



Talvirenkaiden pölypäästöt ja eri katupölylähteiden osuudet kadunvarrella kerätyissä hiukkasnäytteissä

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

Opastinsilta 6 A
00520 Helsinki
puhelin 09 156 11
faksi 09 1561 2011
www.hsy.fi

Copyright

Kartat: © Kaupunkimittausosasto. Helsinki 039/2013
Kuvat: Roosa Ritola
Kansikuva: HSY / Kai Widell

Edita Prima Oy
Helsinki 2013

Raportti:

Kaarle Kupiainen, Nordic Envicon Oy
Liisa Pirjola, Metropolia Ammattikorkeakoulu
Roosa Ritola, Nordic Envicon Oy
Ana Stojiljkovic, Nordic Envicon Oy
Aleksi Malinen, Metropolia Ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää (1) päällysteestä ja hiekoituksesta peräisin olevan materiaalin osuuksia PM_{10} -katupölyssä ja (2) Nasta- ja kitkarenkaiden PM_{10} -pölypäästöjä. Tutkimus toteutettiin osana NASTA-tutkimusohjelmaa talvikaudella 2011/2012. Tavoitteen (1) mukaiset tutkimukset toteutettiin Suurmetsäntiellä, Helsingissä ja tavoitteen (2) Viikintiellä Helsingissä.

Tulokset osoittivat, että kevätkaudella päällysteen kiviaineksista peräisin olevat kulumatuotteet olivat suurin yksittäinen lähde, jonka osuus kevätkauden näytteissä oli 40 - 50 prosenttia. Pölyn muodostumisprosesseja koskevien tutkimusten perusteella merkittävin selittäjä kevätkaudella havaittavalle päällysteperäiselle pölylle on nastarenkaiden aiheuttama päällysteen kulumaa.

Tutkimuskohteessa käytettiin tarkastellulla talvikaudella talvihiekoitusta ja suolausta. Talvihiekoituksessa käytettyä kivimateriaalista muodostuneet hiukkaset selittivät ilma- ja resuspensio-näytteissä havaitusta PM_{10} -katupölystä noin 25 prosenttia. Talvihiekoituksella on ollut pieni, arviolta muutamien prosentin merkitys myös päällysteperäisen pölyn muodostumisessa hiekkapaperi-ilmion kautta.

Päällysteen ja talvihiekoituksen lähdeosuuksien osalta talvikaudelta 2011/2012 Suurmetsäntieltä saadut tulokset ovat samankaltaisia kuin aikaisemmissakin 2000-luvun alussa Suomessa tehdyissä tutkimuksissa. Hangossa tehdyssä tutkimuksessa (Kupiainen & Tervahattu 2004) talvihiekoituksen ilmanlaatuvaikutukseksi PM_{10} -pölyssä arvioitiin keskimäärin noin 10 prosenttia ja Helsingin keskustassa tehdyssä tutkimuksessa noin puolet (Tervahattu ym. 2005). Tiesuolan vaikutus pölyn koostumukseen oli havaittavissa erityisesti maalisi- ja huhtikuun näytteissä, jolloin suolauskertojakin on ollut useita.

Suomessa on yleisesti ollut vallalla käsitys, että talvihiekoitus olisi kaupunki-ilmassa havaittavan katupölyn päällähde. 2000-luvulla tehtyjen tutkimusten (Kupiainen & Tervahattu 2004, Tervahattu ym. 2005) ja nyt saatujen tulosten perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että talvihiekoitus ei ole tutkituissa kohteissa ollut päällähde PM_{10} -katupölyssä sellaisinaanakaan talvina jolloin hiekoitustarve on ollut suuri.

Renkaan pölypäästö ilmaan koostuu renkaan suoraan muodostamasta ja ilmaan päästämästä pölystä sekä aikaisemmin kadunpinnalle kertyneestä pölystä, jonka renkas nostaa ilmaan (resuspensio). Resuspensio-päästöjä havaitaan katuolosuhteissa käytännössä läpi vuoden, mutta sen kuukausivaihtelu on voimakasta (Kupiainen ym. 2009).

Julkaisija

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

Tekijät

Kaarle Kupiainen, Liisa Pirjola,
Roosa Ritola, Ana Stojiljkovic,
Aleksi Malinen

Päivämäärä

19.2.2013

Julkaisun nimi

Talvirenkaiden pölypäästöt ja eri katupölylähteiden osuudet kadunvarrella kerätyissä hiukkasnäytteissä

Avainsanat

ilmanlaatu, katupöly, talvirenkaat

Sarjan nimi ja numero: HSY:n julkaisuja 3/2013

ISSN-L 1798-6095

ISBN (nid.) -

ISBN (pdf) 978-952-6604-65-7

ISSN (nid.) -

ISSN (pdf) 1798-6095

Kieli: suomi

Sivuja: 26

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

PL 100, 00066 HSY

puhelin 09 156 11, faksi 09 1561 2011

www.hsy.fi

Huhtikuun alkupuolella tehdyt renkaiden päästömittaukset edustivat tilannetta alkukevään korkeilla resuspensio-päästötasoilla. Päästöt olivat 15 - 20-kertaisia verrattuna alhaisen resuspensiotason olosuhteisiin. Talvirenkaiden välillä ei havaittu merkittäviä systemaattisia eroja ja esimerkiksi nastarenkailta havaitut päästöt olivat samalla tasolla kitkarenkaiden päästöjen kanssa. Alkukevään olosuhteissa pölyn resuspensiotaso on niin korkea, että esimerkiksi nastojen aiheuttama päällysteen kulumassa muodostuva pöly ei ole aineistosta havaittavissa.

Alhaisissakin resuspensio-olosuhteissa resuspensio-päästö selitti uusilla renkailla edelleen noin 50-60 prosenttia nastarenkaiden kokonaispäästötasosta. Loput 40 - 50 prosenttia kokonaispäästöstä johtui nastojen aiheuttaman päällysteen suorasta kulumasta. Nastojen lukumäärän vähentäminen laski päällysteen kulumasta aiheutuvan PM_{10} -päästön muodostumista. Vuoden 2013 heinäkuussa voimaan tulevien vaatimusten mukainen nastarengas ai-

heutti alhaisella resuspensiotasolla noin 10-28 prosenttia alhaisemmat pitoisuudet aikaisempien vaatimusten mukaiseen nastarenkaaseen verrattuna. Alhaisissa resuspensio-olosuhteissa saadut päästömittaukset osaltaan demonstroivat nastarenkaiden lisäävän pölyn muodostumista verrattuna nastattomiin renkaisiin.

Renkaan kulumisen havaittiin muuttavan sen hiukkaspäästöjä merkittävästi. Sekä nasta- että kitkarenkailla havaittiin päästön alenevan renkaan kuluessa. Kulumisen aiheuttaa muutoksia sekä resuspensiosta että päällysteen kulumasta aiheutuviissa päästöissä. Kuluneiden renkaiden osalta tutkimuksia tulee jatkaa päästömuutoksia aiheuttavien tekijöiden määrällisen ymmärryksen parantamiseksi.

Summary

Aim of this study was to determine: (1) the relative contributions from pavement wear and traction sanding in PM_{10} road side air and road dust resuspension samples; (2) PM_{10} dust emissions from studded and studless tyres in on-road conditions. The study was conducted as part of the NASTA research program during the winter season 2011/2012. The studies were carried out in Suurmetsäntie and Viikintie in Helsinki, Finland.

The results showed that dust from pavement aggregates was the largest source during spring, accounting for 40-50 percent of the particulate matter in the air and resuspension samples. Based on studies on formation of dust, major source of the dust from pavement aggregates is the wear by studded tyres. Traction sand and road salt were used frequently during the winter 2011/2012. Sanding material explained about 25 percent of the road dust in the air and resuspension samples. Traction sanding is estimated to account for approximately few percent of the pavement dust via the sandpaper effect. Effect of road salt was few percent in the samples.

The source contributions from pavement and traction sanding observed in spring 2011/2012 at Suurmetsäntie are similar to what has been estimated in previous studies conducted in the early 2000s in Finland. In a study conducted in the city of Hanko, Kupiainen & Tervahattu (2004) estimated the contribution from traction sanding to be in average of about 10 percent. In another study in the center of Helsinki the contribution was estimated to be about half of the PM_{10} (Tervahattu et al. 2005).

The general perception in Finland has been that traction sanding is the main source of airborne road dust. Studies conducted in 2000s and the results of this study, however, indicate that traction sanding has been an important but not the main source of PM_{10} road dust even in winters with extensive use of gravel for traction control.

Emissions of road dust by a single tyre consist of direct emissions of wear products as well as resuspension emissions of material deposited on the road surface. Resuspension is detected in street conditions throughout the year, but the seasonal variation is high (Kupiainen et al. 2009).

The measurements conducted in early April represented the situation at high resuspension levels. Emissions were 15-20-fold greater than during low resuspension conditions. No significant differences in the emission levels of the different winter tires were detected. Initial conditions of the resuspension were so high that the increment emissions from pavement wear by studs were not detectable.

Published by

Helsinki Region Environmental Services Authority

Author

Kaarle Kupiainen, Liisa Pirjola,
Roosa Ritola, Ana Stojiljkovic,
Aleksi Malinen

**Date of
publication**
19.2.2013

Title of publication

Emissions of road dust by winter tyres and the contributions of different road dust sources in road side particle samples

Keywords

air quality, street dust, winter tyres

Publication series title and number:

HSY publications 3/2013

ISSN-L 1798-6095

ISBN (print) -

ISBN (pdf) 978-952-6604-65-7

ISSN (print) -

ISSN (pdf) 1798-6095

Language: Finnish

Pages: 26

Helsinki Region Environmental Services Authority

PO Box 100, 00066 HSY

Tel. +358 9 156 11, Fax +358 9 1561 2011

www.hsy.fi

At low resuspension conditions, still approximately 50-60 percent of the studded tyre's overall emissions were explained by resuspension. The remaining 40-50 percent was accounted to the pavement wear by studs. Reducing the number of studs per tyre reduced also the PM_{10} emission. The tyre that complied with the new studded tyre requirements that will enter into force in July 2013 reduced the emissions by 10-28 percent. The results obtained in low resuspension conditions demonstrate that studded tires increase the formation of dust compared to non-studded tires.

Tire wear was observed to change its particulate emissions significantly. Increasing tread wear reduced the tyre's PM_{10} emissions. Tyre wear resulted in changes in both resuspension and pavement wear emissions. Further studies on factors affecting the PM_{10} emissions of worn tires should be conducted.

Sammandrag

Syftet med denna studie var att bestämma: (1) de relativa bidragen av PM₁₀ partiklar från vägslitage och sandning i gaturummets luft och uppvirvling av vägdamm, (2) PM₁₀ emissioner från dubbade och dubbfria däck på vägförhållanden. Studien genomfördes som en del av NASTA forskningsprogrammet under vintersäsongen 2011/2012. Studierna genomfördes i Storskogsvägen och Viksvägen i Helsingfors, Finland.

Resultaten visade att vägdamm från slitaget av vägytan var den största källan under våren och står för 40-50 procent av partiklar i luften och uppvirvling i Storskogsvägen. Baserat på studier av dammbildning, största orsaken till detta är vägslitage av dubbdäck. Sanding och salt användes ofta för halkbekämpning under vintern 2011/2012. Slipmaterial förklarade om 25 procent av vägdamm i luften och uppvirvling. Sandning står för maximalt några få procent av vägslitage via sandpapper effekten. Effekt av vägsalt var några procent i proven.

De relativa bidragen av PM₁₀ partiklar från vägslitage och sandning som observerats under våren 2011/2012 på Storskogsvägen liknar vad som beräknats i tidigare studier utförda i början av 2000-talet i Finland. I en studie i staden Hangö uppskattade Kupiainen & Tervahattu (2004) bidrag från sandning vara i genomsnitt cirka 10 procent. I en annan studie i centrum av Helsingfors bidraget uppskattades att vara ungefär hälften av PM₁₀ (Tervahattu et al. 2005).

Den allmänna uppfattningen i Finland har varit att sandning är den huvudsakliga källan av luftburet vägdamm. Studier utförda i 2000-talet och resultaten av denna studie tyder dock på att sandning har varit en viktig, men inte den viktigaste källan till PM₁₀ vägdamm även i vintrar med omfattande användning av grus.

Utsläpp av vägdamm genom ett enda däck består av direkta utsläpp av slitage produkter samt uppvirvling av material som deponeras på vägbanan. Resuspension detekteras i gatan förhållanden under hela året, men den säsongsmässiga variationen är hög (Kupiainen et al. 2009).

Mätningarna, som genomfördes i början av april representerade situationen vid höga uppvirvling nivåer. Utsläppen var 15 - 20-faldigt högre än under låg uppvirvling förhållanden. Inga signifikanta skillnader i utsläppsnivåerna för de olika vinterdäck upptäcktes. Ursprungliga villkoren för uppvirvlingen var så höga, att utsläppen från dubbdäckens vägslitage inte var mätbar.

Utgivare

Samkommunen Helsingforsregionens miljötjänster

Författare

Kaarle Kupiainen, Liisa Pirjola,
Roosa Ritola, Ana Stojiljkovic,
Aleksi Malinen

Datum

19.2.2013

Publikationens namn

Vinterdäckens partikelutsläpp och andelen av de olika vägdammkällorna i partikelprov samlade vid vägkanten

Nyckelord

luftkvalitet, vägdamm, vinterdäck

Publikationsseriens titel och nummer:

HRM:s publikationer 3/2013

ISSN-L 1798-6095

ISBN (hft) -

ISBN (pdf) 978-952-6604-65-7

ISSN (hft) -

ISSN (pdf) 1798-6095

Språk: finska

Sidor: 26

Samkommunen Helsingforsregionens miljötjänster

PB 100, 00066 HSY
telefon 09 156 11, fax 09 1561 2011
www.hsy.fi

Vid låga uppvirvling förhållanden, fortfarande cirka 50-60 procent av dubbdäckens totala utsläppen förklaras av uppvirvling. De återstående 40-50 procent redovisades på vägslitage av dubbar. Minskad antalet dubbar per däck minskade även PM10 emissionen. Däcket som uppfyller de nya krav för dubb däck som skall trädas i kraft i juli 2013 minskade utsläppen med 10-28 procent. De erhållna resultaten i låga uppvirvling förhållanden visar att dubbdäck ökar bildningen av damm jämfört med dubbfria däck.

Däckslitage observerades att ändra däckens partikelutsläppen betydligt. Ökad slitage av däckens slitbanan minskar däckets PM₁₀ utsläpp. Däckslitage medfört förändringar i utsläpp från både uppvirvling och vägslitage. Ytterligare undersökningar av faktorer som påverkar PM₁₀ utsläppen av slitna däck bör genomföras.

