



Pääkaupunkiseudun  
julkaisusarja B 2005:12

# Tutkimuksia katupölyn koostumuksesta ja lähteistä



Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2005:12

Heikki Tervahattu, Kaarle Kupiainen, Mika Räisänen

**TUTKIMUKSIA KATUPÖLYN KOOSTUMUK-  
SESTA JA LÄHTEISTÄ**

Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)  
Helsinki 2005

Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)  
Opastinsilta 6 A  
00520 HELSINKI  
Puh. (09) 15 611  
[www.ytv.fi](http://www.ytv.fi)

Huvudstadsregionens samarbetsdelegation (SAD)  
Semaforbron 6 A  
00520 HELSINGFORS  
Tfn (09) 15 611  
[www.ytv.fi](http://www.ytv.fi)

Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2005:12

ISSN 0357-5470  
ISBN 951-798-581-9

Kansikuva: Jari Viinanen

YTV:n monistamo  
Helsinki 2005

## ESIPUHE

Katupöly on jokakeväinen ongelma, kun talven aikana renkaiden ja hiekan jauhama pöly lentää ilmassa. Hengitettäville hiukkasille annettu vuorokausiraja-arvo ylittyi Helsingissä vuonna 2003 Runeberginkadulla. Raja-arvoylityksestä on annettu EU:lle selvitys, jossa vedottiin ilmanlaatudirektiivin talvihiekoituspoikkeamaan. Tämä poikkeama antaa pohjoisille maille lievennyksiä silloin, kun raja-arvon ylittyminen johtuu talvihiekoituksesta. Selvityksessä arvioitiin, että raja-arvo mahdollisesti ylittyy Helsingin vilkkaasti liikennöidyissä katukuiluissa tai muilla sellaisilla vilkkaasti liikennöidyillä väylillä, joissa ilmansaasteiden laimentuminen on heikentynyt rakennusten tai kasvillisuuden vuoksi. Tänä vuonna raja-arvo on jo ylitetty Mannerheimintien mittausasemalla ja on todennäköistä, että se ylittyy myös Hämeentiellä.

Katupölyn syntyyn vaikuttavia tekijöitä on tutkittu useissa kenttä- ja laboratoriotutkimuksissa. Näiden tutkimusten tuloksia on koottu tähän selvitykseen. Koosteen on laatinut dosentti Heikki Tervahattu Nordic Envicon Oy:stä, ja koosteen ovat rahoittaneet Ympäristöministeriö, Liikenne- ja viestintäministeriö sekä YTV:n ympäristötoimisto. Selvitystä on käytetty osoittamaan EU-komissiolle, että talvihiekoitus on merkittävä hiukkaspitoisuuksia nostava tekijä Suomessa ja pääkaupunkiseudulla.

Helsingissä 31.5.2005

Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)  
Ympäristötoimisto

Ympäristöpäällikkö            Kari Wallenius

Mittauspäällikkö            Tarja Koskentalo

**KUVAILULEHTI**

<i>Julkaisija</i>	Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)	<i>Päivämäärä</i> 30.5.2005
<i>Rahoittaja/ Toimeksiantaja</i>	Ympäristöministeriö, Liikenne- ja viestintäministeriö, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)	
<i>Tekijät</i>	Heikki Tervahattu, Kaarle Kupiainen, Mika Räisänen	
<i>Julkaisun nimi</i>	Tutkimuksia katupölyn koostumuksesta ja lähteistä	
<i>Julkaisusarjan nimi</i>	Pääkaupunkiseudun julkaisusarja PJS B	<i>Nro</i> 2005:12 <i>ISBN</i> 951-798-581-9 <i>ISSN</i> 0357-5470 <i>Kieli</i> suomi
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Katupölyprojektin päätavoitteena oli tutkia kaupunki-ilman hengitettävän pölyn koostumusta ja selvittää erityisesti hiekoituksesta ja asfaltista peräisin olevien pölyjen osuuksia. Tähän asiaan saatiin kokeellisissa tutkimuksissa yllättävä vastaus: hiekoitus lisäsi suuresti hienojakoisen pölyn määrää, mutta pääosa pölystä oli peräisin asfaltista. Se syntyy siten, että renkaan ja asfaltin välissä oleva hiekka irrottaa hienojakoista pölyä asfaltista. Tämä ilmiö on ensi kertaa osoitettu näissä tutkimuksissa ja annoimme sille nimen hiekkapaperi-ilmiö. Nastarenkaiden käyttö synnytti selvästi enemmän hengitettävää pölyä kuin kitkarenkailla ajo. Kuitenkin kitkarenkaista on todennäköisesti muodostunut enemmän orgaanista kumipölyä kuin nastarenkaista.</p> <p>Hiekoituksen lisääminen vaikutti voimakkaasti hengitettävän pölyn määrään siten, että sekä hiekoituksesta että asfaltista peräisin olevan hiukkasmassan määrä lisääntyi. Hienorakeinen hiekka lisäsi pölyn muodostusta karkeampiin murskeisiin verrattuna. Hiekoitusmateriaalin mineraalikoostumus on myös tärkeä etenkin helposti murskaantuvilla ja jauhautuvilla kiviaineksilla. Jos hiekoitusmurske on iskunkestävyydeltään heikkoa ja se koostuu lisäksi pääasiallisesti kovista mineraaleista (esimerkiksi kvartsista), muodostuu hiekoitusmurskeen jauhautumisen seurauksena tehokas kuluttava "hiekkapaperimateriaali". Hiekoitusmateriaalin ja asfaltin kiviaineksen keskinäisillä ominaisuuksilla on myös merkitystä. Tulokset osoittavat, että on tärkeää tuntea kaikki tekijät, jotka liittyvät renkaiden, hiekoituksen ja asfaltin vuorovaikutukseen. Ne kaikki on otettava huomioon selvitetäessä mahdollisuuksia vähentää katupölyn muodostusta.</p> <p>Kenttätutkimusten päätehtävä oli selvittää hiekoituksen osuutta keväisessä katupölyssä. Keväinen hiukkasmassa koostuu kaikista niistä pölylähteistä, joita talven aikana on kaduille kertynyt ja keskenään sekoittunut. Keväisestä PM10-katupölystä muodosti mineraaliaines pääosan. Se on peräisin hiekoituksesta ja asfaltista, jossa kiviainesta on yli 90 prosenttia. Hiekoituksen ja asfaltin suhde kevätpölyssä vaihteli suuresti. Hiekoituksen osuus oli pienimmillään Hangossa (noin 20 % mineraaliaineksesta), jossa käytettiin hiekoitukseen masuunikuonahiekkaa ja olosuhteet muutenkin olivat poikkeavat. Tikkurilassa, jossa käytettiin hienorakeista hiekoitushiekkaa, mineraalipölystä oli hiekoituksesta jopa 80 %. Kokeelliset tutkimuksemme olivat osoittaneet, että hienorakeinen hiekoitusmateriaali nostaa suuresti katupölyn määrää karkearakeisempaan verrattuna.</p> <p>Muu osa hengitettävästä pölystä oli peräisin monista eri lähteistä. Niistä tärkeimpiä olivat liikenteen pakokaasut sekä erilaiset rikki-pitoiset hiukkaset, jotka tulevat energiantuotannon ja teollisuuden päästöistä. Ne ovat merkittävältä osaltaan kaukokulkeutuneita. Myös renkaiden ja muiden autosien kuluminen sekä asfaltin bitumi tuottavat hengitettäviä hiukkasia. Muita hiukkastyyppejä olivat mm. natriumkloridi (tiesuolauksesta ja merivedestä), kalsiumrikkaat hiukkaset monista eri lähteistä sekä rauta- ja muut metallihiukkaset.</p> <p>Projektissa tutkittiin myös kalsiumkloridin käyttöä katupölyn sidontaan. Se havaittiin tehokkaaksi silloin, kun ilman suhteellinen kosteus oli korkea, mutta vaikutus laski voimakkaasti ilman kosteuden aletessa.</p>	
<i>Avainsanat</i>	Hiukkaset, mineraalipöly, PM <sub>10</sub> , hiekoitus, nastarenkaat, asfaltin kuluminen, laskeuma, SEM/EDX, kalsiumkloridi	
<i>Jakelu</i>	Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV), ympäristötoimisto Opastinsilta 6 A, 00520 Helsinki, p. 15 611, Sähköposti: ymt@ytv.fi, Internet: www.ytv.fi	

## PRESENTATIONSBLAD

<i>Julkaisija</i>	Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV)	<i>Datum</i>	30.5.2005
<i>Finansiär/ Uppdragsgivare</i>	Miljöministeriet, Kommunikationsministeriet, Huvudstadsregionens samarbetsdelegation		
<i>Författare</i>	Heikki Tervahattu, Kaarle Kupiainen, Mika Räisänen		
<i>Publicationens titel</i>	Forskningar om gatudammets sammansättning of uppkomst		
<i>Publikationsserie</i>	Pääkaupunkiseudun julkaisusarja PJS B	<i>Nro</i>	2005:12
		<i>ISBN</i>	951-798-581-9
		<i>ISSN</i>	0357-5470
		<i>Språk</i>	Finska
<i>Sammandrag</i>	<p>Huvudsyftet med gatudammprojektet vara att studera konsistensen av inandningsbara damm i stadsmiljöer under våren. Fokus var lagt vid att studera vilken andel sandning och asfalt har i dammet. Experimentet gav ett överraskande resultat: sandningen ökade på dammet, även om största delen av dammet härstammade från asfalten. Detta förklaras med att sanden mellan däckena och asfalten sliter på asfalt och frigör finkornigt damm. Detta fenomen påvisades nu för första gången i detta projekt, och det namngavs sandpapperfenomenet. Dubbdäck förorsakade betydligt mera damm i luften än friktionsdäck. Friktionsdäck förorsakade å sin sida sannolikt mera organiskt gummidamm än dubbdäck.</p> <p>Studien visade att sandningen ökade massan av inandningsbara partiklar i luften. Speciellt kunde det påvisas att partikelmassan från både sandning och asfalt ökades i dammet. Sandning som gjorts med finkornigt sand skapade mera damm än grövre sandningsmaterial. Det visades också att mineralkonsistensen av sandningsmaterialet är viktig speciellt då det gäller stenmaterial som har dålig fragmenteringsförmåga. Om sandningsmaterialet består av hårda mineraler (t.ex. kvarts), uppstår det ett effektivt slitande sandpappermaterial, när sandningsmaterialet söndras till mindre sand kornen under däck. Sandningsmaterialets och asfaltens gemensamma egenskaper har också en betydelse. Resultaten visar att det är viktigt att känna till alla faktorer som kan kopplas till däcken, sandningens och asfaltens samverkan. De skall alla tas i beaktande då man utreder möjligheter att minska på uppkomsten av gatudamm.</p> <p>Huvudsyftet med fältstudierna var att utreda vilken andel sandningen har i gatudammet under våren. Partikelmassan under våren består av alla de dammkällor, som samlas under vintern längs vägarna. Studien visar att mineralpartiklarna utgjorde den största delen utav det årliga PM10 gatudammet. Det härstammar från sandning och asfalt (stenmaterial över 90 %). Andelen av sandning och asfalt i dammet varierade. I Hangö visade det sig att sandningens andel i dammet var minst (ca. 20% av mineralpartiklarna). Där sandades vägarna med masugnsslag sand, och där var omständigheterna överlag avvikande. I Dickursby sandades vägarna med mycket finkornigt sand, och studien visade att t.o.m. 80% av dammet hade sitt ursprung i sandningen. De experimentella studierna visade att finkornigt sandningsmaterial ökar avsevärt på gatudammet jämfört med grövre sand.</p> <p>Resten av dammet härstammade från flera olika källor. De viktigaste källorna visade sig vara avgaspartiklar från trafik samt andra svavelhaltiga partiklar, som härstammar från energiproduktion och industriavsläpp, som till största del är fjärtransporterade. Även förslitning av däck samt andra bildelar, samt asfaltens bitumen skapar partiklar, som frigörs i luften som inandningsbara partiklar. Andra typer av partiklar är bl.a. natriumklorid partiklar (vägsaltning och saltvatten), kalciumrika partiklar från flera olika källor samt järn- och andra metalpartiklar.</p> <p>I gatudammprojektet studerades också möjligheten att använda kalciumklorid för att binda gatudamm. Metoden visade sig vara effektiv, när den relativa fuktigheten i luften var hög, men dess inverkan sjönk när luftens fuktighet sjönk.</p>		
<i>Nyckelord</i>	Mineraldamm, PM <sub>10</sub> , sandningen, dubbdäck, asfaltens slitning, deposition, SEM/EDX, kalciumklorid		
<i>Distribution</i>	Huvudstadsregionens samarbetsdelegation (SAD), miljöbyrå Semaforbron 6 A, 00520 Helsingfors, tfn. 15 611, www.ytv.fi		

## DOCUMENTATION PAGE

Publisher	Helsinki Metropolitan Area Council (YTV)	Date	30.5.2005
Financier/ Comissioner	Ministry of the Environment, Ministry of Transport and Communications, Helsinki Metropolitan Area Council		
Authors	Heikki Tervahattu, Kaarle Kupiainen, Mika Räisänen		
Title of the Publication	Studies on the composition and sources of urban road dust		
Publication series	Pääkaupunkiseudun julkaisusarja PJS B	Number	2005:12
		ISBN	951-798-581-9
		ISSN	0357-5470
		Language	Finnish
Abstract	<p>The main objective of the Road Dust Project was to study the composition of urban fugitive dust, particularly PM originated from traction sanding material and asphalt stone in the springtime road dust. Our experimental investigations gave a surprising result: the use on anti-skid aggregates greatly increased PM<sub>10</sub>-concentrations but most of this increase is produced by asphalt wear caused by anti-skid aggregate grains between tires and asphalt pavement. This phenomenon was not known earlier and we named it as the sandpaper effect. Studded tires increased PM<sub>10</sub>-concentrations compared with friction tires. However, the use of friction tires produced more organic particles from tire wear.</p> <p>The amount of anti-skid aggregate dispersed greatly impacted the amount on fugitive dust increasing PM from both the traction sand and asphalt stone. Anti-skid aggregate with fine grain size enhanced substantially PM emissions compared with coarser aggregates. The modal composition of the traction sand is also important, and aggregates with low resistance to fragmentation are not recommended for their greater dust emissions. Which component is more abraded, asphalt or anti-skid aggregate, depends on the properties of both. These results emphasize the interaction of tires, traction sand, and asphalt pavement in the production of dust emissions. Therefore, they all must be taken into account when measures to reduce road dust are considered.</p> <p>The main goal of field investigations was to study the share of anti-skid aggregate in the vernal road dust. During the wintertime, fine PM from several sources accumulate on road surfaces. Airborne PM is therefore a complex mixture that varies in composition in different places. Mineral matter made up a great majority of the springtime airborne PM<sub>10</sub>-road dust. It was originated from the traction sand and asphalt that contains 90% on crushed rock. The shares of these two sources varied greatly. PM from sand was lowest in Hanko (20% of mineral PM) where conditions were different to other locations (e.g. a special sanding material, clinker sand from an iron factory). On the contrary, 80% of mineral PM was originated from sanding material in Tikkurila. This was caused by fine-grained aggregate which according to our experimental studies greatly enhanced road dust emissions.</p> <p>Other major sources in our PM-samples were exhaust particles from automobiles as well as several particle types that contained sulfur and originated from fossil fuel burning or industry and were largely depositions of long-range transport. The wear of tires and other parts of automobiles and bitumen from asphalt also produced airborne PM as well as sodium chloride from road salting and sea water, calcium-rich particles from many sources and particles of iron and other metals.</p> <p>In the Road Dust Project we also studied the use of calcium chloride for binding urban road dust. CaCl<sub>2</sub> decreased effectively airborne PM when the relative humidity was high. The impact greatly weakened at lower humidity</p>		
Keywords	Particles, mineral dust, PM <sub>10</sub> , traction sanding, studded tires, asphalt wear, deposition, SEM/EDX, calcium chloride		
Distribution	Helsinki Metropolitan Area Council (YTV), Environmental Office Opastinsilta 6A, 00520 Helsinki, tel +358-9-15611, e-mail ymt@ytv.fi, Internet www.ytv.fi		

# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>KATUPÖLYONGELMAN ESITTELY</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROJEKTIN KUVAUS</b> .....	<b>3</b>
2.1	TAVOITTEET JA TEHTÄVÄT.....	3
2.2	TOTEUTUS.....	4
<b>3</b>	<b>KATUPÖLYN MUODOSTUMINEN ASFALTISTA JA HIEKOITUSHIEKASTA - KOKEELLISIA TUTKIMUKSIA</b> <b>6</b>	
3.1	KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN TOTEUTUS .....	6
3.2	KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN TULOKSET .....	8
3.2.1	<i>Hiekoituksen vaikutus pölyn muodostukseen</i> .....	8
3.2.2	<i>Hiekoitusmateriaalin vaikutus pölyn muodostukseen</i> .....	11
3.2.3	<i>Asfaltin kiviaineksen vaikutus pölyn muodostukseen</i> .....	12
3.2.4	<i>Renkaiden vaikutus pölyn muodostukseen</i> .....	13
3.2.5	<i>Ajonopeuden vaikutus pölyn muodostukseen</i> .....	14
3.2.6	<i>Hiukkasten kokojakauma ja hienojen hiukkasten koostumus</i> .....	15
<b>4</b>	<b>KATUPÖLYN KOOSTUMUKSESTA TEHDYT KENTTÄTUTKIMUKSET</b> .....	<b>17</b>
4.1	HANGON - TAMMISAAREN TUTKIMUS .....	18
4.2	TUTKIMUKSET MUSEOKADULLA JA TIKKURILASSA TALVIKAUDELLA 2000 - 2001 .....	19
4.2.1	<i>Helsinki, Museokatu</i> .....	20
4.2.2	<i>Vantaa, Tikkurila</i> .....	23
4.2.3	<i>Johtopäätökset</i> .....	26
4.3	KATUPÖLYN KOOSTUMUS JA LÄHTEET TIKKURILASSA KEVÄÄLLÄ 2002.....	26
4.4	HIUKKASTUTKIMUKSET POHJOISRANNASSA (HELSINKI).....	30
4.5	HIUKKASTUTKIMUKSET LAPPEENRANNASSA .....	33
4.6	KALSIVAMKLOORIDIN KÄYTTÖ KATUPÖLYN SIDONTAAN .....	36
4.6.1	<i>Kalsiumkloridin käyttö kaupunkiliikenteessä</i> .....	36
4.6.2	<i>Fysiokemiallinen tausta</i> .....	37
4.6.3	<i>Kalsiumkloridin korroosiovaikutus</i> .....	38
4.6.4	<i>Kalsiumkloridin käyttökokeilu keväällä 1998</i> .....	38
4.6.5	<i>Kalsiumkloridin käyttö keväällä 2004</i> .....	38
4.6.6	<i>Yhteenvedo ja johtopäätökset</i> .....	41
	<b>KATUPÖLYPROJEKTIN TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>42</b>
	<b>TIIVISTELMÄ KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN TULOKSISTA</b> .....	<b>43</b>
	<b>TIIVISTELMÄ KENTTÄTUTKIMUSTEN TULOKSISTA</b> .....	<b>45</b>
	<b>YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ</b> .....	<b>47</b>
	<b>LÄHDELUETTELO</b> .....	<b>51</b>

## Liiteluettelo

- Liite 1      Kartta tutkimuspaikoista  
Liite 2      Katupölyn tutkimusprojektin julkaisut



# 1. KATUPÖLYONGELMAN ESITTELY

Keväinen katupöly on edelleen vaikeimpia ilmansuojelun ongelmia Suomessa, vaikka sen vähentämiseksi on tehty runsaasti työtä monissa kaupungeissa ja kunnissa. Suomessa astuivat voimaan elokuussa 2001 Neuvoston direktiivin 1999/30/EY mukaiset ilmanlaadun raja-arvot, jotka on säädetty ihmisten terveyden suojelemiseksi. Raja-arvot on pantu täytäntöön valtioneuvoston asetuksella ilmanlaadusta (711/2001, myöhemmin ilmanlaatuasetus). Vuosiraja-arvo hengitettävälle hiukkasille ( $PM_{10}$ ) on  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja vuorokausiraja-arvo  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , joka saa ylittyä vuoden aikana 35 kertaa. Raja-arvot on saavutettava viimeistään 1.1.2005 mennessä. Sitovien raja-arvojen lisäksi Suomessa on voimassa valtioneuvoston päätös ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeuman tavoitearvoista (480/1996, myöhemmin ilmanlaadun ohjearvopäätös), jossa säädetään ohjearvot sekä hengitettävälle hiukkasille että hiukkasten kokonaisleijumalle (TSP = total suspended particulates). Ohjearvot on otettava huomioon ilman pilaantumisen ehkäisemiseksi suunnittelussa, kuten esimerkiksi maankäytön ja liikenteen suunnittelussa. Ohjearvoille ei ole säädetty määräaika, johon mennessä ne olisi saavutettava. Raja-arvot ja ohjearvot on esitetty taulukoissa 1a ja 1b.

**Taulukko 1a.** Raja-arvot ilman hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) pitoisuuksille ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) vuorokausi- ja vuosikeskiarvoina.

Vuosi	Vrk-keskiarvo	Ylityksiä kpl	Vuosikeskiarvo
2005	50	35	40

**Taulukko 1b.** Ohjearvot hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) ja kokonaisleijuman (TSP) pitoisuuksille ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) vuorokausi- ja vuosikeskiarvoina.

	Vrk-keskiarvo	Määrittely	Vuosikeskiarvo
$PM_{10}$	70	kuukauden toiseksi korkein vuorokausipitoisuus	-
TSP	120	vuoden vuorokausiarvojen 98. prosenttipiste	50

Suomen kannalta tärkeä on EU:n raja-arvoille annettu poikkeama, jonka mukaan jäsenvaltiot voivat nimetä ne alueet tai taajamat, joissa  $PM_{10}$ -pitoisuudelle asetetut raja-arvot ylittyvät teiden talvihiekoituksesta aiheutuvan hiukkasleijuman vuoksi (1999/30/EY 5 artiklan 5 kohta). Jäsenvaltioiden on esitettävä tarpeelliset perustelut, jotka osoittavat ylitysten johtuvan kyseisestä leijumasta. Vastaavat säännökset sisältyvät ilmanlaatuasetuksen 13 §:ään. Katupölyn tutkimusprojekti liittyy

olennaisesti tähän ongelmaan. Tätä ennen ei ole riittävän hyvin selvitetty, mikä osuus eri lähteillä on keväisen katupölyn muodostuksessa.

Ilmassa leijuva pöly on erittäin merkittävä terveyshaitta. WHO:n mukaan (2000) ei ole terveydellisesti vaaratonta hiukkaspitoisuuden alarajaa, vaan haitat lisääntyvät lineaarisesti jo pienistä pitoisuuksista. Ilman hiukkaspitoisuuden ( $PM_{10}$ ) lisääntyminen  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  vaikuttaa lyhytaikaisena lisäyksenä 0,7 % kuolemantapauksissa, 0,8 % hengityssairaiden sairaalaan otoiissa, 3,2-3,6 % hengityselinoireissa, 3 % asmaatikkojen kohtauslääkityksessä. Pitkän aikavälin lisäyksenä vastaava hiukkaspitoisuuden nousu vaikuttaa 10 % kuolemantapauksissa ja 29 % keuhkoputkentulehduksissa. Ranskassa, Itävallassa ja Sveitsissä tehdyn terveystutkimuksen (Kunzli ym., 2000) mukaan ilman hiukkaset ( $PM_{10}$ ) aiheuttavat 6 % kuolemantapauksista eli 40 000 tapausta vuosittain. Puolet näistä aiheutui liikenteen hiukkaspäästöistä, joiden arvioitiin aiheuttavan myös yli 25 000 kroonista keuhkoputkentulehdusta aikuisilla, yli 290 000 keuhkoputkentulehdustapausta lapsilla sekä yli 500 000 astmakohtausta.

Sosiaali- ja terveysministeriön ja ympäristöministeriön julkaisemassa kansallisessa ympäristöterveysohjelmassa (Holopainen 1997) on arvioitu yhdyskuntailman epäpuhtauksien, erityisesti hiukkasten lyhytaikaisten pitoisuusvaihteluiden aiheuttavan Suomessa vuosittain 200-400 ennen aikaista kuolemaa, 30 000 astmaoireiden pahentumista ja 30 000 - 40 000 lasten hengitystieinfektiota. Katupölyn terveysvaikutuksista ei vielä ole selvää käsitystä. Toisaalta tiedetään, että suurimmat haittavaikutukset ovat pienhiukkasilla, kun taas katupölyn massan pääosa on karkeammassa hiukkasissa. Toisaalta taas keväinen katupöly on sekoitus kaikenkokoisia ja erilaisista lähteistä peräisin olevia hiukkasia, joissa pienhiukkaset ovat agglomeroituneet suurempien pinnoille. Katupöly sisältää myös kaduille kertyneitä mikrobeja, joilla voi olla hengityselimistöissä haitallisia terveysvaikutuksia (Salonen ym. 2004).

Suomessa pidetään yleisesti hiekoitushiekkaa pääasiallisena keväisen katupölyn aiheuttajana. Ulkomailla (mm. Japani, USA ja Norja) on kiinnitetty runsaasti huomiota nastarenkaiden aiheuttamaan asfaltin kulumiseen ja siitä syntyvään pölyyn, minkä vuoksi on rajoitettu nastarenkaiden käyttöä (Fukuzaki ym., 1986, Noguchi ym., 1995).

Myös Suomessa on esitetty, että nastarenkaiden irrottamalla pölyllä saattaa olla huomattava vaikutus. Arviot nastarenskaista aiheutuvasta tien pinnan kulutuksesta vaihtelevat suuresti. Lampinen (1993) päätyi väitöskirjassaan v. 1993 asfaltin kulumisen osalta arvioon 107 000 tonnia/vuosi. Asfaltin kulumista on saatu vähennetyksi sekä asfalttimateriaalin että nastojen koon ja metallikoostumuksen muutoksella. Mäkelän (2000) uudempien arvioiden mukaan nastojen aiheuttama teiden kuluma on noin 47 000 t/v. Siitä vain osa nousee hienojakoisena pölynä ilmaan, eri arvioiden perusteella 5-20% eli 2 100 – 10 400 t/v. Määrä on kuitenkin varsin suuri, jos sitä vertaa Suomen kaikkiin hiukkaspäästöihin ( $PM_{10}$ -päästöt; mukaanluettuna liikenne), jotka olivat 54 800 t vuonna 2002 (Suomen

ympäristökeskus 2004). On myös huomattava, että merkittävä osa asfaltista peräisin olevasta hiukkasmassasta kasautuu vilkkaasti liikennöidyissä kaupunkikeskuksissa talven aikaan katujen varsille ja nousee keväällä katujen kuivuessa lyhyen ajanjakson aikana ilmaan ihmisten hengityskorkeudella. Hiukkasmassan laskeuduttua takaisin katujen pinnoille se saattaa niistä nousta yhä uudelleen ilmaan. Siten pääosin sama hiukkasmassa voi aiheuttaa useita korkeita pitoisuuksia.

Sen selvittäminen, johtuuko ilmassa leijuvien hiukkasten suuri määrä hiekoitushiekan käytöstä, ei ole helppoa. Tutkimuksen pääongelma aiheutuu siitä, että yleisesti käytetty hiekoitusmateriaali on koostumukseltaan samankaltaista kuin asfaltin tekoon käytettävä kiviaines, jota on asfaltissa 90-95 %. Lisäksi asfaltissa on bitumia, mutta sen ainesosia ei voida käyttää asfaltista irronneen materiaalin tunnistukseen, koska samantapaista hiukkasmassaa tulee kaduille mm. autojen renkaista ja pakokaasuista sekä energiantuotannon hiukkaspäästöjen laskeutumisena. Toisin sanoen: hiekoitushiekasta ja tien pinnasta jauhautuvia hiukkasia on erittäin vaikea erottaa toisistaan kemiallisilla analyyseillä tai muilla menetelmillä. Sen vuoksi tämän projektin yhtenä tehtävänä on ollut kehittää tutkimusmenetelmiä, joilla ongelmaa voidaan luotettavasti selvittää.

## 2. PROJEKTIN KUVAUS

### 2.1. TAVOITTEET JA TEHTÄVÄT

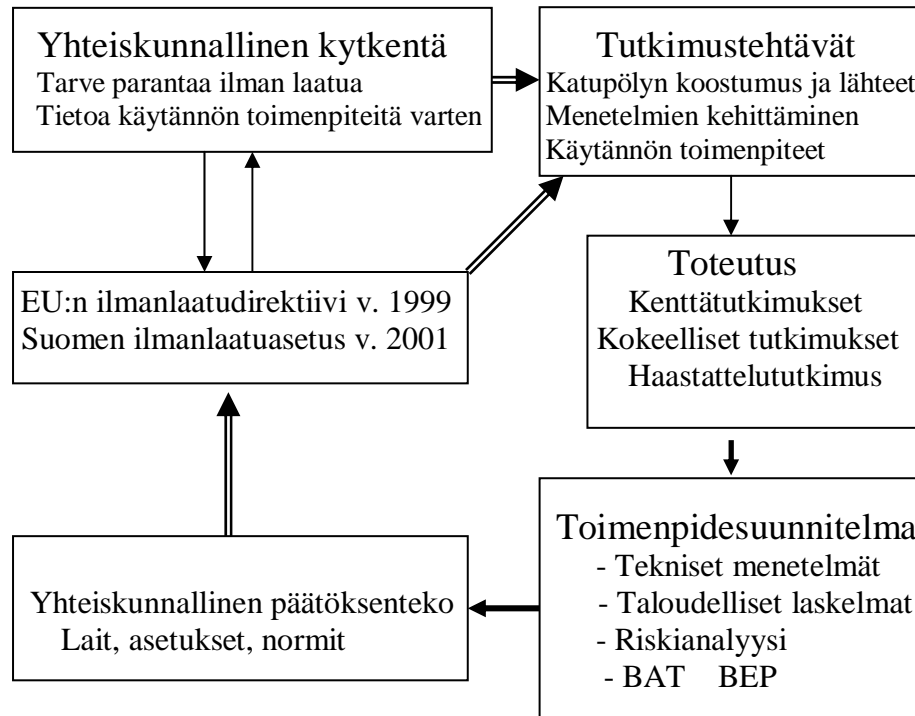
Katupölyprojektin tavoitteet ja tehtävät ovat muodostuneet edellä esitellyistä ongelmista. Projektilla on tiivis kytkeä yhteiskunnan tarpeisiin, kuten kuvassa 1 osoitetaan.

