



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

Nanohiukkasille altistuminen asfaltointityössä

Työsuojelurahaston hankkeen 115509 loppuraportti

Jani Leskinen, Mirella Miettinen ja Jorma Jokiniemi

Itä-Suomen yliopisto
Ympäristö- ja biotieteiden laitos
Kuopio
2016

Grano Oy
Kuopio, 2016

Itä-Suomen yliopiston kirjasto
PL 107, 80101 Joensuu
+358-50-3058396
www.uef.fi/kirjasto

ISBN: 978-952-61-2258-8 (nid.)
ISBN: 978-952-61-2259-5 (PDF)

Esipuhe

Tämä on Työsuojelurahaston rahoittaman väitöskirjan jälkeisen tutkimuksen *Nanohiukkasille altistuminen asfaltointiyössä* loppuraportti.

Hankkeessa tutkittiin nanohiukkasten pitoisuuksia ja ominaisuuksia asfalttityömailla. Hankkeen vastuullisena johtaja toimi FT Jani Leskinen. FT Mirella Miettinen osallistui mittausten suorittamiseen. FT Jari Leskinen (SIB Labs) teki elektronimikroskooppikuvaukset. Mittauksissa käytettiin Itä-Suomen yliopiston Pienhiukkas- ja aerosolitekniikan laboratorion (johtaja prof. Jorma Jokiniemi) mittalaitteita.

Kiitos Työsuojelurahastolle hankkeen rahoittamisesta, sekä kiitokset kaikille hankkeen mahdollistaneille tahoille: Skanska Asfaltti ja Kuopion Kaupunki, sekä kiitos mukana olleille henkilöille.

Kuopiossa 26.09.2016

Jani Leskinen

Tiivistelmä

Asfaltointityössä käsitellään kuumaa asfalttimassaa, josta vapautuu sekä pienhiukkasia että kaasumaisia yhdisteitä. Lisäksi työmailla on käytössä dieselkäyttöisiä työkoneita ja ajoneuvoja, jotka myös tuottavat hiukkas- ja kaasupäästöjä. Erityisesti kokonaispölyn määrää ja kaasumaisia päästöjä on karakterisoitu aiemmissa tutkimuksissa. Hiukkasista pienimmät, eli nanokoon hiukkaset, ovat sen sijaan jääneet hieman vähemmälle huomiolle aiemmissa tutkimuksissa.

Nanokoon hiukkasilla tiedetään olevan haitallisia terveysvaikutuksia. Ne aiheuttavat esimerkiksi keuhko- ja sydänsairauksia sekä alentavat eliniänodotetta. Nämä pienet hiukkaset kulkeutuvat varsin tehokkaasti keuhkojen syvimpiin osiin ja sieltä edelleen verenkiertoon. Lisäksi pienillä hiukkasilla on suuri ominaispinta-ala, joka osaltaan vaikuttaa niiden haitallisuuteen. Hiukkasen koostumus vaikuttaa haitallisuuteen, mutta tietyt aineet voivat nanokoossa olla haitallisempia kuin suurempina hiukkasina.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin aerosolitekniiikan menetelmillä asfalttityömailla esiintyviä nanokokoisten hiukkasten pitoisuuksia sekä karakterisoitiin näitä hiukkasia. Mittauksissa pääpaino oli reaaliaikaisissa mittalaitteissa. Mittauspiste oli rakennettu pakettiautoon, joka oli sijoitettu mahdollisimman lähelle asfaltointityötä.

Tutkimuksessa havaittiin asfaltointityössä vapautuvan monen kokoisia hiukkasia aivan pienistä nanohiukkasista mikrometrien hiukkasiin asti. Mitatut lukumäärä- ja massapitoisuudet olivat verrattain korkeita. Myös pinta-alapitoisuudelle mitattiin huomattavan korkeita arvoja. Hiukkasten terveysvaikutusten on havaittu olevan sidoksissa hiukkasten pinta-alapitoisuuteen, mutta tämän riippuvuuden selvittämiseksi tarvitaan lisää tutkimusta. Näin ollen mitatuista pitoisuuksista ei voida vetää suoraan johtopäätöksiä terveysvaikutuksista. Pitoisuuksien ajallinen vaihtelu oli huomattavaa.

Nykyiset työturvallisuusrajat perustuvat hiukkasten massapitoisuuteen. Tästä seuraa epäsuhta, koska nanokoon hiukkasten massa on mitätön mikrometrikoon hiukkasiin verrattuna. Kuitenkin lukumäärällisesti nanokoon hiukkasia vapautuu asfaltointityössä huomattavan paljon. Tämä tutkimus tarjoaa tietoa pohdinnan perustaksi mitä hiukkasparametreja asfalttityössä olisi syytä mitata massapitoisuuden lisäksi, kun tavoitellaan parempaa työhygieniaa ja työntekijöiden hyvinvointia.

ESIPUHE	3
1 JOHDANTO	7
2 HANKKEEN TAVOITE	8
3 MENETELMÄT	9
3.1 ASFALTOINTITYÖ	9
3.2 MITTAUSKOHDDE 1	9
3.3 MITTAUSKOHDDE 2	10
3.4 TUTKIMUSMENETELMÄT	11
3.4.1 MITTALAITTEET	12
4 TULOKSET	13
4.1 KOHDE 1	13
4.1.1 LUKUMÄÄRÄ- MASSA- JA PINTA-ALAPITOISUUDET	13
4.1.2 LUKUMÄÄRÄKOKOJAKAUMAT	16
4.1.3 OFF-LINE ANALYYSIT	17
4.2 KOHDE 2	20
4.2.1 LUKUMÄÄRÄKOKOJAKAUMAT	20
4.2.2 LUKUMÄÄRÄ-, MASSA-, JA PINTA-ALAPITOISUUDET	21
4.2.3 OFF-LINE ANALYYSIT	23
5 JOHTOPÄÄTELMÄT	27
6 SUOSITUKSET	28
7 HAASTEET JA ONGELMAT	29
8 YHTEENVETO	29
KIRJALLISUUS	30

Lyhenneluettelo ja selitteet

Alveolialue	Keuhkorakkuloiden alue (Alveolar)
Nanohiukkanen	EU:n määritelmä: vähintään yksi dimensio alle 100 nm. Tässä tutkimuksessa nanokokoluokan hiukkanen tarkoittaa hiukkasta jonka halkaisija on alle 500 nm
D_p	Hiukkasen halkaisija eli hiukkaskoko (Diameter)
LDSA	Keuhkoihin deponoituvien hiukkasten pinta-ala (Lung Deposited Surface Area)
C_m	Hiukkasten massapitoisuus (Mass concentration)
C_n	Hiukkasten lukumääräpitoisuus (Number concentration)
CPC	Kondensatiohiukkaslaskuri (Condensation Particle Counter)
EDS	Energiaerotteinen röntgenspektroskopia (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)
ELPI	Sähköinen alipaineimpaktori (Electrical Low-Pressure Impactor)
FMPS	Sähköinen liikkuvuusluokittelija (Fast Mobility Particle Sizer)
HTP	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus
NSAM	Nanohiukkasten pinta-alamonitori (NanoParticle Surface Area Monitor)
SEM	Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (Scanning Electron Microscope)
TEM	Läpäisyelektronimikroskooppi (Transmission Electron Microscope)
TEOM	Värähtelevä mikrovaaka (Tapered Element Oscillating Microbalance)

1 Johdanto

Asfaltointityössä käsitellään kuumaa asfalttimassaa ja käytetään dieselkäyttöisiä työkoneita. Yleisesti on tiedossa kuuman asfalttimassan levityksessä vapautuvan hiukkaspäästöjä sekä kaasumaisia yhdisteitä (NIOSH 2000, Somayah ym. 2012, Somayah ym. 2014). Myös dieselmoottorit aiheuttavat oman osansa työmaalle vapautuvista päästöistä (esim. Morawska ym. 1998). Näillä altisteilla on todettu olevan terveysvaikutuksia kuten alentunutta keuhkojen toimivuutta (esim. Ulvestad ym. 2007). Aiemmissä tutkimuksissa on erityisesti



selvitetty kokonaispölyn (painottuu suuriin hiukkasiin) ja kaasumaisten komponenttien pitoisuuksia ja esiintyvyyttä (esim. Burstyn ym. 2002).

Verrattain vähän on tutkittu ns. nanokokoisten (tässä tutkimuksessa: koko alle 500 nm) päästöhiukkasten pitoisuuksia ja ominaisuuksia. Näitä tutkimuksia ovat esimerkiksi Elihn ym. (2008), jossa karakterisoitiin vapautuneita nanohiukkasia ja

selvitettiin niiden yhteyttä tulehduksiin.

Nanokoon hiukkaset ovat työhygienian kannalta mielenkiintoisia, koska ne kulkeutuvat keuhkoihin ja deponoituvat verrattain tehokkaasti keuhkorakkuloiden alueelle, ja sieltä edelleen verenkiertoon. Nanokoon hiukkasilla tiedetäänkin olevan haitallisia vaikutuksia ihmisen terveyteen aiheuttaen esimerkiksi keuhko- ja sydänsairauksia sekä alentunutta eliniänodotetta (esim. Oberdörster ym. 2005, Nel ym. 2009, Xia ym. 2013).

Tässä tutkimuksessa selvitettiin asfalttityömailla vallitsevia hiukkaspitoisuuksia ja karakterisoitiin hiukkasten ominaisuuksia. Erityisesti keskityttiin nanokoon hiukkasiin käyttäen reaaliaikaisia mittalaitteita. Käytetyt mittalaitteet ja mittausten menetelmät ovat aerosoliteknikan alalla yleisesti käytettyjä, ja kykenevät havaitsemaan ja karakterisoimaan myös alle 500 nm:n hiukkasia (Baron & Willeke, 2001). Mittauspiste oli rakennettu pakettiautoon, ja auto oli sijoitettuna niin lähelle asfaltointityötä kuin turvallisesti ja työntekoa häiritsemättä oli mahdollista.

2 Hankkeen tavoite

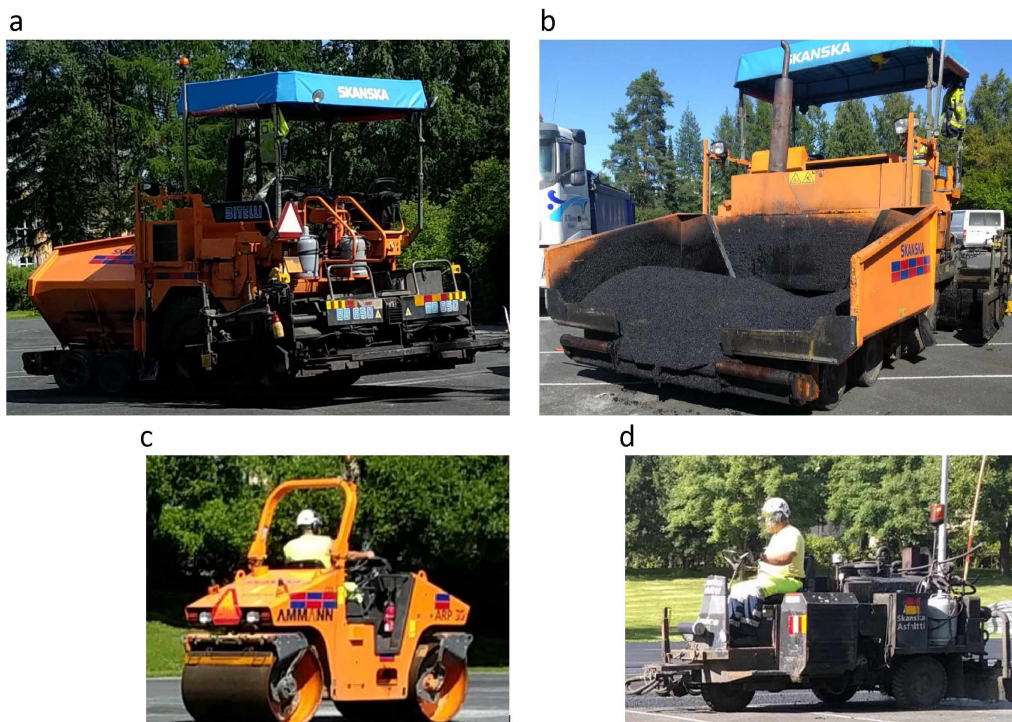
Hankkeen tavoitteena oli selvittää millaisia nanohiukkaspitoisuuksia asfalttityömailla esiintyy, sekä karakterisoida hiukkasten ominaisuuksia.

Hankkeessa selvitettiin asfalttityömailla esiintyneitä nanohiukkasten pitoisuuksia sekä tutkittiin hiukkasten ominaisuuksia. Tutkimuksessa käytettiin sekä reaaliaikaisia mittalaitteita (on-line) että off-line analyysijä työmaan ilmasta kerätyistä hiukkasnäytteistä.

