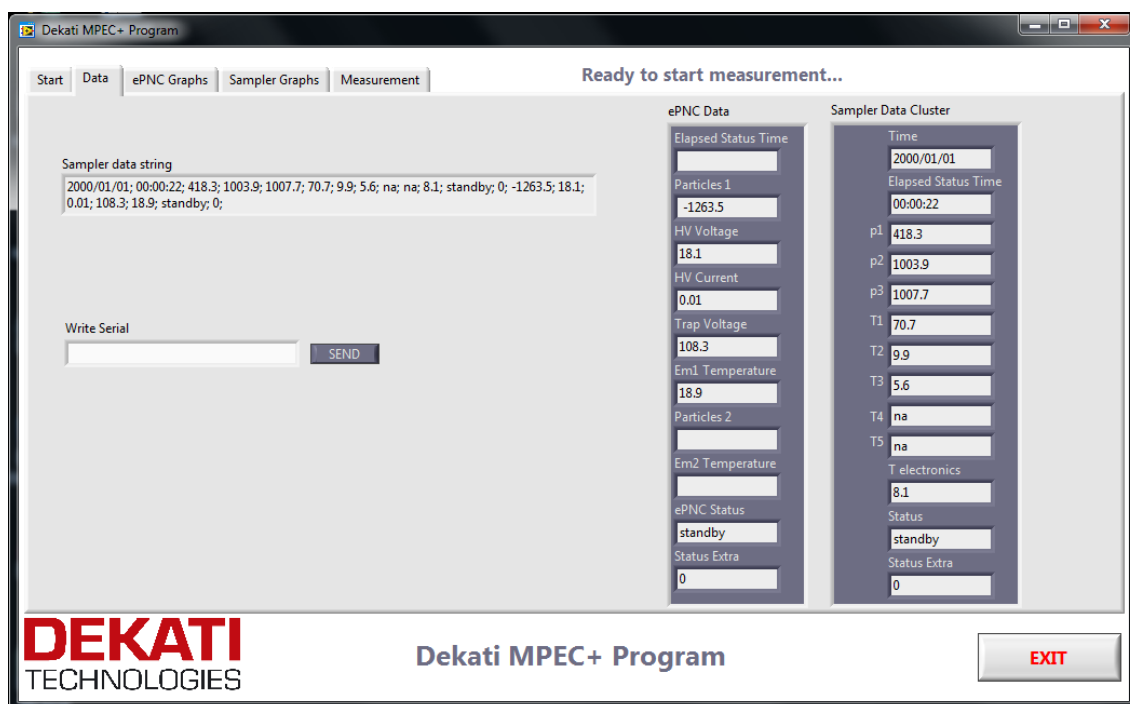
Kuva 3. Start-välilehti ja COM-Portin valintaruutu.

### 3.2.2 Data

Data-välilehden alta löytyy mittauslaitteen status eli tila (kuva 4). Kun laite käynnistetään, sen varaajan pumppu ja lämmitin kytkeytyvät automaattisesti päälle. Laite menee Warm-up-tilaan eli esilämmitystilaan. Tällöin mittauksia ei voi suorittaa vaan on odotettava, että laite on esilämmitetty. Laite on valmis, kun p1-arvo on noin 400 millibaaria ja t1-arvo on noin 300 astetta (kuva 5).



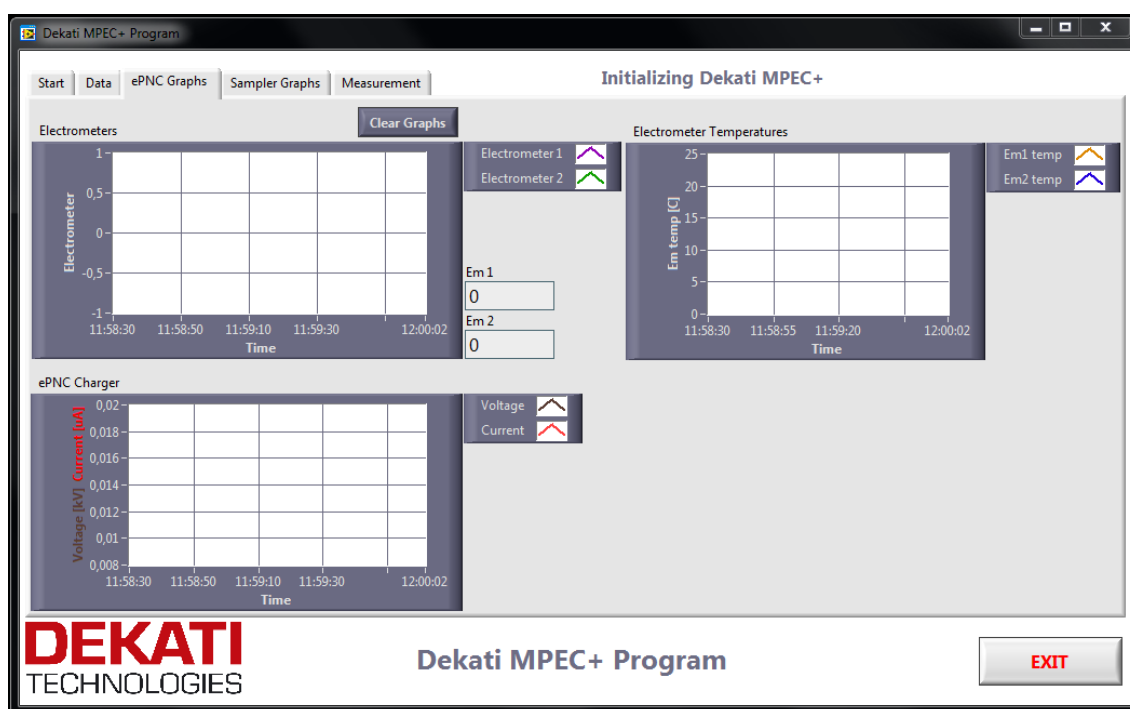
Kuva 4. Data-välilehti, kun laitteeseen ei ole muodostettu yhteyttä.



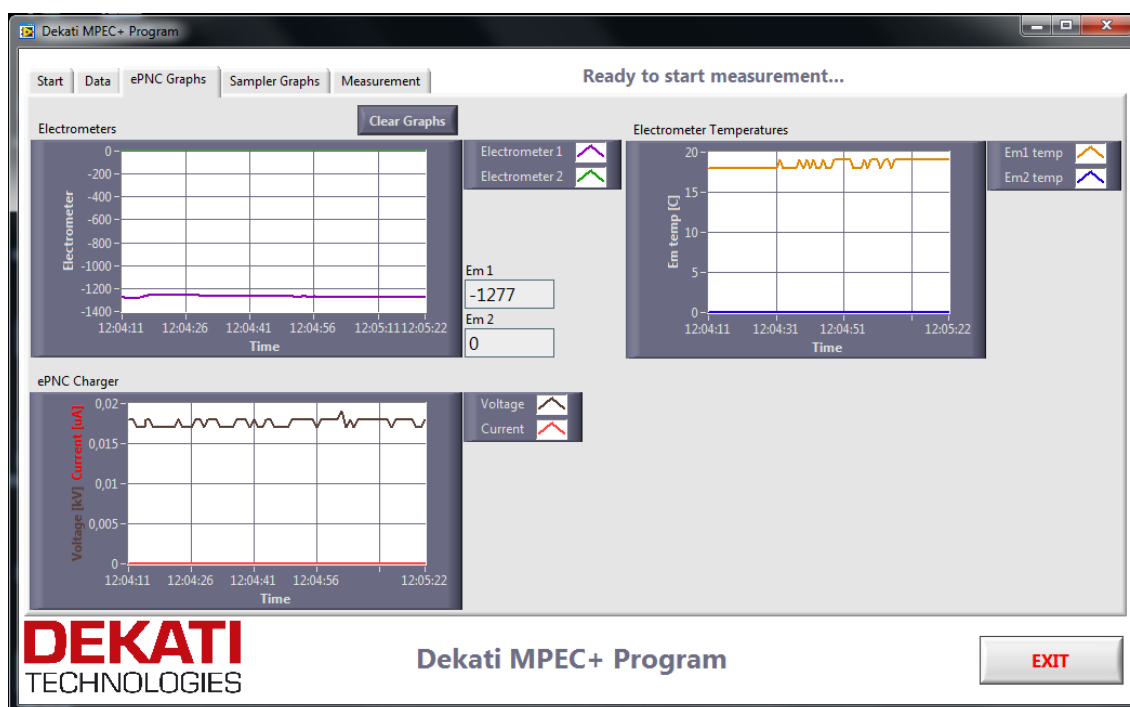
Kuva 5. Data-välilehti, lämmitysvaihe.