**1.Päätavoitteena** on ollut tutkia katupölyn koostumusta ja lähteitä. Ongelma on fokusoitu voimassa olevien säädösten perusteella hengitettäviin hiukkasiin eli sellaisiin, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 10 mikrometriä (kuvataan lyhenteellä  $PM_{10}$ ,  $PM$  = particulate matter). Kenttätutkimuksissa on käytetty materiaaleina myös hiukkasten kokonaisleijumasta (TSP) kerättyjä näytteitä, koska hengitettävistä hiukkasista ei ole aina ollut saatavana käyttökelpoista tutkimusaineistoa. TSP-näytteiden tutkimus on ollut tarpeen myös sen vuoksi, että Suomessa ovat edelleen voimassa TSP-ohjeet (taulukko 1b). Kokeellisissa tutkimuksissa on selvitetty  $PM_{10}$ - ja TSP-hiukkasmassojen koostumuksen yhtäläisyyttä ja eroja.

Erityisesti on ollut tarpeen tutkia, kuinka suuri osa katupölystä on peräisin

- hiekoitushiekasta
- nastarenkaiden aiheuttamasta tien kulumisesta
- renkaiden kulumisesta
- polttoeräisistä lähteistä, mm. autojen pakokaasuista
- muista lähteistä

2. Toisena tavoitteena on ollut kehittää menetelmiä, joilla voidaan luotettavasti selvittää hiekoitushiekan ja asfaltin materiaalin osuus katupölyssä erilaisissa olosuhteissa.
3. Tärkeänä tavoitteena on myös ollut aineiston tuottaminen katupölyongelmiin liittyvään päätöksentekoon ja käytännön toimenpiteisiin.



**Kuva 1.** Katupölyn tutkimusprojektin tehtävät ja toteutus sekä yhteiskunnallinen kytkentä. (BAT = Best Available Techniques, paras käytettävissä oleva teknologia; BEP = Best Environmental Practices, paras ympäristökäytäntö).

## 2.2. TOTEUTUS

Projektin **TOTEUTUS** on koostunut kolmesta osaprojektista (kuva 1), joista kaksi ensimmäistä on sisältänyt menetelmien kehittämisen:

1. Kenttätutkimukset, joissa katupölyn koostumusta ja lähteitä on tutkittu erilaisissa katuolosuhteissa.
2. Kokeelliset tutkimukset, joissa on selvitetty erilaisten tekijöiden vaikutusta katupölyn muodostukseen.
3. Haastattelututkimus, jossa on selvitetty eri sektoreiden asiantuntijoiden näkemyksiä katupölyongelmasta sekä toimenpiteistä haittojen vähentämiseksi.

Projekti on toteutettu laajassa yhteistyössä rahoittajien ja muiden yhteistyökumppaneiden kanssa. Toiminta on perustunut verkostoitumiselle, jossa eri tahojen asiantuntemusta ja laitteistoja on käytetty mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti.

#### Projektin rahoittajat

MOBILE<sup>2</sup> (Liikenteen ja kuljetusten ympäristövaikutukset ja energiankäyttö, tutkimuskokonaisuus), Ympäristöministeriö, Liikenne- ja viestintäministeriö, Tiehallinto, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV, Tekniikan Edistämiskeskus TEKES, Licentia Oy, Helsingin kaupungin ympäristövirasto, Lappeenrannan ympäristövirasto, K. H. Renlundin Säätiö, Nokian Renkaat Oyj, Tikka-Nastat Oy, Suomen luonnonvarain tutkimussäätiö.

#### Muut yhteistyökumppanit

Helsingin kaupungin rakennusviraston katuosasto, Ilmatieteen laitos, Lemminkäinen Oyj, Fortum Oyj, Lohja-Rudus Oy Ab, Interrock Oy, Helsingin yliopiston (HY) Biotekniikan Instituutin Elektronimikroskopian yksikkö, HY biologisten ja ympäristötieteiden laitos, HY fysikaalisten tieteiden laitos, Teknillisen korkeakoulun Elektroniikan valmistuksen laboratorio, Top Analytica Oy, Helsingin kaupungin rakennusviraston katulaboratorio, Hangon ympäristövirasto, Tammisaaren ympäristövirasto, Envimetria Oy, Imatran ympäristövirasto, Transportøkonomisk institutt Norge, Väg- och transportforskningsinstitutet Sverige, lukuisat tutkijat ja alan ammattilaiset.

#### Käytännön toteutus

Projektin toteuttajana on ollut Nordic Envicon Oy. Vastuullisena johtajana on toiminut dosentti Heikki Tervahattu, päättökijana MMM Kaarle Kupiainen ja muina tutkijoina FM Mika Räisänen ja MMM Jarkko Niemi. Projekti käynnistyi kenttätutkimuksilla vuoden 2000 alussa. Kokeelliset tutkimukset käynnistyivät keväällä 2001. Projekti päättyi vuoden 2004 lopussa, mutta siihen liittyviä projekteja jatketaan senkin jälkeen. Projektin tuloksista on ilmestynyt 24 artikkelia ja raporttia (liite 2). Lisäksi tuloksia on esitelty lukuisissa tilaisuuksissa Suomessa ja ulkomailla sekä lehdistössä, radiossa ja televisiossa.

Tutkimustulokset antavat arvokasta tietoa katupölyn vähentämiseen tähtäävien käytännön toimenpiteiden kannalta. Niiden pohjalta voidaan arvioida hiekoituksen osuus katupölyn muodostuksessa ja laatia perusteluja alussa mainitun ilmanlaatuasetuksen 13 §:ssä tarkoitettuja hiekoituksesta aiheutuvia raja-arvojen ylitystilanteita varten. Yhteistyössä eri tahojen kanssa voidaan myös laatia käytännön toimenpidesuosituksia niiden organisaatioiden kanssa, jotka ovat tekemisissä katupölyongelman kanssa tavalla tai toisella. Tällaisia ovat mm. tieliikenneviranomaiset (valtakunnalliset, alueelliset, paikalliset), ympäristöviranomaiset (valtakunnalliset, alueelliset, paikalliset), alalla toimivat tutkijat, katujen kunnossapidosta vastaavat viranomaiset, katujen kunnossapitoalalla toimivat yritykset, asfaltin ja sen materiaalien valmistajayritykset, hiekoitusmateriaalin valmistaja- ja käsittely-yritykset, autonrenkaiden

valmistajayritykset, rengasnastojen valmistajayritykset, alan suunnittelu- ja konsultointiyritykset (kuva 1).

### 3. KATUPÖLYN MUODOSTUMINEN ASFALTISTA JA HIEKOITUSHIEKASTA – KOKEELLISIA TUTKIMUKSIA

Kaupunkiolosuhteissa tavattava katupöly on sekoitus monenlaisia hiukkasia useista eri lähteistä (Rogge ym., 1993). Erityisesti keväisin tavattavien korkeiden katupölytilanteiden tärkeimmäksi komponentiksi on havaittu mineraaliperäinen pöly (Pakkanen ym. 2001). Sen tärkeimpinä lähteinä ovat nastarenkaiden aiheuttama tien pinnan kulutus ja hiekoitushiekka. Kuitenkaan ei ole pystytty määrittelemään näiden lähteiden osuuksia pölyssä vaihtelevissa kenttäolosuhteissa. Ajoneuvojen pakokaasuista sekä jarrujen, renkaiden ja muiden autonosien kulumisesta ilmaan pääsevät hiukkaset tuovat oman lisänsä asfaltista ja talvihiekoituksesta syntyvien mineraaliperäisten hiukkasten joukkoon. Lisäksi tienpinnoille laskeutuu kauempaa kulkeutuneita hiukkasia. Kenttäoloissa tämä monimuotoisuus vaikeuttaa katupölyn koostumuksen tutkimista ja johtopäätösten tekemistä eri päästölähteiden merkityksestä hiukkasmassassa. Tämän monimuotoisuuden eliminoimiseksi tehtiin Katupöly-projektin yksi osa Fortumin koeradalla suljetussa tilassa. Koska muiden hiukkaslähteiden vaikutus on rajattu pois, on koeradalla pystytty tutkimaan pelkästään hiekoitushiekasta, asfaltista ja renkaista syntyvää pölyä.

#### 3.1. KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN TOTEUTUS

Koeradalla suoritettavan osaprojektin tavoitteena oli saada tarkempaa tietoa tekijöistä, jotka vaikuttavat hiekoituksen ja tienpinnan kulumisen seurauksena syntyvien hiukkasten määrään ja koostumukseen. Tutkittuja tekijöitä olivat seuraavat:

- Hiekoituksen määrä
- Hiekoitusmateriaalin kiviaineskoostumuksen vaikutus
- Hiekoitusmateriaalin raekoon vaikutus
- Asfaltin kiviaineksen vaikutus
- Renkaiden (nastarengas/kitkarengas) vaikutus
- Ajonopeuden vaikutus

Lisäksi tutkittiin hiukkasten kokovaihtelua ja pienhiukkasten muodostumista.

Esitutkimuksessa rata oli päällystetty AB12-massalla, jonka kiviaines oli Tornioista toimitettua ferrokromikuonaa. Siitä peräisin oleva hiukkasmassa voitiin tunnistaa korkean kromin (5-7%) ja magnesiumin (25-27%) pitoisuuksien perusteella. Radalle levitettiin hiekoitusmursketta, jonka mineraalikoostumus tunnettiin. Kokeessa kerätty hiukkasmassa (TSP) tutkittiin yksittäishiukkasmenetelmällä, jolloin voitiin erottaa toisistaan asfaltista ja hiekoitushiekasta peräisin olevat hiukkaset. Näin saatiin selville näiden kahden lähteen osuus leijuvassa pölyssä ja varmuus siitä, että kyseistä

koerataa voidaan käyttää katupölyn muodostuksen tutkimuksissa. Edellytyksenä kuitenkin oli, että asfaltin ja hiekoitushiekan kiviainekset poikkeavat riittävästi toisistaan, jotta ne voidaan analyytisesti identifioida ja erotella tilastollisin menetelmin. Lisäksi tuli käyttää yleisesti käytössä olevia kivimateriaaleja sekä asfaltin valmistukseen että hiekoitukseen.

Kaikkiaan tehtiin 59 koesarjaa kolmessa jaksossa. Kahdessa ensimmäisessä koesarjassa asfaltin kiviaineksena käytettiin Patavuoren vulkaniittia, jossa on 53% sarvivälkettä. Hiekoitukseen käytettiin materiaaleja, joissa ei ollut sarvivälkettä lainkaan, joten asfaltista peräisin oleva hiukkasmateriaali voitiin tunnistaa tämän mineraalin avulla. Kolmannessa koesarjassa käytettiin asfaltin valmistukseen Malmgårdin graniittia ja tarkoituksena oli tutkia, onko asfaltin kiviaineksella vaikutusta katupölyn muodostukseen. Asfaltin ja hiekoitusmateriaalien kiviainesten mineraalikoostumus on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Kokeissa käytettyjen kiviainesten mineraalikoostumus (%), käyttötarkoitus, mineraalien kemiallinen kaava ja lujuusominaisuudet. Patavuoren vulkaniittia käytettiin asfaltin kiviaineksena vuosina 2001-2002 ja hiekoitusmateriaalina vuonna 2003. Graniitteja käytettiin hiekoitusmateriaaleina 2001-2002 ja asfaltin kiviaineksena 2003.

Käyttötarkoitus	Ämmässuo graniitti Hiekoitus 2001-2002	Malmgård graniitti Asf. 2003	Diabaasi Hiekoitus 2001- 2003	Patavuoren vulkaniitti Asf. 2001-2002 Hiekoitus 2003	Kemiallinen kaava
Kvartsi	30.4	28.4			SiO <sub>2</sub>
Kalimaasälpä	29.6	26.3			KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Plagioklaasi	32.4	39.4	57.4	29.4	(Na,Ca)Al(Si, Al)Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
Biotiitti	5.9	1.8	3.8		K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Al, Fe)Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub>
Sarvivälke				53	Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>4</sub> Al (Si <sub>7</sub> Al)O <sub>22</sub> (OH ,F) <sub>2</sub>
Klinopyrokseeni			17.3		(Ca,Mg,Fe) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (Augite)
Oliviini			17.5		(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Kummingtoniitti- gruneriitti				12.8	(Mg,Fe) <sub>7</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>2 2</sub> (OH) <sub>2</sub>
Muut	1.7	4.1	4	4.8	
STT*	20.7	5.2	11.6	6.2	
LA**	42/43	15/24	16/23	11/17	

\*STT = kuulamylyarvo – STT arvo kertoo kiviaineksen kykyä vastustaa nastarenkaiden aiheuttamaa raapivaa/hiovaa kulutusta; arvo on sitä pienempi (parempi), mitä vähemmän kiviaines kuluu testissä (SFS 1998b).

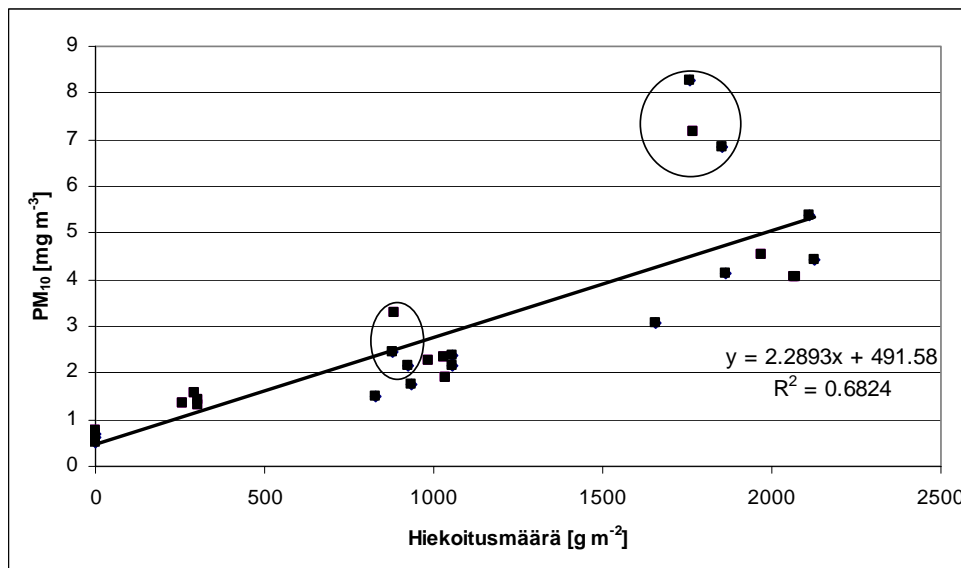
\*\*LA = Los Angeles-luku raekoolle 10-14/4-5.6 mm – Los Angeles testin (SFS 1998a) avulla määritetään kiviaineksen iskunkestävyyttä ja LA-arvo on vastaavasti sitä parempi, mitä pienempi se on, koska sekin kuvaa testissä hienontuneen kiviaineksen määrää.

Yksittäisten hiukkasten alkuainekoostumusta tutkittiin kerätyistä näytteistä pyyhkäisyelektronimikroskoopilla ja siihen kytketyllä mikroanalysaattorilla (SEM/EDX-laitteistolla, Zeiss DSM-962 ja Link ISIS, mittausohjelmana ZAF-4). Alkuainekoostumuksen perusteella voitiin määrittää, mitä mineraalia kukin hiukkanen edusti. Hiukkasten jakaantumista eri mineraalilajeihin käytettiin perustana laskettaessa tilastollisesti asfaltin kiviaineksesta ja hiekoitushiekasta peräisin olevan pölyn määriä. Pölyn mineraalikoostumuksen lisäksi tutkittiin pölyssä olevia hiilipitoisia hiukkasia, jotta saataisiin selville renkaista ja bitumista peräisin olevan pölyn määrä. Ilmatieteen laitoksella määritettiin orgaanisen ja mustan hiilen osuudet näytteissä termo-optisella menetelmällä (Birch & Cary 1996).