Sisällys

Tiivistelmä	3
Summary	4
Sammandrag	5
Johdanto	7

OSA I. PM10-hiukkasten koostumus ja lähteet Suurmetsäntien resuspensiossa ja kadun varren ilmassa

1.1. Tutkimuskohde	9
1.2. Päälysteet ja talvikunnossapito	9
1.3. Menetelmät	10
Ilma- ja resuspensio-näytteiden keruu	10
Näytteille tehdyt analyysit	10
Hiukkasten koostumusanalyysit ja lähdeosuuksien arviointi	11
1.4. Tulokset ja niiden tulkinta	11
1.5. Johtopäätökset - osa I	14

OSA II. Nasta ja kitkarenkaiden vertailu- mittaukset Viikintiellä

2.1 Tutkimuskohde	17
2.2 Menetelmät	17
Aineiston käsittely	17
Renkaiden välinen vertailu - referenssi- korjaus	17
2.3 Testattavat renkaat ja testiajankohdat	18
2.4 Tulokset ja niiden tulkinta	18
Renkaiden päästöt korkealla resuspensio-tasolla	19
Renkaiden päästöt alhaisella resuspensio-tasolla	20
2.5 Johtopäätökset - osa II	22

Koko tutkimuskokonaisuuden tulosityhteenvedo	24
Kirjallisuus	26

Johdanto

Laaja tutkimusaineisto osoittaa, että sekä nastarenkaat että talvihiekoitus lisäävät hengitettävien hiukkasten (PM_{10}) pölynmuodostumista merkittävästi verrattuna nastattomaan talvirenkaaseen tai hiekoituksen osalta tilanteeseen jossa ei hiekoiteta (Kupiainen ym. 2005, Gertler ym. 2006, Kupiainen 2007, Juneholm 2007, Gustafsson ym. 2009). Näiden kahden lähteen osalta pölyn muodostumisprosesseissa on eroja, sillä nastarenkaiden pölynmuodostumisvaikutus kohdistuu tienpinnan materiaaleihin aina kun päällyste on paljas (Kupiainen 2007, Gustafsson ym. 2009), kun taas talvihiekoituksen pölynmuodostumisvaikutus on episodimainen ja rajattu aikaan, jolloin hiekoitusta käytetään ja hiekoitusmateriaalia on kadun pinnalla (Gertler ym. 2006, Kupiainen & Pirjola 2011). Nastojen ja nastarenkaiden ominaisuuksien (nastan paino, lukumäärä, nastaulkonema) on havaittu vaikuttavan pölynmuodostukseen (Gustafsson ym. 2009, Kupiainen & Pirjola 2011).

Nastallisen ja nastattoman renkaan päästöjen suhdelu on hyvin herkkä tienpinnan pölyisyydelle, mikä selittää varsin suuren hajonnan renkaiden vertailua koskevissa tutkimustuloksissa (Kupiainen & Pirjola 2011). Renkaan aiheuttama pölypäästö koostuu katuolosuhteissa pääosin kahdesta komponentista: (1) nastan aiheuttamasta päällysteen kulumasta, joka nousee suoraan ilmaan sekä (2) kadun pinnalla jo valmiiksi olevan pölystä, jonka rengas nostaa ilmaan (resuspensio). Näiden kahden päästöprosessin merkitys vaihtelee eri rengastyypeillä. Nastattomilla renkailla resuspensio on yleisesti ottaen merkittävämpi päästön aiheuttaja kun taas nastallisilla renkailla sekä suora päästö (1), että resuspensio (2) ovat merkittävässä asemassa. Suoran päästön ja resuspension suhteelliset osuudet riippuvat siitä, kuinka paljon aikaisemmin muodostunutta ja katuympäristöön kertynyttä pölyä on kadun pinnalla.

Suomen katuolosuhteissa resuspensio päästön kuukausivaihtelu on voimakasta, ja on suurimmillaan kuivilla kadun pinnoilla maaliskuun vaihteessa, kun lumi ja jää ovat sulaneet katuympäristöstä (Kupiainen ym. 2009). Huhituksen aikana resuspensio päästö laskee voimakkaasti ja toukokuun puolessa välissä päästötilanne saavuttaa keuhkaisen puhtaan tilanteen (Kupiainen ym. 2009).

Talvihiekoituksen pölyvaikutus syntyy siten, että hieka tai sepeli murskaantuu ja jauhautuu renkaiden alla ja näin ollen lisää resuspendoituvan pölyn määrää kadun pinnalla. Hiekkarakeet ja pöly lisäksi hiovat päällysteen kiviainesta, jolloin myös päällysteestä muodostuu resuspendoituvaa pölyä nk. hiekkapaperi-ilmion kautta (Kupiainen 2007). Kun hiekkaa tai sepeliä on renkaan alla, pölyä muodostuu huomattavasti enemmän kuin muulloin. Hiekoituksen levitysmäärillä ja materiaalin ominaisuuksilla

on vaikutusta pölynmuodostumisen voimakkuuteen (Kupiainen 2007).

Aikaisempi tutkimus on osoittanut molempien lähteiden (talvihiekoitus ja päällysteen kulumasta nastarenkaiden vaikutuksesta) lisäävän katupölyn määrää katu ympäristöissä. Osa katupölyn ilmalaatuvaikutuksesta syntyy suoran päästön kautta heti pölynmuodostumistapahtuman jälkeen. Kuitenkin merkittävämpi ilmanlaatuvaikutus, varsinkin kevät-pölykaudella, tulee aikaisemmin muodostuneen ja katu ympäristöön keräytyneen pölyn noustessa ilmaan ajoneuvojen ja tuulen nostattamina (resuspensio) (Kupiainen ym. 2009, Pirjola ym. 2009). Ilmanlaatuvaikutusten ja mahdollisten vähentämistoimenpiteiden kannalta on oleellista tuntea resuspendoituvan katupölyn lähteet erityisesti päivinä, jolloin ilmanlaatu on hengitettävien hiukkasten kannalta huono. Kyseinen tutkimustehtävä on kuitenkin haasteellinen kaupunkiolosuhteissa, lähinnä päällysteen ja hiekoitusmateriaalin kiviainesten samankaltaisen mineraalikoostumuksen takia. Hangossa maaliskuussa 2000 tehdyssä tutkimuksessa (Kupiainen & Tervahattu 2004) käytettiin hiekoitusmateriaalina hyvin eroteltavissa olevaa masuunikuonaa. Tutkimuksessa arvioitiin hiekoituksen suoraksi ilmanlaatuvaikutukseksi PM_{10} -hiukkasten viikkokohtaisissa pitoisuuskeskiarvoissa noin 12 prosenttia ja mineraalifraktiossa noin 20 prosenttia. Museokadulla talvikaudella 2000/2001 tehdyssä tutkimuksessa arvioitiin PM_{10} -mineraalihiukkasista olleen noin puolet hiekoitusperäistä. Kummassakaan tutkimuksessa ei ollut tarkemmin tiedossa hiekoitustapahtumien ajankohtia eikä määriä, joten tulosten yleistettävyyttä on vaikea arvioida. Todennäköisesti eri katupölylähteiden osuudet voivat vaihdella talvi- ja kevätkauden aikana paljonkin (Kupiainen & Stojiljkovic 2009).

Yleisesti ottaen tietopohjaa sekä talvirenkaiden että talvihiekoituksen pölyn muodostumis- ja päästöprosesseista tulisi lisätä. Tämä tutkimus osaltaan vastaa tähän haasteeseen tavoitteenaan selvittää (1) päällysteestä ja hiekoituksesta peräisin olevan materiaalin osuuksia PM_{10} -katupölyssä ja (2) Nasta- ja kitkarenkaiden PM_{10} -pölypäästöjä. Tutkimus toteutettiin osana NASTA- tutkimusohjelmaa talvikaudella 2011/2012. Kohdan (1) tutkimukset toteutettiin Suurmetsäntiellä, Helsingissä ja kohdan (2) Viikintiellä Helsingissä. Raportti on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen osa esittelee ensimmäisen tavoitteen ja toinen osa vastaavasti toisen tavoitteen mukaisten tutkimusten toteutusta, tuloksia ja johtopäätöksiä. Yleiset johtopäätökset koko tutkimuskokonaisuudesta on koottu raportin loppuun. Tämän raportin aihepiiriä käsittelee myös NASTA-tutkimusohjelman puitteissa tehty kirjallisuuskatsaus nastarenkaan ja talvihiekoituksen pölyvaikutuksista (Kupiainen & Ritola 2013).

OSA I. PM10-hiukkasten koostumus ja lähteet Suurmetsäntien resuspensiossa ja kadun varren ilmassa

Raportin ensimmäisessä osassa esitellään tutkimuskokonaisuuden ensimmäisen tavoitteen mukaisen tutkimuksen toteutus, tulokset ja johtopäätökset. Tarkoituksena oli selvittää PM₁₀-katupölyn lähteitä erottelemalla toisistaan päällyste- ja talvihiekoitusperäisen PM₁₀-pölyn osuudet katupölyssä, erityisesti sen mineraalihiukkasissa, sekä arvioimalla kyseisten lähteiden ilmanlaatuvaikutusta. Tutkimusaineiston muodostivat kadun varresta kerätyt ilmanäytteet sekä tienpinnan resuspensionäytteenä.

1.1. Tutkimuskohde

Nasta-tutkimusohjelmaan liittyvien PM₁₀-hiukkasnäytteiden keruukohteena oli Suurmetsäntie Koillis-Helsingissä lähellä Vantaan rajaa. Suurmetsäntie valikoitui tutkimukseen siksi, että siellä oli mahdollista käyttää talvihiekoituksessa kiviainesta, jonka koostumus oli riittävän erilainen verrattuna päällysteen kiviainekseen. Vastaavan tutkimusasetelman toteutus keskustamaisemmassa kaupunkiympäristössä todettiin tämän tutkimuksen puitteissa mahdottomaksi.

Suurmetsäntie on itä-länsisuuntainen kokoojkatu, jonka vuorokausiliikennemäärä on katuosuudesta riippuen noin 9 500 - 14 400 (syksyn KAVL) ja raskaan liikenteen osuustästä 5 - 7 %. Suurin liikennemäärä (14 400, 7 %) osuu Malminkaaren ja Rattitien väliin jäävälle tieosuudelle (kts. kartta Kuva 1.). Kyseiseltä osuudelta kerättiin myös tässä tutkimuksessa käytetyt resuspensionäytteenä. Nopeusrajoitus Suurmetsäntiellä on 60 km/h.

Suurmetsäntien katuosuus, jolla keräykset tehtiin, on avointa katu ympäristöä. Kadun molemmin puolin tietä on laajat aukeat peltoalueet, ja ilmamassalla on mahdollisuus sekoittua ja päästöillä laimentua suhteellisen vapaasti verrattuna suljetumpaan katukuilumaiseen ympäristöön. Tien reunoista ja kaistojen välistä puuttuu kanttikiveys lukuun ottamatta lyhyitä pätkiä osuuden molemmissa päissä.

1.2. Päällysteet ja talvikunnossapito

Tutkimusta varten kerättiin tietoja Suurmetsäntien päällysteestä ja Suurmetsäntiellä tapahtuneista talvikunnossapidon toimenpiteistä. Suurmetsäntie (välillä Ruokoushuoneentie - Puistolantie) on päällystetty vuosina 2004-2005 (Lemminkäinen Infra Oy). Asfalttityyppi on AB 22 ja nastarengaskestävyysluokitus AN10. Päällysteen kiviaine on Talman louhokselta.

Talvihiekoitusta käytetään Suurmetsäntiellä tarpeen mukaan, mutta pääasiassa sepeli levitetään risteysalueille ja bussipysäkeille ja niiden läheisyyteen. Talvihiekoitus toteutetaan 1/5,6 mm raekoon pesuseulotulla sepelillä, johon lisätään pieni annos suolaa paakkuuntumisen estoon. Lisäksi Suurmetsän tiellä on käytetty nk. suolahiekkaa, joka on tiesuolan (NaCl) ja sepelin sekoitus siten, että molempia on tilavuusosuuksina mitattuna noin 50 prosenttia. Sepelin ja suolahiekan kertalevitysmäärät vaihtelivat 40 ja 200 g/m² välillä ja tiesuolan (NaCl) 10 ja 40 g/m² välillä riippuen sääolosuhteista. Tiesuola levitetään yleensä joko liuoksena tai kostutettuna materiaalina.

Suurmetsäntien pohjoispuolella on kevyen liikenteen väylä, joka on erotettu ajoradasta kapealla viherkaistaleella. Kevyen liikenteen väylän osalta käytössä ei ollut tarkempia toimenpidekirjauksia, eikä näin ollen tietoa liukkaudentorjuntaan käytetyistä materiaaleista tai määristä.

Suurmetsäntiellä ja sen lähikaduilla tehtiin talvikunnossapitotoimia talvi- ja kevätkaudella 2011 -2012 seuraavasti:

- Marraskuu
 - Suolaus 1 päivänä (25.11.)
- Joulukuu
 - Suolaus 4 päivänä (1., 7., 11. ja 23.12.)
 - Hiekoitus 5 päivänä (1., 6., 21., 22. ja 31.12.)
- Tammikuu
 - Hiekoitus 7 päivänä (2., 3., 7., 9., 10., 12., ja 13.1.)
 - Suolahiekka 10 päivänä (14., 18., 19., 20., 21., 22., 23., 24., 25. ja 26.1.)

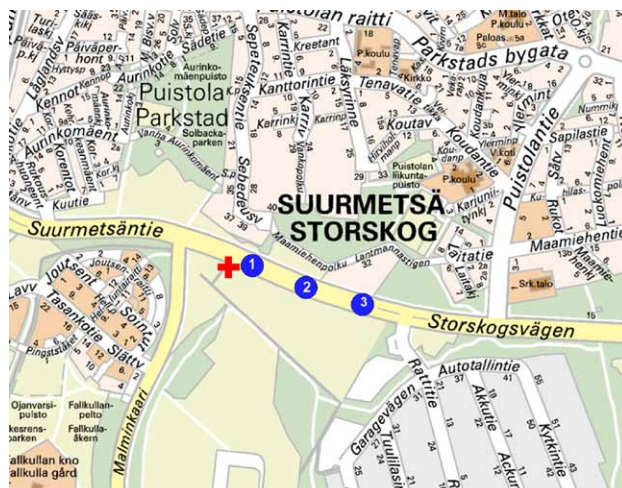
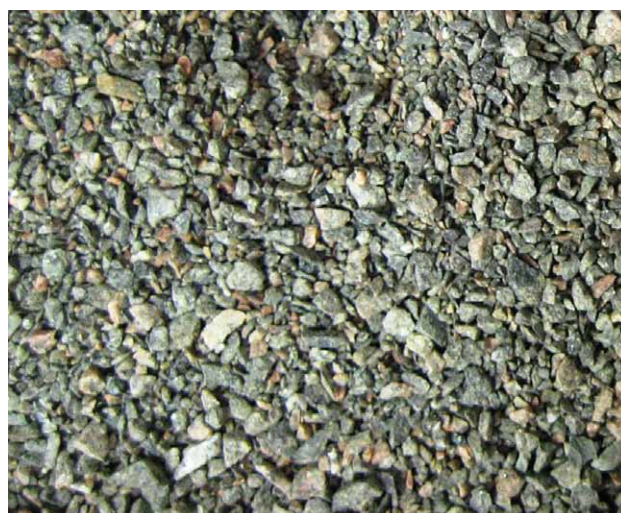
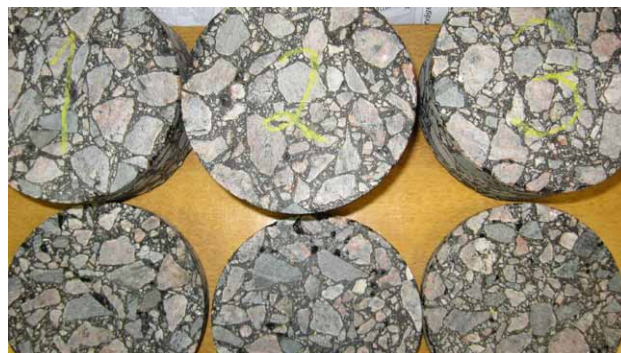
- Helmikuu
 - Suolaus 1 päivänä (24.2.)
 - Hiekoitus 2 päivänä (1.2. ja 16.2.)
 - Suolahiekka 16 päivänä (2., 3., 4., 5., 6., 7., 12., 13., 14., 15., 17., 18., 20., 22., 23. ja 29.2.)
- Maaliskuu
 - Suolaus 6 päivänä (1., 3., 4., 10., 11. ja 12.3.)