### 3.2.3 ePNC Graph

ePNC Graph -välilehti näyttää sensorien reaaliaikaiset parametrit, elektrometrin virran, elektrometrin lämpötilan, varaajan virran sekä lämpötilan. Laitteen käynnistyessä ja ennen ensimmäistä nollakohtaa kalibrointia nämä arvot voivat olla korkeammat kuin yleensä (kuvat 6 ja 7).



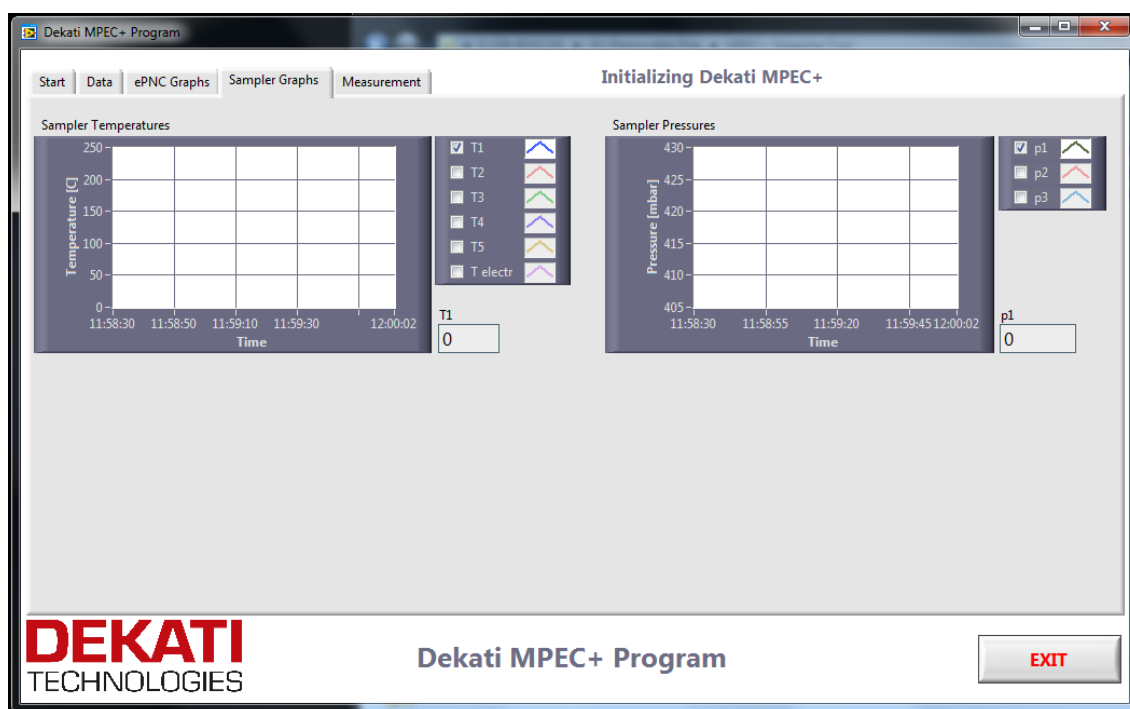
Kuva 6. ePNC Graph -välilehti, laite ei kytkettynä.



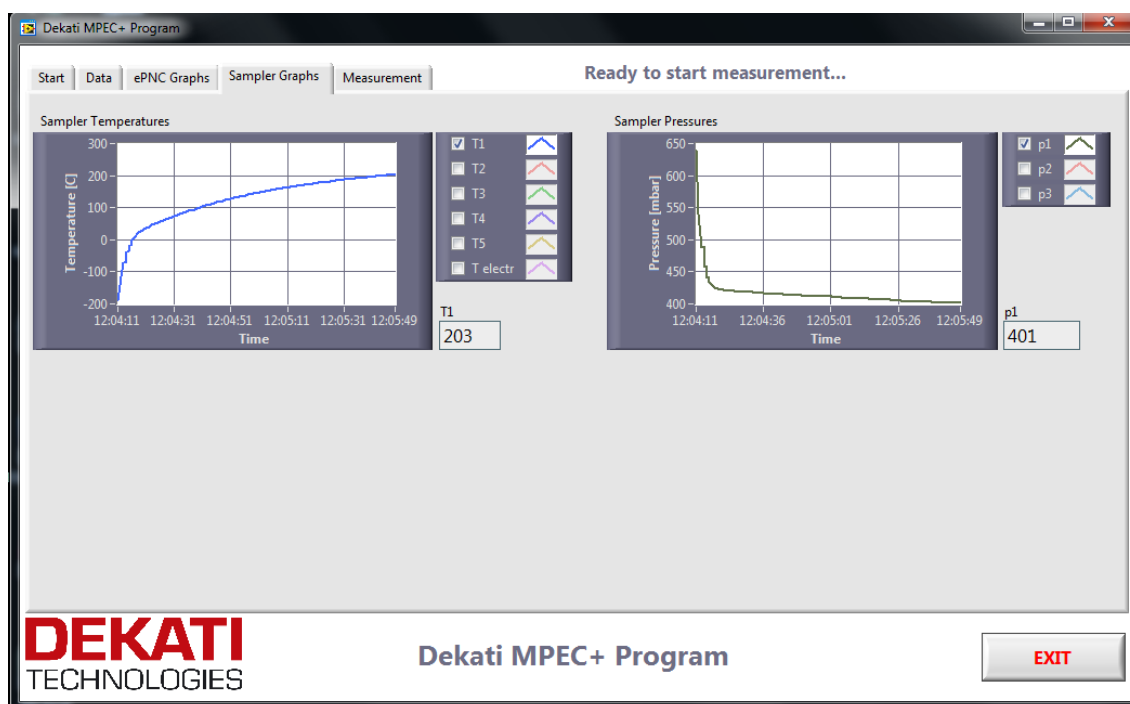
Kuva 7. ePNC Graphs, lämmitysvaihe.