3 Menetelmät

3.1 Asfaltointityö

Asfaltointityössä olleet työntekijät olivat levitinkoneen kuljettaja, asfalttityöntekijät, jyrän kuljettaja, liimamoponkuljettaja sekä kuorma-autonkuljettajia. Pääosin työntekijät tekivät kukin tiettyä työtehtävää koko työpäivän ajan. Kuvassa 1 on esitetty valokuvin kohteessa 1 käytössä olleita asfaltointityökoneita.



Kuva 1: Valokuvia asfaltointityökoneista (kohde 1). a) ja b) levitinkone, c) jyrä, d) liimamopo.

3.2 Mittauskohde 1

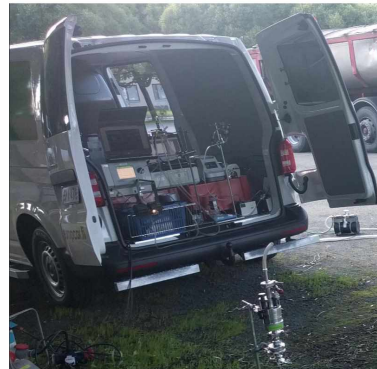
Tutkimuskohteena oli tenniskentän päällystystyö AB 6-massalla. Tenniskentän päällysteestä haluttiin erityisen eheä, vettä läpäisemätön pinta. Sen vuoksi käytössä oli hieman harvemmin käytetty asfalttimassa joka ei sisältänyt lainkaan kierrätysmateriaalia. Kyseisen päällystykseen voidaan sanoa edustaneen vähäpäästöistä asfaltointia eli massan levityksessä vapautui suhteellisen vähän hiukkasia, mikä voidaan havaita myös valokuvista vähäisenä savuna (kuva 2a).

Ominaisuuksiltaan kohde oli monilta osin erinomainen tähän tutkimukseen. Kenttä oli melko suojaista pinnanmuotojen puolesta. Lisäksi muualta tulleiden nanohiukkasten osuus voidaan arvioida olleen vähäinen kohteen sijainnin vuoksi. Kuitenkaan ulkona tehtävissä mittauksissa muualta tulevilta hiukkasilta ei voida kokonaan välttyä.

a



b



Kuva 2: Valokuvia mittauskohteesta 1. Mittalaitteet oli sijoitettu pakettiautoon (b) ja auto pysäköitiin lähelle asfaltoitavan alueen reunaa.

Mittauspiste oli rakennettu pakettiautoon (Kuva 2b), joka oli asemoitu päällystettävän kentän välittömään läheisyyteen, niin ettei varsinainen työ häiriintynyt. Autoa jouduttiin kaksi kertaa päivän aikana siirtämään työkoneiden tieltä. Työ eteni siten, että välillä asfaltointi tapahtui mittauspisteen välittömässä läheisyydessä ja välillä kauempana. Mittaukset aloitettiin jo ennen päällystystyön aloitusta taustailman laadun määrittämiseksi, mikä paransi tulosten luotettavuutta ja helpotti analyysiä.

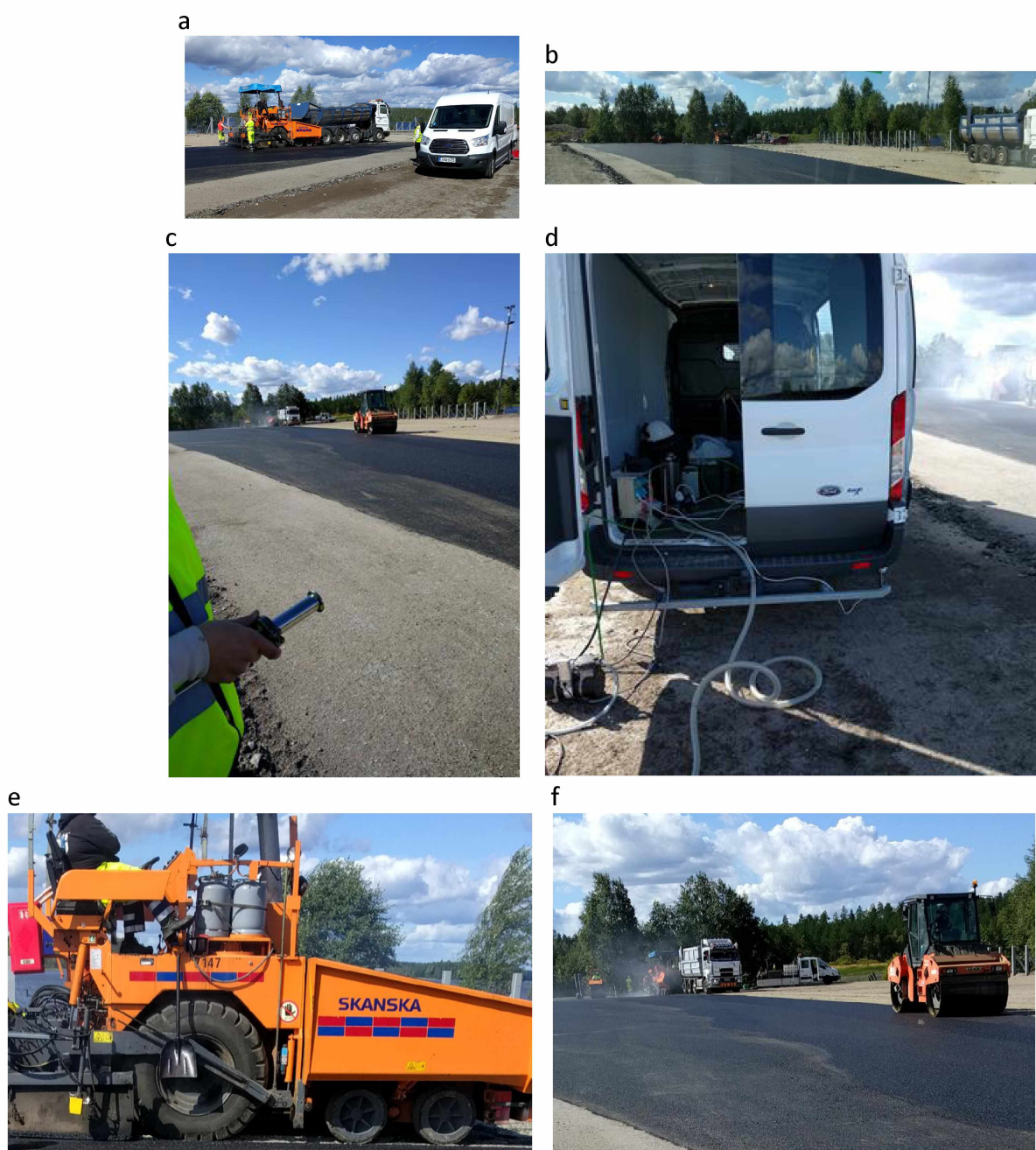
Liimamopolla (kohde 1, kuva 1d) levitettiin tartunta-aine vanhan asfaltin päälle parantamaan uuden pinnoituksen tarttumista. Mopossa oli dieselmoottori ja siinä käytettiin nestekaasupolttimia liima-aineen juoksevana pitämiseksi. Liiman levityksestä alueelle levisi astinvaraisesti havaittu liuottimen haju.

Liima-aineen levityksen jälkeen levitettiin kuuma asfalttimassa asfaltinlevityskoneella sekä käsikäyttöisillä välineillä. Työntekijät työskentelivät levityksen ajan levitinkoneen välittömässä läheisyydessä. Lopuksi pinta jyrättiin tasaiseksi. Työmaa-alueella oli ajoittain menossa useampi työvaihe yhtä aikaa.

3.3 Mittauskohde 2

Tutkimuskohteena 2 oli tehdasalueella olevan isohkon kentän päällystystyö (kuva 3) AB16 RC 15-massalla (mukana kierrätyskomponenttia). Tämä kohde edusti ns. tyyppillistä asfaltointia ja käytetty massatyyppi on yleinen esim. teiden päällystyksessä. Päästöjä tuli selkeästi enemmän kuin tenniskentän päällystyksestä. Päällystetty kenttä sijaitsi järven rannalla eikä näin ollen ollut yhtä suojaisa kuin kohde 1, mutta tässä kohteessa mittauspiste voitiin sijoittaa lähemmäs asfaltointia ja autoa ei jouduttu siirtämään mittausten aikana.

Ennen asfaltoinnin aloittamista alueen valmistelevat pohjatyöt oli jo tehty. Tällä työmaalla ei käytetty liima-aineita koska pinnoitteen alle ei jäänyt vanhaa pinnoitetta. Kuuma asfalttimassa levitettiin levitinkoneella ja ihmisvoimin manuaalisesti. Työntekijät kulkivat levityksen ajan levitinkoneen välittömässä läheisyydessä. Lopuksi levitetty asfaltti tasoitettiin jyrällä.



Kuva 3: Valokuvia mittauskohteesta 2.

Mittauspiste oli rakennettu pakettiautoon ja auto sijoitettiin aivan päällystettävän alueen reunalle (kuva 3d). Lähimmillään työkoneen olivat mittauspisteestä noin 2,5 m etäisyydellä. Tällöin mittauspisteelle tuli huomattava näkyvä asfaltointisavu. Silmämääräisesti arvioiden samanlainen savu vallitsi asfalttia levittävien työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä. Kauimmillaan etäisyyttä oli useita kymmeniä metrejä, tällöin työstä aiheutuneet päästöt kulkeutuivat mittalaitteisiin vaihtelevasti, tuulesta riippuen. Levittämisenkin jälkeen kuumasta pinnoitteesta vapautui vielä jonkin verran hiukkasia.

3.4 Tutkimusmenetelmät

Työmaiden ilmasta mitattiin pien- ja nanohiukkasia käyttäen yleisesti käytettyjä aerosoliteknikan laitteita ja menetelmiä. Laitteet ja menetelmät on kuvattu lyhyesti

kappaleessa 3.4.1. Kunkin tuloksen kohdalla on kerrottu millä laitteella tai menetelmällä mittausta on suoritettu. Mitattavia parametreja olivat: lukumäärä-, massa- ja pinta-alapitoisuus, lukumääräkokojakauma sekä nanokokoisten hiukkasten massaosuus. Lisäksi kerättiin hiukkasia suodattimelle, jolta teetettiin kemiallinen analyysi alkuainekoostumuksen selvittämiseksi. Työmaan ilmasta kerättiin myös näytteet elektronimikroskooppianalyysiä (SEM ja TEM) varten. SEM-kuvissa hiukkaset näkyvät vaaleina tai valkoisina, mustat kohteet ovat keräysalustan reikiä. TEM-kuvissa hiukkaset näkyvät mustina tai tummina kohteina. Elektronimikroskooppinäytteitä analysoitiin myös TEM-EDS:lla (EDS = Röntgensäteiden käyttöön perustuva alkuainekoostumuksen analyysimenetelmä) yksittäisen hiukkasen alkuainekoostumuksen selvittämiseksi.

Näytteitä ei laimennettu vaan mittauspisteen sijoittamisella haettiin sopiva hiukkaspitoisuus, näin vältettiin yksi mahdollinen epätarkkuustekijä. Täten mitatut tulokset edustavat suoraan työmaa-alueella vallinneita pitoisuuksia. Tietenkin päästöjen leviämällä ja sitä myötä luonnollisella laimenemisellä on oma vaikutuksensa. Suurimmat pitoisuudet kuvaavat tilannetta jossa asfaltointityö on tapahtunut verrattain lähellä mittauspistettä ja tuulen suunta on ollut suotuisa. Nämä huippuarvot ovat pitoisuuksia joille kuumana levitettävän asfalttimassan lähellä olevat työntekijät vähintäänkin alistuvat. On kuitenkin huomioitava suuri ajallinen vaihtelu mitatuissa pitoisuuksissa ja todellisessa altistumisessa.

3.4.1 Mittalaitteet

CPC. Hiukkasten lukumääräpitoisuutta mitattiin kondensatiohiukkaslaskurilla (CPC 3775 TSI). CPC:ssa hiukkasten kokoa kasvatetaan tiivistämällä hiukkasten pinnalle butanolihöyryä, jolloin ne voidaan havaita optisesti ja laskea.

FMPS. Sähköinen liikkuvuusluokittelija (FMPS 3091 TSI) mittasi hiukkasten lukumääräkokojakaumaa 1 sekunnin aikaresoluutiolla. FMPS:n toiminta perustuu hiukkasten sähkövaraamiseen ja sitä seuraavaan sähköiseen hiukkaskoon mukaiseen luokitteluun. FMPS toimii kokovälillä 5,6 – 560 nm.