Suurmetsäntien liukkaudentorjunnassa käytettävään talvihiekoitukseen tilattiin tätä hanketta varten erikseen mahdollisimman tummasta kivilajista tehty murske, joka erosi mineraalikoostumukseltaan riittävästi päällysteen kiviaineksesta. Lähdemateriaalien riittävän erilainen koostumus mahdollistaa talvihiekoituksesta ja päällysteen kulumasta muodostuneen pölyn osuuksien arvioimisen erikseen. Päällysteen ja talvihiekoituksen kiviainesten mineraalikoostumuksia on käsitelty yksityiskohtaisemmin luvussa 1.4.

Nastarenkaiden käyttöastetta seurattiin REDUST-hankkeen puitteissa liikennevirrassa kuulovartio-menetelmällä Tapaninvainontieellä noin 5 kilometriä Suurmetsäntieltä länteen (Unhola 2012). Talvikaudella 2011/2012 alkutalvi oli lämmin ja lumeton ja talvisiksi olosuhteet muuttivat varsinaisesti vasta vuodenvaihteen jälkeen, tammi-kuun puolella välissä. Sääolosuhteet näkyivät renkaiden vaihtojankohdan viivästyksenä suhteessa esimerkiksi aikaisempaan talveen (Unhola, 2012). Nastarenkaiden käyttöaste alkoi nousta marraskuun alusta, oli noin 50 prosenttia marraskuun puolella välissä ja saavutti normaalin talvikauden tilanteen joulukuun puoleen väliin mennessä (Unhola, 2012). Sydäntalvella käyttöaste oli 81 - 84 prosenttia. Käyttöasteen hienoista laskua havaittiin maaliskuussa, mutta voimakas lasku noin 75 prosentista 3 prosenttiin havaittiin huhtikuun aikana toukokuun 2. päivään mennessä. Myöhemmin toukokuussa nastarenkaita ei liikennevirrassa enää havaittu.

1.3. Menetelmät

PM₁₀-pölyn koostumuksen ja lähdeosuuksien arvioinnissa käytettiin yksittäishiukkasanalyysiä ja reseptorimallinnusta (kts. esim. Tervahattu ym. 2005, Kupiainen ym. 2005, Kupiainen 2007). Yksittäishiukkasanalyysiä ja reseptorimallinnusta yhdistelevässä menetelmässä kerätään tietoa yksittäisten hiukkasten ja hiukkasagglomeraattien koostumuksesta sekä lähteillä että reseptorilla. Tässä tutkimuksessa reseptoreina olivat kadun pinnan resuspensiopöly sekä kadun varren ilmasta kerätty pöly. Kadun pinnan resuspensionäytteet ja kadun varren ilman hiukkasnäytteet kerättiin polykarbonaattialustalle Metropolia Ammattikorkeakoulun kahdella DustTrak-hiukkasmittalaitteella. Resuspensionäytteet kerättiin Nuuski- ja -auton katupölyn mittausjärjestelmään ja ilmanäytteet HSY:n mittausvaunun katolle asennetuilla mittalaitteilla. Lähdenäytteinä puolestaan toimivat Suurmetsäntieltä otetut päällystenäytteet ja hiekoitusmateriaalista otetut näytteet (Kuva 1). Koostumustietojen perusteella arvioitiin laskennallisesti eri hiukkaslähteiden osuuksia PM₁₀-näytteissä.



Kuva 1. Suurmetsäntien päällystenäytteet (3 kpl) otettiin väyliltä Malminkaari - Rattitie. Oikealla ylhäällä päällystenäytteet ja alhaalla oikealla Suurmetsäntieellä liukkaudentorjunnassa 2011-2012 käytetty sepeli. HSY:n mittausvaunu sijaitsi lähellä Malminkaaren ja Suurmetsäntien risteystä (punainen rasti), ja tien pohjoispuolella mittausvaunun kohdalla sijaitsi lisäksi yksi akullinen PM₁₀-monitori (Osiris).



Kuva 2. HSY:n ilmanlaadun mittausvaunu Suurmetsäntiellä, lähellä Malminkaaren ja Suurmetsäntien risteystä.

Ilma- ja resuspensionäytteiden keruu

Näytteitä kerättiin sekä ilmasta kadun varrelta noin 3 m korkeudelta että kadun pinnalta nousevasta resuspensionäytteistä, jota mitta-ajoneuvo nostattaa ilmaan.

Ulkoilmanäytteet kerättiin DustTrak-mittalaitteella (TSI, malli 8530), joka asennettiin Helsingin seudun ympäristöpalvelut kuntayhtymä HSY:n Suurmetsäntielle pystytämään ilmanlaadunmittausvaunuun. Näytteenottopiste vaunun katolla on noin 3 metrin korkeudella. HSY:n mittausvaunu sijaitsi lähellä Malminkaaren ja Suurmetsäntien risteystä, Suurmetsäntien eteläpuolella (Kuvat 1 ja 2). Myös Suurmetsäntiellä kerätty ilmanlaatuaineisto on peräisin samasta näytteenotto paikasta (SHARP- ja Osiris-monitorit).

Resuspensionäytteet kerättiin DustTrak-hiukkasmittalaitteella (TSI, malli 8530), joka asennettiin Metropolian Nuuskija-tutkimusajoneuvoon. Metropolia Ammattikorkeakoulussa suunniteltu ja kehitetty Nuuskija-auto on liikkuva ilmanlaadun tutkimuslaboratorio. Mittausjärjestelmä ja laitteet on asennettu diesel-käyttöiseen VW LT 35 pakettiautoon. Nuuskijalla voidaan mitata pakokaasuperäisiä kaasu- ja hiukkaspäästöjä, hiukkasten kokojakaamaa sekä auton renkaan synnyttämiä ja nostattamia katupölypäästöjä, mittausjärjestelmän erikoisvahvuutena ovat jatkuvatoimiset mittaukset todellisissa liikennetilanteissa (Pirjola et al. 2004; 2006; 2009; 2010).

Nuuskija-auton katupölyn mittaukseen suunnitellussa mittausjärjestelyssä vasemman takarenkaan nostattama katupöly imetään pyörän takana olevan kartiomaisen suuaukon (20cmx20cm) läpi auton katolla olevan pumpun avulla putkistoon, josta se haarautetaan isokineettisesti PM₁₀-esierottimen kautta massapitoisuutta mittaaville laitteille (TEOM Tapered Element Oscillating Microbalance ja DustTrak) sekä hiukkasten kokojakaamaa ja kokonaislukumääräpitoisuutta mittaavalle laitteelle (ELPI Electrical Low Pressure Impactor).

Näytteille tehdyt analyysit

Tutkimuksessa analysoitiin yksi hiekoitusoran kokoomänäyte, kolme päällystenäytettä ja 16 DustTrakien suodattimille kerättyä PM₁₀-hiukkasnäytettä. DustTrakien suodattimille oli kerätty ilma- ja resuspensionäytteitä edellämainituilla menetelmillä. Päällystenäytteet toimitti Staran Katu- ja maalaboratorio. Hiekoitusoranäyte otettiin syksyllä 2011 suoraan siilosta, johon Stara oli tilannut hiekoitusmateriaalin talvea 2011-2012 varten. Resuspensionäytteen ja ilmanäytteen näytteenottopäivämäärät on koottu Taulukkoon 1.

Taulukko 1. Suurmetsäntieltä kerättyjen resuspensionäytteen ja ilmanäytteen näytteenottopäivämäärät.

Näytteet R1 - R10 ovat renkaan takaa kerättyjä resuspensionäytteitä. A1 - A6 ovat ilmanäytteitä.

Osa ilmanäytteistä (loppukevät) kerättiin useamman vuorokauden ajalta, jotta näytettä kertyi suodattimelle riittävä määrä jatkoanalyysijä varten.

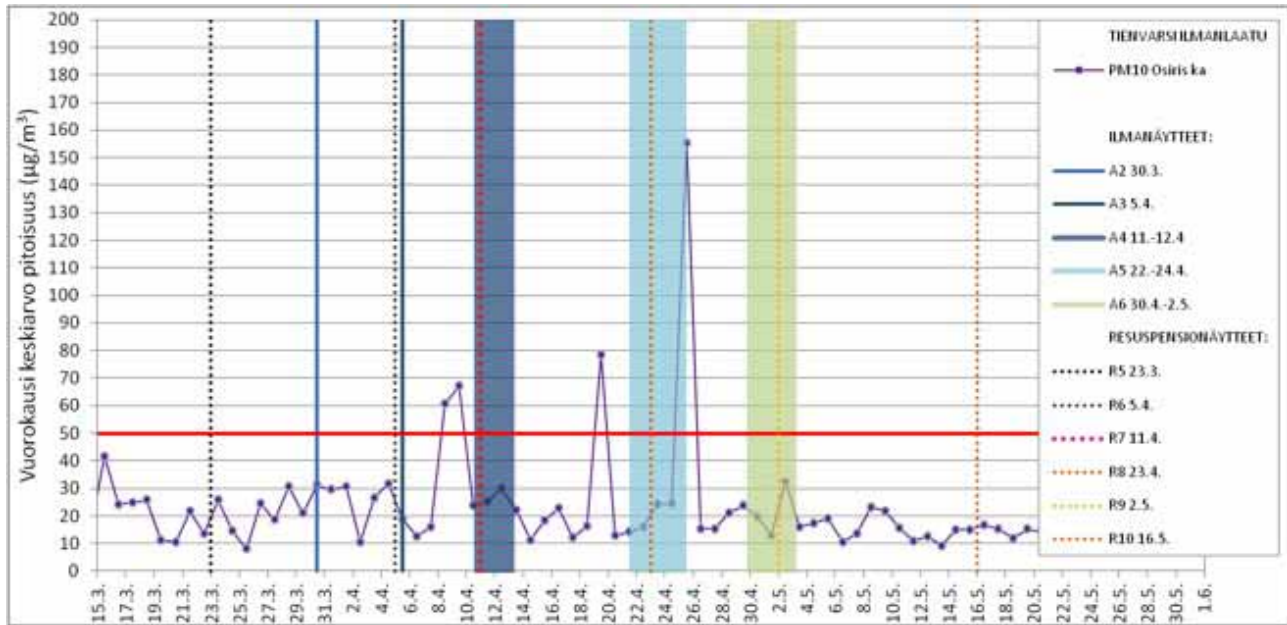
Näyte renkaan takaa			PM ₁₀ *)
R1	7.10.2011		66
R2	27.10.2011		388
R3	28.12.2011		771
R4	8.3.2012		1251
R5	23.3.2012		420
R6	5.4.2012		749
R7	11.4.2012		1376
R8	23.4.2012		226
R9	2.5.2012		191
R10	16.5.2012		91

Ilmanäyte		PM _{2,5} **)	PM ₁₀ **)
A1	8.3.2012	n/a***)	n/a***)
A2	30.3.2012	7,1	22,1
A3	5.4.2012	6,1	12,4
A4	11.-12.4.2012	13,5	26,3
A5	22.-24.4.2012	11,7	20,3
A6	30.4.-2.5.2012	7,5	20,9

*) Nuuskija ja keskimääräinen DustTrak PM₁₀-päästö

**) PM_{2,5}- ja PM₁₀-pitoisuudet ovat vuorokausikeskiarvoja kyseiseltä päivältä, tai useamman vuorokauden keskiarvo mittausjakson kestäessä kauemmin. Monitorina SHARP 5030.

***) 8.3. analysoitiin hiukkasnäyte, mutta pitoisuustietoa ei ole käytettävissä.



Kuva 3. PM_{10} -pitoisuudet (Osiris) Suurmetsäntiellä 14.3. - 8.6. ja näytteenottopäivät. Resuspensionäytteet on merkattu kuvaajaan katkoviivoin ja ilmanäytteet joko yhtenäisin pystyviivoin (näyte kerätty yhden vuorokauden ajalta) tai alueena (näyte kerätty useamman kuin yhden päivän aikana). $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (punainen viiva) on EU:n määräämä PM_{10} -vuorokausiraja-arvotaso, jonka ylittäminen sallitaan enintään 35 krt kalenterivuodessa.

HSY tallensi Suurmetsäntiellä ilmanlaatudataa REDUST-hanketta (REDUST LIFE09 ENV/FI/000579) varten ajanjaksolla 14.3. - 8.6.. Taulukossa 1 esitetyt $PM_{2.5}$ - ja PM_{10} -pitoisuudet ovat SHARP-laitteella mitattuja vuorokausikeskiarvoja. SHARP-monitorin näytteenottopiste sijaitsee samalla korkeudella ilmanäytteiden keruuta varten asennetun DustTrak-monitorin näytteenottopisteen kanssa. Renkaan takaa mitatuille näytteille on käytetty Nuuskijan DustTrakin keskimääräistä PM_{10} -päästöä näytteen keräämiseen käytetyltä ajalta. Nuuskijan PM_{10} -päästö kuvaa kadunpinnan pölyisyyden (resuspensio) tasoa kyseisenä ajankohtana.

Kuvaan 3 on merkittu Nasta-hankkeen aikana kerätyt ilma- ja resuspensionäytteet, ja katu ympäristön PM_{10} -pitoisuus (vuorokausikeskiarvo). Kuvaajassa käytetty PM_{10} -keskiarvo on tien etelä- ja pohjoispuolella sijainneiden Osiris-monitorien pitoisuuksien keskiarvo. Näin tuulensuunnan vaikutus mitattuun päästöön on pystytty minimoimaan ja pitoisuus kuvastaa hyvin koko katu ympäristön tilannetta.

Hiukkasten koostumusanalyysit ja lähdeosuuksien arviointi

Hiukkasten koostumuksen analyysimenetelmänä käytettiin yksittäishiikkasanalyysiä (kts. esim. Tervahattu ym. 2005, Kupiainen 2007). Menetelmässä kerätään tietoa yksittäisten hiukkasten ja hiukkasagglomeraattien koostumuksesta lähdearvioiden pohjaksi.

DustTrak-keräimen suodattimilta analysoitiin yksittäisten hiukkasten ja hiukkasagglomeraattien koostumusta elektronimikroskoopilla, johon oli liitetty alkuaineanalyysointilaitteisto (SEM/EDX, JEOL JSM5900LV, Oxford Instruments INCA - ZAF-4 korjaus). Alkuaineanalyysointilaitteen säteilyn tunkeutumissyvyys nyt tutkittuilla näytteillä on arvioitu olevan noin $1 \mu\text{m}$ (vaihtelee alkuaineittain), ja analysoidut hiukkaset ovat yleisesti ottaen tätä suurempia (Kupiainen, 2007). Näin ollen PM_{10} -hiukkasnäytteessä analyysitulokset edustavat lähinnä karkeiden hiukkasten koostumusta.

Näytteiden analysointi tapahtui automatisoidulla Feature Analysis -ohjelmalla. Jokaisesta näytteestä analysoitiin noin 1000 hiukkasta. Hiukkaset ryhmiteltiin koostumukseltaan homogeenisiin luokkiin klusterianalyysin avulla (hierarchical cluster analysis, etäisyysmittoina euklidiset neliöt, 40 hiukkasluokkaa) käyttäen R-ohjelmistoa. Klusterianalyysi pakotettiin tuottamaan 40 hiukkasluokkaa, mikä tarkoitti, että mukana oli koostumukseltaan päällekkäisiä luokkia. Nämä päällekkäiset luokat poistettiin lopullisia lähdeanalyysijä varten ja lopputuloksena oli 22 erillistä hiukkasluokkaa.

Suurmetsäntiellä vaikuttaneiden hiukkaslähteiden vaikutusosuuksia arvioitiin laskennallisesti reseptorimallinnuksen avulla, käyttäen hyväksi US EPA:n CMB8.2-ohjelmistoa (US EPA 2001). Menetelmässä lasketaan eri hiukkaslähteiden osuuksia DustTrakeilla kerätyissä hiukkasissa (reseptori). Laskennan lähtötiedoksi tarvitaan lähteiden hiukaskoostumukset (kts. Kupiainen ym. 2005, Tervahattu ym. 2005, Kupiainen 2007).