### 3.2.4 Sampler Graph

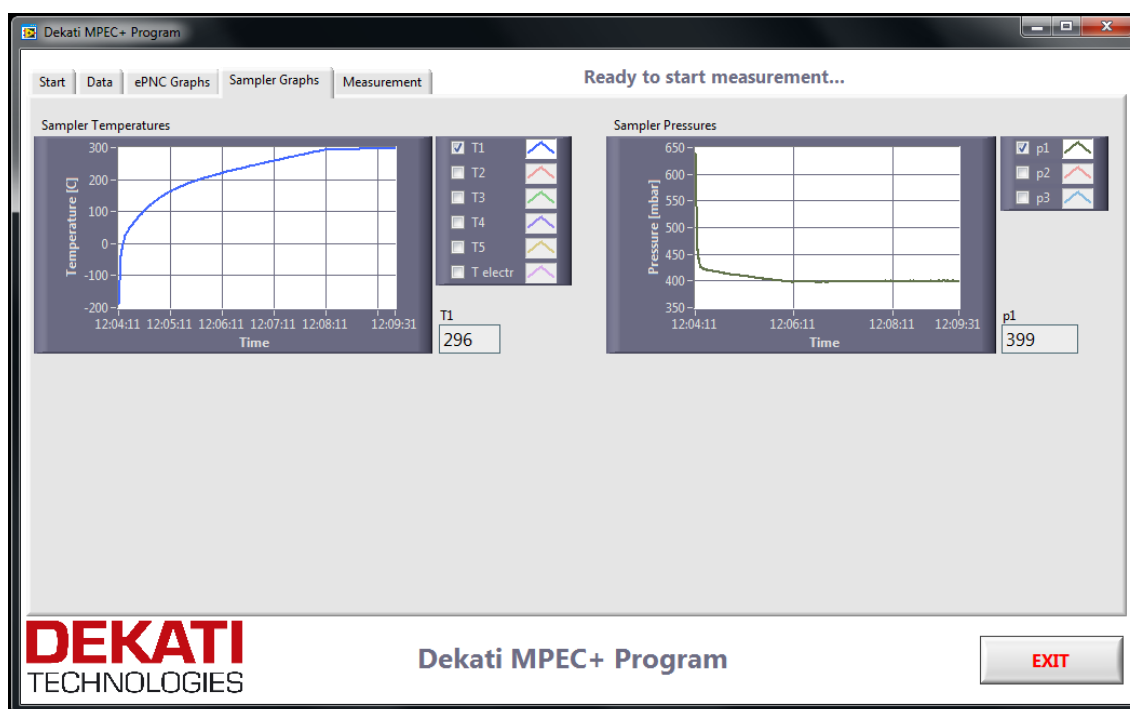
Sampler Graph -välilehti näyttää mittauslinjan lämpötilan ja paineen (kuva 8). Kun systeemin paine (mbar) nousee 400 asteeseen ja lämpötila (°C) nousee 300 asteeseen, on laite valmis suorittamaan mittausta. Laitteen status muuttuu, ja Measurement-välilehti ilmestyy näkyville. Jos laite ei ole toimintalämmin, Measurement-sivulla ei näy mitään. Laitteen lämmitys kestää noin 5 minuuttia (kuvat 9 ja 10).



Kuva 8. Sampler Graphs, laite ei kytkettynä.



Kuva 9. Sampler Graphs, lämmitys kesken T1=203.



Kuva 10. Sampler Graphs, laite mittausvalmis T1=296.

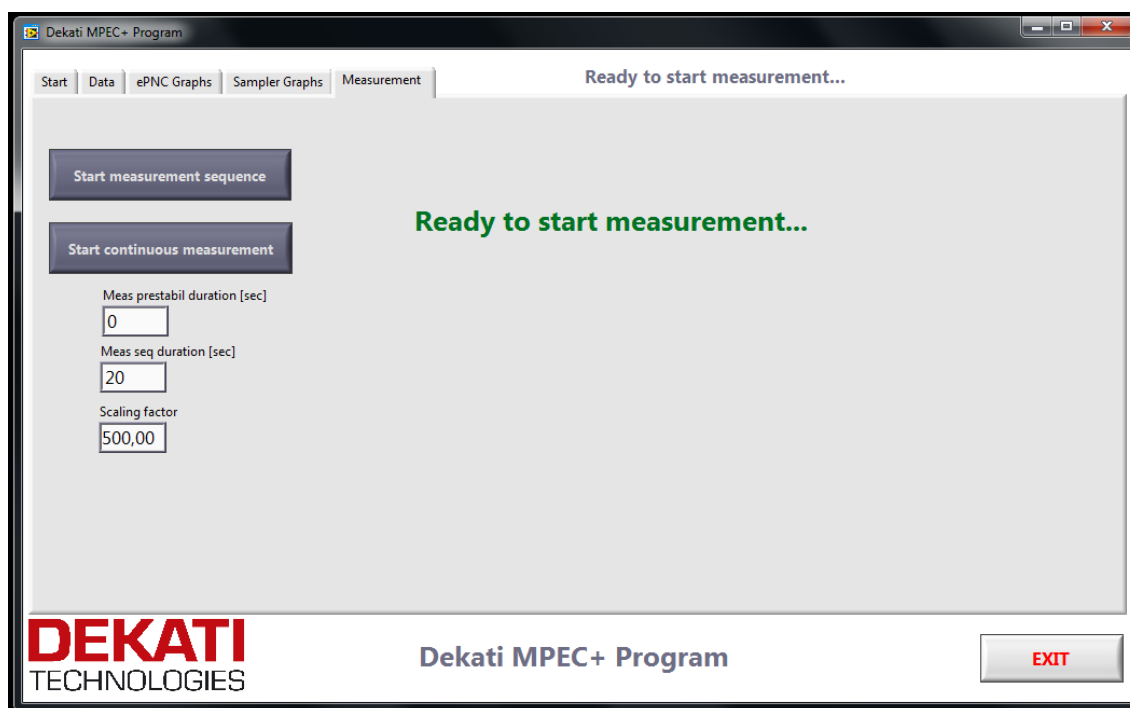
### 3.2.5 Measurement

Measurement-välilehden ilmestyttyä mittaus voidaan aloittaa joko mittaussekvenssinä tai jatkuvana mittauksena (kuva 11). Mittaussekvenssiä (Start Measurement Sequence) käytetään tietyn ajan (sec) mittaamiseen. Haluttu mittausaika syötetään ohjelmassa kohtaan Meas Seq Duration (sec). Suositeltava aika on alle 300 sekuntia.

Pre-stabilization Time eli esistabiloinnin aika syötetään kohtaan Meas Prestabil Duration [sec]. Esistabiloinnin aika tarkoittaa 3-suuntaventtiilin aukeamisen ja oikean mittauksen välistä aikaa. Venttiilin auettua pakokaasu pääsee kulkemaan mittauslaitteen ja sensoreiden läpi, mikä tuottaa elektrometrin signaalin.

Scaling Factor eli mittauslaitteen skaalaus on muuttuja, jota käytetään partikkelin konsentraation laskemiseen elektrometrin virran perusteella (kaava 1).

$$\text{Particle number concentration [ cm}^{-1}\text{ ]} = \text{Electrometer current [ fA ]} * \text{Scaling Factor [ cm}^{-1}\text{/fA ]} \quad (1)$$



Kuva 11. Measurement-välilehti, Ready to start measurement.