ELPI. Sähköinen alipaineimpaktori (ELPI Dekati) mittasi hiukkasten lukumääräkokojakaumaa 1 sekunnin aikaresoluutiolla. ELPI:n toiminta perustuu hiukkasten kokoluokitteluun niiden inertian (eli massan) mukaan ja sähköiseen havainnointiin. ELPI toimii kokovälillä 7 nm – 10 µm.

NSAM. Hiukkasten keuhkodespositiopinta-alapitoisuutta mitattiin nanohiukkasten pinta-alamonitorilla (NSAM 3550 TSI). NSAM:ssa selvitetään, kuinka paljon sähkövarausta hiukkasiin saadaan tietyllä menetelmällä tarttumaan. Tämä sähkövarauksen määrä on verrannollinen hiukkasen pinta-alaan. NSAM:n mittaama pinta-alapitoisuus oli kalibroitu näyttämään keuhkojen alveolaarialueelle deponoituvaa pitoisuutta.

TEOM. Värähtelevä mikrovaaka (TEOM 1405 Thermo Scientific) mittasi 10 sekunnin aikaresoluutiolla hiukkasmassapitoisuutta. TEOM:n toiminta perustuu värähtelevään putkeen, jonka päälle asetetulle suodattimelle kertynyt hiukkasmassa alentaa värähtelytaajuutta. Taajuuden muutoksesta voidaan laskea kertynyt massa.

4 Tulokset

Työmaa-alueelle levinneet hiukkaspäästöt olivat yhdistelmä kuumasta asfalttimassasta, työkoneiden moottoreista ja ulkoisista lähteistä peräisin olevia hiukkasia. Näin ollen osa mitatuista hiukkasista on peräisin muualta kuin varsinaisesta asfaltointityöstä. Näiden hiukkasten osuutta on vaikea arvioida, mutta ne ovat kuitenkin suurelta osin asfaltointityössä väistämättä läsnä olevia päästöjä, joille työntekijät altistuvat. Kohteissa tehdyt taustailman mittaukset osoittivat, että mitatut hiukkaset ovat pääosin peräisin työmaa-aktiviteeteista.

Mittauksissa tuulen vaikutus oli huomattava. Alla olevissa kuvaajissa osa ajallisesta vaihtelusta johtuu ilmapvirtausten vaihtelusta, ei pelkästään hiukkasemission vaihtelusta. Pitoisuuspiikkien kohdat edustavat tilannetta, jossa ilmapvirta on käynyt mittauspistettä kohti ja työkoneet ovat olleet suhteellisen lähellä mittauspistettä. Nämä huippuarvot edustavat pitoisuuksia, joille asfalttityöntekijät vähintään altistuvat työtä tehdessään.

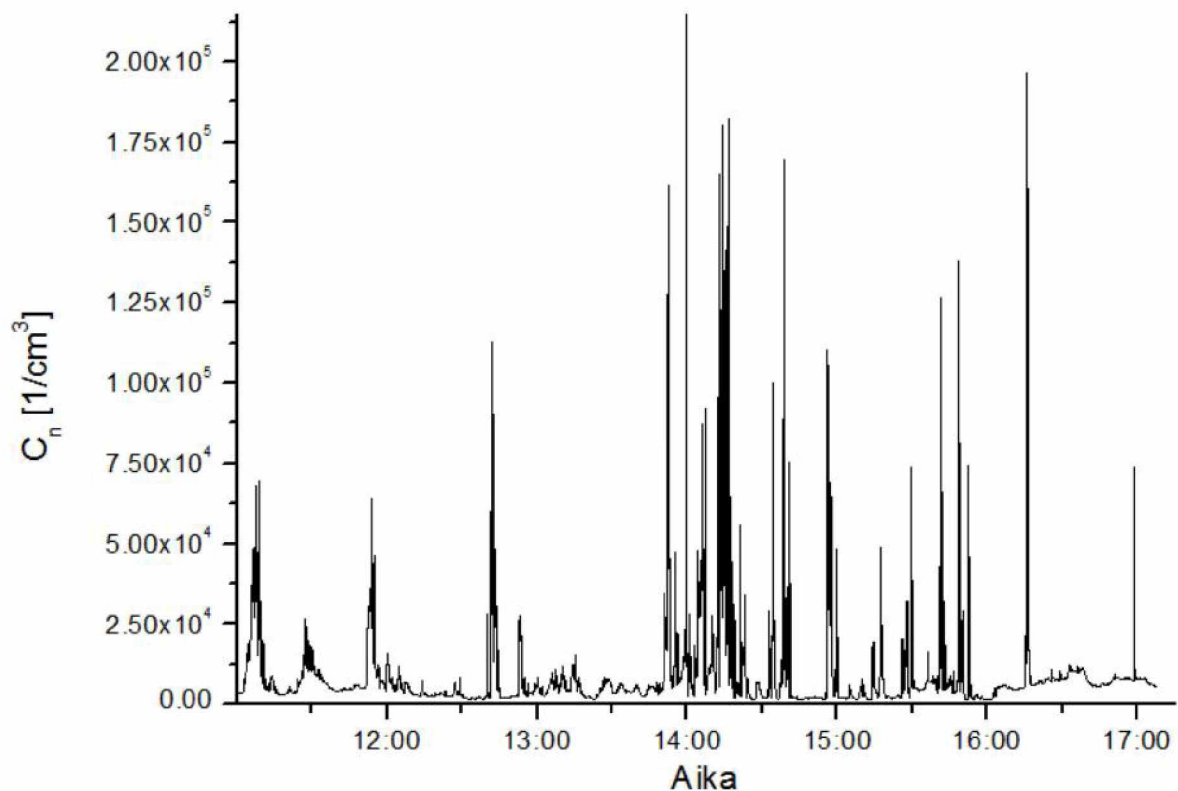
4.1 Kohde 1

Säätila: puolipilvinen, lämmin (20-25 °C) ja heikkotuulinen kesäpäivä.

Alla on esitetty aikasarjoja, joista nähdään hiukkaspitoisuudet ja niiden ajallinen vaihtelu (kuvat 4-6). Hiukkasten todettiin leviävän muutoin kuin tuulen vaikutuksesta hyvin vähän, kuten voitiin olettaakin. Subjekttiivinen arvio ”asfaltti haisee” ei välttämättä näkynyt hiukkasmittalaitteilla ollenkaan. Kaiken kaikkiaan tenniskentän päällystyksestä vapautui näkyvää savua (kuva 2) verrattain vähän kohteen 2 asfaltointiin (kuva 3) verrattuna. Tämä kohde edustaakin vähempipäästöistä asfalttityötä tehdyn pinnoitteen erikoisvaatimusten vuoksi.

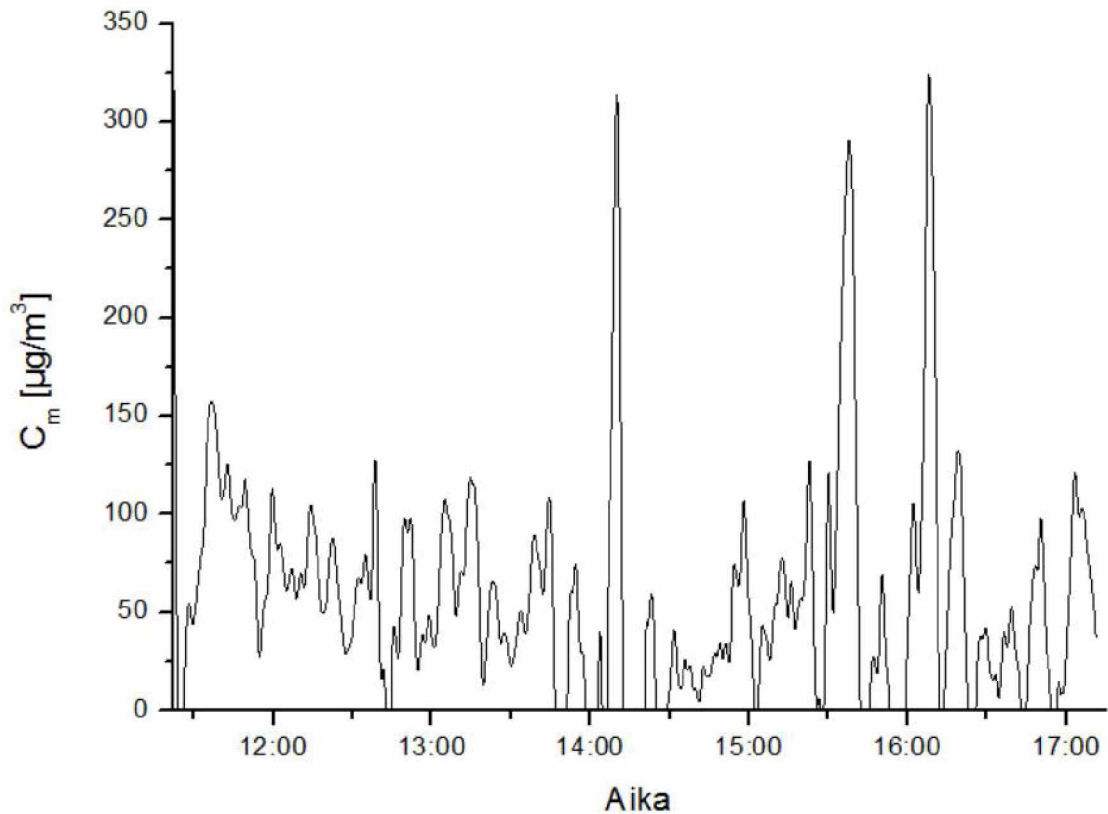
4.1.1 Lukumäärä- massa- ja pinta-alapitoisuudet

Lukumääräpitoisuus (C_n) vaihteli suuresti riippuen asfaltointikoneiden etäisyydestä sekä tuulesta (kuva 4). Matalimmillaan lukumääräpitoisuudet olivat $1-5 \times 10^3$ $1/cm^3$, eli käytännössä tällöin mitattiin alueella ollutta taustailmaa. Korkeimmat huippuarvot olivat n. $1-3 \times 10^5$ $1/cm^3$. Tällöin tuuli kävi sopivasti ja työkoneet olivat verrattain lähellä. Nämä hetket edustavat sitä tasoa jolle työkoneen ympärillä olleet työntekijät vähintään altistuivat. Lähempänä konetta pitoisuuksien voidaan arvioida olleen mitattuja huippuarvojakin korkeampia. On huomioitava, että myös levitinkoneen ympärillä näkyvän savun määrä vaihteli ajallisesti huomattavan paljon.



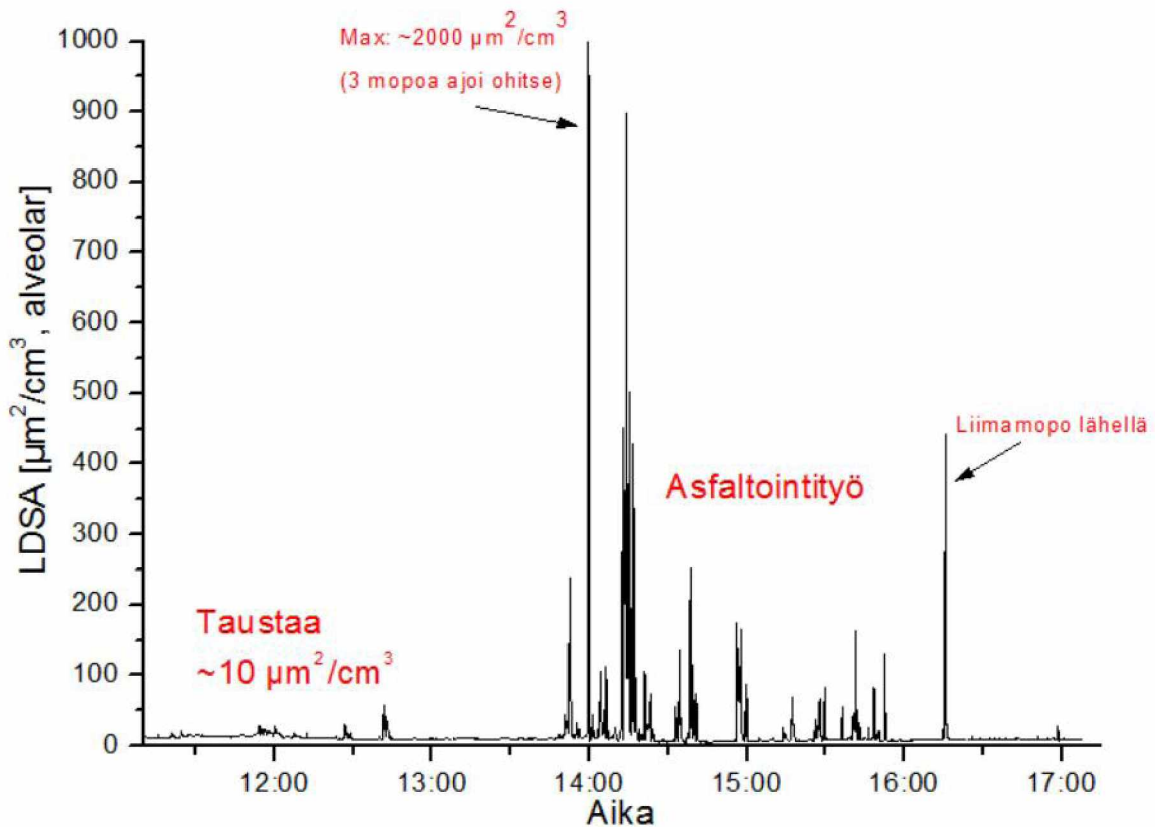
Kuva 4: Aikasarja lukumääräpitoisuudesta (CPC-3775).