1.4. Tulokset ja niiden tulkinta

Päälystenäytteet ja hiekoitusoranäyte analysoitiin loppuvuodesta 2011, ennen talvikauden ja liukkaudentorjuntatoimenpiteiden aloitusta. Materiaalianalyysit osoittavat päälysteen kivilajin olevan koostumukseltaan erilaista verrattuna hiekoitusmateriaaliin (Taulukko 2.) Oleelliset erot näytteiden koostumuksissa havaittiin biotiitilla, sarvivälkkeellä, kalimaasälvällä ja kvartsilla. Plagioklaasin osuudet olivat lähes samat.

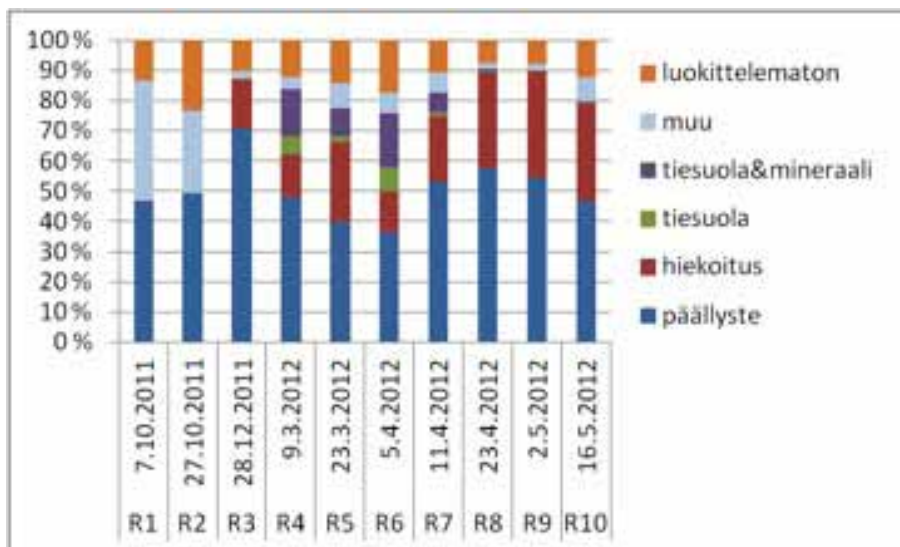
Tyypillisimpien mineraalien lisäksi Suurmetsäntiellä havaittuja hiukkasluokkia olivat natriumkloridi (NaCl), natriumkloridin ja mineraalihiukkasten sekatyypit sekä hiili-, rauta- ja kalsiumrikkaat hiukkaset. Kyseisiä hiukkasluokkia on havaittu aikaisemminkin vastaavalla menetelmällä analysoiduissa kaupunki-ilman hiukkasissa (esim. Kupiainen ym. 2010). Merkkialkuaineiden perusteella kahdessa hiukkasluokassa tulkittiin olleen päälysteen bitumin, fillerin ja/tai renkaan kumimateriaalin vaikutusta.

Lähdearvoissa resuspensio- ja ilmanäytteiden koostumusta mallinnettiin käyttäen selittävinä hiukkaslähteinä kuutta lähdeä. 1) Päälysteen ja 2) talvihiekoituksen läh-

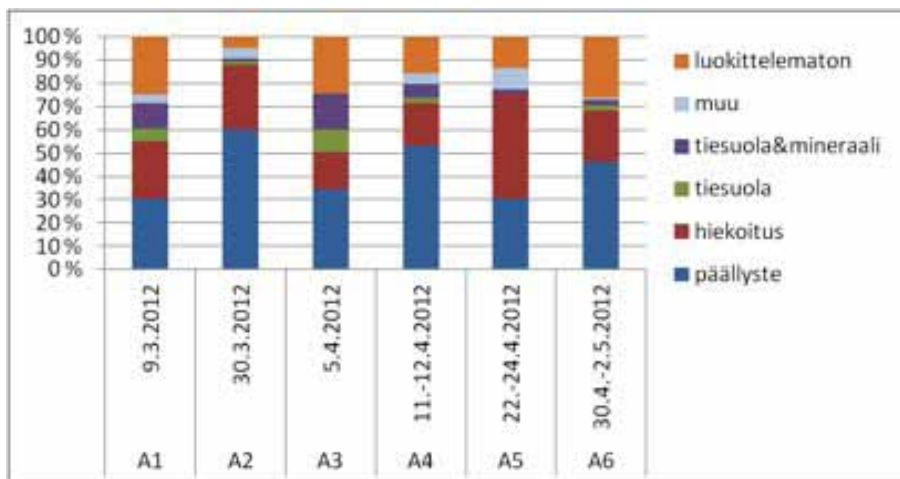
Taulukko 2. Päälysteen ja hiekoitusmateriaalin keskimääräiset mineraalikoostumukset päämineraaleille.

	Päälyste	Hiekoitus
Biotiitti	15%	36%
Kalimaasälpä	35%	10%
Kvartsi	28%	9%
Plagioklaasi	19%	23%
Sarvivälke	2%	22%

deprofiileina käytettiin päämineraalien jakaantumia. 3) Tiesuolauksen profiilina käytettiin pelkästään natriumkloridi-hiukkasista koostuvaa luokkaa. 4) Tiesuolauksen vaikutusta näkyy lisäksi natriumkloridin ja mineraalihiukkasten sekatyypissä. Kyseisten hiukkasten mineralogian ei pystytty selkeästi määrittämään natriumin vaikutuksen takia, mutta niitä ei kuitenkaan hallittu käsitellä puhtaasti tiesuolana juuri kiviaineksen vaikutuksen takia. Näin ollen niitä käsiteltiin omana luok-



Kuva 4. Resuspensio-näytteiden arvioidut lähdeosuudet mineraalikoostumuksen perusteella.



Kuva 5. Ilmanäytteiden arvioidut lähdeosuudet mineraalikoostumuksen perusteella.

kanaan, joka siis sijoittuu mineraalipölylähteiden ja tiesuolan välimaastoon. Lisäksi merkkiaineiden perusteella nimetyt kaksi sekaluokkaa (lähdeprofiilit 5 ja 6) käsiteltiin omina lähteinään, joista muodostettiin tulosten esitystä varten luokka "muu". Kuvissa 4 ja 5 on esitetty reseptorimallinnuksen avulla laskettuja eri katupölylähteiden osuuksia Suurmetsäntiellä kerätyissä näytteissä. **Luokittelemattomassa ryhmässä** on se osuus hiukkasissa, jota ei laskennallisesti pystytty selittämään malliin sisällytetyillä päälähteillä. Se kuvastaa esimerkiksi pakokaasun ja muiden lähteiden osuutta hiukkasissa. Näytteet R1 - R10 (Kuva 4) ovat renkaan takaa kerättyjä resuspensionäytteitä ja A1 - A6 ilmanäytteitä (Kuva 5).

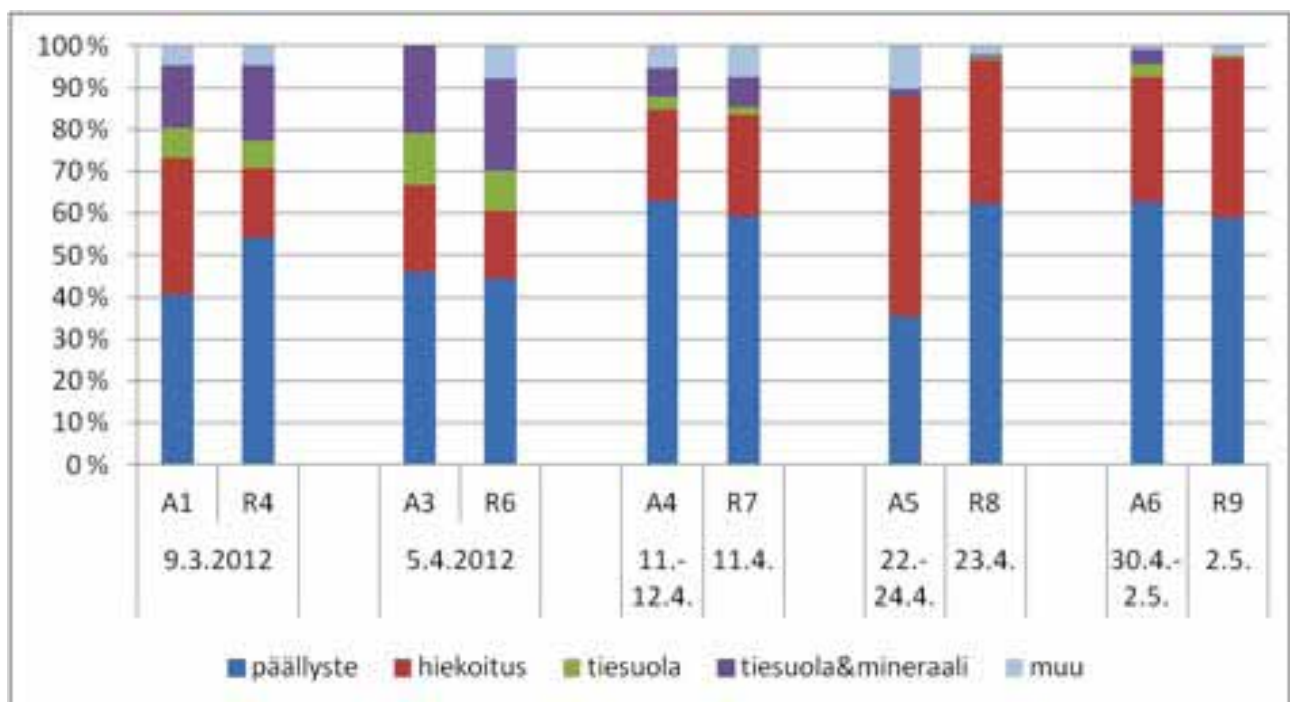
Toimenpidekirjausten mukaan **talvihiekoitusta** on käytetty Suurmetsäntiellä joulukuun alusta helmikuun loppuun. Sepeliä on levitetty yhteensä 14 kertaa ja suolahiekkaa yhteensä 26 kertaa. Lähdearvioiden perusteella talvihiekoituksella on ollut merkittävä vaikutus sekä resuspensioettä ilmanäytteissä joulukuun lopulta ja loppukevääseen saakka. Resuspensionäytteissä talvihiekoituksen osuus on vaihdellut joulu-toukokuussa 14 ja 35 prosentin välillä ja ilmanäytteissä 16 ja 45 prosentin välillä. Keskimääräiset osuudet koko kevätkaudelle olivat 26 prosenttia ilmanäytteiden ja 25 prosenttia resuspensionäytteiden hiukkasista.

Toimenpidekirjausten perusteella tiesuolaa levitettiin Suurmetsäntiellä marraskuun ja maaliskuun välillä yhteensä 12 kertaa. Suolahiekkaa levitettiin tammi-helmikuussa yhteensä 26 kertaa. **Tiesuolan** vaikutus lähdeosuuksiin näkyy maaliskuun ja huhtikuun näytteissä. Puhtaita suolahiekkasia on havaittu resuspensionäytteissä 2-8 prosenttia ja ilmanäytteissä 2-9 prosenttia riippu-

en päivästä. Keskimääräinen osuus kevätkauden kaikissa ilmanäytteissä oli 4 prosenttia ja resuspensionäytteissä 3 prosenttia. **Suola-mineraali** lähteen hiukkasia havaittiin jonkin verran enemmän kuin suolahiekkasia ja näytekohtaisten osuuksien vaihteluväli oli suurempi, osuus vaihteli 1-18 prosentin välillä riippuen päivästä ja niitä on havaittu maalishuhtikuun ohella myös toukokuussa. Keskimääräiset kevätkauden osuudet suola-mineraali hiukkasille olivat 6 prosenttia ilmanäytteissä ja 5 prosenttia resuspensionäytteissä.

Merkittävin yksittäinen lähde Suurmetsäntien hiukkasissa on ollut **päälystyperäinen pöly**. Sen osuus on vaihdellut ilmanäytteissä 30 ja 60 prosentin välillä ja resuspensionäytteissä 36 ja 71 prosentin välillä. Kevätkaudella päälystyperäisen katupölyn keskimääräiset osuudet olivat ilmanäytteissä 43 prosenttia ja resuspensionäytteissä 48 prosenttia. Pääasiallinen lähde päälystyperäiselle pölylle on katupäälysteen kuluma. Nastarengaskaudella erityisesti nastarenkaiden aiheuttama päälysteen kiviaineksen kuluma lisää katupölyn määrää katu ympäristöissä.

Osa päälystyperäisestä pölystä on aiheutunut hiekoitusmateriaalin kuluttaessa päälysteen kiviaineista hiekoitusoran ja muun irtoaineksen ollessa renkaiden alla (hiekkapaperi-ilmiö). Hiekkapaperi-ilmiön vaikutusta on vaikea määrällisesti arvioida katuolosuhteissa. Koerataolosuhteissa Kupiaisen (2007) raportoitujen tulosten perusteella hiekkapaperi-ilmiö vastasi 300 g/m² hiekoitusmäärällä keskimäärin 20 prosenttia päälysteen ja hiekoituksen kiviaineksista syntyneestä pölystä. Suurmetsäntiellä hiekoitusmäärä on ollut yleisesti ottaen kolmanneksen tai alle koeradon vastaavasta, minkä perusteella voidaan olettaa hiekkapaperi-ilmiön vaikutuksen Suurmetsäntiel-



Kuva 6. Ilmanäytteistä (A1-A6) ja resuspensionäytteistä (R4-R9) saatujen lähdeosuuksien vertailua.

lä olleen korkeintaan joitakin prosentteja analysoitujen näytteiden hiukkasista. Suurmetsäntien olosuhteissa hiekoitusmateriaali on ollut sekä raekooltaan että laadultaan erilaista kuin koeradnan testiasetelmissa ja koeradnan testiasetelma yleisesti ottaen eroaa selvästi katuolosuhteista. Hiekkapaperi-ilmiön tutkimuksia katuolosuhteissa tulee tulevaisuudessa jatkaa, jotta sen merkittävyyttä voitaisiin paremmin arvioida.

Lokakuun näytteissä päälystyperäisten hiukkasten laskettiin selittävän 46-49 prosenttia hiukkasista. Nastatonkin rengas hioo ja kiillottaa päälysteen kiviainesta, jolloin syntyy päälystyperäisiä hiukkasia. Lokakuussa talvihiekoitusta tai suolausta ei ollut vielä käytetty ja nastarengasosuus oli hyvin alhainen ja näin ollen katupölyn määrä katu ympäristössä on ollut merkittävästi alhaisempi verrattuna kevätkauteen.

Lähde **muu** koostuu kahdesta hiukkasluokasta, joiden koostumuksessa on alkuaineita kuten rikki, sinkki, kromi ja kupari, mitkä voivat viitata bitumin, renkaan kumin, jarrupölyn tai päälysteen fillerin vaikutukseen, ja joita on vaikea erottaa toisistaan. Koostumus voi viitata myös muihin lähteisiin kuten lentotuhkaan tai kaukokulkeutuneisiin hiukkasiin. Lähteen osuudet ovat vaihdelleet kevätkaudella sekä ilma- että resuspensionäytteissä 1 ja 9 prosentin välillä, mutta lokakuussa kerätyissä resuspensionäytteissä sen osuus oli 40 prosenttia (7.10.2011) ja 27 prosenttia (27.10.2011). Lokakuun korkeita muun lähteen osuuksia selittää se, ettei talvihiekoitusta tai suolausta ollut vielä käytetty ja nastarengasosuuksien laskennan perusteella lokakuussa nastarenkaita ei ole ollut vielä käytössä tai käyttöaste on kuun lopussa ollut korkeintaan 10 prosenttia tai alle. Katupölyn määrä katu ympäristössä lokakuussa on ollut alhainen verrattuna kevätkauteen. Lokakuun näytteiden voi katsoa edustavan kesäkauden pölyn koostumusta, missä voi olettaa olevan jarruista, renkaan kulumisesta ja muista lähteistä syntyviä hiukkasia suhteellisesti enemmän kuin kevätkaudella.