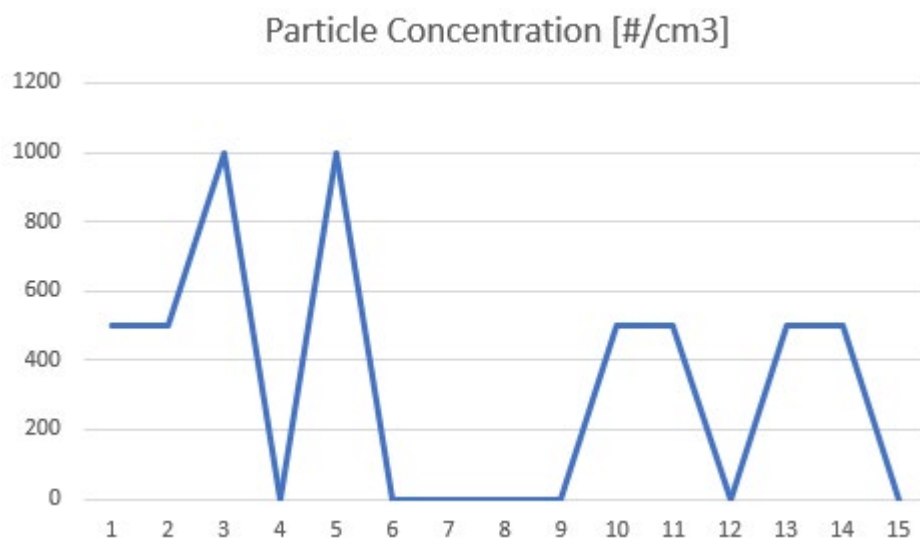
## 4 Mittausvaihe

Ajoneuvo ajetaan mittaustilaan ja mittaus tehdään joutokäynnillä. Mittausaika on Saksassa käytettävä 3 kertaa 30 sekuntia ja Alankomaissa käytettävä 15 sekunnin esivalmistelu ja 15 sekunnin varsinainen mittaus. Mittausvaihe aloitetaan laittamalla ePNC-laitteen mittauspää ajoneuvon pakoputkeen. Tämän jälkeen käynnistetään Windows-pohjaisella sovelluksella mittausvaihe, joka suorittaa mittauksen ja näyttää tulokset sovelluksessa.

Mittauksia tehtiin jokaiseen ajoneuvoon vähintään 21 kappaletta, ja jos regenerointi oli mahdollista, mittauksia tehtiin 51 kappaletta. Käytössä olivat edellä mainitut Alankomaiden ja Saksan mittaustyyliä sekä tutkimustilanteessa hyväksi todettu mittausmenetelmä, 10 sekunnin esistabilointi ja 60 sekunnin mittausaika. Tämä toistettiin kolme kertaa. Tällä mittaustyyliä datan lukeminen oli helpompaa, koska pitkällä mittausajalla varmistettiin se, että muutokset mittauksen aikana saadaan tallennettua.

Mittauksen aikana pyrittiin saamaan aikaan tilanne, joka vaikuttaa hetkellisesti tai pidempiaikaisesti ajoneuvon pienhiukkaspäästöihin. Tällainen tilanne voi esimerkiksi olla jokin tietty kuormittava tekijä, kuten ilmastoinnin kompressorin käynnistyminen, joka lisää huomattavasti moottorin kuormitusta. Ajoneuville tehtiin myös stabiileja mittauksia eli sitä mitattiin joutokäynnillä, ilman että pienhiukkaspäästöihin yritettiin vaikuttaa jollakin tavalla (kuva 12).

Pienhiukkasmittaukset suoritettiin kolmeen ajoneuvoon: Opel Vivaro, Volvo V40 sekä Volkswagen Tiguan. Ajoneuvojen tilaa ja parametreja tutkittiin KTS 560 -diagnostiikkatyökalulla moottorinohjauksen (ECU) kautta.



Kuva 12. Opel Vivaron joutokäyntimittaus Alankomaiden mittaustavalla.

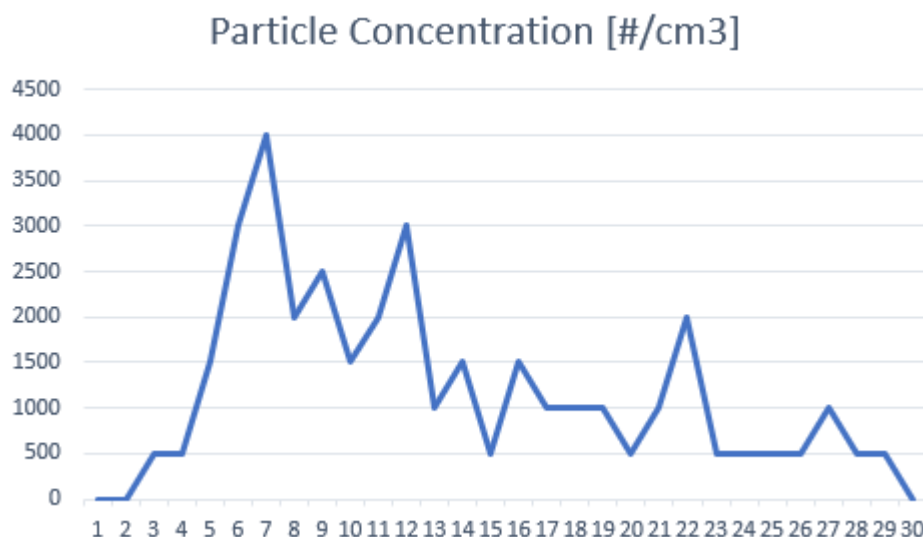
## 5 Tutkimustulokset

### 5.1 Opel Vivaro

Ensimmäisenä mittausajoneuvona toimi vuoden 2020 Opel Vivaro. Vivaro on varustettu 2-litraisella dieselmoottorilla D 20 DTH / AHX -moottoritunnus. Ajoneuvo oli juuri ennen mittauksiin saapumista tehnyt partikkelisuodattimen regeneroinnin, koska hiukkassuodattimen paine-ero oli matala ESI[tronic] 2.0:lla luettaessa (kuva 13). Ensimmäisistä mittauksista tuli tasaisen hyviä tuloksia, mutta tuloksen manipulointi oli haastavaa. Nokimassaa saatiin 500 grammaa, ja paine-eroa ei pystytty nostamaan lyhytsykliisellä ajolla. Ajoneuvon öljyn lämpötila nousi 70 asteeseen, ja jäähdytinnesteen lämpötila vaihteli 50–60 asteen välillä lyhyen moottoritieajon aikana. Näillä ei kuitenkaan juurikaan ollut mittaustulokseen vaikutusta, vaan lähinnä sähkönkuluttajien ja kuorman lisääminen vaikuttivat partikkelimäärään. (Kuva 14.)

| Mittatut arvot (On-arvo)                             |          |
|--|----------|
| <a href="#">Paine-ero / hiukkassuodatin</a>          | 5 mbar   |
| <a href="#">Pakokaasujen lämpötila ennen KAT</a>     | 70 °C    |
| <a href="#">Tuhkapitoisuus, hiukkassuodatin</a>      | 13 %     |
| <a href="#">Pakokaasulämpö SCR-katalysaattorissa</a> | 65 °C    |
| <a href="#">DPF-suodat.paine-ero: dynaam.offset</a>  | --- mV   |
| <a href="#">Jäähdytysnesteen lämpötila</a>           | 26 °C    |
| <a href="#">Hiukkassuodatin: nokimassa</a>           | 52,023 g |
| <a href="#">Hiukkassuodatin: valvontakerroin</a>     | 0 %      |

Kuva 13. Mitatut Arvot Opel Vivaro.



Kuva 14. Sähkökuluttajien vaikutus Opel Vivaron partikkelimäärään mittauksessa.