Massapitoisuus (C_m) (kuva 5) työmaan ilmassa vaihteli ajan suhteen suuresti. Massapitoisuusmittalaitteen (TEOM) kanssa ei käytetty erierotinta, joten massapitoisuus edustaa ilmassa ollutta kokonaispölypitoisuutta. Kuitenkin niin, etteivät kaikista suurimmat pölyhiukkaset juurikaan päässeet mittalaitteen sisään. Taustataso oli noin 25-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tämä on verrattain korkea taustapitoisuus mutta todennäköisesti alueella olleesta muusta toiminnasta vapautui jonkin verran hiukkasia. Mittauskohde sijaitti suhteellisen lähellä kaupungin keskustaa, joka osin selittää mitatun taustapitoisuuden. Korkeimmat massapitoisuudet olivat n. 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. TEOM mittaa hetkellisen massapitoisuuden, mutta hyvin nopeisiin vaihteluihin se ei kykene reagoimaan. Näin ollen todelliset maksimipitoisuudet ovat voineet olla mitattuja huippuarvoja korkeampia.



Kuva 5: Aikasarja massapitoisuudesta (TEOM).

LDSA-pitoisuuden aikasarja (kuva 6) havainnollistaa hyvin asfaltoinnin vaikutusta alueen ilmanlaatuun. Ennen toiminnan alkua LDSA pitoisuus oli luokkaa $10 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, ja työn alettua pitoisuus yli kymmenkertaistui, ajoittain lähes satakertaistui. Eli asfaltoinnista mitattiin moninkertaisesti taustaa suurempia pinta-alapitoisuuksia. Pinta-alapitoisuus on sidoksissa hiukkasten terveysvaikutuksiin, mutta lisätutkimusta tarvitaan tarkemman käsityksen muodostamiseksi LDSA-pitoisuuden ja terveysvaikutusten korrelaatiosta. Pinta-alapitoisuus on hyvä indikaattori kohonneelle nanohiukkaspitoisuudelle. Sitä mittaavia laitteita käytetäänkin valvontatarkoituksissa nanoteknologian työpaikoilla. Mittauspisteen ohitse ajoi kolme tieliikennemopoa, jotka näkyvät selvänä pitoisuuspiikkinä kuvassa 6.



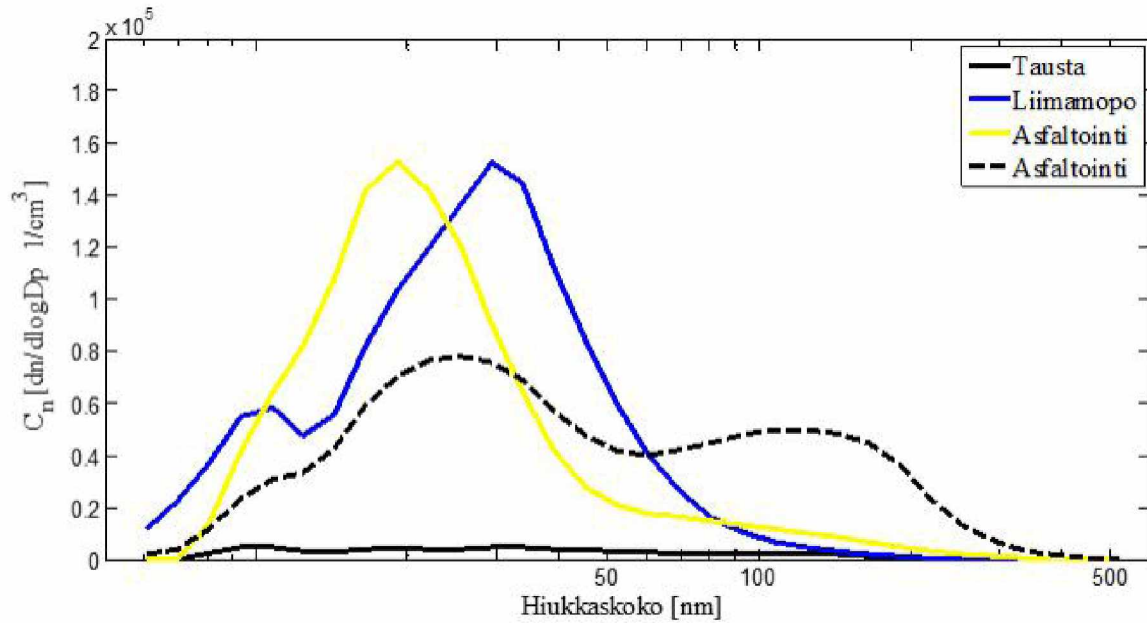
Kuva 6: Aikasarja LDSA-pitoisuudesta (NSAM-alveolar).

Kuvista 4 ja 6 nähdään myös, että vaikka varsinainen työ oli tauolla, varsin korkeita pitoisuuksia saatettiin mitata silti. Osa näistä hiukkasista on muusta työmaatoiminnasta peräisin ja osa on ajoittaisen vähäisen tuulen vuoksi jäänyt alueelle leijumaan. Lisäksi kuumana levitetystä asfalttimassasta vapautui hiukkasia myös jonkin aikaa levittämisen jälkeen, kunnes massa oli riittävästi jäähtynyt. Auringon paiste omalta osaltaan hidasti pinnan jäähtymistä.

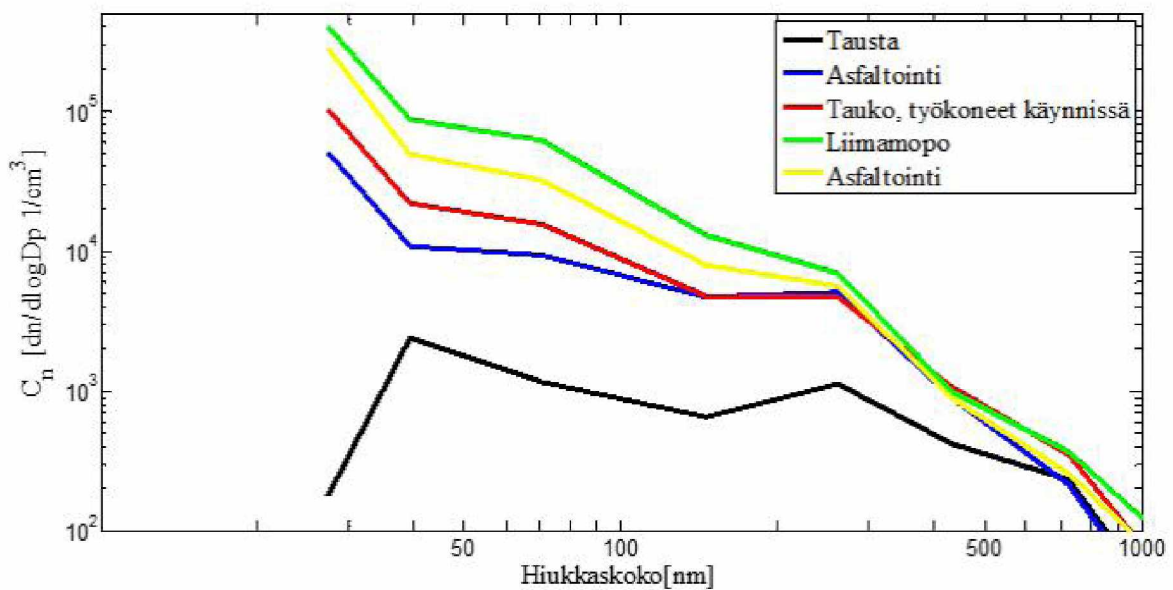
4.1.2 Lukumääräkokojakaumat

Lukumääräkokojakaumista (kuvat 7 ja 8) nähdään asfaltoinnista peräisin olleiden hiukkasten olleen keskimäärin varsin pieniä kooltaan. Jakauman moodi (tyypillisin hiukkaskoko) oli n. 20-30 nm asfaltoinnin hiukkasille. Lisäksi ajoittain näkyi toinen moodi myös suuremmassa n. 150 nm kokoluokassa. Jakaumista voi nähdä myös selkeästi näitä suurempia hiukkasia (kuva 8). Massapitoisuus on suurelta osin peräisin suurista hiukkasista, koska pienten hiukkasten massa on niin pieni.

Liimamopon käyttö tuotti pieniä jopa vain muutaman nanometrin kokoisia hiukkasia sekä moodin n. 40 nm kohdalle (kuva 7, sininen käyrä). Ei ole täyttä varmuutta olivatko liimamopon tuottamat hiukkaset enimmäkseen peräisin liima-aineesta, nestekaasupolttimista vai dieselmoottorista.



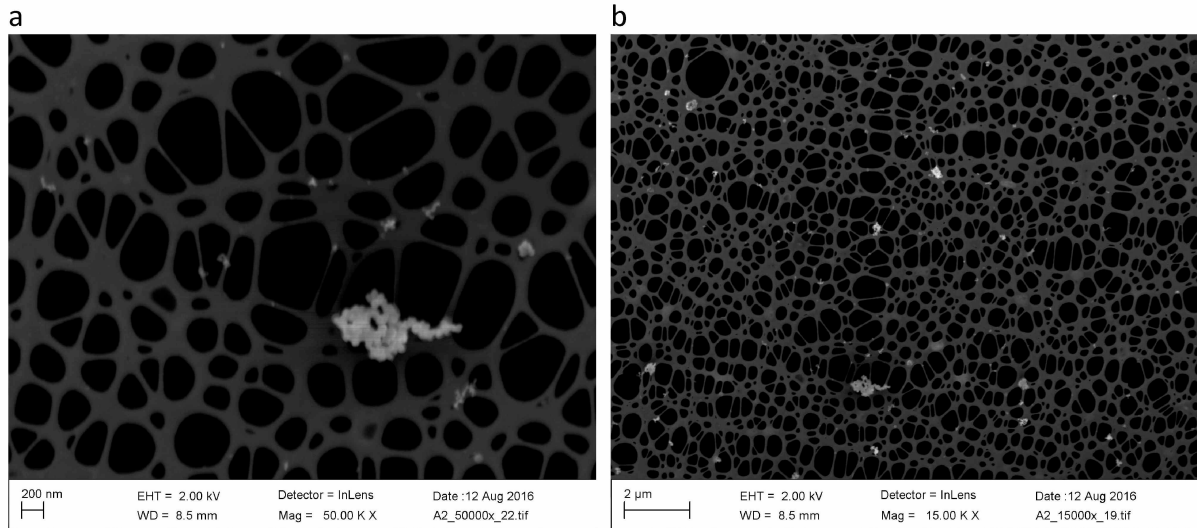
Kuva 7: Lukumääräkokojakaumia eri työvaiheista (FMPS).