## 3.2. KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN TULOKSET

### 3.2.1. Hiekoituksen vaikutus pölyn muodostukseen

Hiekoituksen käyttö lisäsi suuresti ilmassa leijuvan hengitettävän pölyn ( $PM_{10}$ -hiukkasten) määrää. Hiekan määrä vaikutti niin, että käytettäessä  $300 \text{ g/m}^2$  hiukaspitoisuus lisääntyi kaksinkertaiseksi hiekoittamattomaan tilanteeseen verrattuna (kuva 2). Levitettäessä hiekkaa  $1000 \text{ g/m}^2$  kohosi ilman  $PM_{10}$ -pitoisuus nelinkertaiseksi ja jopa 9-kertaiseksi, kun hiekkaa käytettiin  $2000 \text{ g/m}^2$ . Pölyn lisääntyminen oli merkittävää kaikilla hiekoitus- ja asfalttilaaduilla.



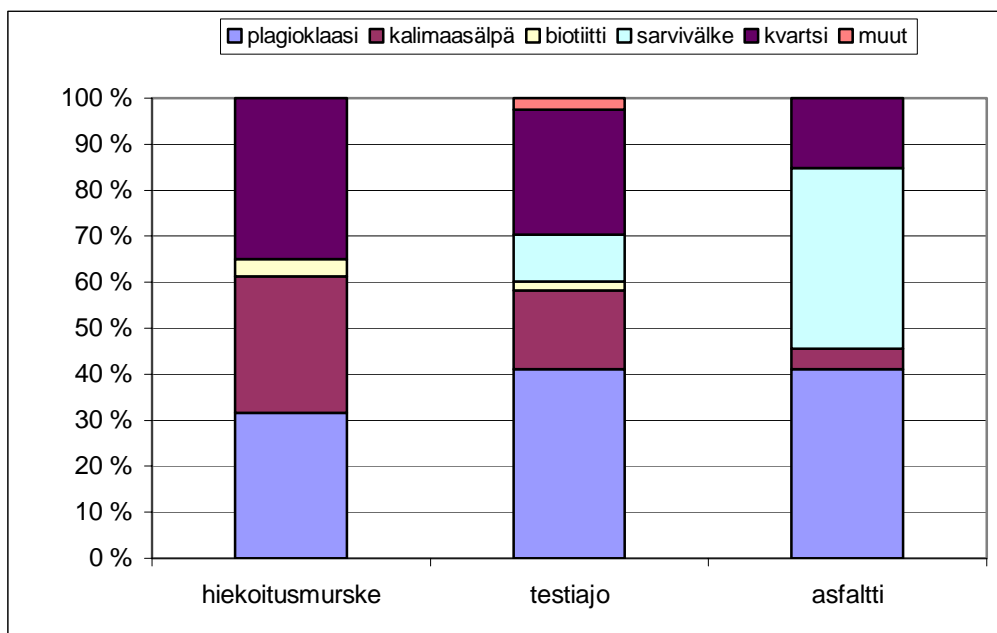
**Kuva 2.** Hiekoitusmäärän vaikutus  $PM_{10}$ -pitoisuuksiin (kaikissa kokeissa käytetty nastarenkaita). Iskunkestävyydeltään huono hiekoitusmurske (ympyröity) aiheutti muita murskeita enemmän pölyä varsinkin runsaasti käytettynä.

Käytettäessä hiekoitukseen iskunkestävyydeltään heikkoa Ämmäsuon graniittia (kts. STT- ja LA-arvot taulukossa 2), pölyn määrä oli huomattavasti suurempi kuin iskunkestävyydeltään lujemmilla hiekoitusmateriaaleilla. Jos nämä tulokset (rengastettu kuvassa) otetaan pois, nousee  $R^2$  arvoon 0.934 eli hiekoituksen määrä



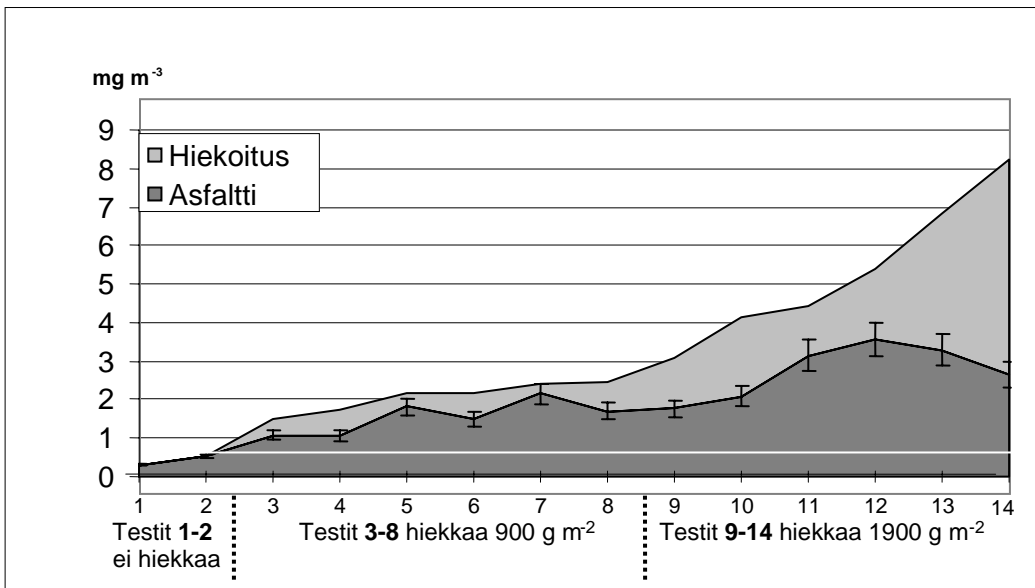
selittää erittäin pitkälle hengitettävän pölyn määrän näissä koeolosuhteissa. Tämän perusteella voisi ehkä päätellä, että PM<sub>10</sub>-pöly olisi pääosin peräisin hiekasta.

Kuitenkaan kuvassa esitetyt tulokset eivät kerro mitään pölyn alkuperästä. Sitä selvitetiin tutkimalla yksittäishiukkasmenetelmällä hiukkasten mineraalikoostumusta. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaistettuna kolmen näytteen mineraalikoostumukset. Siitä ilmenee, että hiekoitusmurskeessa (vasen pylväs) ei ollut lainkaan sarvivälkettä, jota puolestaan oli runsaasti asfaltin kiviaineksessa (oikea pylväs). Hiekoitusmurskeessa puolestaan oli runsaasti kvartssia ja kalimaasälpää, joita asfaltissa oli hyvin vähän. Kuvan keskellä on hiukkasnäyte testiajosta, jossa on käytetty vasemman pylvään hiekoitusmursketta ja oikean pylvään asfalttia. Kuvasta nähdään, että koeajon näyte sisältää runsaasti asfaltista peräisin olevaa sarvivälkettä ja toisaalta kvartssia ja kalimaasälpää selvästi enemmän kuin asfaltin kiviaines. Voidaan siten todeta, että testiajon PM<sub>10</sub>-hiukkasmassa on peräisin sekä asfaltista että hiekoitusmurskeesta. Mineraalien keskinäisten suhteiden perusteella voidaan laskea, kuinka suuri osuus PM<sub>10</sub>-massassa on kummastakin lähteestä peräisin.



**Kuva 3.** PM<sub>10</sub> näytteiden mineraalikoostumus SEM/EDX-analyyseissä. Testiajossa on käytetty 1000 g m<sup>-2</sup> vasemman pylvään hiekoitusmursketta. Asfaltin hiukkaskoostumus on määritetty testiajosta, jossa ei ole käytetty hiekoitusta. Kokeissa käytetty nastarenkaita.

Laskelmat osoittivat, että keskimäärin noin 70 prosenttia hiukkasmassasta oli peräisin asfaltista (vaihteluväli 32-97 %). Vaikka hiekoituksen käyttö lisäsi suuresti hengitettävän pölyn määrää, oli pääosa hiukkasmassasta kuitenkin peräisin asfaltista. Analyysien perusteella tultiin siihen johtopäätökseen, että hiekan jauhautuminen hienojakoiseksi pölyksi oli vain osatekijä pölyn muodostuksessa. Pölyn määrän suuri lisääntyminen hiekoituksen vaikutuksesta on johtunut lisäksi siitä, että auton renkaat jauhavat hiekkaa asfalttia vasten, jolloin asfaltista irtoaa hienojakoista pölyä. Annoimme tälle ilmiölle nimen **hiekkapaperi-ilmiö** (englanniksi sandpaper effect). Tätä ilmiötä ei aikaisemmin ole tunnettu, joskin eräissä tutkimuksissa on oletettu, että tien pinnalla oleva irtain aines voi kuluttaa asfaltin pintaa (Kanzaki ja Fukuda 1993, Lindgren 1998). Hiekkapaperi-ilmiö tapahtuu myös siten, että asfaltista irronnut materiaali kuluttaa edelleen asfalttia.



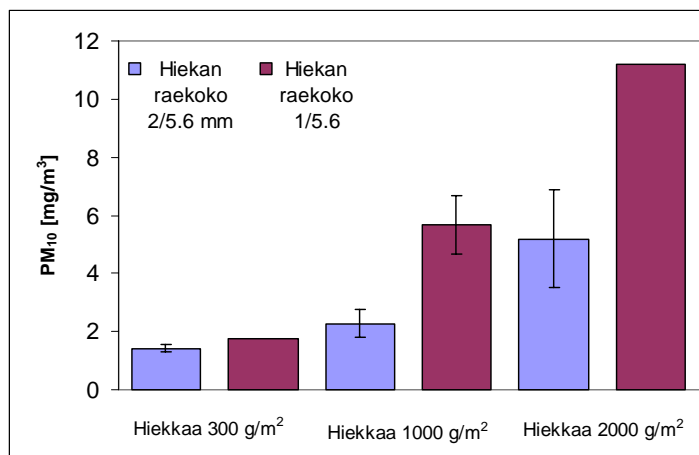
**Kuva 4.** Hiekoitushiekasta ja asfaltista peräisin olevien hiukkasmassojen osuus  $PM_{10}$ -pitoisuuksista hiekoitusmäärän funktiona (kaikissa kokeissa käytetty nastarenkaita, myös hiekoitusmateriaalin raekoko oli kaikissa sama – 2/5.6 mm). Testeissä 1-2 ei hiekkaa käytetty. Hiekoitus lisäsi suuresti myös asfaltista peräisin olevaa pölyä: kaikki valkean linjan yläpuolella oleva asfalttiperäinen pöly on muodostunut hiekanjyvien kuluttaessa asfalttia renkaiden alla (hiekkapaperi-ilmiö).

Hiekkapaperi-ilmiön vaikutus ja mittasuhteet näkyvät hyvin kuvasta 4. Siinä on tulokset 14 testiajossa, joissa hiekoituksen määrää on lisätty vasemmalta oikealle mentäessä. Vasemmassa reunassa on kaksi ajoa ilman hiekoitusta. Näissä  $PM_{10}$ -hiukkasmassa on kokonaan peräisin asfaltista. Kuvan valkea linja kuvaa siis tätä tasoa, jolla hiukkaspitoisuus on ilman hiekoitusta. Kaikissa muissa ajoissa on käytetty hiekoitusta ja hengitettävän pölyn määrä on lisääntynyt voimakkaasti. Samalla on kuitenkin asfaltista peräisin olevan hiukkasmassan määrä lisääntynyt ja se muodostaa valtaosan  $PM_{10}$ -pitoisuuksista lukuunottamatta sellaisia testiajoja, joissa on käytetty hyvin paljon huonolaatuista hiekoitusta (testit 13 ja 14 kuvassa 4).

### 3.2.2. Hiekoitusmateriaalin vaikutus pölyn muodostukseen

Tässä raportissa käytetään nimitystä hiekoitushiekka yleisnimityksenä kaikelle käytetylle hiekoitusmateriaalille. Se ei ota kantaa materiaalin alkuperään tai tuotantotapaan, raekokojakaumaan, tai murskaukseen (kalliomurske, soramurske, kuiva- tai pesuseulottu materiaali, seulomaton luonnon hiekka). Useimmat käytetyt materiaalit sekä kokeissa että kentällä olivat murskeita. Käsittelemätöntä luonnon kivimateriaalia käytettiin kokeissa nimellä sora. Lisäksi Lappeenrannassa käytettiin luonnon murskaamatonta hiekkaa.

Tässä projektissa on tutkittu sekä hiekoitusmateriaalin raekokojakauman että kiviaineksen koostumuksen, rakenteen ja lujuuden vaikutuksia hengitettävän pölyn muodostukseen. Käytettäessä hienojakoista hiekoitusmateriaalia (1/5.6 mm; tarkoittaa materiaalia, jonka pienin raekoko on 1 mm ja suurin 5.6 mm) lisääntyivät  $PM_{10}$ -pitoisuudet suuresti verrattuna karkeampaan (2/5.6 mm; pienin raekoko 2 mm ja suurin 5.6 mm) hiekoitusmurskeeseen (kuva 5). Vaikutus korostui käytettäessä runsaasti hiekoitusta. Sama tulos saatiin sekä nasta- että kitkarenkailla. Tuloksista pääteltiin, että sekä hiekkapaperi-ilmiön synnyttämä asfalttiperäinen pöly että hiekoituksesta peräisin oleva pöly riippuvat jauhavan ja jauhettavan pinnan suuruudesta. Hienojakoisen hiekan kyseessä ollen materiaalin pinta-ala suhteessa levitettävään massaan on suurempi ja aiheuttaa siten voimakkaamman pölyn muodostuksen.



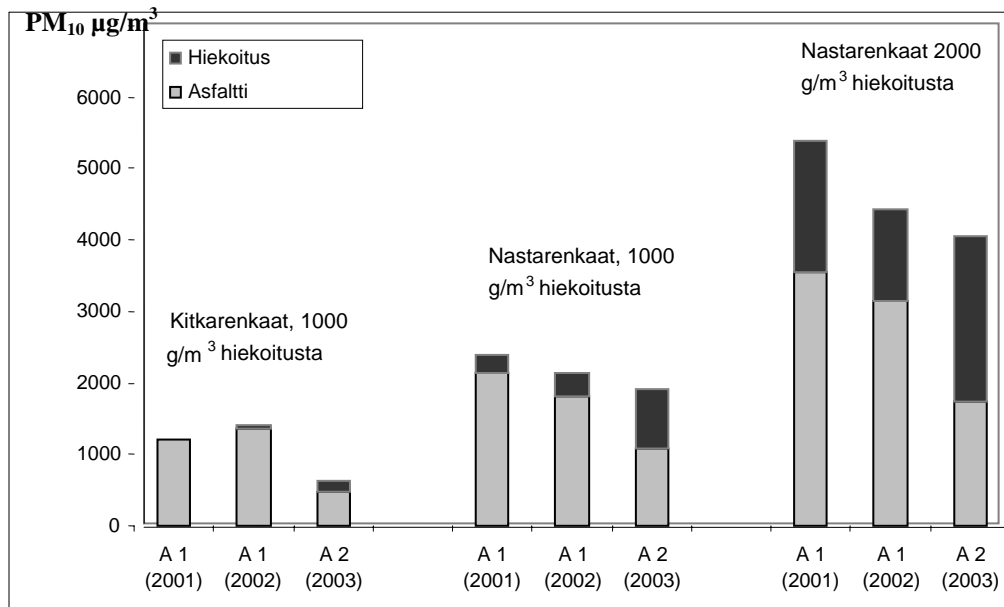
**Kuva 5.** Hiekoitusmateriaalin raekoon vaikutus ilman  $PM_{10}$ -pitoisuuksiin käytettäessä erisuuruisia hiekoitusmääriä. Hienojakoinen hiekoitusmurske (raekoko 1/5.6 mm) tuottaa enemmän hengitettävää pölyä; ero karkeampaan hiekkään (raekoko 2/5.6 mm) kasvaa hiekoitusmäärän lisääntyessä.