Määrällistä epävarmuusarviota lähdeosuuksille ei tämän työn puitteissa ole tehty. Aikaisempien tutkimuksien perusteella voi arvioida vastaavatyypisissä lähdeosuusarvioissa epävarmuuksien olevan noin 10 prosenttia (Kupiainen 2007). Kuvaan 6 on koottu ilma- ja resuspensionäytteiden lähdeosuudet suurin piirtein samoilta päiviltä kerätyistä näytteistä, mikä kertoo suuntaa-antavasti tulosten toistettavuudesta, sillä resuspensiohiukkasten koostumusten tulisi teoriassa selittää ilmanlaatonäytteiden koostumusta mikäli näytteet on kerätty vastaavina ajankohtina. Kuvan 6 vertailusta on poistettu "Luokittelematon" lähde, sillä siinä voi olettaa olevan myös esimerkiksi pakokaasuhiukkasten vaikutusta, jota ei resuspensiohiukkasissa ole. Ilma- ja resuspensionäytteissä havaitut lähdeosuudet ovat olleet vastaavina ajankohtina pääsääntöisesti samankaltaisia, kun oletetaan analyysiepävarmuudeksi noin 10 prosenttia (Kuva 6).

1.5. Johtopäätökset - osa I

Analyysien perusteella päälystyperäinen pöly näyttäisi olevan suhteellisesti merkittävin katupölylähde Suurmetsäntiellä kevätkaudella 2012. Sen osuus tutkituista näytteistä vaihteli noin 30 ja 70 prosentin välillä. Kevätkauden keskimääräinen lähdeosuus ilmanäytteissä oli 43 prosenttia ja resuspensionäytteissä 48 prosenttia (Taulukko 3). Myös hiekoitusperäisellä pölyllä oli merkittävä osuus sekä resuspensio- että ilmanäytteissä. Kevätkaudella talvihiekoituksen osuus näytteissä vaihteli 15 ja 45 prosentin välillä, ollen keskimäärin ilmanäytteissä 26 prosenttia ja resuspensionäytteissä 25 prosenttia.

Taulukko 3. Keskimääräiset lähdeosuudet ja niiden keskihajonnat Suurmetsäntiellä kerätyissä ilma- ja resuspensionäytteissä maaliskuu-toukokuussa 2012.

	Ilmanäytteet	Resuspensionäytteet
Päälyste	43 % ±13	48 % ±8
Hiekoitus	26 % ±10	25 % ±9
Tiesuola	4 % ±3	3 % ±3
Tiesuola&mineraali	6 % ±6	7 % ±7
Muu	4 % ±3	5 % ±3
Luokittelematon	18 % ±8	12 % ±4

Tulokset tukevat teoriaa, jonka mukaan talven aikana muodostuva pöly varastoituu katu ympäristöön ja pääsee ilmaan vasta keväällä huhti-toukokuussa peitteettömiltä ja kuivilta katupinnoilta. Tätä demonstroi havainto, jonka mukaan talvihiekoituksen ja tiesuolan vaikutus päästössä ja ilmanlaadussa näkyy vielä pitkään sen jälkeen kun liukkaudentorjuntatoimenpiteitä ei enää ole tehty. Päälysteen ja talvihiekoituksen lähdeosuuksien osalta talvikaudelta 2011/2012 Suurmetsäntieltä saadut tulokset ovat samankaltaisia kuin aikaisemmissakin 2000-luvun alussa Suomessa tehdyissä tutkimuksissa. Hangossa tehdyssä tutkimuksessa talvihiekoituksen ilmanlaatuvaikutukseksi PM₁₀-pölyssä arvioitiin keskimäärin noin 10 prosenttia ja Helsingin keskustassa tehdyssä tutkimuksessa noin puolet. Tiesuolan vaikutus pölyn koostumukseen oli havaittavissa erityisesti maaliskuu- ja huhtikuun näytteissä, jolloin suolauskertojakin on ollut useita.

Eri lähteiden suhteelliset osuudet katu ympäristössä vaihtelevat riippuen vaikuttavista lähteistä jo talvi- ja kevätkauden aikana ja selittävät eroja myös vuosien välillä. Talven ja kevään sääolosuhteet vaikuttavat kadun pinnan olosuhteisiin kuten lumi- ja jääpeitteisyyteen sekä kosteuteen, jotka sitovat pölyä. Sateiset ja kosteat kevät helpottavat katupölyongelmaa merkittävästi, koska silloin lumen ja jään sulaessa vapautuva pöly ei pääse ilmaan kosteuden sitoessa sen kadun pintaan. Vasta kuivilta katupinnoilta pöly voi päästä ilmaan.

Vuosien välinen vaihtelu talvikauden sääolosuhteissa vaikuttaa liukkaudentorjunnan tarpeeseen ja menetelmiin, kuten siihen, käytetäänkö liukkaudentorjunnassa

hiekoitusta vai suolausta. Viimeisen viiden vuoden ajalle ajoittuu talvia, jolloin hiekoitustarve on ollut vähäinen ja esimerkiksi Helsingin keskustan pääkaduilla sitä ei ole käytetty lainkaan. Toisaalta viimeisen viiden vuoden ajaksolle ajoittuu myös talvia, kuten tutkimuksen kohteena ollut 2011/2012 talvikausi, jolloin olosuhteet ovat vaatineet paljon talvihiekoitusta. Hiekoituksen vaikutus näkyy selvästi myös katu ympäristön katupölyssä niinä talvina, jolloin hiekoitusta käytetään paljon.

Yleisesti on ollut vallalla käsitys, jonka mukaan talvihiekoitus olisi katupölyn päälähde. 2000-luvulla tehtyjen tutkimusten ja nyt saatujen tulosten perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että talvihiekoitus ei ole tutkituissa kohteissa ollut päälähde sellaisinaanakaan talvina jolloin hiekoitustarve on ollut suuri. Helsingissä tähän on voinut vaikuttaa talvihiekoituksen pölyvaikutuksen vähentämiseen tähänneet toimenpiteet, joissa on pyritty lisäämään korvaavien liukkaudentorjunta-aineiden, kuten tiesuolan käyttöä sekä kohdistamaan hiekoitus ongelmallisille katuosuuksille kuten mäkiin, risteysalueille ja bussipysäkeille. Lisäksi Helsingissä käytetään pesuseulottua sepeliä, josta pölyävä hienoaines on pyritty poistamaan.

OSA II. Nasta ja kitkarenkaiden vertailumittaukset Viikintiellä

Raportin toinen osa esittelee tutkimuskokonaisuuden toisen tavoitteen mukaisten tutkimusten toteutusta, tulokset ja johtopäätökset. Tutkimuksen toisen osan tavoitteena oli selvittää PM_{10} -katupölyn muodostumista ja päästöjä nastallisilla ja nastattomilla talvirenkailla kaupunkinopeuksilla ja eri resuspensiotasoilla. Mittauksissa selvitetiin lisäksi renkaiden kulumisen ja nastojen lukumäärän vähentämisen vaikutuksia pölyn muodostumiseen ja päästöihin. Renkaan aiheuttama pölypäästö koostuu kahdesta komponentista: (1) suorasta kulumatuotteiden päästöstä ilmaan sekä (2) kadun pinnalla olevan pölyn päästöstä ilmaan renkaan ja tien kontaktissa tapahtuvien aerodynaamisten prosessien seurauksena (resuspensio).

Aikaisempi tutkimus on osoittanut, että nastoitettujen talvirenkaiden nastat kuluttavat päällystettä ja samalla lisäävät myös PM_{10} -katupölyn muodostumista verrattuna nastattomiin renkaisiin (Kupiainen 2007, Gustafsson ym. 2009, Kupiainen & Pirjola 2011). Nastattomilla talvirenkailla (esim. kitkarenkaat) pölyä muodostuu merkittävästi vähemmän kuin nastarenkaalla. Sekä nastattomat että nastalliset talvirenkaat aiheuttavat resuspensiopäästöjä silloin, kun pölyä on kadun pinnalla. Voidaankin sanoa, että kitkarenkaan päästösignaali koostuu lähinnä resuspensiosta, kun taas nastarenkaan päästö koostuu sekä päällysteen kulumatuotteista että resuspensiosta.

Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että resuspensiopäästöjä havaitaan katuolosuhteissa läpi vuoden, ainoastaan laboratorio-olosuhteissa voidaan resuspensioon vaikutus poistaa (Gustafsson ym. 2009). Suomen katuolosuhteissa resuspensiopäästön kuukausivaihtelu on voimakasta, ja on suurimmillaan kuivilla kadun pinnoilla maaliskuuhuhtikuun vaihteessa, kun lumi ja jää ovat sulaneet katu ympäristöstä (Kupiainen ym. 2009). Huhtikuun aikana resuspensiopäästö laskee voimakkaasti ja toukokuun puolella välissä päästötilanne saavuttaa kesäisen puhtaan tilanteen. Kesäisellä resuspensiotasolla nastarenkaan suorat kulumapäästöt ovat selvästi havaittavissa. Kadun pinnan resuspensiotaso vaikuttaa merkittävästi sekä nastoitettujen että nastattomien talvirenkaiden pölypäästöön ja niiden suhteellisiin eroihin (Kupiainen & Pirjola 2011).

2.1 Tutkimuskohde

NASTA-tutkimusprojektiin liittyvät rengastestit tehtiin Viikintiellä Itä-Helsingissä. Viikintie valittiin soveltuvaksi kohteeksi aikaisemmin tehtyjen vastaavanlaisten rengastestien perusteella. Viikintien päällystetyyppi on AB22 ja nastarengaskestävyysluokitus AN10. Nopeusrajoitus testipätkällä on 60 km/h. Testeissä ajonopeudet olivat 30,

40 ja 50 km/h. Mittaukset tehtiin kuivalta kadun pinnalta, sillä kosteus sitoo pölyä.

Viikintien mittauksissa käytettyä katuosuutta reunustavat etelän puolella kevyen liikenteen väylä ja länsipäässä muutama rakennus. Suurimmaksi osaksi tietä reunustaa eteläpuolella kuitenkin tiheydeltään vaihteleva puusto/pensaisto. Tien pohjoispuoli on suurimmaksi osaksi laajaa peltoaluetta. Tien reunoissa ja kaistojen välissä on paikka paikoin kanttikiveys (kevyen liikenteen ylityspaikat ja länsipään risteysalueet) mutta suurimmaksi osaksi kanttikiveykset puuttuvat. Päästösignaali mitataan heti renkaan takaa, joten katu ympäristön ominaisuudet eivät vaikuta mittauksiin merkittävästi. Aikaisemmissa mittauksissa kesäaikaisen resuspension taso on havaittu suhteellisen alhaiseksi, minkä vuoksi kohteen katsottiin soveltuvan talvirenkaiden mittaukseen. Alhaisella resuspensiotasolla esimerkiksi nastojen aiheuttama päällysteen suorasta kulumasta aiheutuva pölypäästö on havaittavissa, mikä osaltaan oli tämän tutkimusosion tavoitteena.

2.2 Menetelmät

Nastarengastestit tehtiin Opel Vectra henkilöautolla, johon on asennettu yhdysvaltalaiseen TRAKER-mittausmenetelmään perustuva katupölynmittausjärjestelmä (Etyemetzian ym. 2003). Vasemman eturenkaan takaa nouseva ilmavirtaus imetään suulakkeen kautta mittausputkistoon, ja PM_{10} -pitoisuus mitataan mittausputkiston päähän liitetyllä DustTrak-mittalaitteella. Auton katolla on puhallin, joka synnyttää virtauksen putkistoon. Ilmavirran tulee olla laminaarinen ja näytteenoton kohdalla isokineettinen, jolloin minimoidaan hiukkasten häviöt putkistossa ja varmistetaan näytteen laatu. Mittausajoneuvon ympäristön taustailman PM_{10} -pitoisuus mitataan auton etupuskurin alapuolelta toisella DustTrak-mittalaitteella. Mittausdata tallennetaan mittalaitteiden omiin muisteihin ja siirretään mittausajon päätteeksi autoon sijoitetulle kannettavalle tietokoneelle. Tietokoneeseen on yhdistetty myös GPS-paikannin. Vectraan rakennetun mittauslaitteiston etuja ovat helppo ja nopea mittalaitteiden asennus ja purku sekä vertailtavuus henkilöauton renkaiden synnyttämän päästön kanssa.

Aineiston käsittely

Ajon aikana mitattu päästösignaali on renkaan takaa mitatun pitoisuuden ja taustapitoisuuden erotus. Päästösignaali yhdistetään GPS-tietoon. GPS-tiedon perusteella saadaan paikan lisäksi rekisteröityä mittausten aikainen ajonopeus. Analyysivaiheessa mittausaineisto rajattiin

niin, että ainoastaan mittauspisteet, joissa nopeus pysyi ± 3 km/h sisällä tavoitenopeudesta ja kiihtyvyys/hidas-
tuvuus välillä $-0.7 - 0.7$ m/s² (vrt. TRAKER), otettiin huo-
mioon. Mittausarvot, joihin mahdollisesti ovat vaikutta-
neet häiritsevät ulkoiset tekijät (esimerkiksi muu liikenne,
raskaat dieselajoneuvot) rajattiin ulos aineistosta ajon ai-
kana pidetyn lokikirjan perusteella.

Renkaiden välinen vertailu - referenssikorjaus

Hiukkaspäästöön vaikuttavat erilaiset tekijät, kuten tien
pinnan kosteus ja pinnalle kulkeutunut resuspendoituva
aines. Muutoksia mittausoloissa monitoroidaan mittaa-
malla nk. referenssirenkään päästöt vähintään kaksi ker-
taa mittausten aikana, yleensä ensimmäisenä ja viimeise-
nä. Referenssirenkään päästössä tapahtuneet muutokset
osoittavat mahdolliset muutokset mittausolosuhteissa
päivän aikana. Referenssirenkään pitoisuuden muutoksen
avulla lasketaan kaikille renkailla uusi, todellinen vertai-
lutaso. Testattavien renkaiden mittaustulokset suhteute-
taan referenssirenkäällä mitattuihin tuloksiin (referenssi-
korjaus). Referenssirenkään käyttö mahdollistaa myös eri
mittauspäivien aineistojen vertailun toisiinsa, joskin re-
suspension tason vaihtelut eivät heijastu täysin referens-
sikorjattuihin tuloksiin.