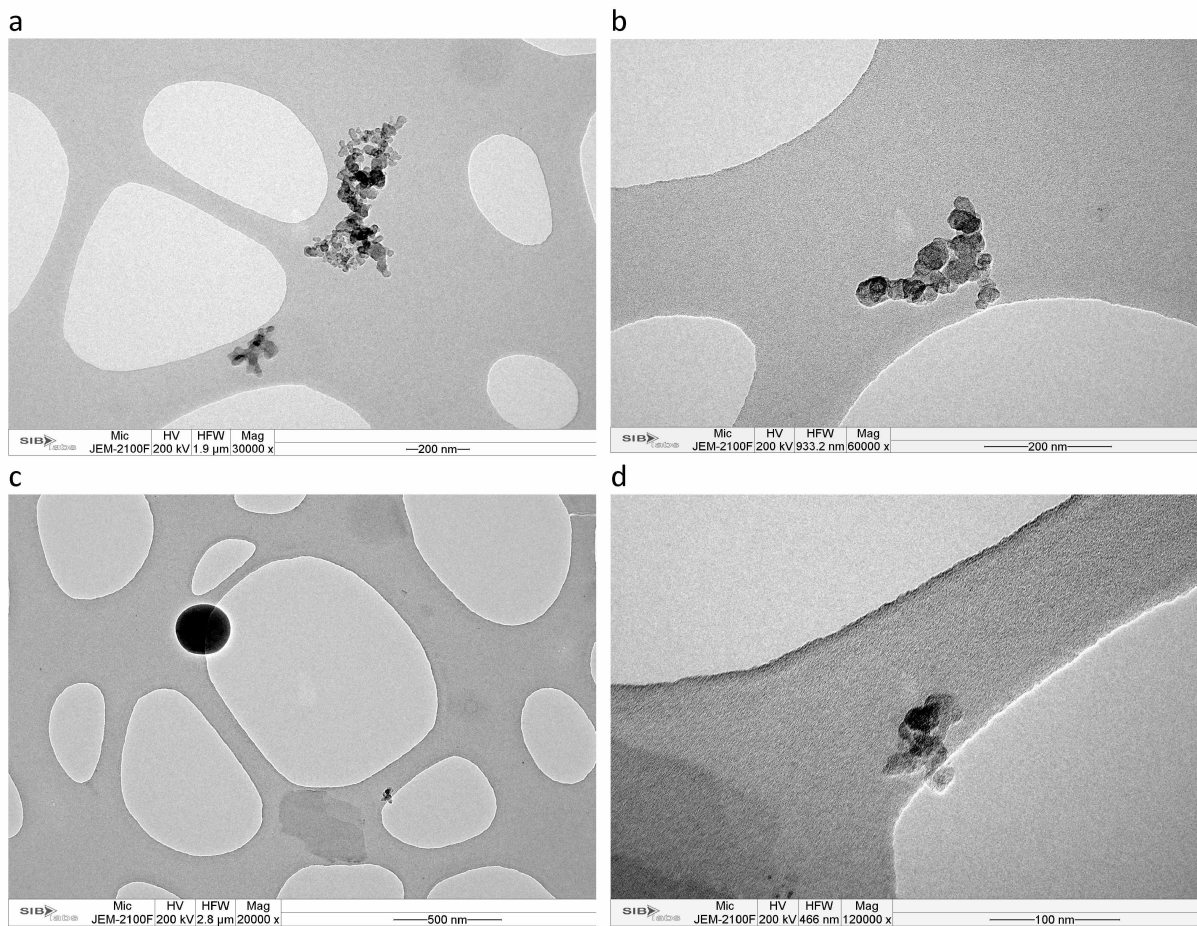
Kuva 8: Lukumääräkokojakaumia eri työvaiheista (ELPI). Huomaa logaritminen y-akseli.

4.1.3 Off-line analyysit

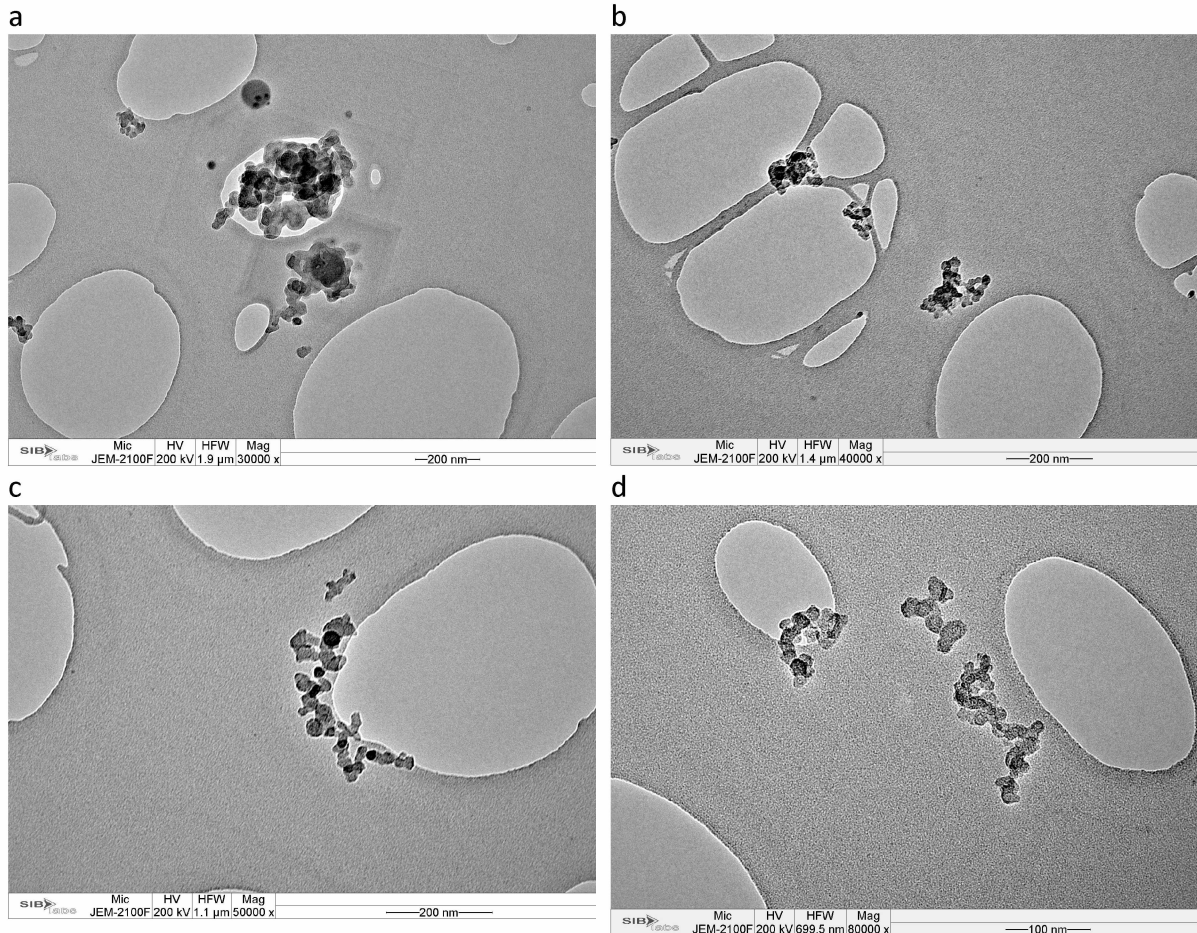
Liimamopon käytön aikana kerätystä elektronimikroskooppinäytteestä (Kuvat 9 ja 10) löytyi sekä muutaman kymmenen nanometrin, että suuremmissa määrin joidenkin satojen nanometrien kokoisia hiukkasia. Nämä suuremmat hiukkaset olivat osin sintrautuneita agglomeraatteja, eli todennäköisesti palamisprosessista peräisin. Näytteistä löytyi myös jonkin verran mikrometriluokassa olevia selkeästi suurempia hiukkasia.



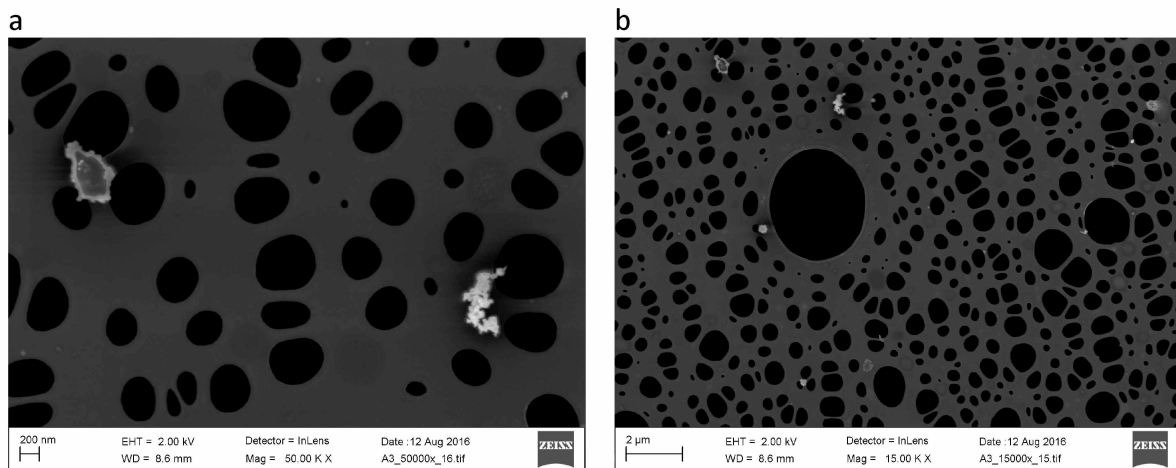
Kuva 9: Elektronimikroskooppikuvia (a ja b; SEM), näyte otettu, kun liimamopo oli käytössä.



Kuva 10: Elektronimikroskooppikuvia (a, b, c ja d; TEM), näyte otettu, kun liimamopo oli käytössä.



Kuva 11: Elektronimikroskooppikuvia (a, b, c ja d; TEM) asfaltionnin päästöhiukkasista.



Kuva 12: Elektronimikroskooppikuvia (a ja b; SEM) asfaltionnin päästöhiukkasista.

Asfaltionnin aikana kerätyistä näytteistä (kuvat 11 ja 12) nähdään päästöhiukkasten olleen hiukkasryppäitä ja ketjumaisia agglomeraatteja, kooltaan tyypillisesti noin muutaman sata nanometriä. Nämä agglomeraatit koostuivat muutamien kymmenen nanometrin kokoisista primäärihiukkasista. Lisäksi näytteissä oli pieniä määriä selkeästi pienempiä muutamien kymmenen nanometrin kokoisia yksittäisiä hiukkasia.

Kerättyjen suodatinnäytteiden osalta kertynyt hiukkasmassa jäi liian vähäiseksi, jotta niiltä olisi voinut tehdä analyysyjä.

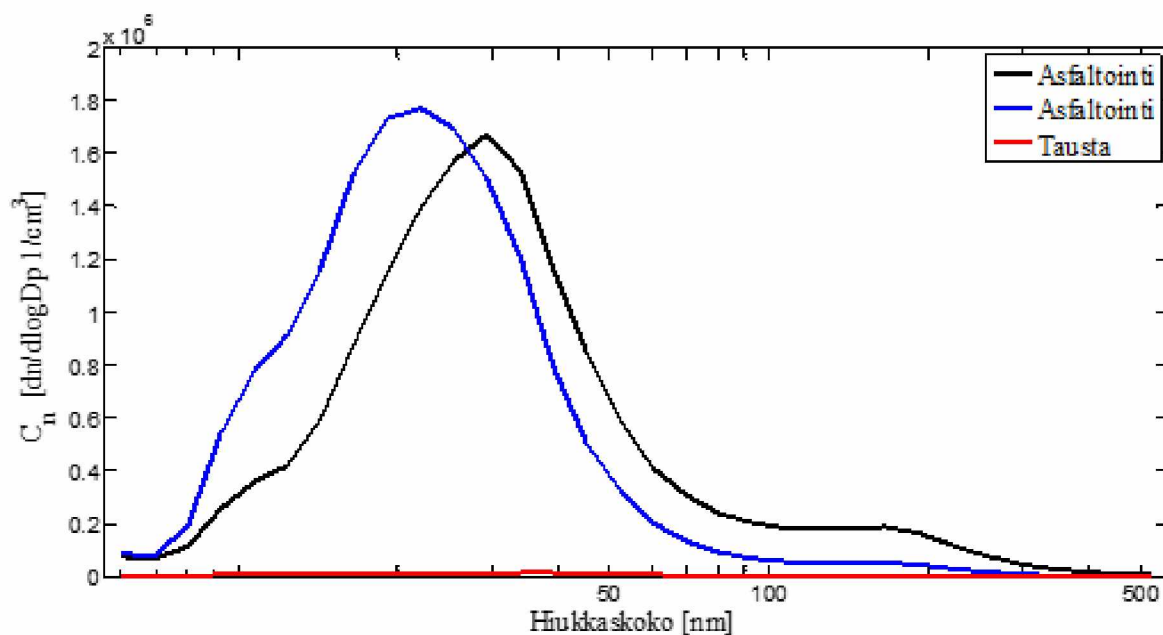
4.2 Kohde 2

Säätila: Puolipilvinen, lämmin tuulinen (puuskittainen) kesäpäivä.