Hiekoitusmateriaalin iskunkestävyysominaisuuksien vaikutuksesta mainittiin jo edellä, että ominaisuuksiltaan huonolaatuinen Ämmäsuon graniitti aiheutti enemmän pölynmuodostusta kuin lujemmat kivilajit. Heikkojen murskeiden kivi- ja mineraalirakeet rikkoutuvat helpommin pienemmiksi kuluviksi ja kuluttaviksi osiksi. Diabaasi valittiin kokeisiin hiekoitusmateriaaliksi, koska sen

iskunkestävyysominaisuudet tiedettiin hyväksi (taulukko 2). Oletamus osoittautui sikäli oikeaksi, että diabaasia käytettäessä hiekoitusmateriaalista peräisin olevan pölyn määrä jäi vähäiseksi. Kuitenkin kokonaispölyn määrä oli varsin suuri, mikä johtui siitä, että diabaasilla oli tehokas hiekkapaperivaikutus ja asfalttiperäistä pölyä syntyi runsaasti.

### 3.2.3. Asfaltin kiviaineksen vaikutus pölyn muodostukseen

Asfaltin kiviaineksella voi olla vaikutusta hengitettävän pölyn muodostukseen, minkä vuoksi siihen on tarpeen kiinnittää huomiota asfaltin valmistuksen yhteydessä erityisesti vaikeimmilla pölyalueilla sekä esimerkiksi hiljaisen päällysteen tuotekehittäelyssä. Asfaltin laatuun vaikuttaa eniten käytetyn kiviaineksen laatu ja seuraavaksi asfalttityyppi. Asfalttityypit erotellaan mm. niissä käytettävän kiviaineksen raekokojakauman mukaan. Kulutuskestävin asfaltti sisältää runsaasti raekooltaan karkeampia kivirakeita. Vilkkaimmin liikennöidyillä kaduilla käytetään kivimastiksiasfalttia (SMA), joka sisältää runsaasti karkeampia (>8 mm) kivirakeita. Asfalttityyppejä on lukuisia, ja niiden pääpiirteet käyvät ilmi Päällystealan neuvottelukunnan (PANK ry.) kirjasta Asfalttinormit 2000. Asfaltin kiviaineksen luokittelu perustuu kykyyn vastustaa nastojen aiheuttamaa raapivaa kulutusta, liikennemäärään ja ajonopeuteen (PANK 2000).



**Kuva 6.** Hiekoituksesta ja asfaltista peräisin olevat PM<sub>10</sub>-pitoisuudet käytettäessä kahta asfaltin kivimateriaalia: Patavuoren vulkaniittia A1-kokeissa 2001 ja 2002 sekä Malmgårdin graniittia A2-kokeissa 2003. Kaikissa kokeissa Eurajoen diabaasi hiekoitusmateriaalina. Kokeita tehtiin sekä kitka- että nastarenkailla ja eri suuruisilla hiekoitusmäärillä.

Projektissa tutkittiin asfaltin kiviaineksen vaikutusta hengitettävän pölyn muodostukseen käyttämällä kahta materiaalia. Niiden kiviaineksina olivat hyvän kulutuskestävyyden omaavat Patavuoren vulkaniitti ja Malmgårdin graniitti (taulukko

2). Kummassakin tapauksessa muodostui runsaasti  $PM_{10}$ -hiukkasmassaa, kuitenkin vähän enemmän käytettäessä vulkaniittia (kuva 6). Kun molemmilla asfalttilaaduilla käytettiin samaa hiekoitusmateriaalia (Eurajoen diabaasi), muodostui vulkaniitilla keskimäärin 20 prosenttia enemmän pölyä. Ero oli tilastollisesti melkein merkitsevä (Sign testi,  $p=0.063$ ,  $n=4$ ).

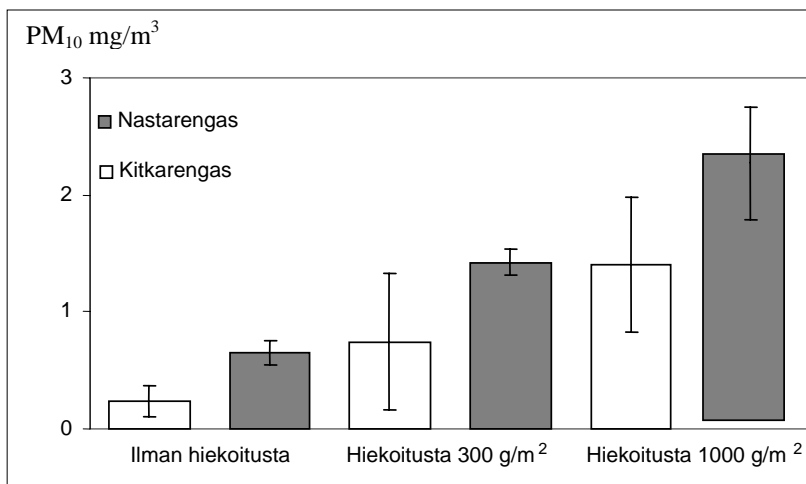
Tutkittiin myös sitä, oliko pölyn koostumuksessa ja lähteissä eroa käytettäessä erilaisia asfaltin kiviaineksia ja molemmissa tapauksissa diabaasia hiekoitukseen. Havaittiin, että asfaltista peräisin olevan hiukkasmassan määrä oli suhteellisesti pienempi (keskimäärin vain puolet) silloin, kun graniittia oli käytetty kiviaineksena. Toisaalta hiekoitusdiabaasista peräisin olevan  $PM_{10}$ -hiukkasmassan määrä oli jonkin verran suurempi graniittiperustaisella asfaltilla. Tämä kokeet osoittavat, että katupölyn muodostuksessa on merkitystä sekä asfaltin että hiekoitusmateriaalin kiviaineksilla samoin kuin niiden keskinäisellä vuorovaikutuksella.

### 3.2.4. Renkaiden vaikutus pölyn muodostukseen

Jotta saataisiin selville nastarenkaiden vaikutus hengitettävän pölyn muodostukseen, käytettiin sekä nasta- että kitkarenkaita. Nastarenkaat ovat Suomessa henkilö- ja pakettiautoissa vallitseva rengastyyppejä koko talvikauden. VTT:n tutkimuksen nastarenkaiden käyttöaste henkilöautoissa oli 88 prosenttia talvella 2000-01 ja pakettiautoissa 6 %. Nastoilla varustettujen talvirenkaiden pitokausi alkaa 1. marraskuuta. Talvirengaspakko alkaa 1. joulukuuta ja kestää helmikuun loppuun saakka. Näiden kolmen talvikuukauden aikana on henkilö- ja pakettiautoissa käytettävä nastoitettuja tai nastattomia talvirenkaita. Nastarenkaat on vaihdettava pois maaliskuun viimeisenä päivänä tai toisen pääsiäispäivän jälkeisenä maanantaina sen mukaan, kumpi päivämäärä on myöhemmin. Eri puolilla maata vaihtelevat säät ja kelit voivat vaatia pitempää käyttöaikaa.

Kuvassa 7 on esitetty tulokset kokeista, joissa on tutkittu nasta- ja kitkarenkaiden vaikutusta hengitettävän pölyn muodostukseen keskenään vertailukelpoisissa testiajoissa. Nastarenkaita käytettäessä  $PM_{10}$ -hiukkasmassan määrä oli suurempi eron ollessa tilastollisesti merkitsevä (Sign testi,  $p=0.016$   $PM_{10}$ -hiukkasille ja  $p=0.031$   $PM_{2.5}$ -hiukkasille). Samanlaisia tuloksia saatiin lukuisista muistakin vertailuista nastarenkaiden tuottaessa keskimäärin 50 prosenttia pölyä.

Projektissa selvitettiin myös renkaista peräisin olevan pölyn muodostusta mittaamalla leijuvasta hiukkasmassasta eri hiilifraktioiden määrät. Hiilipitoisen massan osuus  $PM_{10}$ -hiukkasmassasta oli keskimäärin 5.0 % (SD 2.0 %). Se oli pääosin (4.4 %, SD 1.7 %) orgaanista hiiltä, 0.2 % alkuainehiiltä ja 0.4 % karbonaattia, joka oli peräisin täyteaineena käytetystä kalkkikivijauheesta.



**Kuva 7.** Rengastyypin vaikutus PM<sub>10</sub>-pitoisuuksiin eri hiekoitusmäärillä. Nastarenkailla muodostui enemmän leijuvaa pölyä kuin kitkarenkailla.

Orgaaninen hiili voi olla peräisin joko renkaista tai asfaltin bitumista. Käytettäessä kitkarenkaita, orgaanista hiiltä muodostui suhteessa kokonaisuun enemmän kuin nastarenkailla (taulukko 3; OC(%)). Ero oli tilastollisesti merkitsevä (Sign testi,  $p=0.016$ ). Toisaalta orgaanisen hiilen kokonaisuun määrässä ei ollut eroa näillä kahdella rengastyypillä. Tuloksista pääteltiin, että kitkarenkaista syntyy enemmän rengasperäistä orgaanista hiiltä kuin nastarenkaista niiden pehmeämmän kumimateriaalin vuoksi. Kuitenkin nastarenkaita käytettäessä asfaltin kulumisen oli selvästi voimakkaampaa ja siten bitumista peräisin olevaa orgaanista hiiltä tuli nastarenkailla enemmän. Nämä kaksi lähdettä kompensoivat toisiaan siten, että kun kitkarenkailla tuli enemmän OC:ta renkaista ja nastarenkailla enemmän OC:ta bitumista, olivat OC:n kokonaisuudet samaa suuruusluokkaa – kuitenkin niin, että suhteessa koko hiukkasmassaan kitkarenkailla tuli enemmän OC:ta.

**Taulukko 3.** Kitka- ja nastarenkaiden vaikutus leijuvan pölyn orgaanisen hiilen (OC) pitoisuuksiin. Käytettäessä hiekoitusta se oli kaikissa 1000 g m<sup>-2</sup>.

	OC [mg m <sup>-3</sup> ]		OC (%)		Huom
	Kitka	Nasta	Kitka	Nasta	
Ei hiek.	0.04	0.02	8.3	3.0	
Ei hiek.	0.04	0.10	5.7	3.0	30km h <sup>-1</sup>
Graniitti1	0.15	0.11	5.9	3.9	
Graniitti1	0.18	0.18	4.0	2.8	Hieno hiekka
Graniitti2	0.09	0.11	6.3	6.2	
Diabaasi	0.13	0.09	6.4	3.1	
Sign Test	p = 0.656		p = 0.016		

### 3.2.5. Ajonopeuden vaikutus pölyn muodostukseen

Testiajot suoritettiin pääosin normaalia kaupunkiliikennettä alhaisemmalla nopeudella (15 km/t). Toisaalta ajo tapahtui koko ajan varsin jyrkässä kaarteessa, mikä lisää sivuttaiskitkan kuluttavaa vaikutusta. Muutamissa ajoissa käytettiin nopeuksina 25 km/t ja 30 km/t. Kun nopeusrajoituksia esim. Helsingissä on alennettu 30 ja 40 km:iin/t, eivät koeradnan olosuhteet siten suuresti poikenneet kaupunkien keskustoista. Pölypitoisuudet testiajoissa lisääntyivät nopeuden kasvaessa, mutta se johtui pääosin siitä, että kuljettu matka aikayksikköä kohti myös kasvoi. Nopeuden nosto ei lisännyt päästöjä kuljettua matkaa kohti. Tunnettua on, että nopeuden nosto lisää asfaltin kulumista sen vuoksi, että nastaiskun voima kasvaa. Uusimpien tutkimusten mukaan (Unhola 2004) nopeudet välillä 40-100 km/t eivät juuri vaikuta asfaltin kulumiseen minimin ollessa välillä 70-80 km/t. Vasta nopeuden noustessa yli 100 km/t lähtee kulumisen jyrkkään nousuun. Kaupunkiolosuhteissa ei ajonopeudella ole juuri vaikutusta nastarenkaiden aiheuttamaan tien kulumiseen ja pölypäästöihin. Sen sijaan ajonopeudella on vaikutusta leijuvaan pölyn määrään siten, että ajettaessa suuremmilla nopeuksilla ovat liikenteen aiheuttamat ilmapirtaukset voimakkaampia varsinkin raskaalla kalustolla ja sen seurauksena myös ilmaan nousevat pölymäärät suurempia.

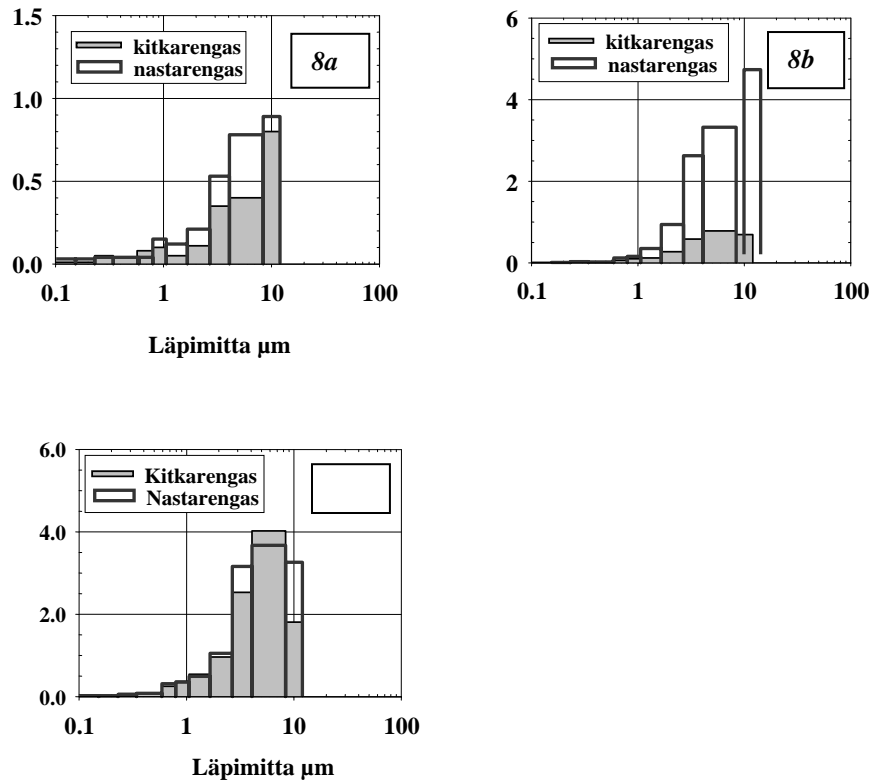
### **3.2.6. Hiukkasten kokojakauma ja hienojen hiukkasten koostumus**

Kuvassa 8 on esitetty hiukkasten kokojakauma ilman hiekoitusta sekä hiekoituksen kanssa käytettäessä nasta- ja kitkarenkaita sekä kahdella eri ajonopeudella. Ilman hiekoitusta nastarenkait tuottavat huomattavasti enemmän hiukkasmassaa kuin kitkarenkait varsinkin suuremmissa fraktioissa (kuva 8a). Ajonopeuden lisääminen näkyy nastarenkaiden pölymäärien voimakkaana lisäyksenä suhteessa kitkarenkaisiin (kuva 8b). Nämä hiukkasmassat ovat siis peräisin asfaltin kulumisesta. Hiekoitusta käytettäessä muodostui kitkarenkailakin varsin paljon hiukkasmassaa (kuva 8c), mikä viittaa siihen, että hiekkapaperivaikutus ei juuri ole riippuvainen siitä, käytetäänkö nasta- vai kitkarenkaita.