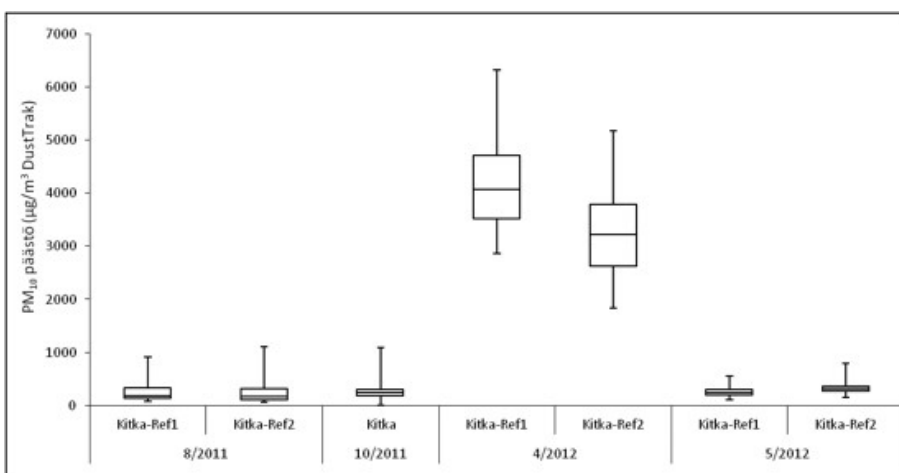
2.3 Testattavat renkaat ja testiajankohdat

Rengastesteissä suoritettiin NASTA-hankesuunnitelman
mukaiset vertailut kolmena eri ajankohtana (17.8.2011,
12.4.2012, 15.5.2012) seuraavilla renkailla (rengasdimen-
sio kaikilla testirenkailla 205/55 R16):

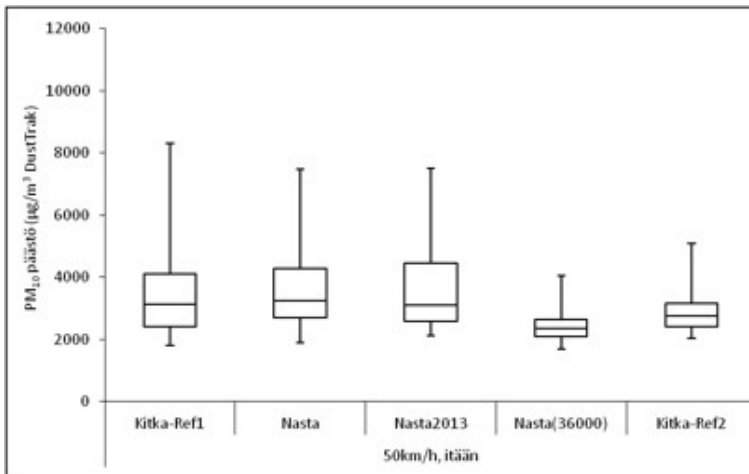
1. Kitka: Uusi Nokian renkaat HKPL-R. Kulutus pintaa
noin 10 mm. Uusi = sisäänajettu n. 200 km.
2. Nasta: Uusi Nokian renkaat HKPL-7. Kulutus pintaa
noin 10 mm. Nastojen määrä 128 kpl, uudessa
renkaassa nastaylitys vaihtelee välillä 0,9-1,2
mm. Uusi = sisäänajettu n. 200 km.
3. Nasta2013: Uusi Nokian renkaat HKPL-7.
Kulutus pintaa noin 10 mm. Nastojen määrä 90
kpl, uudessa renkaassa nastaylitys vaihtelee
välillä 0,9-1,2 mm. Uusi = sisäänajettu n. 200 km.
4. Nasta (36000): Nokian renkaat HKPL-7. Ajettu
36198 km talvikaudella 2010-2011 oikeana
takarenkaana Mercedes Benz C-mallissa (taksi/
Helsinki). Renkaan kulutus pintaa jäljellä noin 6-7
mm. Nastaylitys keskimäärin 0,5 mm.
5. Kesärenngas (vain 17.8.2011). Bridgestone Turanza.
Kulunut, ajettu arviolta 15-20 000 km, dimensio
225/50 R17.

Renkaan ikääntymisen vaikutusta pölypäästöön on haas-
tavaa selvittää. Tämän tietämyksen lisäämiseksi tutkimus-
suunnitelmaan lisättiin mittauskampanja (14.10.2011), jos-
sa oli mukana useampia eri tavoin ikääntyneitä renkaita.

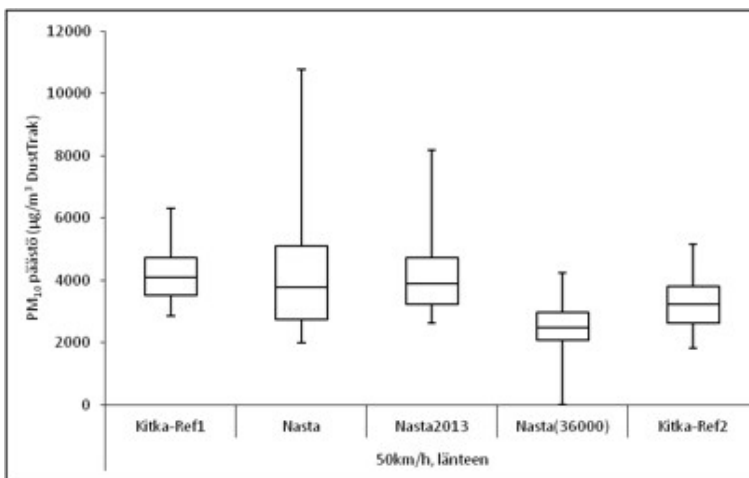
6. Nasta - nastat poistettu: Uusi Nokian renkaat
HKPL-7, josta nastat poistettu. Kulutus pintaa
noin 10 mm. Uusi = sisäänajettu n. 200 km.
7. Nasta (19500, 6 mm). Ajettu 19500 km
vasempana takarenkaana Helsingin taksissa
kevättalvella 2011 (helmi - toukokuu).
Kulutus pintaa jäljellä 6 mm.
8. Nasta (19500, 4 mm). Ajettu 19500 km
vasempana eturenkaana Helsingin taksissa
kevättalvella 2011 (helmi - toukokuu) (sama
ajoneuvo kuin kohdassa 7). Kulutus pintaa jäljellä
4 mm.



Kuva 7. Referenssirenkään toimineen kitkarenkaan päästöt vuosina 2011 ja 2012 tehdyissä
mittauksissa. (Viikintie länteen 50 km/h). Keskiviiva on mediaani (suuruusjärjestykseen
asetettujen mittausarvojen keskimääräinen arvo), laatikon ylä- ja alareuna kuvastavat aineiston
jakaantumista ylä- ja alakvartaaleihin, eli laatikon sisällä on puolet mittausaineistosta.
Janojen sisällä on 96 prosenttia mittausaineistosta. Mittausaineisto koostuu yksittäisistä
mittausarvoista, joita kerättiin sekunnin väliajoin. Yhteensä mittausarvoja oli noin 200 - 600
riippuen rengas-nopeus kombinaatiosta.



Kuva 8. Renkaiden välinen vertailu 12.4.2012 korkealla tienpinnan pölytasolla, yläkuvaajassa itään päin, alakuvaajassa länteen päin menevällä kaistalla. Keskiarvo on mediaani, laatikon ylä- ja alareuna kuvastavat aineiston jakaantumista ylä- ja alakvartaaleihin, eli laatikon sisällä on puolet mittausaineistosta. Janojen sisällä on 96 prosenttia mittausaineistosta. Mittausaineisto koostuu yksittäisistä mittausarvoista, joita kerättiin sekunnin väliajoin. Yhteensä mittausarvoja oli noin 200 - 600 riippuen rengas-nopeus kombinaatiosta.



9. Kitka: Uusi Nokian renkaat HKPL-R. "Runflat"-rengas, vahvempi runko kuin standardi renkaassa. Kulutus pintaa noin 10 mm. Uusi = sisäänajettu n. 200 km.
10. Kitka (6 mm). Nokian renkaat HKPL-R. "Runflat"-rengas, vahvempi runko kuin standardi renkaassa. Ajettu BMW-henkilöauton (yksityishenkilön ajossa) takarenkaana talvella 2009-2010. Kulutus pintaa jäljellä 6 mm.

Renkaan ikääntymisen vaikutuksen tutkiminen on haastavaa, sillä renkaat kulumat aina eri tavalla. Jo yksittäisen ajoneuvon eri renkaat kulumat eri tavoin, vaikka kilometrimäärä olisikin sama. Kulumiseen vaikuttavat muun muassa ajoneuvon painon jakautuminen, ja se, onko kyseessä vetävä pyörä vai vapaasti rullaava. Vetävät pyörät kulumat aina enemmän. Lisäksi kulumiseen vaikuttavat alusta, jolla ajetaan, talviolosuhteet, kuten lumisuus sekä kuljettajan ajokäyttäytyminen. Tässä tutkimuksessa on näiltä osin pystytty käsittelemään vain hyvin rajattua joukkoa eri kulumatyyppisiä. Kuluneiden renkaiden tutkimuksia ja päästövaikutuksia tulisikin jatkaa ymmärryksen lisäämiseksi.

2.4 Tulokset ja niiden tulkinta

Renkaan päästö koostuu renkaan suoraan muodostamasta ja ilmaan päästämästä pölystä sekä aikaisemmin kadunpinnalle kertyneestä pölystä, jonka rengas nostaa ilmaan (resuspensio). Aikaisempi tutkimus on osoittanut, että nastoitettujen talvirenkaiden nastat kuluttavat päällystettä ja samalla lisäävät myös PM_{10} -katupölyn muodostumista verrattuna nastattomiin renkaisiin (Kupiainen 2007, Gustafsson ym. 2009, Kupiainen & Pirjola 2011). Nastattomilla talvirenkailla pölyä muodostuu merkittävästi vähemmän kuin nastarenkaalla.

Sekä nastattomat että nastalliset talvirenkaat päästävät pölyä tehokkaasti ilmaan silloin, kun sitä on tien pinnalla ja olosuhteet ovat kuivat. Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että resuspensio-päästöjä havaitaan katuolosuhteissa käytännössä läpi vuoden, mutta kuukausivaihtelu on voimakasta (Kupiainen ym. 2009). Kitkarenkaan päästö koostuu lähinnä resuspensioista, kun taas nastarenkaan päästö koostuu sekä päällysteen kulumatuotteista että resuspensioista.

Kadun pinnan resuspensiotaso siis vaikuttaa merkittävästi sekä nastoitettujen että nastattomien talvirenkaiden pölypäästöön ja niiden suhteellisiin eroihin (Kupiainen

& Pirjola, 2011). Tässä tutkimuksessa tehdyt mittaukset ajoitettiin resuspensiotason kuukausivaihteluiden mukaan alkukeväälle sekä kesäkaudelle toukokuun puolenvälin ja lokakuun puolenvälin väliselle ajalle. Huhtikuun alkupuolella katupölyn määrä Suomen kaupunkien katu-ympäristöissä on korkeimmillaan (Kupiainen ym. 2009) ja mittausten tavoitteena oli demonstroida korkean resuspensiotason vaikutusta renkaiden päästöihin. Touko-, elo- ja lokakuun mittausten tavoitteena oli demonstroida katuolosuhteissa havaittavan mahdollisimman alhaisen resuspensiotason vaikutusta päästöihin.

Kuvassa 7 on esitetty kitkarenkaan päästöt eri mittauspäivinä. Huhtikuussa tehdyissä mittauksissa kadunpinta oli odotetusti pölyisempi kuin myöhemmin keväällä, kesällä ja syksyllä tehdyissä mittauksissa. Huhtikuun alkupuolella kitkarenkaalla mitatut päästötasot olivat 15 - 20-kertaisia verrattuna touko-, elo- ja lokakuussa mitattuihin päästöihin.

Renkaiden päästöt korkealla resuspensiotasolla

Alkukevään korkeilla resuspensio- ja päästötasoilla renkaiden välillä ei havaittu merkittäviä systemaattisia eroja (Kuva 8). Nastarenkailla havaitut päästöt olivat samalla tasolla kitkarenkaiden päästöjen kanssa. Alkukevään olosuhteissa pölyn resuspensiotaso on niin korkea, että renkaiden väliset erot pölyn muodostumisessa häviävät. Mahdolliset renkaiden välillä havaittavat erot johtuvat pääasiassa resuspensio- ja päästöjen eroista, mitkä liittyvät rengas-tie kontaktin aerodynaamisiin prosesseihin. Tämä havaittiin jo aikaisemmassa VIEME-tutkimuksessa (Tervahattu toim., 2008), jossa hyvin korkeilla resuspensiotasoilla kitkarenkaan päästö oli jopa suurempi kuin nastarenkaan, viitaten siihen, että renkaan pintakuviointi ja -materiaali vaikuttavat resuspensio- ja päästöön. VIEME-tutkimuksen maksimiresuspensiotasot olivat kuitenkin huomattavasti korkeampia kuin nyt mitatut.

Yleisesti ottaen VIEME:ssä ja tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa renkaan aiheuttaman resuspensio- ja päästöjen riippuvan todennäköisesti renkaan pintakuviointista ja -materiaaleista tai niissä tapahtuvissa muutoksissa, mutta lisätutkimusta tarvitaan vaikuttavien tekijöiden yksilöimiseksi ja määrällistämiseksi. Tässä tutkimuksessa alhaisin mediaanipäästö taso havaittiin kuluneella nastarenkaalla, jonka pintakuviointi oli kulunut noin 2 mm ja nastaulkonema noin 0,5 mm (Kuva 8). Muiden renkaiden mediaanipäästöt olivat käytännössä samalla tasolla keskenään. Yleisesti ottaen mittausaineiston hajonta oli kaikilla renkailla suuri.

Renkaiden päästöt alhaisella resuspensiotasolla

Yksityiskohtaisempaa vertailua mittarenkaiden välillä tehtiin alhaisella kadun pinnan pölytasolla tehdyistä mittaustuloksista. Näissä olosuhteissa renkaan resuspensio- ja päästö on alhaisempi ja varsinaiset pölynmuodostumis-

prosessit mm. nastojen vaikutuksesta ovat selvemmin havaittavissa.

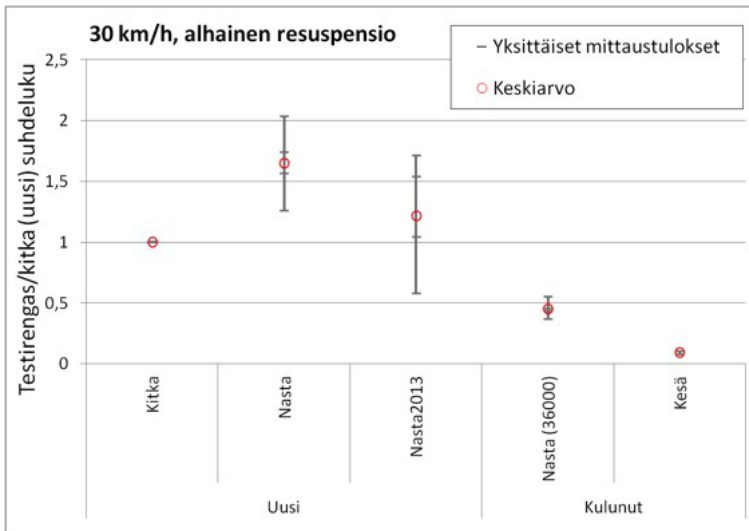
Ajonopeuden nostaminen kasvatti päästötasoa kaikilla renkailla. Suhteutettuna 30 km/h ajonopeuteen 40 km/h ajonopeudella talvirenkaiden päästö taso oli 1,4 - 1,7-kertainen ja 50 km/h ajonopeudella 2,5-2,6-kertainen. Vastaavia tuloksia nopeuden ja päästön yhteydestä on saatu aikaisemmissa tutkimuksissa (Kupiainen & Pirjola 2011). Päästöjen kasvu on seurausta todennäköisesti sekä kulu- ma- että resuspensio- ja päästöjen kasvusta.

Kuvissa 9-11 on esitetty yksittäiset mittaustulokset suhteessa uuden kitkarenkaan päästöön eri ajonopeuksilla. Yksittäisten mittaustulosten perusteella on laskettu lisäksi ajonopeuskohtainen keskimääräinen päästö taso vastaavasti suhteessa kitkarenkaan päästöön.