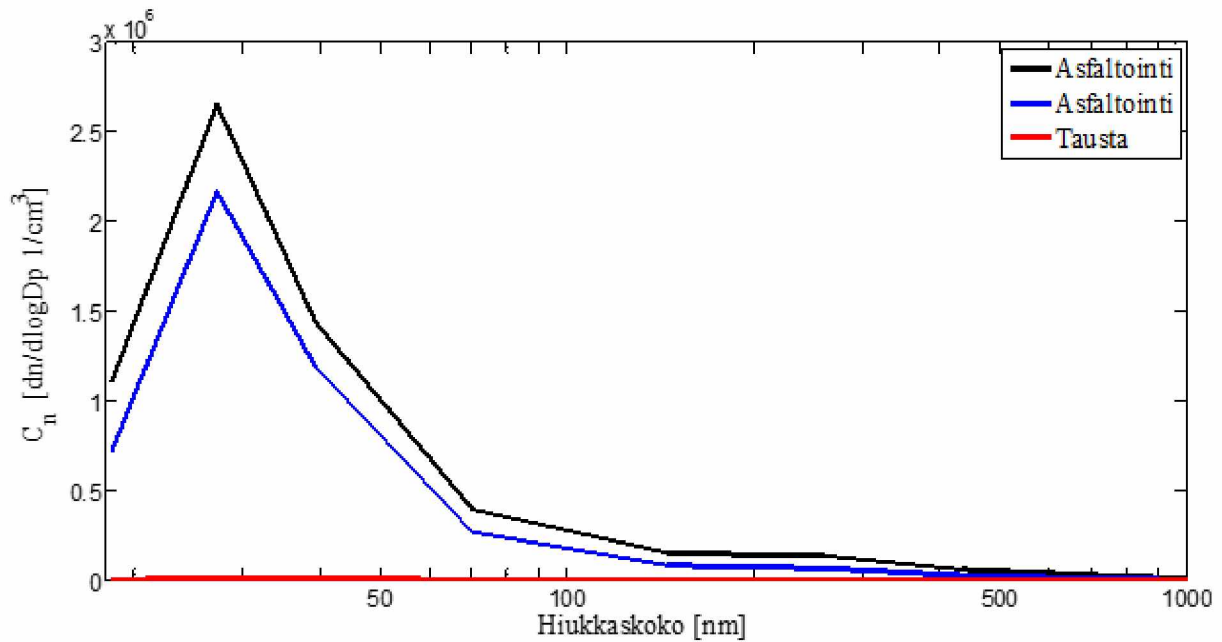
Tuuli kävi suuren osan ajasta työmaa-alueelta mittauspistettä kohti. Työmaalla oli toiminnassa dieselkäyttöisiä kuorma-autoja ja työkoneita joiden päästöt näkyvät osaltaan mittaustuloksissa. Tehtaan omasta toiminnasta peräisin olevien hiukkasten osuuden arvioidaan olleen vähäinen.

4.2.1 Lukumääräkokojakaumat

Asfaltoinnista peräisin olleet hiukkaset olivat keskimäärin huomattavan pieniä (kuva 13 ja 14). Lukumäärämoodi oli n. 20-30 nm kohdalla. Suurempien hiukkasten puolella jakauma oli varsin laakea, ja FMPS:llä havaittiin vaimea moodi 100-200 nm välillä. Jakaumista nähdään, että asfaltoinnissa vapautuu monen kokoisia hiukkasia, kuitenkin lukumäärällisesti eniten nanokokoluokassa. Nämä hiukkaset deponoituvat tehokkaasti keuhkoihin, syvälle alveolialueelle asti, ja edelleen verenkiertoon. Näiden hiukkasten vaikutus massapitoisuuteen on pienen koon vuoksi kuitenkin kokolailla mitätön. Näin ollen massapitoisuuteen perustuvat raja-arvot (HTP-arvot) huomioivat nanokoon hiukkasten osuuden huonosti. Kuitenkin, kuten todettua, myös nanokoon hiukkasilla on havaittu negatiivisia terveysvaikutuksia.



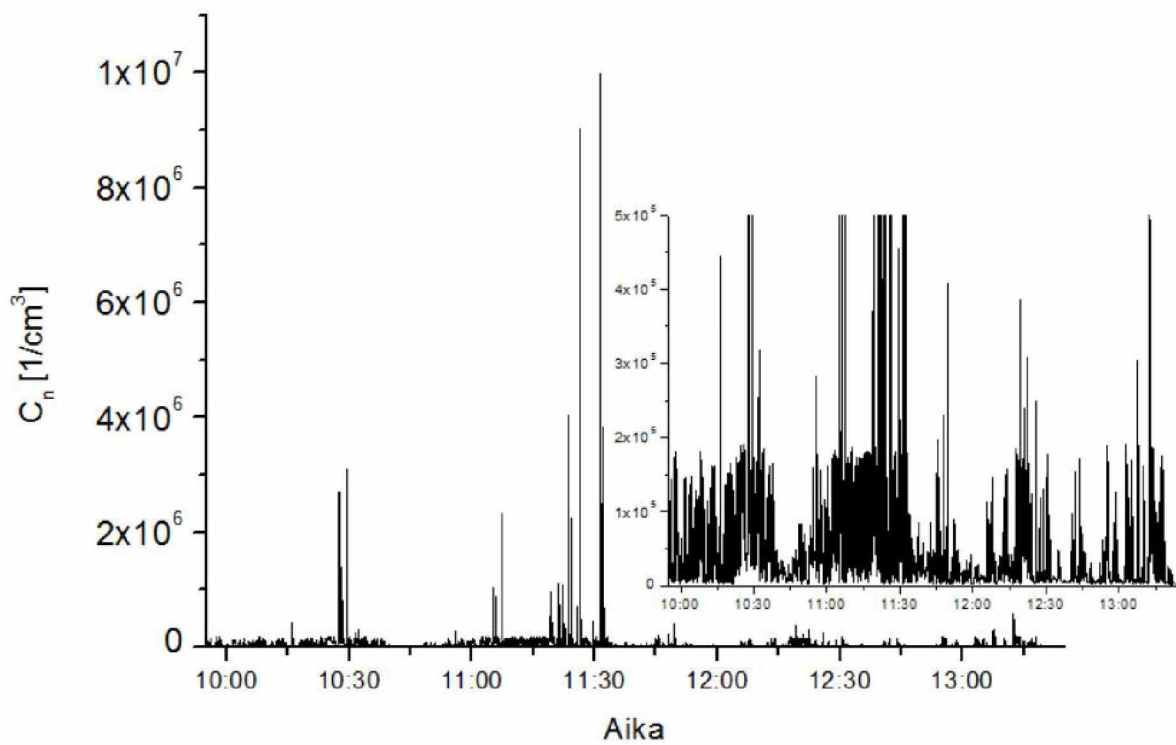
Kuva 13: Lukumääräkokojakaumia kun asfaltointityö tapahtui lähellä mittauspistettä (FMPS).



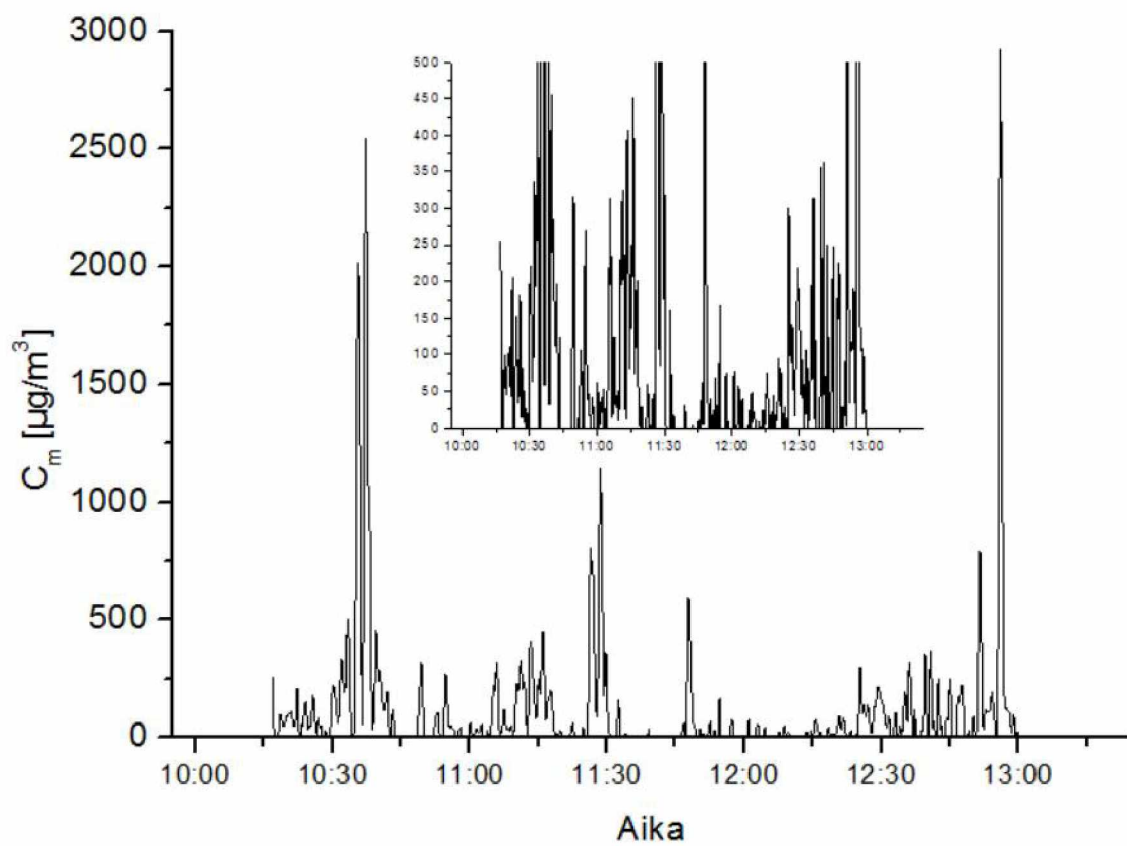
Kuva 14: Lukumääräkokojakaumia kun asfaltointityö tapahtui lähellä mittauspistettä (ELPI).

4.2.2 Lukumäärä-, massa-, ja pinta-alapitoisuudet

Lukumääräpitoisuus (kuva 15) vaihteli voimakkaasti ajan suhteen riippuen työvaiheesta, työskentelyn etäisyydestä mittauspisteeseen nähden ja vallinneista ilmavirtauksista. Huippuarvot olivat kaiken kaikkiaan huomattavan suuria (C_m n. $2,5 \text{ mg/m}^3$ ja C_n n. 10^7 l/cm^3). Nämä huippuarvot ovat arviolta sitä tasoa jolle levitinkoneen vierellä ja kyydissä työskentelevät altistuvat vähintään. On kuitenkin huomioitava pitoisuuksien ajallinen vaihtelu. Kuten kokojakaumista nähdään, suuri osa näistä hiukkasista on erittäin pieniä, jolloin massapitoisuus jää suuresta lukumääräpitoisuudesta huolimatta verrattain alhaiseksi.



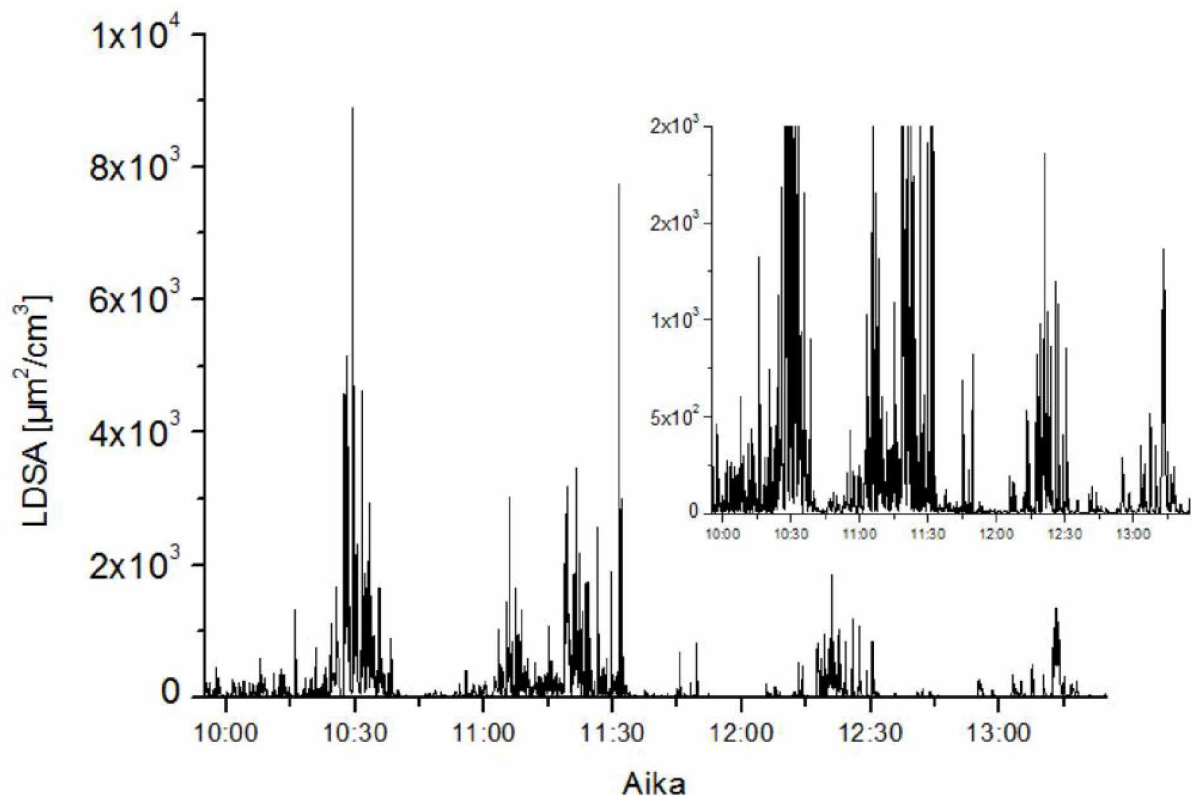
Kuva 15: Aikasarja lukumääräpitoisuudesta (CPC-3775). Sisäkuvana pienemmällä y-akselilla.