PM<sub>10</sub>-hiukkasmassan osuus kokonaisleijumasta (TSP) oli keskimäärin 30 prosenttia. PM<sub>2,5</sub>-hiukkasmassaa puolestaan oli noin 12 % PM<sub>10</sub>-hiukkasmassasta. Alle mikrometrin kokoluokan fraktion osuus PM<sub>10</sub> hiukkasista oli noin 6 prosenttia. Hienoja hiukkasia oli kaikissa näytteissä. Kokojakauma oli samanlainen kuin päällystetyiltä teiltä (Chow ym. 1996, 2003, Kuhns ym. 2003), kvartsihiukkasista (Puledda ym. 1999) ja maaperän pölystä tehdyissä kenttämittauksissa. Näissä kaikissa mineraalihiukkaset olivat pääosa hiukkasmassasta. Alle mikrometrin kokoluokan hiukkaset olivat enimmäkseen mineraalihiukkasia kuten plagioklaasia, sarvivälkettä ja kvartsia ja siten peräisin joko asfaltin kiviaineksesta tai hiekoitusmateriaalista. Tulokset osoittavat, että mekaanisen kulutuksen synnyttämät mineraalihiukkaset ovat merkittävä osa pienhiukkasista ja myös alle mikrometrin kokoisista hiukkasista.

Projektissa tuotettiin myös tietoa siitä, tuottavatko karkea ja hienojakoisempi hiekoitusmurske samassa suhteessa TSP- ja PM<sub>10</sub>-näytteiden hiukkasmassoja. Tulokset osoittivat, että hienojakoista hiekkaa käytettäessä PM<sub>10</sub>-massaa oli

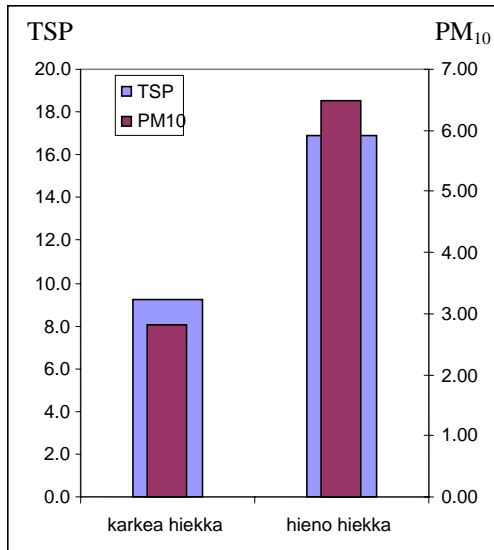
suhteellisesti enemmän kuin TSP-massaa verrattuna karkeammalla hiekalla tehtyihin testeihin (kuva 9).



**Kuva 8.** PM massan kokojakauma kitka- ja nastarenkailla. Y-akselilla hiukkasten lukumääräjakauma ( $\text{dm}/\text{dlog}d_a$ ,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 8a: 15 km h<sup>-1</sup> ilman hiekoitusta; 8b: 30 km h<sup>-1</sup> ilman hiekoitusta; 8c: 15 km h<sup>-1</sup>, 880 g m<sup>-2</sup> hiekoitusta.

Lisäksi tutkittiin, eroavatko TSP- ja PM<sub>10</sub>-näytteiden hiukkasmassat toisistaan sen suhteen, mikä niissä on asfaltin ja hiekoituksen osuus (taulukko 4). Karkeaa hiekkaa käytettäessä näihin kahteen kokoluokkaan muodostui suhteellisesti yhtä suuret osuudet asfaltista ja hiekasta riippumatta rengaslaadusta tai hiekan määrästä. Sen sijaan hienojakoisella hiekalla PM<sub>10</sub>:ssä oli asfaltin osuus (38%) suurempi kuin TSP-massassa (26%) ja siten hiekoituksen osuus TSP:ssä oli suurempi. Näistä havainnoista seuraa myös, että hienojakoista hiekkaa käytettäessä hiekkapaperiefekti tuottaa enemmän asfaltista peräisin olevia hengitettäviä hiukkasia (PM<sub>10</sub>) suhteessa TSP-hiukkasiin. Ajonopeuden nosto tuotti suhteellisesti enemmän hiukkasia PM<sub>10</sub>-fraktioon kuin suurempaan kokoluokkaan.





**Kuva 9.** TSP- ja PM<sub>10</sub>-pitoisuudet Fortumin ajettaessa nastarenkailla ja käytettäessä karkeampaa hiekkaa (2/5.6 mm) tai hienojakoista hiekkaa (1/5.6 mm). Hienojakoisella hiekalla syntyy enemmän molempia kokofraktioita ja suhteellisesti enemmän PM<sub>10</sub>-hiukkasmassaa.

**Taulukko 4.** Asfaltin osuuksien vertailu TSP- ja PM<sub>10</sub>-aineistoissa kokeellisissa tutkimuksissa. Asfaltin prosentuaalinen osuus on sama molemmissa aineistoissa paitsi käytettäessä hienojakoista hiekkaa (1/5.6 mm vs. 2/5.6 mm) tai suurempaa ajonopeutta (nastarengas). Niissä molemmissa hiekoituksen osuus on suurempi TSP-hiukkasissa.

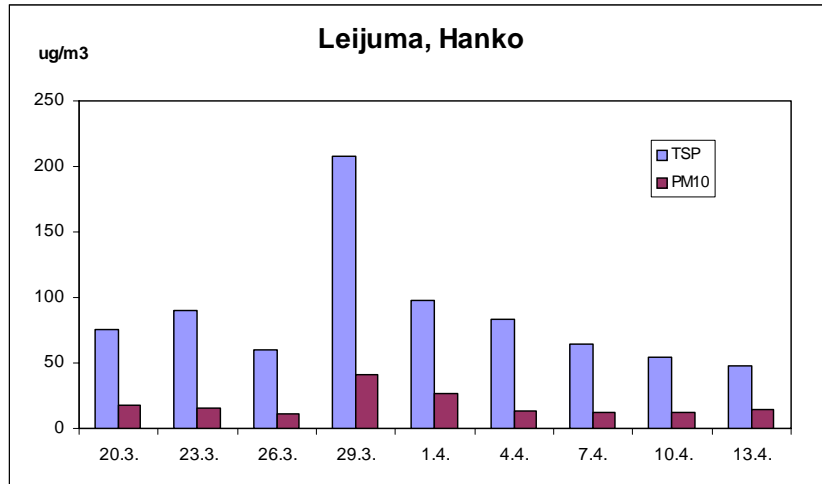
koejärjestely	asfalttia	asfalttia
	TSP:ssä	PM <sub>10</sub> :ssä
hiekkä 1000 g/m <sup>3</sup> , kitkarengas	66 %	61 %
hiekkä 1000 g/m <sup>3</sup> , nastarengas	69 %	69 %
hiekkä 2000 g/m <sup>3</sup> , nastarengas	32 %	32 %
hienojak.hiekkä 1000 g/m <sup>3</sup> , nastarengas	<b>26 %</b>	<b>38 %</b>
hiekkä 1000 g/m <sup>3</sup> , 2-kert. ajonopeus	<b>58 %</b>	<b>94 %</b>
näytemäärä	2	4

## 4. KATUPÖLYN KOOSTUMUKSESTA TEHDYT KENTTÄTUTKIMUKSET

Katupölyn muodostuksen kokeellisissa tutkimuksissa saatiin selville monia tärkeitä perusasioita. Kuitenkin ilmiötä pitää tutkia myös käytännön katuolosuhteissa, jotka ovat paljon monimutkaisemmat kuin koeradalla. Toistaiseksi on tuntematonta mm. se, miten suuri osuus kaupunkien ilmassa leijuvasta hienojakoisesta pölystä syntyy hiekkapaperi-ilmiön vaikutuksesta. Tässä projektissa tehtiin kenttätutkimuksia useissa kaupungeissa erilaisissa olosuhteissa (kartta liitteenä 1).

## 4.1. HANGON-TAMMISAAREN TUTKIMUS

Tässä työssä tutkittiin erilaisista lähteistä peräisin olevien hiukkasten määriä katupölyssä siitä lähtökohdasta, että Hangossa suoritettiin katujen talvihiekoitus Koverharin terästehtaalta tuotetulla masuunikuonahiekalla, joka on monin paikoin käytössä oleva hiekoitusmateriaali (Kupiainen ja Tervahattu 2004). Siitä peräisin olevat hiukkaset voidaan identifioida pääosin suuren kalsiumpitoisuuden (noin 40 %) perusteella.



**Kuva 10.** Hangon hiukkaspitoisuuksien kolmen vuorokauden keskiarvot keväällä 2000.

Tammisaaressa käytettiin normaalia hiekoitusmateriaalia, jonka Ca-pitoisuus on alhainen. Hangossa hiukkasmateriaalia kerättiin kahdella tehokeräimellä (TSP ja PM<sub>10</sub>) keväisen katupölyjakson aikana 17.3.-13.4.2000. Keräinten suodattimet vaihdettiin kolmen päivän välein, joten myös hiukkaspitoisuudet saatiin 3 vrk:n keskiarvoina. Lisäksi hiukkasia kerättiin sekä Hangossa että Tammisaaressa sammalpallomenetelmällä (SFS 1994). Sammalpalloista mitattiin tuhkan sekä eri alkuaineiden pitoisuudet.

Hangossa todettiin keväällä 2000 korkea TSP-pitoisuus 29.3. (kuva 10). Kun otetaan huomioon, että mitattiin kolmen päivän keskiarvoja, on suurimman pölyepisodin<sup>1</sup> aikana korkein vuorokausiarvo ollut vieläkin suurempi kuin kuvan 1 keskiarvo. Vastaavasti voidaan olettaa, että PM<sub>10</sub>-vuorokausikeskiarvot ovat olleet suurempia kuin mitatut 3 vrk:n arvot.

<sup>1</sup> Episodilla tarkoitetaan tilannetta, jossa ilman epäpuhtauspitoisuudet kohoavat normaalia huomattavasti korkeammiksi. Episoditilanne voi syntyä a) poikkeuksellisessa päästötilanteessa, b) epäpuhtauksien sekoittumisen ja laimenemisen kannalta epäedullisissa säätilanteissa, jollaisia ovat esimerkiksi heikkotuuliset korkeapainetilanteet tai c) kaukokulkeuman vaikutuksesta (Myllynen ym. 2004, s. 38). Katupölyn suhteen episodiksi luokitellaan ylnnesä tilanteet, joissa PM<sub>10</sub>-pitoisuuden vuorokausikeskiarvo on >50 µg/m<sup>3</sup>.

Hangon hiukkaskeräinten SEM/EDX-analyysit osoittivat, että noin 10 prosenttia hiukkasaineistosta oli peräisin hiekoitusmateriaalista ja pääosa oli asfaltin kiviaineksesta sekä muusta mineraaliperäisestä hajapölystä (noin 50 %). Hiukkasmassasta lähes 30 % tuli energiantuotannosta, asfaltin bitumista sekä autojen pakokaasuista. Hangon ja Tammisaaren sammalpallojen analyysien perusteella laskettiin, että Hangon kadunvarren sammalpalloihin oli tullut muuta kuin kuonahiekkaa yhteensä 93.6 % ja kuonahiekkaa 6.4 %, kun koko sammalpalloaineisto otetaan huomioon (taulukko 5). Kuonahiekan osuus pieneni keräyksen aikana: se oli ensimmäisellä jaksolla 8.5 % ja viimeisellä 4.3 %. Tämä johtunee siitä, että kuonahiekkaa ohi hengitettävässä pölyssä vähemmän pahimman katupölyepisodin mentyä ohi ensimmäisellä keräysjaksolla ja varsinkin sitten, kun kadut oli puhdistettu talven jäljiltä. Näin ollen sammalpallo tutkimukset vahvistivat SEM/EDX-tutkimusten antamia tuloksia sikäli, että hiekoitushiekan osuudeksi sammalpalloihin kertyneestä materiaalista saatiin alle 10 prosenttia.

**Taulukko 5.** *Masuunikuonahiekan osuus (%) Hangon katupölyssä laskettuna sammalpalloihin kertyneen laskeuman tuhkan Ca- ja Mg-pitoisuuksista.*

Keräysaika	Ca-laskelma	Mg-laskelma	Ca-Mg-keskiarvo
17.3. - 1.4.	8.1	8.9	8.5
17.3. - 14.4.	6.9	6.5	6.7
17.3. - 28.4.	4.1	4.5	4.3
Keskiarvo	6.6	6.2	<b>6.4</b>

Hangon hiekoitusolosuhteiden erityisjärjestelyjen poikkeuksellisuuden vuoksi tuloksia ei voida yleistää. Kuitenkin myöhemmin tehdyt kokeelliset tutkimukset antoivat saman kaltaisia tuloksia asfaltin ja hiekan osuuksista PM<sub>10</sub>-hiukkasissa, kun käytettiin samaa masuunikuonahiekkaa koeradana hiekoitusmateriaalina. Kohtalaisen runsaalla hiekoitusmäärällä (1000 g/m<sup>2</sup>) oli hiekoituksesta tulleen pölyn osuus PM<sub>10</sub>-hiukkasmassasta kokeissa 28%. Hiekoitusmateriaalin osuus Hangon katupölyn mineraaliaineksesta oli lähes 20 %. Hangon olosuhteissa hiekoitus ei ollut niin runsasta kuin koeradalla, mikä vastaavasti vähentää myös hiekan osuutta katupölyn mineraalifraktiossa. Näin ollen kokeelliset tutkimukset antoivat varsin samanlaiset tulokset kuin kenttätutkimukset.