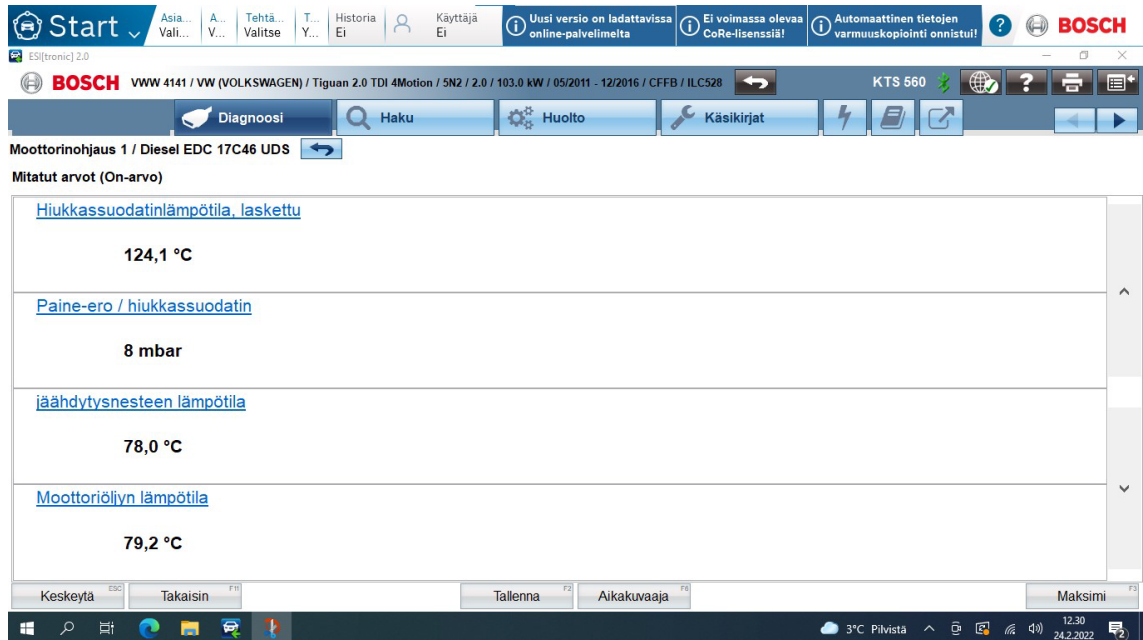
## 5.2 Volkswagen Tiguan

Toisena mittausajoneuvona käytettiin Volkswagen Tiguania (Euro 5 -päästöluokitus), joka on varustettu 2-litraisella dieselmoottorilla, moottoritunnus CFFB. Mittauksessa pyrittiin huomioimaan sähkökuluttajien, olosuhteiden sekä regeneroinnin vaikutusta partikkelimääriin.

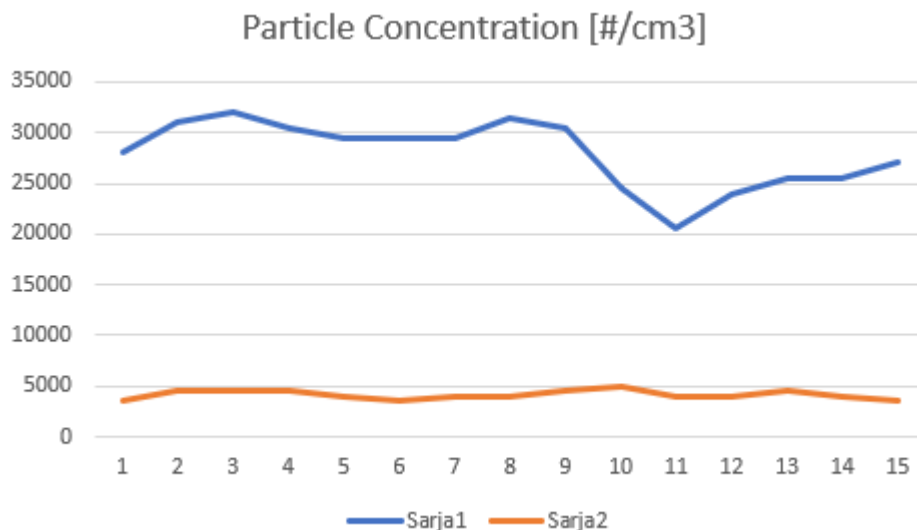
Olosuhteiden ja moottoriparametrien vaikutus pystyttiin huomaamaan mittaustuloksissa. Tuloksista havaittiin, että moottorin lämpötilalla ja hiukkassuodattimen lämpötilalla on vaikutusta partikkelimäärään, eli mitä lähempänä optimikäyntilämpöä moottori on, sitä vähemmän pienpartikkeleja pakoputkesta pääsee kulkemaan ilmaan. (Kuva 15.)

Olosuhteilla ja ajohistorialla huomattiin myös olevan merkitystä pienhiukkaspäästöissä. Edellä mainitulla ajoneuvolla oli ajettu vain lyhyttä työmatkaa taajaman sisällä, ja tämän vaikutus huomattiin mittaustuloksissa. Ensimmäisissä mittauksissa havaittiin korkeammat pienhiukkaspäästöt kuin optimilämpötilassa olevalla moottorilla. Kuvaajasta voidaan nähdä, että partikkelien määrä laski keskiarvoisesti 28000:sta 3500:een, kun ajoneuvoa oli päässyt

optimilämpötilaan. Tämä tarkoittaa, että kyseisen ajoneuvon pienhiukkaspäästöt ovat noin 700 % korkeammat moottorin ollessa kylmä kuin sen ollessa lämmin. (Kuva 16.)



Kuva 15. Tiguanin parametrejä noin 5 minuutin joutokäynnin jälkeen.

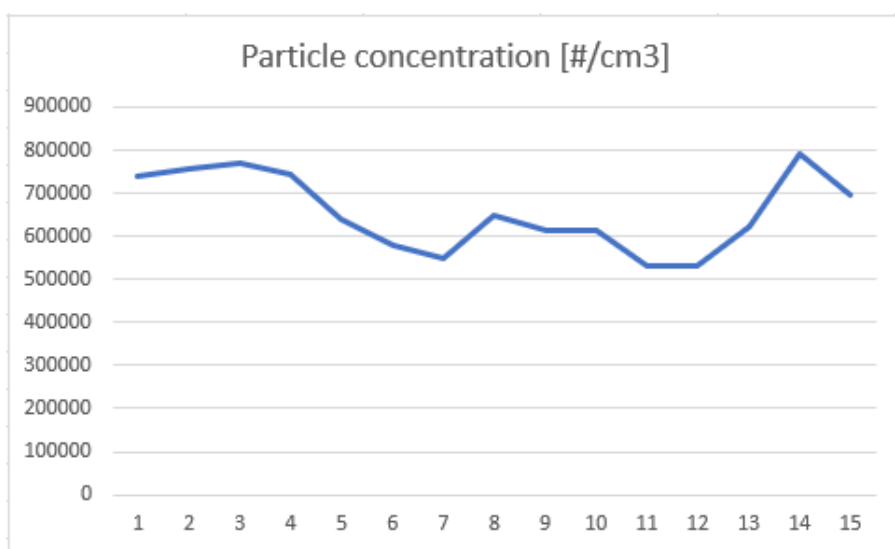


Kuva 16. Tiguanin partikkelimäärä, moottori kylmänä (sarja1) ja lämpimänä (sarja 2).