Kuva 16: Aikasarja massapitoisuudesta (TEOM). Sisempänä pienemmällä y-akselilla.

Työmaa-alueen kokonaismassapitoisuus (kuva 16) oli alimmillaan muutamia kymmeniä $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ollen varsin puhdasta ilmaa. Levitinkoneen ollessa käytössä mittauspisteen lähellä massapitoisuus oli korkeimmillaan milligramman luokkaa (vrt. esim. orgaaniselle pölylle HTP-arvo on $5\text{mg}/\text{m}^3$). Tällöin mittalaitteelle meni silmämääräisesti arvioituna kohtalaisen sankka savu.

On huomioitava, että työntekijä altistuu hiukkasten lisäksi myös kuumasta asfalttimassasta vapautuville kaasumaisille päästöille. Mahdollinen terveyshaitta on näiden kaikkien altisteiden yhteisvaikutus.

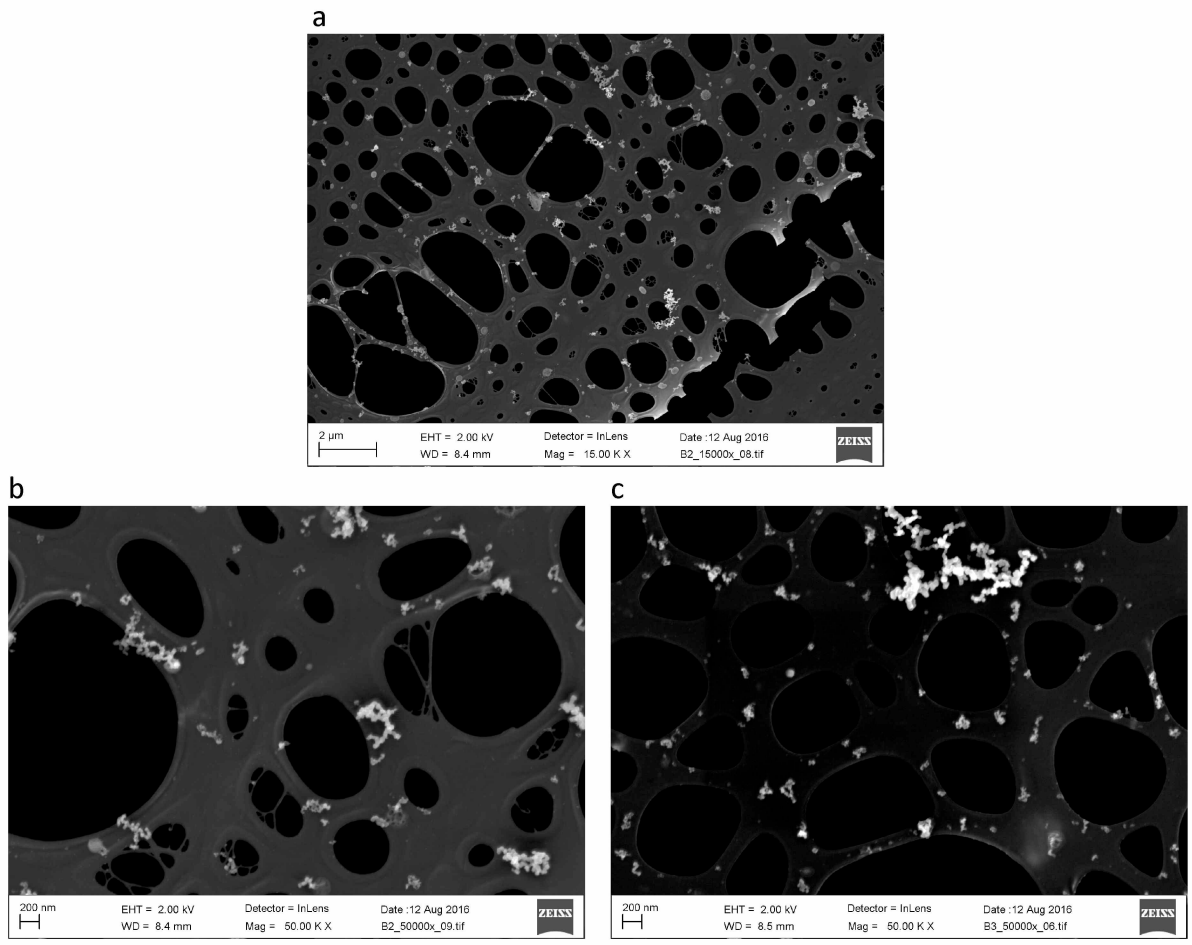


Kuva 17: Aikasarja LDSA-pitoisuudesta (NSAM-alveolar). Sisemmässä kuvassa pienempi y-akseli.

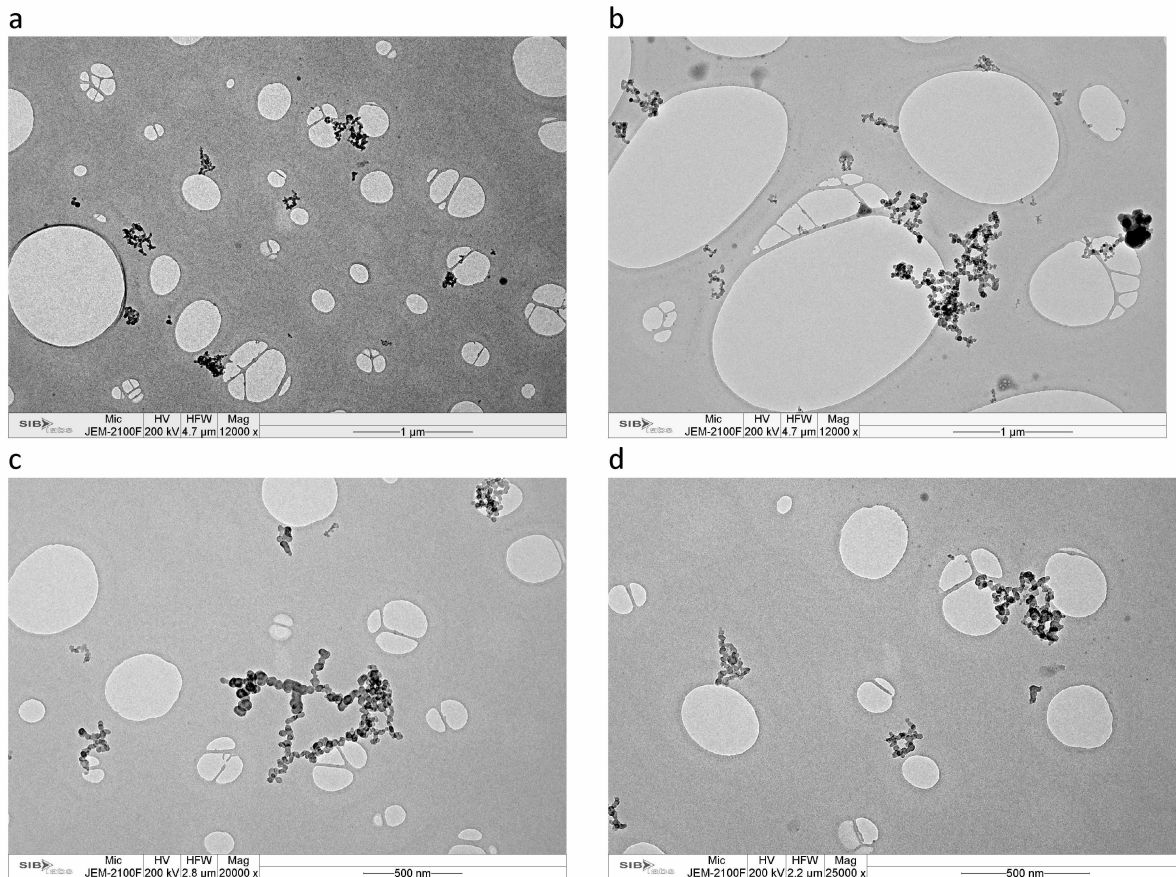
LDSA-pitoisuuden aikasarjasta (kuva 17) nähdään, että suurimmillaan pitoisuus oli karkeasti tuhat kertaa suurempi kuin taustapitoisuus. Kuten kuvaajasta 17 nähdään, pinta-alapitoisuus soveltuisi hyvin kohonneiden nanohiukkaspitoisuuksien havainnointiin.

4.2.3 Off-line analyysit

Elektronimikroskooppikuvat (kuvat 18 ja 19) vahvistivat, että asfaltointityössä vapautuu monen kokoisia hiukkasia, nanometrikoosta mikrometrikokoon asti. Arviolta eniten oli ketjumaisia agglomeraatteja, joiden koko oli joitakin satoja nanometrejä. Myös selkeästi pienempiä hiukkasia löytyi varsin runsaasti kerätyistä näytteistä. Nämä havainnot ovat linjassa mitattujen kokojakaumien kanssa. Muodoltaan agglomeraattihiukkaset olivat jossain määrin samankaltaisia puun palamisesta tai dieselmootoreista peräisin olevien nokiagglomeraattien kanssa.



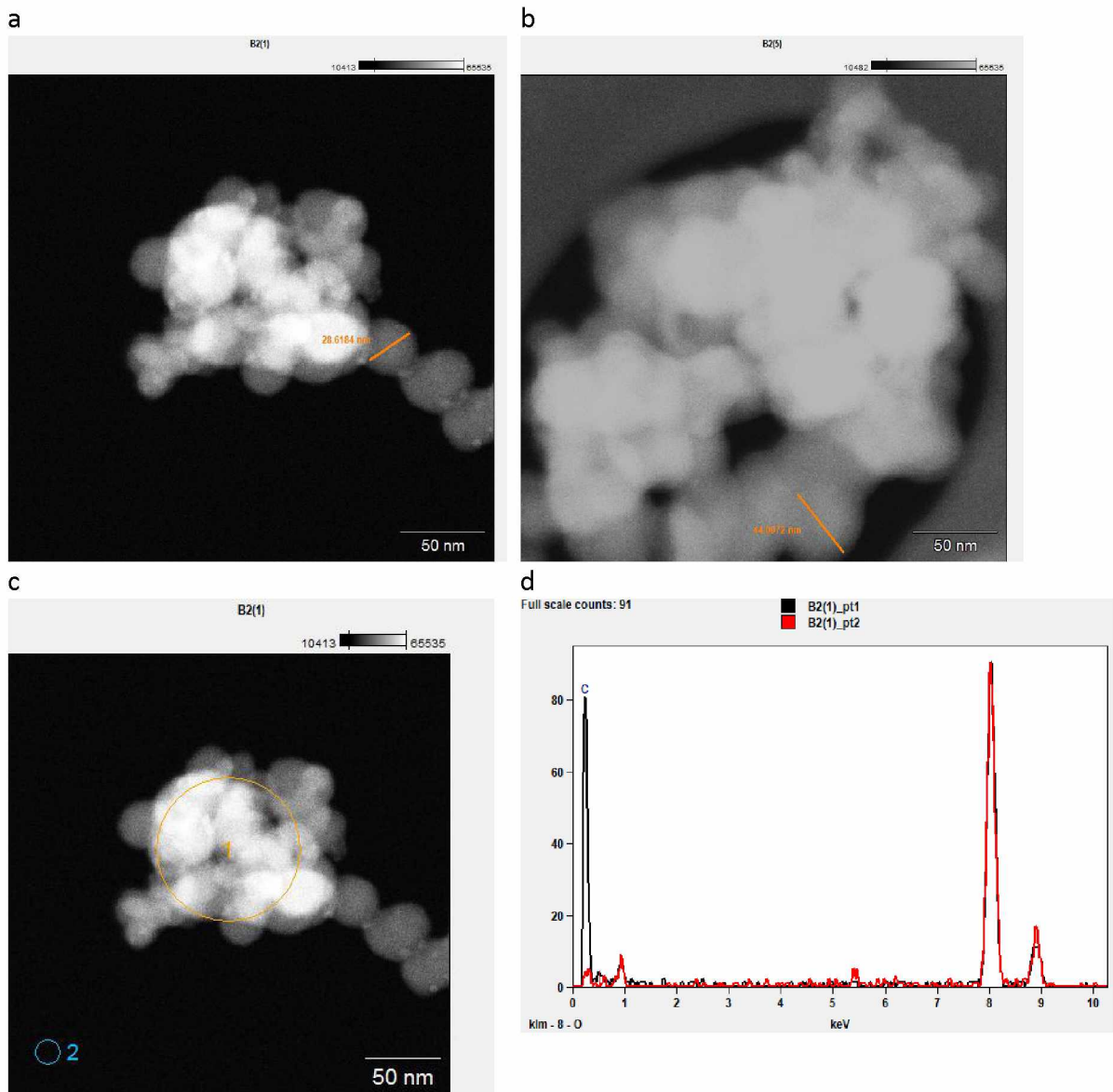
Kuva 18: Elektronimikroskooppikuvia (a, b ja c; SEM) asfaltionnin päästöhiukkasista.