#### 4.2. TUTKIMUKSET MUSEOKADULLA JA TIKKURILASSA TALVIKAUDELLA 2000-2001

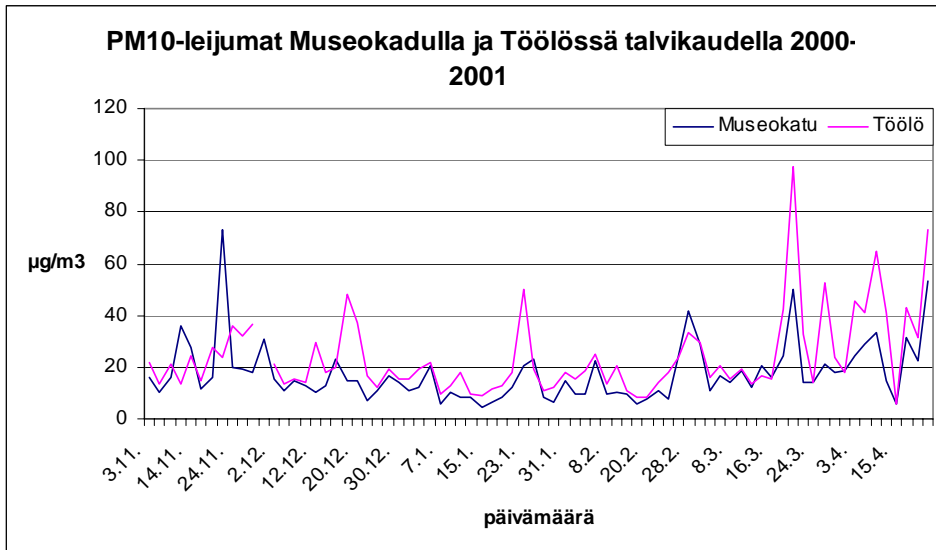
Museokadulla ja Tikkurilassa tutkittiin talvikaudella 2000-2001 katupölyn koostumusta (Kupiainen ym. 2002). Museokadulla mitattiin PM<sub>10</sub>-leijumia YTV:n mittalaitteilla. Tikkurilassa käytettiin YTV:n mittausaseman TSP aineistoja. Keräinten suodattimilta analysoitiin yksittäisten hiukkasten koostumusta sekä etsittiin yleisimpiä hiukkastyyppejä ja niiden lähteitä. Erityiskohteena oli katupölyn mineraalipitoinen aines, joka muodostaa suuren osan keväisestä hiukkasmassasta

(Pakkanen ym. 2001). Pää tarkoituksena oli selvittää asfaltin ja hiekoitusmateriaalin osuuksia pölyssä keväisten katupölyepisodien aikana.

#### 4.2.1. Helsinki, Museokatu

Museokatu (Helsingin Töölössä Kansallismuseon takana) valittiin tutkimuskohteeksi, koska siellä oli mahdollista järjestää sekä jatkuva hiukkaskeräys että ajoratojen hiekoitus sopivalla hiekoitusmateriaalilla. Lisäksi keräyspisteen läheisyydessä asfaltti oli homogeenista - tilanne joka kaupunkiooloissa on vaikea löytää. Alueella käytetyksi hiekoitusmateriaaliksi valittiin Ämmäsuon graniittinen murske, joka erosi mineralogialtaan asfaltin kiviaineksena käytetystä amfiboliittista sarvivälkkeen pitoisuuden osalta. Hiukkasia kerättiin joka toinen päivä. Hiekoitus aloitettiin Helsingissä sääolosuhteiden vuoksi vasta joulunalusviikolla 23.12. (Myllynen 2001), joten syysjaksolla nastarenkaat olivat käytössä pitkähkön ajan ennen hiekoitusta.

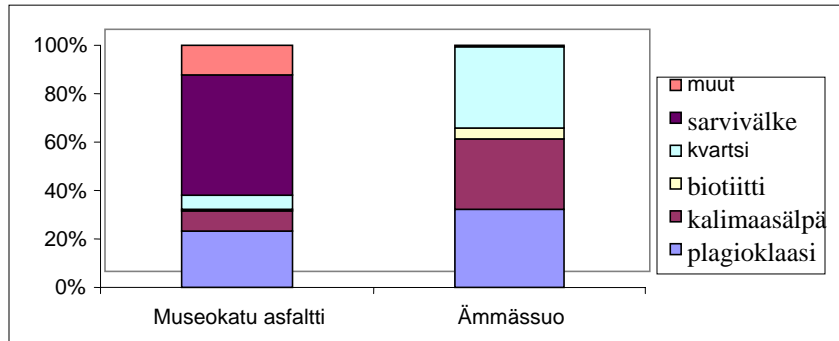
PM<sub>10</sub>-vuorokausipitoisuudet olivat Museokadulla koko mittausjakson (3.11.2000-24.4.2001, kuva 11) aikana melko alhaisia, syyskaudella (3.11.-31.12.) keskimäärin 19 µg/m<sup>3</sup>, alkukeväästä (1.1.-28.2.) 12 µg/m<sup>3</sup> ja loppukeväästä (2.3.-24.4.) 22 µg/m<sup>3</sup>. Alkukevät alhaisine pitoisuuksineen erosi tilastollisesti merkitsevästi muista (Kruskall-Wallis, varianssianalyysi). Syksyn ja loppukevään leijumien vuorokausiarvoilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa.



**Kuva 11.** Museokadulla ja YTV:n Töölön mittausasemalla mitatut PM<sub>10</sub>-vuorokausipitoisuudet. Hiekoitus alkoi 23.12.

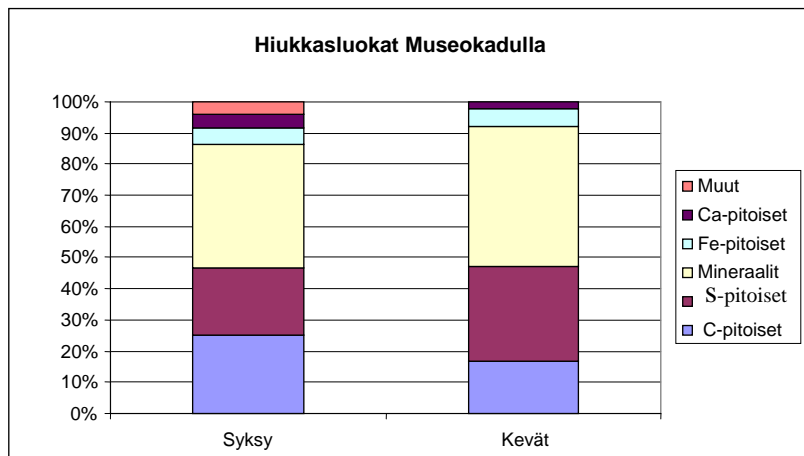
Jotta hiukkaspitoisuuksista voitaisiin laskea, mitkä osuudet olivat peräisin asfaltin kiviaineksista ja hiekoitusmurskeista, oli tunnettava näiden materiaalien mineraalikoostumukset. Niistä oli käytettävissä kuvan 12 osoittamat tiedot, jotka osoittivat materiaalien poikenneen toisistaan suuresti siten, että asfaltin kiviaineksessa oli runsaasti sarvivälkettä, jota ei ollut hiekoitusmurskeessa lainkaan, kun taas hiekoitusmurskeessa oli paljon enemmän kvartssia ja kalimaasälpää. SEM/EDX-

analyysiin valittiin näytteet, joissa oli korkeimmat pitoisuudet. Lisäksi vertailun vuoksi analysoitiin syksyltä kaksi näytettä, joiden pitoisuudet olivat keskimääräistä alhaisempia. Analyysissä käsiteltiin halkaisijaltaan >1 µm hiukkasia, joiden on havaittu muodostavan suurimman osan (97%) katupölyn massasta (Chow ym. 1994).



**Kuva 12.** Museokadun asfaltin ja hiekoitusmurskeen mineralogian vertailu.

Kuvassa 13 on esitetty koko aineistossa yleisimpinä esiintyneet hiukkastyypit. Mineraalihiukkaset, hiilipitoiset sekä rikkipitoiset hiukkaset muodostivat sekä syksyllä (86%), että keväällä (92%) pääosan analysoiduista hiukkasista. Hiilipitoiset hiukkaset ovat pääasiassa liikenteen pakokaasuista, usein pienempien hiukkasten muodostamia agglomeraatteja. Mineraalihiukkaset ovat hiekoituksen ja asfaltin kivimateriaalista jauhautuneita hiukkasia (Tervahattu ja Kupiainen 2002, Pakkanen ym. 2001). Rikkipitoisten hiukkasten lähteenä on kirjallisuudessa esitetty joko lentotuhka (Lighty ym. 2000, Kindratenko ym. 1994), rengaspöly (Rautenberg-Wulff 1995) tai omien tutkimuksiemme mukaan myös asfaltin täytejauhe. Lisäksi kaukokulkeutuneessa mineraalihiukkasissa on havaittu vastaavia alkuainekombinaatioita (Fan ym. 1996, Zhang ja Iwasaha 1999).

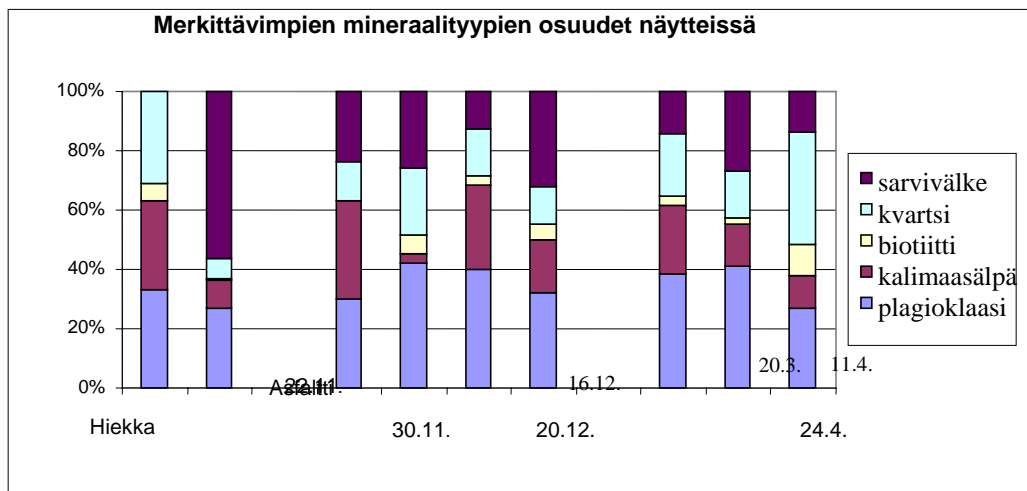


**Kuva 13.** Merkittävimmät hiukkastyypit Museokadun PM<sub>10</sub>-hiukkasissa syystalvella (3.11.-31.12.) ja kevättalvella/kevällä (1.1.-24.4.).

Koska työn päätarkoituksena oli selvittää hiekoitusmateriaalista ja nastojen asfaltin kiviaineksesta jauhaman mineraalipölyn osuuksia, kiinnitettiin

erityishuomiota mineraaliperäisiin hiukkasiin. Niiden luokittelu perustui tutkimusalueella sijaitsevista lähteistä tehtyihin analyysihin ja mineraalien koostumustietoihin (asfaltin kiviaines ja Ämmäsuon murske). Yksittäisten mineraalien osuudet vaihtelivat sekä syksyllä että keväällä yllättävän paljon näytteiden kesken (katso kuva 14). Tämän oletettiin olevan seurausta paikallisen asfaltin ja hiekoituksen lisäksi ”kolmannen” lähteen vaikutuksesta. Mineraalipölyä kulkeutui tutkimusalueelle muualta. Kulkeutumiseen on vaikuttanut myös tarkastellun kokoluokan PM<sub>10</sub> hiukkaset, jotka kulkeutuvat helpommin pitempiä matkoja kuin esimerkiksi TSP (vrt. Tikkurilan tulokset).

Kaupunkialueilla on käytössä useita mineralogialtaan erilaisia hiekoitusmateriaaleja ja asfaltin kiviaineksia. Tämän muualta kulkeutuneen pölyn koostumusta on vaikea arvioida. Tutkimustuloksiin todettiin vaikuttaneen syksyllä kaksi ja keväällä kolme eri mineraalilähdettä: syksyllä asfaltin kiviaines ja muualta kulkeutunut mineraalipöly ja keväällä asfaltin kiviaines, hiekoituksen mineraaliaines ja muualta kulkeutunut mineraalipöly. Toisin sanoen alueilla, joilla paikalliset lähteet eivät ole merkittäviä, on huomioitava kauempaa kulkeutuneen pölyn vaikutus hiukkasmassaan. Tämän pölyn koostumuksen yksityiskohtainen arviointi on vaikeaa.



**Kuva 14.** Yleisimpien mineraalien osuudet Museokadun hiekoitusmurskeessa, asfaltin kiviaineksessa ja PM<sub>10</sub>-näytteissä.

Tärkeimpien mineraalihiukkasten osuuksien keskiarvoja vertailtiin T-testillä. Testin mukaan syksyn ja kevään välillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja millään mineraalilla. Syynä on ollut lähinnä näytteiden välinen suuri hajonta. Tulos osoittaa, että pöly on ollut samanlaista sekä keväällä että syksyllä, joten paikallisilla lähteillä ei ole ollut merkittävää osuutta keskimääräisessä tarkastelussa. Tähän viittaa myös se, että kvartsi esiintyi hengitettävässä pölyssä syksyllä paljon enemmän kuin asfaltin kiviaineksessa, jolloin sen on oltava kulkeutunut kauempaa. Mineraaliosuuksien lisäksi PM<sub>10</sub>-aineistossa havaitut alhaiset pitoisuudet sekä syys- ja kevätpitoisuuksien samankaltaisuus osoittaa, että paikallisista lähteistä muodostuvaa katupölyä on tutkimusajankohtana ollut Museokadulla varsin vähän.

Tilastokäsittelyistä saatujen tulosten seurauksena päätettiin tutkia mahdollisuuksia rajoittaa aineistoa lisää hiekoitusperäisen pölyn määrän arvioimista varten. Laskennassa käytetyt mineraalikohtaiset arvot ja saadut arviot hiekoituksen osuudeksi on esitetty taulukossa 6. Hiekoituksen osuudeksi saatiin noin 50% hiukkasista.

**Taulukko 6.** Laskennassa käytetyt mineraalien pitoisuudet (%) syksyn ja kevään hengitettävässä pölyssä ja hiekoitusmurskeessa sekä arvioitu hiekoituksen osuus eri mineraaleilla.

	C <sub>syksy</sub>	C <sub>hiekoitus</sub>	C <sub>kevät</sub>	A
kalimaasälpä	17.8	30.1	22.8	41%
kvartsi	12.5	30.9	21.0	46%
sarvivälke	32.1	12.5	14.1	56%

Hiukkastyypin luokittelu on perustunut eri alkuaineiden esiintymiseen yksittäisessä hiukkasessa. Tällaisessa työskentelyssä tutkija joutuu käymään aineistoa läpi jopa hiukkaskohtaisesti, joten se on on aikaa vievää ja rajoittaa mahdollisuuksia käsitellä suuria hiukkasmääriä. Määrän lisääminen vähentää analyyseihin liittyviä epävarmuuksia, mutta vaatii tietokoneavusteisen laskennallisen menetelmän kehittämistä. Museokadun aineistoa on käytetty tällaisen menetelmän kehitystyössä. Käyttäen hyväksi multilineaarista mallitusohjelmaa ME-2 (Paatero 1999) kehitettiin multilineaarinen malli, joka yhdistelee pääkomponenttianalyysin ja klusterianalyysin ominaisuuksia. Mallia voidaan kutsua nimikkeellä ”clustering multilinear model” eli CMM. Kun multilineaarisen analyysin tulosta vertailtiin subjektiiviseen luokitteluun todettiin, että 197 tapauksessa 208:sta (95 prosenttisesti) luokittelut olivat yhteneviä. Ero oli siten vain viiden prosentin suuruinen (11 hiukkasta).