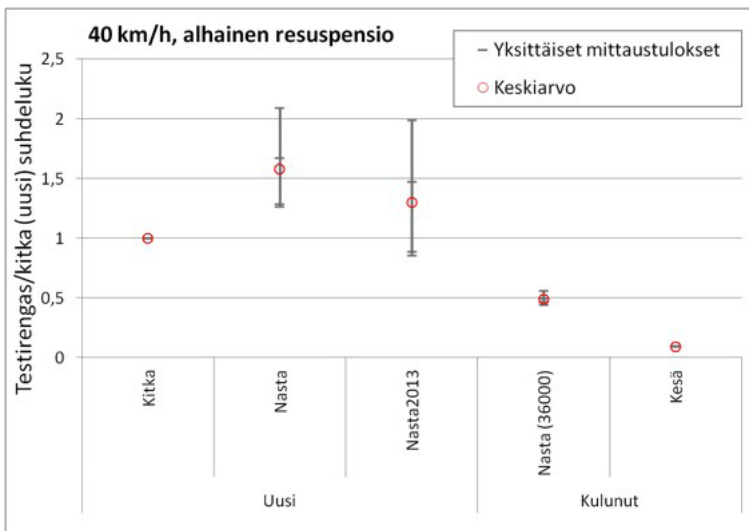
Korkeimmat keskimääräiset päästöt mitattiin vuoden 2011 mallin nastarenkaalla (Nasta) ja alhaisimmat kuluneella kesärenkaalla (Kesä). Uusilla juuri sisäänajetuilla renkailla PM₁₀-pölypäästöt olivat yleisesti ottaen nastarenkailla (sekä 2011 että 2013 malli, kuvissa vastaavasti Nasta ja Nasta2013) korkeampia kuin nastattomilla renkailla. Vuoden 2011 nastarenkaan (Nasta) päästö taso oli noin 1,6-1,7-kertainen verrattuna kitkarenkaaseen (Kitka) ja vuoden 2013 vaatimukset täyttävällä nastallisella talvirenkaalla (Nasta2013) ero on ollut noin 1,2-1,3-kertainen.

Mittaustulokset viittaavat siihen, että resuspensio- ja päästö on selittänyt merkittävän osan renkaiden päästöistä Viikintiellä vielä kesäaikaanakin. 50 km/h ajonopeudella mitattiin 2011 mallin nastarengas sekä nastallisena (Nasta), että ilman nastoja (Nasta - nastat poistettu) ja tulokset osoittavat nastallisen renkaan päästöstä noin 60 prosenttia koostuvan resuspensio- ja päästö.

Talvirenkaista alhaisimmat päästöt mitattiin yllättäen kuluneella nastarenkaalla (Nasta(36000): ajettu 36198km, kuluma 2 mm, nastaulkonema 0,5 mm) (Kuva 11 ja 12). Kyseisen kuluneen nastarenkaan alhainen päästö taso on todennäköisesti seurausta muutoksista sekä resuspensio- ja päästöissä että päällysteen kulumasta aiheutuissa päästöissä. Renkaan nastaulkonema oli laskenut suhteessa uusiin renkaisiin, mikä on todennäköisesti laskenut myös kulumapäästöä. Gustafsson ym. (2010) havaitsivat 50 km/h ajonopeudella ympyräkoerataolosuhteissa PM₁₀-pölynmuodostumisen puolittuvan kun nastaulkonema puolittui 1,2 millimetristä 0,6 millimetriin. Kuluneella nastarenkaalla nastojen kiinnitys renkaan rakenteeseen on myös saattanut löystyä, millä voi olla ollut vaikutusta päästöön. Jos oletetaan, että Gustafsson ym. (2010) havainto pätee myös näissä mittauksissa, eli nastaulkoneman alenemisen seurauksena myös nastakulutus olisi puolittunut, suhteessa renkaan kokonaispäästöön suurempi muutos olisi tapahtunut resuspensio- ja päästöissä, sillä kuluneen nastarenkaan päästö (Nasta(36000)) on ollut edelleen alhaisempi kuin uuden nastarenkaan päästö, josta nastat on poistettu. Kyseisen renkaan mittauksia on suunnitelmassa jatkaa esimerkiksi poistamalla nastat, jolloin nastakulutuksen vaikutus päästöön saadaan selville.



Kuva 9. PM_{10} -päästöjen mediaani, maksimi ja minimi eri rengastyypeillä 30 km/h ajonopeudella.



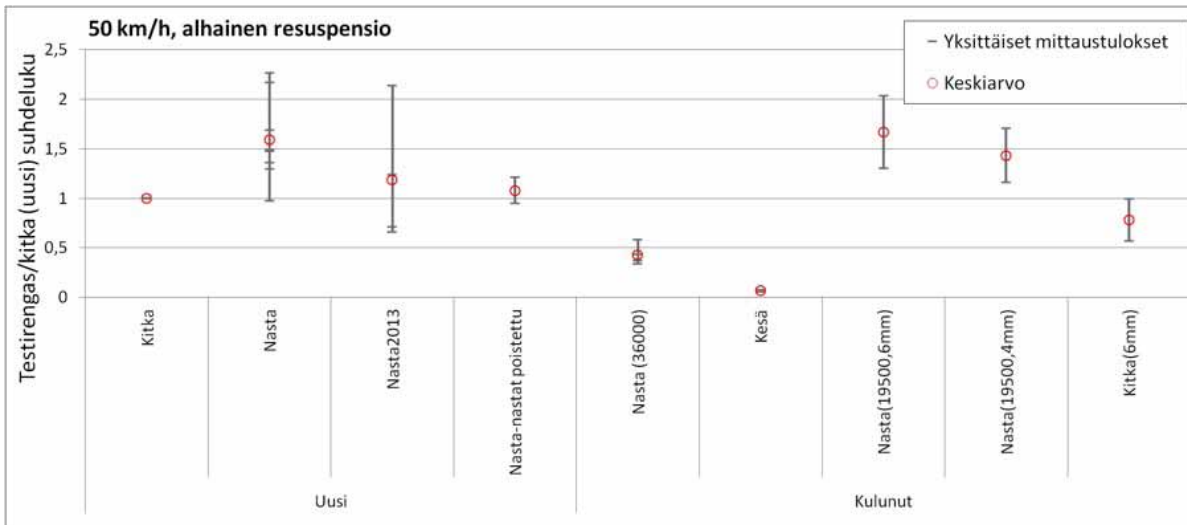
Kuva 10. PM_{10} -päästöjen mediaani, maksimi ja minimi eri rengastyypeillä 40 km/h ajonopeudella.

Kuvissa 11 ja 12 on esitetty myös eri kulumavaiheissa olevien renkaiden päästötasoja suhteessa uuteen vuoden 2011 mallin nastarenkaaseen 50 km/h ajonopeudella. Sekä kitka- että nastarenkaalla renkaan kuluminen on laskeutunut päästötasoa. Kitkarenkaalla päästön aleneminen selittyy resuspensio-päästön laskulla, mutta nastarenkailla on vaikea erotella, mikä osuus muutoksesta on resuspension ja mikä päällysteen kuluman vaikutusta. Tähän mennessä renkaiden pölymittaukset ovat pitkälti keskittyneet uusien renkaiden mittauksiin. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että jatkossa nastarenkaiden ja kitkarenkaiden päästöjä arvioitaessa renkaan kuluminen tulisi huomioida paremmin. Tutkimustehtävä on kuitenkin haastava, sillä edustava otos kuluneista renkaista väistämättä muodostuisi suureksi ja mittaukset näin ollen vaatisivat paljon resursseja.

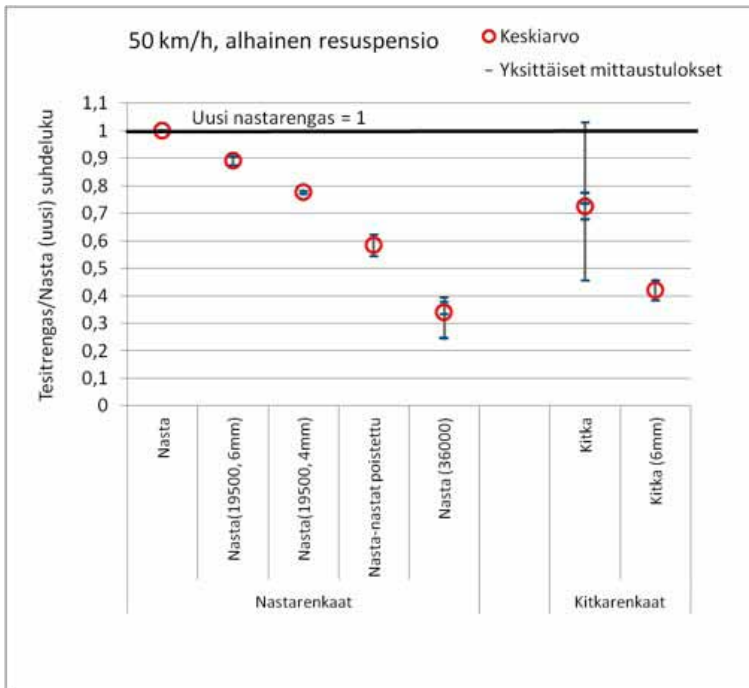
2013 voimaan tulevat nastarengasvaatimukset rajoittavat nastojen lukumäärää per rengasmetri ja vastaavien rengasdimension renkailla laskevat nastojen lukumäärää per rengas. Testien toteutuksen aikaan ei rengasvalmistajilla ollut vielä uuden vaatimusten mukaisia renkaita tarjolla, joten tilannetta simuloitiin testaamalla uutta Nokian

Hakkapeliitta 7 rengasta, josta osa nastoista (n. 30 %) oli poistettu, jotta se vastaisi 2013 voimaan tulevia vaatimuksia (Kuvissa 9-11 nimetty "Nasta 2013").

Kuvassa 13 on esitetty saadut mittaukset suhdelukuina suhteessa uuteen 2011 mallin nastarenkaaseen. Yleisesti ottaen nastojen lukumäärän väheneminen laskee myös päästöä. Kymmenessä mittauksessa kahdestatoista havaittiin pölypäästön vähentyneen. Saavutettu päästövähennä vaihteli mittauskohtaisesti, mutta keskimäärin nastojen vähennyksellä saavutettu päästövähennä oli ajonopeudesta riippuen 10-28 prosenttia verrattuna 2011 mallin vastaavaan renkaaseen (Kuva 13). Tulos on odotettu, sillä mitatuilla renkailla nastojen lukumäärän vähentämisen voi olettaa johtavan vastaavaan vähenemään kulumasta aiheutuvan pölyn määrässä, mutta ei resuspension määrässä. Resuspension osuus 50 km/h ajonopeudella oli noin puolet 2011 mallin nastarenkaan kokonaispäästöstä.



Kuva 11. PM₁₀-päästöjen mediaani, maksimi ja minimi eri rengastyypeillä 50 km/h ajonopeudella.



Kuva 12. Kuluneiden renkaiden ja uuden kitkarengaan (Kitka) päästöt suhteessa uuteen nastarengaseen (Nasta). Oikeassa kuvassa kulutettu nastarengas (Nasta(36000): ajettu 36198km), joka aiheutti pienimmät päästöt

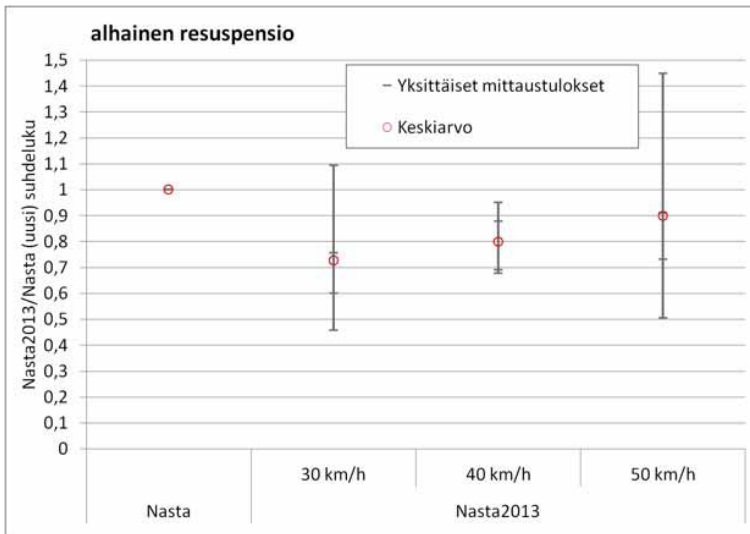
2.5 Johtopäätökset - osa II

Renkaan ilmaan tapahtuva pölypäästö koostuu kahdesta komponentista: (1) suorasta kulumatuotteiden päästöstä ilmaan sekä (2) kadun pinnalla olevan pölyn päästöstä ilmaan renkaan ja tien kontaktissa tapahtuvien aerodynaamisten prosessien seurauksena (resuspensio). Normaleissa katuolosuhteissa resuspendoituvaa pölyä esiintyy kadun pinnoilla kaikkina vuodenaikoina, kuitenkin selvästi eniten alkukeväästä. Vastaavat olosuhteet vallitsivat myös tässä tutkimuksessa.

Huhtikuun alkupuolella tehdyt mittaukset edustivat päästöttilannetta alkukevään korkeilla resuspensio- ja päästö-

soilla. Päästöt olivat 15 - 20-kertaisia verrattuna alhaisen resuspensiotason olosuhteisiin, jotka vallitsivat muina mittausajankohtina. Talvirenkaiden välillä ei havaittu merkittäviä systemaattisia eroja. Nastarengasilla havaitut päästöt olivat samalla tasolla kitkarenkaiden päästöjen kanssa. Alkukevään olosuhteissa pölyn resuspensiotaso on niin korkea, että renkaiden väliset erot pölyn muodostumisessa häviävät.

Touko-, elo- ja lokakuussa tehdyt mittaukset edustivat päästöttilannetta alhaisilla resuspensio- ja päästö-olosuhteilla. Tulokset osoittavat, että nastat lisäävät PM₁₀-pölyn muodostumista suhteessa nastattomiin renkaisiin, mutta resuspensio- ja päästö-olosuhteilla on myös merkittävä rooli. Kyseisissä



Kuva 13. Nastojen lukumäärän vähentämisen suhteellinen vaikutus uusien nastarenkaiden päästöihin eri nopeuksilla. 2011 mallin nastarengas on asteikolla arvolla 1.

olosuhteissa resuspensiopäästön osuus selitti edelleen noin 50 - 60 prosenttia vuoden 2011 mallin nastarenkaan kokonaispäästötasosta. Nastojen lukumäärän vähentäminen laskee päällysteen kulumasta aiheutuvan PM_{10} -päästön muodostumista. Vuoden 2013 heinäkuussa voimaan tulevien vaatimusten mukainen nastarengas aiheutti alhaisella resuspensiotasolla noin 10 - 28 prosenttia alhaisemmat pitoisuudet 2011 vaatimusten mukaiseen nastarenkaaseen verrattuna.

Kuluneiden renkaiden mittauksissa havaittiin päästötason laskevan renkaiden kuluessa. Kokonaispäästön kehitys on

todennäköisesti seurausta muutoksista sekä kuluma-, että resuspensiopäästössä, mutta tässä tutkimuksessa ei asiaa pystytty tarkemmin selvittämään. Tähän viittaa kuitenkin tulos, että kaikista talvirenkaista, ml. uudet renkaat, alhaisimmat päästöt mitattiin kuluneella nastarenkaalla (ajettu 36198 km). Kyseisen renkaan päästöt olivat alhaisemmat kuin kitkarenkaan ja nastarenkaan, josta nastat oli poistettu. Jatkossa nasta- ja kitkarenkaiden päästöjä arvioitaessa renkaan ikääntyminen tulisi huomioida.