Kuva 19: Elektronimikroskooppikuvia (a, b, c ja d; TEM) asfaltionnin päästöhiukkasista.

TEM-EDS-analyysin avulla selvitettiin päästöhiukkasten kemiallista koostumusta (kuva 20). Tutkitut hiukkaset koostuivat hiilestä ja hyvin vähäisessä määrin hapesta. Analyysissä löydettiin viitteitä myös raskaammista aineista, joita hiukkasissa oli vähän, mutta analyysin rajoista johtuen näistä ei tarkempaa tietoa ollut saatavilla. Kuva-analyysin perusteella (kuva 20) päästöhiukkaset olivat agglomeraatteja, jotka koostuivat n. 20-30 nm halkaisijaltaan olevista primaarihiukkasista. Osa analysoiduista hiukkasista voi olla peräisin myös dieselmoottoreista.

Suodatinnäytteeltä analysoitiin hiukkasmassan kemiallista koostumusta metallien osalta. Kaiken kaikkiaan metalleja oli vähäisiä määriä, mikä tukee hyvin TEM-ED:llä saatua käsitystä, että hiukkaset olivat pääosin hiiltä. Hiukkasissa löydettiin olevan mm. alumiinia, kuparia, rautaa, magnesiumia, molybdeeniä ja titaania. Näiden osuus hiileen verrattuna oli pieni.



Kuva 20: Elektronimikroskooppikuvia (a ja b). Oikealla alhaalla (d) TEM-EDS spektri vasemmalla alhaalla (c) olevasta hiukkasesta (piste 1). Punainen kuvaaja on mitattu kohdasta 2 edustaen taustaa. EDS-alkuaineanalyysin perusteella hiukkaset olivat pääasiassa hiiltä.

5 Johtopäätelmät

Ulkoilmassa tehtävät mittaukset ovat alttiita vallitseville olosuhteille ja mittaustulokset edustavat kulloinkin kyseessä olleissa olosuhteissa vallinneita hiukkaspitoisuuksia. Erityisesti tuulen vaikutus on huomattava. Hiukkaset liikkuvat ilmapirran eli tuulen mukana, joten jos tuuli ei käynyt työalueelta mittauspisteelle, pitoisuudet jäivät taustan tasolle. Korkeimmat pitoisuudet taas ovat peräisin tilanteista, joissa tuuli kävi sopivasti mittauspistettä kohti ja asfaltointityö tapahtui lähellä. Nämä tilanteet edustavat pitoisuustasoja, joille asfaltointityöntekijät vähintään työssään altistuvat. Todelliset altistustasot voivat olla jopa tämän tutkimuksen huippuarvoja suurempia, koska mittalaitteet eivät missään vaiheessa voineet olla yhtä lähellä asfaltointia kuin työntekijät. Työn luonteesta johtuen kuitenkin altistumisen ajallinen vaihtelu on huomattavan suurta. Tarkemman altistuksen määrittämiseksi täytyisi käyttää henkilökohtaisia keräimiä. Asfaltointityö on raskasta fyysistä työtä jolloin työntekijät eivät välttämättä ole halukkaita kantamaan keräimiä työpäivänsä ajan. Siksi henkilökohtainen näytteenotto oli rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Jatkotutkimuksia suunniteltaessa olisi hyvä ottaa mukaan henkilökohtaiset keräimet joko työntekijälle tai niin, että tutkija kantaa laitteita kulkee työntekijän vierellä. Jälkimmäiseenkin vaihtoehtoon liittyy myös tiettyjä ongelmia ja rajoitteita. Lisäksi osan mittalaitteista voisi sijoittaa esim. levitinkoneen kyytiin, jolloin pääsisi mittamaan hyvin läheltä levitinkoneenkuljettajan hengitysvyöhykettä.

Työntekijät ja työnjohto osoittivat kiinnostusta työhygieniää selvittävää tutkimusta kohtaan. Selkeästi lisätutkimukselle on tarvetta ja kiinnostusta. Jatkotutkimus vaatii myös urakoitsijoiden puolelta vahvaa sitoutumista.

6 Suositukset

Asfalttityöntekijät altistuvat asfaltoinnista peräisin oleville nano- ja pienhiukkasille sekä kaasumaisille yhdisteille. Hiukkaspitoisuudet ovat verrattain suuria, mutta myös ajallinen vaihtelu on suurta. Työmaan sijainti, ympäröivät rakennukset ja pinnanmuodot sekä vallitsevat sääolot vaikuttavat huomattavasti hiukkaspitoisuuksiin. Lisäksi asfalttimassan tyyppillä on vaikutusta hiukkaspäästöjen suuruuteen. Massan valinta jouduttaneen kuitenkin tekemään jatkossakin pinnoitteen vaatimusten mukaan eikä niinkään hiukkasemission perusteella. Pidemmällä aikavälillä materiaalien kehityksellä voisi olla saavutettavissa pienemmät hiukkaspäästöt.

Levitinkoneen kuljettaja altistui hiukkasille arviolta eniten. Asfaltoinnista vapautuvat hiukkaset ja kaasumaiset yhdisteet nousevat lämmön vaikutuksesta suurelta osin ylöspäin, ko. kuljettajan hengitysvyöhykkeelle. Kuljettaja myös viettää pitkiä aikoja koneen kyydissä ja siten altistuu ajallisesti paljon. Mahdollisuuksien mukaan hengityssuojaimen käyttöä voisi harkita. Levitinkoneen kyytiin voisi myös harkita massa- ja pinta-alapitoisuutta mittaavia laitteita jolloin voisi arvioida koko työpäivän aikaista altistusta. Markkinoilta löytyy myös suhteellisen edullisia nanohiukkasten monitorointiin tarkoitettuja laitteita, jotka voisi sijoittaa levittimen kyytiin ja niiden avulla arvioida hiukkasaltistusta ja mahdollista suojautumisen tarvetta sekä työprosessien kehittämisen vaikutusta.

Levitinkoneen ympärillä työskennelleet työntekijät altistuivat myös huomattaville nanohiukkaspitoisuuksille (ja hiukkasille yleensäkin). Arviolta kuitenkin kokonaisuutena vähemmän kuin koneen kuljettaja, riippuen mm. tuulen suunnasta ja voimakkuudesta. Nämä työntekijät voinevat tietyissä rajoissa huomioida tuulen suunnan ja hakeutua tuulen yläpuolelle, ainakin sellaisiksi ajoiksi kun tuulen alapuolella oleskelu ei ole työn kannalta välttämätöntä. Hengityssuojaimet ovat myös näille työntekijöille hiukkasaltistuksen vähentämisen kannalta suositeltavia. Työ on kuitenkin raskasta ja olosuhteet ajoittain erittäin kuumat, tällöin hengityssuojaimien käyttö voi osoittautua hyvinkin kuormittavaksi.

7 Haasteet ja ongelmat

Asfaltointityöstä peräisin olevien nanohiukkasten tutkimiseen sopivien mittauskohteiden löytyminen osoittautui ennakoitua haastavammaksi. Mittauspaikan piti olla suhteellisen suuri, lisäksi suojaisa tai syrjässä, jotta ympäröivästä toiminnasta peräisin olevat päästöt eivät häiritse mittausta liiaksi. Toisin sanoen, katujen päällystykset eivät tulleet kyseeseen muun liikenteen tuottamien päästöjen vuoksi. Lisäksi työmailla riittävä sähkön saanti herkille mittalaitteille rajasi osan kohteista pois. Myös mittausauton saaminen lähelle pinnoitettavaa aluetta rajoitti tarjolla olleita kohteita. Mikäli mittauspistettä ei saada työn välittömään läheisyyteen, mitataan pääasiassa alueen taustailman laatua eikä asfaltoinnista aiheutuvia päästöjä.

Ulkona suoritettavat mittaukset ovat aina erityisen haastavia ja työläitä toteuttaa. Sääolot ja muut ennakoimattomat tekijät vaikuttavat työmaiden aikatauluihin ja suunnitelmien toteutumisiin. Nämä seikat muodostivat tutkimukselle reunaehdot, joiden piirissä toimittiin, ja osa suunnitelluista kokeista jouduttiin perumaan.

8 Yhteenveto

Hankkeen myötä tietämys asfaltoinnin nanohiukkaspäästöistä ja mittausmenetelmien soveltuvuudesta lisääntyi. Asfaltoinnin todettiin vapauttavan suuria määriä monen kokoisia hiukkasia. Iso osa näistä hiukkasista oli nanokoossa. Nämä hiukkaset eivät juurikaan vaikuta massaperusteisiin työturvallisuusrajoihin, vaikka niillä on haitallisia terveysvaikutuksia. Tarvitaan lisätutkimusta nanohiukkasten havainnoinnista työturvallisuuden kannalta relevanteilla menetelmillä. Lisäksi olisi tarpeen löytää menetelmiä valvoa nanohiukkaspitoisuuksia työmailla jopa reaaliajassa.

Hankkeen tulokset esitellään tämän raportin lisäksi työntekijöiden nanohiukkasille altistumista käsittelevässä tieteellisessä artikkelissa.

Kiitos Työsuojelurahastolle ja kaikille hankkeessa mukana olleille.

Kirjallisuus

Baron, P.A. & Willeke, K., *Aerosol Measurement –Principles, Techniques and applications*. Wiley-Interscience 2001.

Burstyn, I., Randem, B., Lien, J.E., Langård, S., Kromhout, H. Bitumen, polycyclic aromatic hydrocarbons and vehicle exhaust: Exposure levels and controls among Norwegian asphalt workers (2002) *Annals of Occupational Hygiene*, 46 (1), pp. 79-87.

Karine Elihn , Bente Ulvestad , Siri Hetland , Anna Wallén & Britt Grethe Randem (2008) Exposure to Ultrafine Particles in Asphalt Work, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5:12, 771-779, DOI: 10.1080/15459620802473891

Lidia Morawska,* , Neville D. Bofinger, Ladislav Kocis, and Alwell Nwankwoala. Submicrometer and Supermicrometer Particles from Diesel Vehicle Emissions *Environmental Science & Technology* **1998** 32 (14), 2033-2042.

Nel, A.E., Mädler, L., Velegol, D., Xia, T., Hoek, E.M.V., Somasundaran, P., Klaessig, F., Castranova, V., Thompson, M. (2009) Understanding biophysicochemical interactions at the nano–bio interface. *Nat. Mater.* **8**, 543-557.

Somayeh ASADI, Marwa M HASSAN, Heather DYLLA; Characterization of Nano Particles Released During Asphalt and Concrete Laboratory Activities; Construction Research Congress 2012 ASCE 2012 2379-2388.

Somayeh Asadi, Marwa M Hassan, and Heather Dylla; Characterization of Nano Particles Released During Asphalt and Concrete Laboratory Activities; *J. Pavement Res. Technol.* 7(3):211-217, 10.6135/ijprt.org.tw/2014.7(3).211.

Ulvestad B, Randem BG, Hetland S, Sigurdardottir G, Johannessen E, Lyberg T; Exposure, lung function decline and systemic inflammatory response in asphalt workers; *Scand J Work Environ Health* 2007;33(2):114-122 doi:10.5271/sjweh.1114.

U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health Hazard Review Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt, December 2000

Oberdörster, G., Maynard, A., Donaldson, K., Castranova, V., Fitzpatrick, J., Ausman, K., Carter, J., Karn, B., Kreyling, W., Lai, D., Olin, S., Monteiro-Riviere, N., Warhait, D., Yang, H. (2005) Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Part. Fibre Toxicol.* **2**, 8.

Xia, T., Malasarn, D., Lin, S., Ji, Z., Zhang, H., Miller, R. J., Keller, A. A., Nisbet, R. M., Harthorn, B. H., Godwin, H. A., Lenihan, H. S., Liu, R., Gardea-Torresdey, J., Cohen, Y., Mädler, L., Holden, P. A., Zink, J. I., Nel, A. E. (2013) Implementation of a multidisciplinary approach to solve complex nano EHS problems by the UC Center for the environmental implications of nanotechnology. *Small* **9**, 1428-1443.