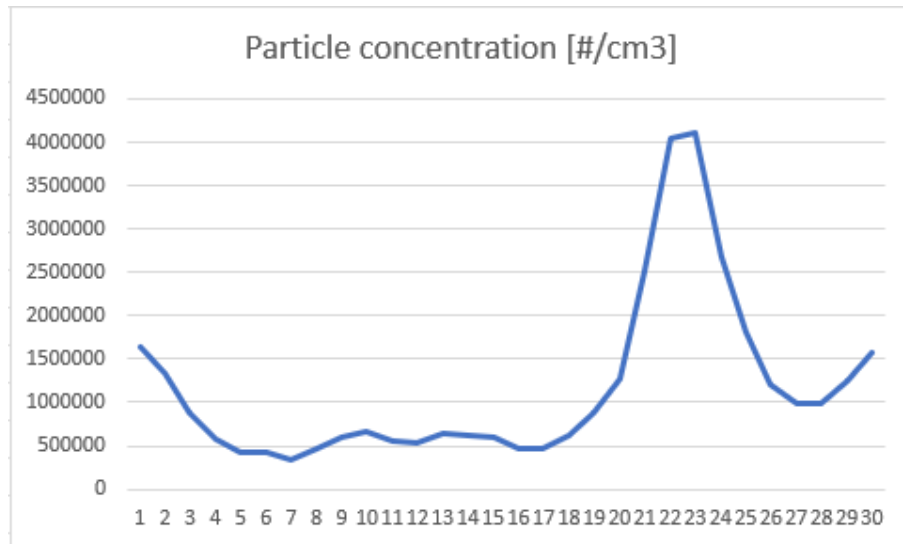
### 5.3 Volvo V40

Kolmantena mittauskohteena käytettiin Volvo V40 -merkkistä ajoneuvoa, joka on varustettu 1,6-litraisella dieselmoottorilla D 4162 T. Mittauksessa pyrittiin selvittämään regeneroinnin ja sähkökuluttajien vaikutusta mittaustuloksiin ja ajoneuvoon.

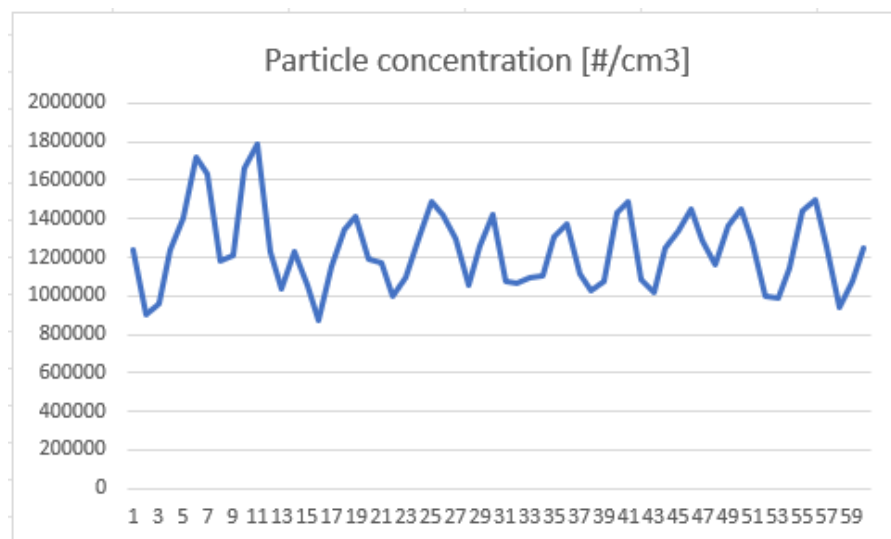
Mittauksen alkuvaiheessa Volvo jäi Euro 5 -päästöluokitukselle osoitetun sallitun maksimiarvon (1 000 000 partikkelia per kuutiosenttimetri) alapuolelle (kuva 17), mutta manipuloimalla ajoneuvon sähkökuluttajia saatiin tulokseksi korkeammat arvot (kuva 18). Volvosta pystyttiin myös kuulemaan, kuinka moottorinohjaus ohjasi ajoneuvon eri releitä, ja tällä huomattiin olevan merkitystä tuloksissa (kuva 19). Lisäksi ajoneuvon käynnissä pystyttiin havaitsemaan muutosta näiden tapahtumien seurauksena. Joutokäynti muuttui, ja moottorin pyörintänopeus laski hetkeksi ja palasi normaaliksi, kuitenkin käyden hieman raskaammin. Tätä voisi selittää generaattorin latausjännitteen muutos. Ajoneuvon generaattori muuttaa polttomoottorin mekaanisen liike-energian sähköenergiaksi, ja kun ajoneuvon sähkön tarve kasvaa, niin generaattorin kuorma suurenee. Tällä huomattiin olevan vaikutusta mittaustuloksiin. [Automotive Handbook 2018: 1290]



Kuva 17. Volvon pienhiukkaspäästöt joutokäynnillä.



Kuva 18. Saksan mittaustavalla suoritettu sähkökuluttajilla manipuloitu tulos, piikki sähkökuluttajat.



Kuva 19. Pienhiukkasten määrä. Kuvaajassa kaksi alkupiikkiä osoittavat releiden naksunnalla nousseet pienhiukkaslukumäärät.

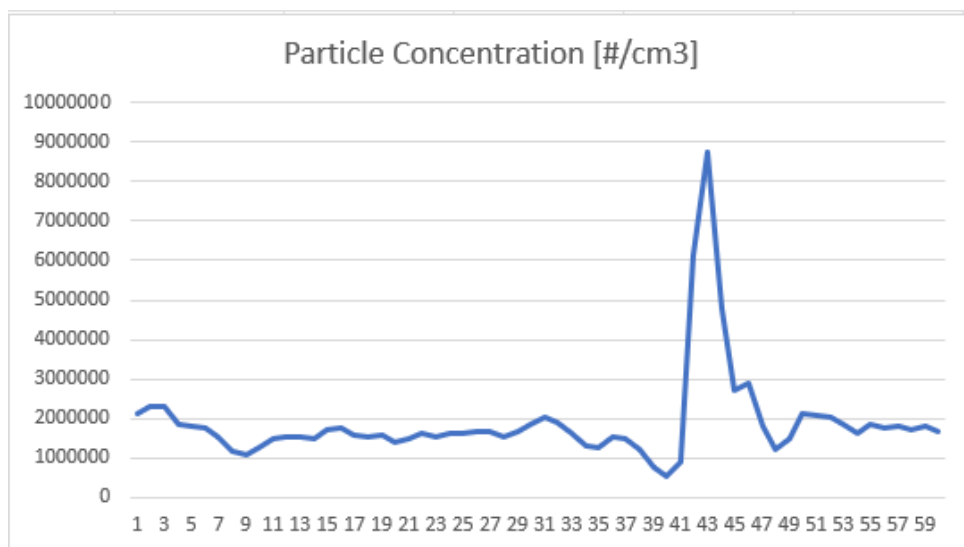
#### 5.4 Euro 5 -päästöluokituksen regenerointi

Partikkelisuodattimen tehtävänä on puhdistaa dieselmoottorin tuottamat pienhiukkaset. Yleisimmät käytössä olevat suodatintyypit ovat

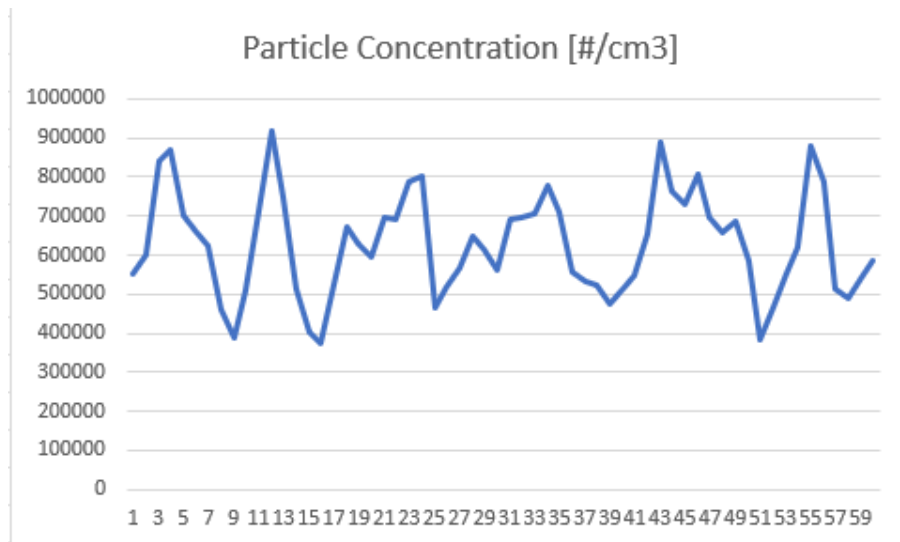
hunajakennorakenteisia tai lamellirakenteisia. Tukkeutumisen riskin vuoksi ajoneuvoihin on kehitetty partikkelisuodattimen regenerointi. (Ruottinen 2020: 2.)