Koko tutkimuskokonaisuuden tulosityhteenveto

Aikaisempi tutkimus on osoittanut, että nastoitettujen talvirenkaiden nastat kuluttavat päällystettä ja samalla lisäävät myös PM_{10} -katupölyn muodostumista verrattuna nastattomiin renkaisiin (Kupiainen 2007, Gustafsson ym. 2009, Kupiainen & Pirjola 2011). Nastattomilla talvirenkailla pölyä muodostuu merkittävästi vähemmän kuin nastallisilla. Aikaisemmissa tutkimuksissa (Kupiainen, 2007) on myös osoitettu, että talvihiekoitus lisää pölyn muodostumista katu ympäristössä materiaalin murskaantuessa ja materiaalin kuluttaessa päällysteen pintaa. Talvihiekoitus lisää PM_{10} -katupölyn määrää katu ympäristössä.

Kadun pinnan ollessa kostea, luminen tai jäinen katupölyä voi muodostua, mutta se ei pääse ilmaan vaan kertyy katu ympäristöön. Vasta kuivilta pinnoilta katupöly pääsee ilmaan. Talven aikana muodostuvasta katupölystä katu ympäristöihin kertyy suurehko pölyvarasto, joka merkittävässä määrin vapautuu ilmaan vasta kevään kuivissa olosuhteissa resuspension kautta (Kupiainen ym. 2009). Pääkaupunkiseudulla reuspension päästöhuippu havaitaan yleensä maaliskuun vaihteessa ja päästö laskee voimakkaasti huhtikuun aikana. Toukokuun aikana päästö taso yleensä saavuttaa kesäisen puhtaan tilanteen. Maalis-huhtikuussa havaitaan Suomen kaupunkien liikenne ympäristöjen ilmassa korkeita PM_{10} -pitoisuuksia, joiden on osoitettu koostuvan pitkälti juuri päällysteen ja hiekoituksen kiviaineksista muodostuneesta katupölystä. Tämän vuoksi aikajaksoa kutsutaankin ”katupölykaudeksi”.

Nastarenkaiden aiheuttama päällysteen kuluma ja talvihiekoitus ovat pölyn muodostumisprosesseina erilluonteisia. Päällyste kuluu nastaiskujen myötä aina ollessaan paljas ja tällöin myös pölyn muodostumisprosessit ovat käynnissä, käytännössä koko talvirengaskauden. Talvihiekoituksessa muodostuva pöly on sen sijaan sidottu hiekoitustapahtumiin ja -kohteisiin, ja sen käyttökerrat ja -määrät voivat vaihdella paljonkin eri katu ympäristöissä ja eri vuosina. On tärkeä tietää näiden päälähteiden osuudet erityisesti kevätkauden resuspensiossa ja tie ympäristöjen ilmanlaadussa, mutta muodostumis- ja päästöprosessien erojen ja kompleksisuuden takia tutkimustehtävä on haastava.

Tämän tutkimuksen osassa I määritettiin PM_{10} -katupölylähteiden osuuksia ilma- ja resuspensionäytteissä Pohjois-Helsingissä talvella 2011/2012. Kevään 2012 katupölykaudelta näytteitä kerättiin maaliskuun ajalta. Tulokset osoittivat, että kevätkaudella päällysteen kiviaineksista aiheutuvat kulumatuotteet olivat suurin yksittäinen lähde, jonka osuus kevätkauden resuspensionäytteissä oli 48 prosenttia ja ilmasta kerätyissä hiukkanäytteissä 43 prosenttia. Pölyn muodostumisprosesseja koskevien tutkimusten perusteella merkittävin se-

littäjä kevätkaudella havaittavalle päällysteperäiselle pölylle on nastarenkaiden aiheuttama päällysteen kuluma.

Tutkimuskohteessa käytettiin tarkastellulla talvikaudella talvihiekoitusta ja suolausta. Talvihiekoituksessa käytettyä kivimateriaalista muodostuneet hiukkaset selittivät ilma- ja resuspensionäytteissä havaitusta PM_{10} -katupölystä noin 25 prosenttia. Talvihiekoituksella on ollut pieni, arviolta muutaman prosentin merkitys myös päällysteperäisen pölyn muodostumisessa hiekkapaperi-ilmiön kautta.

Päällysteen ja talvihiekoituksen lähdeosuuksien osalta talvikaudelta 2011/2012 Suurmetsäntieltä saadut tulokset ovat samankaltaisia kuin mitä on arvioitu aikaisemmissakin 2000-luvun alussa Suomessa tehdyissä tutkimuksissa. Hangossa tehdyssä tutkimuksessa (Kupiainen & Tervahattu, 2004) talvihiekoituksen ilmanlaatuvaikutukseksi PM_{10} -pölyssä arvioitiin keskimäärin noin 10 prosenttia ja Helsingin keskustassa tehdyssä tutkimuksessa noin puolet (Tervahattu ym. 2005). Tiesuolan vaikutus pölyn koostumukseen oli havaittavissa erityisesti maaliskuun ja huhtikuun näytteissä, jolloin suolauskertojakin on ollut useita.

Eri lähteiden suhteelliset osuudet katu ympäristössä vaihtelevat riippuen vaikuttavista lähteistä. Vuosien välinen vaihtelu talvikauden sääolosuhteissa vaikuttaa liukkaudentorjunnan tarpeeseen ja menetelmiin, kuten siihen käytetäänkö liukkaudentorjunnassa hiekoitusta vai suolausta. Viimeisen viiden vuoden ajalle ajoittuu talvia, jolloin talvihiekoitustarve on ollut vähäinen ja esimerkiksi Helsingin keskustan pääkaduilla sitä ei ole käytetty lainkaan (Kupiainen ym. 2009). Toisaalta viimeisen viiden vuoden ajanjaksolle ajoittuu myös talvia, kuten tutkimuksen kohteena ollut 2011/2012 talvikausi, jolloin olosuhteet ovat vaatineet paljon talvihiekoitusta. Hiekoituksen vaikutus näkyy selvästi myös katu ympäristön katupölyssä sellaisina talvina, jolloin hiekoitusta käytetään paljon.

Yleisesti on ollut vallalla käsitys, että talvihiekoitus olisi kaupunki-ilmassa havaittavan katupölyn päälähde. 2000-luvulla tehtyjen tutkimusten (Kupiainen & Tervahattu 2004, Tervahattu ym. 2005) ja nyt saatujen tulosten perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että talvihiekoitus ei ole tutkituissa kohteissa ollut päälähde PM_{10} -katupölyssä sellaisinaanakaan talvina jolloin hiekoitustarve on ollut suuri. Helsingissä tähän ovat voineet vaikuttaa talvihiekoituksen pölyvaikutuksen vähentämiseen tähänneet toimenpiteet, joissa on pyritty lisäämään korvaavien liukkaudentorjunta-aineiden kuten tiesuolan käyttöä sekä kohdistamaan hiekoitusta ongelmallisille katuosuuksille kuten mäkiin, risteysalueille ja bussipysäkeille. Lisäksi Helsingissä käytetään pesuseulottua sepeliä, josta pölyvä hienoaines on pyritty poistamaan.

Renkaan pölypäästö ilmaan koostuu renkaan suoraan muodostamasta ja ilmaan päästämästä pölystä sekä aikaisemmin kadunpinnalle kertyneestä pölystä, jonka rengas nostaa ilmaan (resuspensio). Kitkarenkaan päästösignaali koostuu lähinnä resuspensio-päästöstä, kun taas nastarenkaan päästö koostuu sekä päällysteen kulumatteista että resuspensioista. Tämän tutkimuksen osa II keskittyi demonstroimaan eri rengastyypin ja eri kuluvaiheissa olevien renkaiden päästöjä katuolosuhteissa korkealla ja alhaisemalla resuspensiotasolla.

Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että resuspensio-päästöjä havaitaan katuolosuhteissa käytännössä läpi vuoden, mutta sen kuukausivaihtelu on voimakasta (Kupiainen ym. 2009). Tässä tutkimuksessa huhtikuun alkupuolella tehdyt mittaukset edustivat päästötilannetta alkukevään korkeilla resuspensio-päästötasoilla. Päästöt olivat 15 - 20-kertaisia verrattuna alhaisen resuspensiotason olosuhteisiin, jotka vallitsivat muina mittausajankohtina. Talvirenkaiden välillä ei havaittu merkittäviä systemaattisia eroja ja esimerkiksi nastarenkailla havaitut päästöt olivat samalla tasolla kitkarenkaiden päästöjen kanssa. Alkukevään olosuhteissa pölyn resuspensiotaso on niin korkea, että esimerkiksi nastojen aiheuttama päällysteen kulumassa muodostuva pöly ei ole aineistosta havaittavissa.

Alhaisissakin resuspensio-olosuhteissa resuspensio-päästö selitti uusilla renkailla edelleen noin 50 - 60 prosenttia nastarenkaan kokonaispäästötasosta (vuoden 2011 uusi rengasmalli). Loput 40 - 50 prosenttia kokonaispäästöstä johtui nastojen aiheuttaman päällysteen suorasta kulumasta. Nastojen lukumäärän vähentäminen laskee päällysteen kulumasta aiheutuvan PM_{10} -päästön muodostumista. Vuoden 2013 heinäkuussa voimaan tulevien vaatimusten mukainen nastarengas aiheutti alhaisella resuspensiotasolla noin 10 - 28 prosenttia alhaisemmat pitoisuudet 2011 vaatimusten mukaiseen nastarenkaaseen verrattuna.

Renkaan kulumisen havaittiin muuttavan sen hiukkas-päästöjä merkittävästi. Sekä nasta- että kitkarenkailla havaittiin päästön alenevan renkaan kuluessa. Kulumisen aiheuttaa muutoksia sekä resuspensioista että päällysteen kulumasta aiheutuviin päästöissä. Kuluneiden renkaiden osalta tutkimuksia tulee jatkaa päästömuutoksien aiheuttavien tekijöiden määrällisen ymmärryksen parantamiseksi.

Alhaisissa resuspensio-olosuhteissa saadut päästömitaukset osaltaan demonstroivat nastarenkaiden lisäävän pölyn muodostumista verrattuna nastattomiin renkaisiin. Päällysteeseen kohdistuvien nastaiskujen tai nastaisku-kohtaisen kuluman vähentäminen alentaisi PM_{10} -pölyn muodostumismäärää katu ympäristössä, mikä osaltaan vähentäisi katu ympäristöön talven aikana kertyvän pölyn kokonaismäärää, edelleen keväällä ilmaan resuspension kautta pääsevän pölyn päästötasoa ja näin ollen edesauttaisi ilmanlaadun parantumista. Resuspensio-päästötsoon voi vaikuttaa myös esimerkiksi pölynsidonnalla ja katujen puhdistuksella (Kupiainen ym. 2009).

Nastaiskujen määrää voi vähentää alentamalla nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen osuutta liikennevirrassa tai alentamalla nastojen määrää per rengas. 2013 voimaan astuneet nastarengasmääräykset teoriassa vähentävät nastojen lukumäärää. Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella näyttäisi myös siltä, että sekä resuspensio- että päällysteen kulumapäästöt laskevat ajonopeuden laskiessa, mikä mahdollistaisi pölyn muodostumismääriin vaikuttamisen myös esimerkiksi nopeusrajoituksin. Nastojen ja nastarenkaiden ominaisuuksien jatkokehitysmahdollisuudet vähemmän päällystettyä kuluttaviksi eivät ole olleet tämän tutkimuksen kohteena, mutta myös niitä tulisi jatkossa selvittää.

Kirjallisuus

- Etyemezian V., Kuhns H., Gillies J., Green M., Pitchford M., Watson J., 2003. Vehicle-based street dust emission measurement: I-methods and calibration. *Atmospheric Environment* 37, 4559-4571.
- Gertler A. ym. 2006. A Case Study of the Impact of Winter Road Sand/Salt and Street Sweeping on Road Dust Re-entrainment. *Atmospheric Environment* 40, 5976-5985.
- Gustafsson M., Blomqvist G., Brorström-Lundén E., Dahl A., Gudmundsson A., Hjort M., Johansson C., Jonsson P., Swietlicki E. 2009. NanoWear. Nanopartiklar från slitage av däck och vägbana. VTI rapport 660. 75 s.
- Juneholm M. 2007. Åtgärder för att minska emissionerna av partiklar från slitage och uppvirvling från vägtrafiken. Vägverket SA80A 2006:15982.
- Kupiainen, K. and Tervahattu, H. 2004: The Effect of Traction Sanding on Urban Suspended Particles in Finland. *Environmental Monitoring and Assessment* 93, 287-300.
- Kupiainen K.J., Tervahattu H., Räisänen M., Mäkelä T., Aurela M., Hillamo R., 2005. Size and Composition of Airborne Particles from Pavement Wear, Tires, and Traction Sanding. *Environmental Science & Technology* 39, 699-706.
- Kupiainen K., 2007. Road Dust from Pavement Wear and Traction Sanding. *Monographs of the Boreal Environment Research* 26. 50 s.
- Kupiainen & Stojiljkovic 2009. Mannerheimintien PM10-hiukkasten koostumus ja lähteet raja-arvon ylityspäivinä 2008. Helsingin kaupungin rakennusviraston julkaisut 2009:9 / Katu- ja puisto-osasto. 24 s.
- Kupiainen, K., Pirjola, L., Viinanen, J., Stojiljkovic, A., Malinen, A. 2009. Katupölyn päästöt ja torjunta. KAPU hankkeen loppuraportti. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 13/2009. 99 s.
- Kupiainen K. & Pirjola L. 2011. Vehicle non-exhaust emissions from the tyre-road interface - Effect of stud properties, traction sanding and resuspension. *Atmospheric Environment* 45, 4141-4146.
- Kupiainen K. & Ritola R. 2013. Nastarengas ja hengitettävä pöly. Katsaus tutkimuskirjallisuuteen. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja XX/2013.
- Pirjola, L., Parviainen, H., Hussein, T., Valli, A., Hämeri, K., Aalto, P., Virtanen, A., Keskinen, J., Pakkanen, T., Mäkelä, T., Hillamo, R. 2004. "Sniffer" - a novel tool for chasing vehicles and measuring traffic pollutants. *Atmospheric Environment* 38, 3625-3635.
- Pirjola, L, Kupiainen, K.J., Perhoniemi, P., Tervahattu, H. and Vesala, H. 2009. Non-exhaust emission measurement system of the mobile laboratory SNIFFER. *Atmospheric Environment* 43, 4703-4713.
- Tervahattu H., Kupiainen K., Räisänen M. 2005. Tutkimuksia katupölyn koostumuksesta ja lähteistä. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2005:12. Helsinki. 56 s.
- Tervahattu (toim.), 2008. Vierintämelun vähentäminen. VIEME-tutkimus- ja kehittämishankkeen loppuraportti. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 4/2008. 98 s.
- Unhola T. 2012. Nastoin varustettujen autojen osuus liikennevirrasta Pohjois-Helsingissä 2011-2012. Luonnos 11.5.2012. 12 s.

HSY:n julkaisuja | HRM:s publikationer 3/2013

ISSN-L 1798-6095

ISSN 1798-6095 (pdf)

ISBN 978-952-6604-65-7 (pdf)

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

PL 100, 00066 HSY, Opastinsilta 6 A, 00520 Helsinki

Puh. 09 156 11, Fax 09 1561 2011, www.hsy.fi

Samkommunen Helsingforsregionens miljötjänster

PB 100, 00066 HRM, Semäforbron 6 A, 00520 Helsingfors

Tfn. 09 156 11, Fax 09 1561 2011, www.hsy.fi

Helsinki Region Environmental Services Authority

P.O. Box 100, FI-00066 HSY, Opastinsilta 6 A, 00520 Helsinki

Tel. +358 9 15611, Fax +358 9 1561 2011, www.hsy.fi