Euro 5 -päästöluokituksen ajoneuvot pystyttiin pakottamaan diagnostiikkalaitteiden avulla suorittamaan partikkelisuodattimen regenerointi. Regeneroinnin tarkoitus on polttaa partikkelisuodattimeen kertyneet pienhiukkaset ja puhdistaa suodatin.

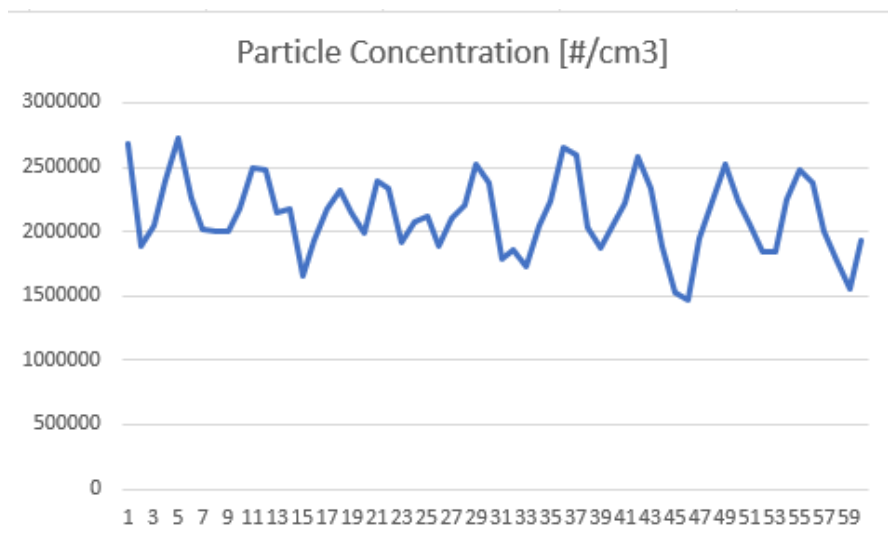
Regeneroinnin aikana pakokaasulämpötilat nousivat 260–290 asteeseen ja ajoneuvon käynnin muutoksista pystyttiin havaitsemaan pakokaasun lämpötilan vaihteluita. Lämpötilan vaihtelut mitattiin termoparin avulla, joka oli kytkettynä Dekatin mittalaitteeseen. Regeneroinnin aikana ajoneuvo nostaa partikkelisuodattimen lämpötilaa korkeammaksi jotta, pienhiukkaset palaisivat pois. Regeneroinnin alku saatiin kuvaajalle (kuva 20), ja tästä voitiin todeta regeneroinnin aiheuttavan huomattavasti suuremmat pienhiukkaspäästöt kuin normaalilla joutokäynnillä (kuva 21). Volkswagenin pienhiukkaspäästöt regeneroinnin jälkeen olivat huomattavasti matalammat kuin Volvon pienhiukkaspäästöt. Regeneroinnin jälkeinen tila, kun partikkelisuodatin on tyhjennetty, aiheutti hetkellisen muutoksen partikkelimäärässä. (Kuvat 22 ja 23.)



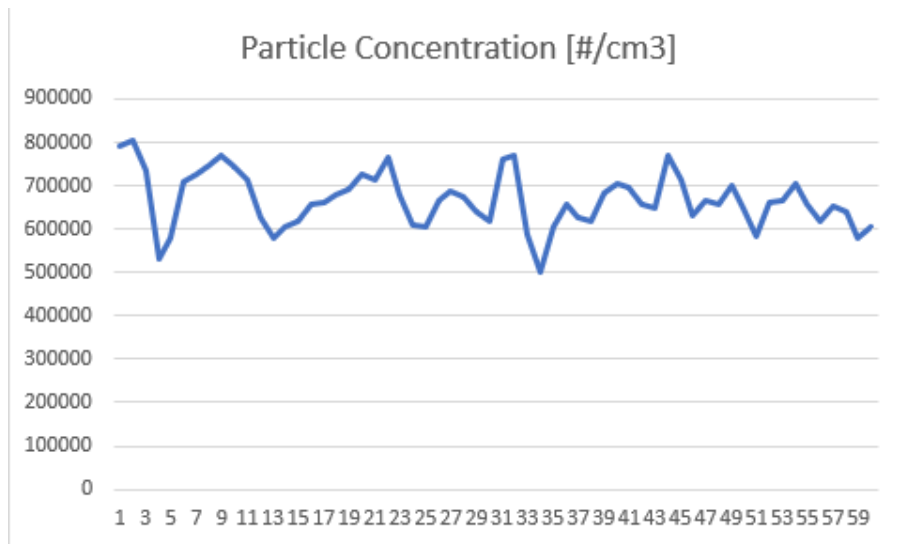
Kuva 20. Regenerointivaiheen alkaminen.



Kuva 21. Joutokäytinmittaus ennen regenerointivaihetta.



Kuva 22. Volvon pienhiukkaslukumäärä regenerointivaiheen jälkeen.



Kuva 23. Volkswagenin pienhiukkaslukumäärä regenerointivaiheen jälkeen.

## 6 Loppupäätelmät

Insinööriyön keskeisenä tutkimuskysymyksenä oli se, miten eri muuttujat vaikuttavat pienhiukkaspäästöjen mittaamiseen. Mitatuista ajoneuvoista pystyttiin selkeästi huomaamaan, että erilaiset tilanteet vaikuttavat partikkelien määrään. Esimerkiksi moottorin lämpötila, ajohistoria, sähkökuluttajat sekä regeneroinnin vaikutus osoittautuivat testissä merkittäviksi tekijöiksi. Lisäksi työssä pohdittiin partikkelimittaustyylien eroja Saksassa ja Hollannissa sekä niiden hyviä ja huonoja puolia.

Kaikki mittaukset tehtiin samassa mittausympäristössä samalla tavalla. Muuttujina olivat ajoneuvo, sen ajohistoria ja päästöluokitus. Sähkökuluttajien vaikutus pienhiukkaspäästöihin oli Euro 5 -päästöluokituksen ajoneuvoissa selvemmin huomattavissa kuin Euro 6 -päästöluokituksen ajoneuvoissa. Selkeitä partikkelipitoisuuksien muutoksia siis voidaan ylemmissä kuvissa havaita (kuva 18).

Mittausten perusteella huomattiin, että regenerointisyklit vaikuttavat merkittävästi dieselmootoreiden partikkelimääriin. Regeneroinnin tila sekä vikakoodit onkin selvitettävä aina ennen mittauksen suorittamista, esimerkiksi OBD:n kautta. Tuloksista voitiin huomata, että regeneroinnin jälkeen partikkelimäärät ovat suuremmat kuin ennen regenerointia, koska partikkelisuodattimen suodatus-teho perustuu partikkelien määrään suodattimessa. Vastikään regeneroitu partikkelisuodatin siis päästää enemmän partikkeleja suodattimen läpi kuin osittain täynnä oleva suodatin.

Tutkimus osoitti, että regeneroinnin lisäksi moottorin eri parametrit vaikuttavat partikkelimääriin. Optimilämpötilassa oleva ajoneuvo päästää pakokaasun mukana vähemmän partikkeleita ilmaan kuin kylmä moottori. Ajoneuvon saavuttaessa optimikäyntilämpötilan eli 90 asteen jäähdytinnestelämpötilan ajoneuvon palamistapahtuma on puhtaampi ja pienhiukkaspäästöt pienemmät. Lisäksi pakokaasun lämpötilalla huomattiin olevan merkitystä tuloksiin. Myös ajoneuvon sähkökuluttajilla eli esimerkiksi penkinlämmityksellä, takalasinlämmittimellä,

ilmastoinnilla ja sisätilan puhaltimella pystyttiin manipuloimaan moottorin kuormaa, jolla huomattiin olevan merkitystä partikkelimäärään. Tämä näkyi kohonneena keskiarvona mittauksen lopputuloksissa varsinkin Euro 5 -päästöluokituksen ajoneuvoissa. Euro 6 -päästöluokituksen ajoneuvoissa tätä ilmiötä esiintyi vähemmän.

Sähkökuluttajat ja niiden vaikutus ajoneuvoon todettiin suurimmaksi vaikuttajaksi tuloksiin. Laturin kuormitus aiheuttaa kuormaa moottorille, jolloin pienhiukkaspäästöt kasvavat. Jos partikkelimittaus tulee osaksi katsastusta Suomessa, erityishuomiota on kiinnitettävä ajoneuvon tilaan ja tuleviin mittausohjeisiin. Mittaus henkilön täytyy osata tarvittaessa reagoida erilaisiin tilanteisiin esimerkiksi kytkemällä mahdollisia turhia sähkökuluttajia pois päältä. Lisäksi diagnostiikkalaitteiden käyttö ja niiden hyödyntäminen katsastuksessa täytyy hallita, esimerkiksi on osattava selvittää ajoneuvosta viimeisin regeneroinnin tila ja paine-erosuodattimessa sekä nokimassa. Näiden perusteella pystytään päättelemään ajoneuvon tila ja selvittämään myös partikkelisuodattimen kunto.

Mittaustuloksia analysoitaessa on syytä huomioida mahdolliset virheelliset lukemat, sillä laboratorio-olosuhteissa suoritetuissa mittauksissa pystyttiin toteamaan virhepiikkejä, jotka johtuivat pääsääntöisesti joko mittapäänteen venttiilin aukeamisesta tai mitta-arvon suuresta heittelystä.

Mittausdatan lukeminen ja analysointi on hyvin tärkeää tulevaisuudessa, jos partikkelimittaus tulee osaksi katsastusta. Tämän vuoksi katsastajat on perehdytettävä aiheeseen, partikkeleihin ja niiden syntyyn sekä ajoneuvojen perustoimintaan, eli onko ajoneuvossa jokin aktiivinen tekijä, kun mittaus suoritetaan. Esimerkiksi pakokaasun lämpötilasta voidaan päätellä, onko regenerointivaihe ajoneuvossa käynnissä. Tällä pystytään välttämään niin sanotut väärät positiiviset tulokset, eli jokin tietty tekijä on vaikuttanut mittaustulokseen niin paljon, että ajoneuvon pienhiukkaspäästöt ovat yli sille määritetyn rajan.

Pienhiukkasten mittaus katsastuksen yhteydessä tulisikin ottaa käyttöön, jos halutaan kehittää päästöjen valvontaa parempaan suuntaan niin ilmaston kuin

ihmisten terveyden takia. Tämä mittausmenetelmä antaisi erinomaisen kuvan siitä, täyttävätkö tieliikenteessä olevat ajoneuvot valmistajan ja lainsäädännön määrittämät vaatimukset.

## Lähteet

Buekenhoudt, Pascal. 2019 PN study, New fine particle emission measurement for the assessment of the quality of the particulate filter during the periodic inspection of diesel vehicles. Verkkoaineisto. COGA. <[https://www.vert-dpf.eu/j3/images/pdf/VERT\\_Forum\\_2019/Goca\\_Buekenholdt.pdf](https://www.vert-dpf.eu/j3/images/pdf/VERT_Forum_2019/Goca_Buekenholdt.pdf)>. Luettu 20.12.2021.

Twigg, Martin V. & Phillips. 2009. Cleaning The Air We Breathe – Controlling Diesel Particulate Emissions from Passenger Cars. Verkkoaineisto. Johnson Matthey Technology Review. <<https://www.technology.matthey.com/article/53/1/27-34/>>. 2009. Luettu: 24.2.2022.

Dekati ePNC at PTI station. 2021. Verkkoaineisto. YouTube. DekatiLtd. <<https://www.youtube.com/watch?v=-7YvRLt4cYw>>. Luettu 14.1.2022.

Dekati MPEC+ Brochure. Verkkoaineisto. Dekati Ltd. <[https://www.dekati.com/wp-content/uploads/dekati\\_mpec\\_brochure.pdf](https://www.dekati.com/wp-content/uploads/dekati_mpec_brochure.pdf)>. Luettu 14.1.2022.

Dietsche, Karl-Heinz & Reif, Konrad. 2018. Automotive Handbook 10<sup>th</sup> Edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

Giechaskiel Barouch; Melas, Anastasios; Martini, Giorgio; Dilara, Panagiota & Ntziachristos, Leonidas. 2022. Revisiting Total Particle Number Measurements for Vehicle Exhaust Regulations, s. 11. MDPI: Atmosphere.

Mayer, Andreas. 2019. N-PTI New Particle Number Measurement for Vehicle Inspection. Bryssel: CITA workshop.

NL regulations for checking DPF with PN counter. 2019. Yrityksen sisäinen dokumentti. Dekati Ltd.

Non-exhaust Particulate Emissions From Road Transport. 2020. E-Kirja. OECD.

Pakarinen, Mikko. 2015. Dieselautojen katsastuspäästömittauksen kehittäminen. Turun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Riipinen, Laura. 2011. Tieliikenteen pöly-, pakokaasu- ja pohjavesipäästöt ympäristöön sekä niiden torjunta. Kandidaatin työ. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.

Hamanaka, Robert B. & Mutlu, Gökhan M. 2018. Particulate Air Pollution: Effects on the Cardiovascular System. Verkkoaineisto. <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fendo.2018.00680/full>>. 16.11.2018. Luettu 18.12.2021.

Ruottinen, Aleks. 2020. Dieselin hiukkassuodattimen puhdistusmenetelmät. Insinööri-työ. Turun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Seppälä, Juha. 2003. Liikenteen pakokaasupäästöjä tutkiva ajoneuvo. Insinööri-työ. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Tanskanen, Miikka. 2018. Dieselajoneuvojen päästöt ja niiden puhdistusmenetelmät. Insinööri-työ. Oulun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Verkehrsblatt 8/2021 Nr. 86. – guideline for periodical motor vehicle emission inspection (PTI). Yrityksen sisäinen dokumentti. 2021. Dekati Ltd.