#### 4.2.2. Vantaa, Tikkurila

Tikkurila Vantaalla (vilkasliikenteinen Tikkurilantie) valittiin tutkimukseen, koska läheinen asfaltti, jolla suurin osa moottoriliikenteestä kulki, oli homogeenista. Lisäksi paikalla sijaitsi YTV:n kiinteä ilmanlaadun mittausasema. Aseman TSP-näytteitä käytettiin tutkimuksiin. Alueella käytetyn hiekoitusmateriaalin valintaan ei kuitenkaan ollut mahdollista vaikuttaa. Hiekoitusmurske oli Suomiehen louhokselta tullutta graniittista soraa, jonka mineralogia saattaa vaihdella huomattavasti. Lohja-Rudukselta saatiin eri mineraalien osuuksien arvioidut vaihteluvälit (taulukko 7). Tikkurilassa analysoitiin kahdesta asfalttinäytteestä kiviaineksen mineraalikoostumusta. Asfaltin mineraaliosuudet ovat analyyseiden keskiarvoja. Selvimmin kiviainekset erosivat sarvivälkkeen ja kvartsin osalta. Hiekoitusmateriaalissa oli vähemmän sarvivälkettä, mutta enemmän kvartssia.

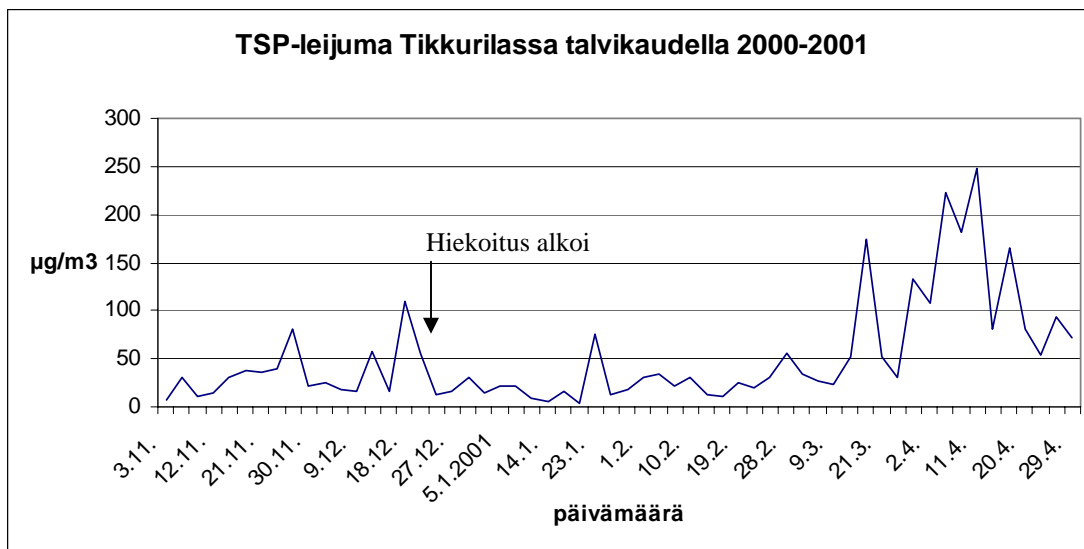
TSP-vuorokausipitoisuuksien keskiarvo oli syyskaudella (3.11.-30.12.) 33 µg/m<sup>3</sup>, alkukevällä (2.1.-28.2.) 23 µg/m<sup>3</sup> ja loppukevällä (3.3.-29.4.) 102 µg/m<sup>3</sup>. Loppukevään jakso erosi tilastollisesti (Kruskall-Wallis) merkitsevästi muista jaksoista. TSP:n ohjearvo (taulukko 1b) ylitettiin ja vuorokausikeskiarvo oli

maksimissaan 248  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Muilla jaksoilla vain yhtenä päivänä (18.12., 110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) havaittiin vastaavia pitoisuuksia. Leijumat on esitetty kuvassa 15.

**Taulukko 7.** Hiekoitussoran ja asfaltin mineralogialta Tikkurilassa. Mineraalien alimmat ja ylimmät prosenttiosuudet käytetyissä materiaaleissa.

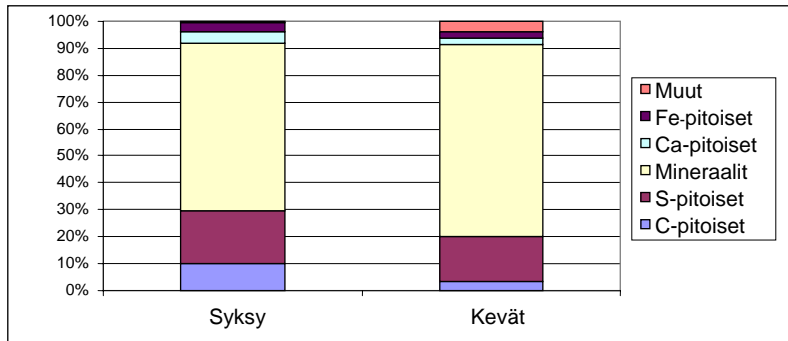
Hiekka	Alin	Ylin		Asfaltti	Keskiarvo	Alin	Ylin
Plagioklaasi	25	40		Plagioklaasi	27	26	29
Kalimaasälpä	10	35		Kalimaasälpä	7	3	12
Biotiitti	5	15		Biotiitti	6	3	10
Kvartsi	20	35		Kvartsi	6	1	10
Sarvivälke	0	10		Sarvivälke	46	41	51
Muut	0	10		Muut	6	1	11

SEM/EDX-analyysiin valittiin näytteet, joissa oli kohonneita pitoisuuksia. Yleisesti ottaen hiukkastyypit olivat samoja, joita Museokadulla havaittiin. Ainoana lisänä esiintyi hiukkastyypin, jossa esiintyi Si:n ja Ca:n ohella korkeana pitoisuutena Ti. Hiukkastyypien osuudet Tikkurilan näytteissä on esitetty kuvassa 16. Selvästi suurimman osuuden Tikkurilan TSP-pölyssä muodostivat mineraalihiukkaset (syksyllä 62 % ja keväällä 72 % koko hiukkasmassasta). Seuraavina tulivat rikkipitoiset ja hiilipitoiset hiukkaset.



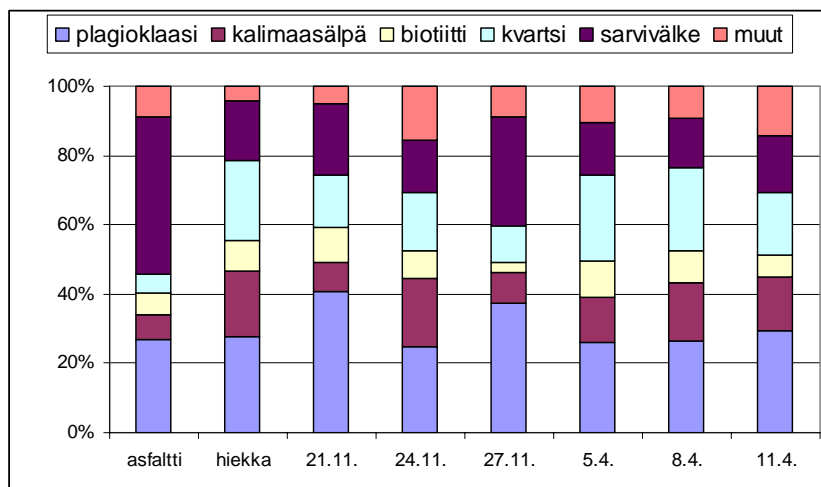
**Kuva 15.** Tikkurilan TSP-vuorokausipitoisuudet talvikaudella 2000-2001.





**Kuva 16.** Merkittävimmät hiukkastyypit Tikkurilan TSP-pölyssä syystalvella (3.11.-31.12.) ja kevättalvella/kevällä (1.1.-29.4.).

Mineraalihiukkasten tarkasteluihin valittiin syys- ja kevätjaksoilta kaksi episodinomaista tilannetta, jolloin oli vallinnut idänpuoleinen tuuli suunnasta, josta asfalttinäytteet oli otettu ja jossa oli alueen vilkain liikenne. Syksyn episodin (21.-27.11.) aikana nastarenkaat olivat käytössä, mutta hiekoitusta ei oltu aloitettu. Pitoisuudet olivat syksyn tasoon nähden korkeampia vaihdellen  $36-80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kevään episodin aikana (5.-11.4.) pitoisuudet vaihtelivat  $182-248 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja silloin havaittiin koko tutkimusjakson korkeimmat leijuma-arvot. Hiekoitus oli aloitettu joulun alla. Kuvassa 17 on esitetty merkittävimpien mineraalihiukkasten osuudet tarkastelluissa näytteissä.



**Kuva 17.** Mineraalien osuudet näytteissä syksyn 2000 ja kevään 2001 episodeissa Tikkurilassa. Hiekoitusmateriaalin mineralogia on arvioitu vaihteluvälin perusteella.

Syksyn ja kevään mineraalihiukkasten keskimääräisiä osuuksia vertailtiin T-testillä. Tilastollisesti merkitsevä ero (p-arvo 0.03) oli sarvivälkkeen osuuksissa, joka selvimmin erotti asfaltin ja hiekoitusmurskeen mineralogian. Sarvivälkkeen keskimääräinen osuus syksyllä oli korkeampi (23.5 %) kuin kevätpölyssä (16.1 %). Hiekoituksen vaikutuksen voisi olettaa näkyvän juuri sarvivälkkeen suhteellisen osuuden vähenemisenä kevällä. Lisäksi kvartssia ja kalimaasälpää oli kevätpölyssä enemmän (joskaan ei tilastollisesti merkitsevästi), mikä myös viittaa hiekoituksen

vaikutukseen. Kauempaa kulkeutuneiden hiukkasten osuus oletettiin pieneksi, sillä katupölytilanteissa TSP:n hiukkasmassa muodostuu pääosin suuremmista hiukkasista, jotka eivät kulkeudu pitkiä matkoja. Lisäksi itäpuoleisten tuulten suunnassa ei Tikkurilan mittauspisteen lähistöllä ollut muita merkittäviä mineraalipölyn lähteitä.

Lopullisissa laskelmissa hiekoitusperäisen pölyn määrä saatiin käyttämällä hiekoitussoran arvion keskiarvoa. Näin hiekoituksen osuudeksi kevään TSP:ssä saadaan keskimäärin 84%, kun vertailuna käytetyn syyspölyn koostumusta edustaa vain 27.11. mitattu näyte (syksyn korkein massapitoisuus), ja 73% kun syksyn näytteitä on kolme. Laskelmien mineraalikohtaiset tulokset on esitetty taulukossa 8.

Tässä esitetyt arviot hiekoituksen osuudeksi ovat epävarmoja. Mittaustuloksiin liittyy oma epävarmuutensa, ja myös näytteiden välinen hajonta on ollut suurta. Lisäksi hiekoitusmateriaalin koostumuksesta ei ollut luotettavia tietoja. Tuloksia tulee tarkastella suuntaa-antavina, ja ne osoittavat mahdollista suuruusluokkaa hiekoitusperäisen pölyn osuudesta.

**Taulukko 8.** Laskelmissa käytetyt mineraalien pitoisuudet (%) hiekoitushiekassa (*C<sub>hiekoitus</sub>*) ja saadut hiekoituksen prosenttiosuudet TSP-pölyssä keväällä.

	<i>C<sub>hiekoitus</sub></i>	A (27.11.)	A (3 näytettä)
Plagioklaasi	26.5	86%	82%
Kalimaasälpä	17.0	83%	64%
Kvartsi	25.5	82%	75%
Sarvivälke	13.0	84%	70%

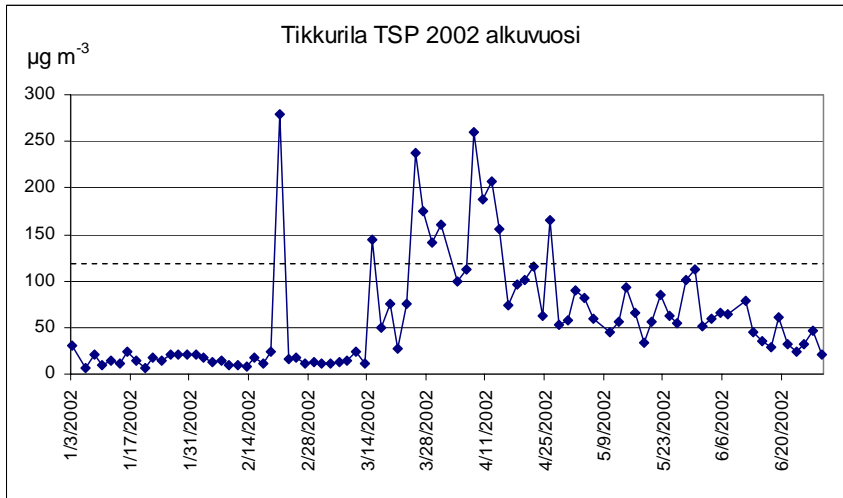
#### 4.2.3. Johtopäätökset

Museokadulla kerätyissä PM<sub>10</sub>-hiukkasissa yleisimpinä hiukkastyyppeinä esiintyivät mineraalihiukkaset, pääosin pakokaasuista peräisin olevat hiilipitoiset hiukkaset ja rikkipitoiset hiukkaset. Paikallisten mineraalilähteiden (hiekoitushiekan ja asfaltin) osuus oli melko pieni, minkä vuoksi Museokatua ei voi suositella vastaaviin tutkimuksiin jatkossa. Tikkurilassa kerätyssä TSP-pölyssä mineraalihiukkaset olivat selvästi merkittävin luokka. Paikallisen hiekoituksen vaikutus näkyi selvemmin kuin Museokadun PM<sub>10</sub>-hiukkasissa. Hiekoitusperäisen pölyn osuutta jouduttiin arvioimaan vähäisellä näytemäärällä, koska lähinnä tuuliolojen suhteen vertailukelpoisia keräyspäiviä oli vähän.

### 4.3. KATUPÖLYN KOOSTUMUS JA LÄHTEET TIKKURILASSA KEVÄÄLLÄ 2002

Keväällä 2002 Tikkurilassa mitattiin korkeita hiukkaspitoisuuksia ja lukuisia TSP-ohjearvon (120 µg m<sup>-3</sup>, kuva 18) ylityksiä, joten sopivaa tutkimusaineistoa oli käytettävissä. Sen vuoksi siitä päätettiin tutkia toisenkin talven aineisto (Nordic Envicon Oy 2003). Tutkimusaineistona käytettiin YTV:n TSP-suurtehokeräimen

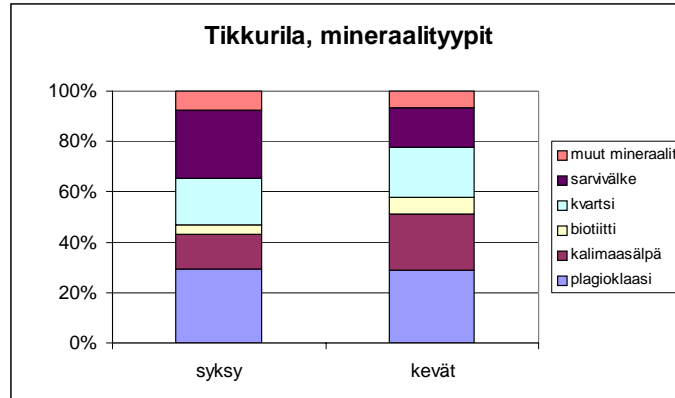
mittauksen yhteydessä kerättyjä hiukkasnäytteitä. Tutkimuksiin valittiin seitsemän päivän näytteet ajalta 21.2.-26.4.2002, jolloin mitattiin korkeita TSP-arvoja ja vallitsi heikko tuuli. Näissä olosuhteissa katsottiin karkean TSP-hiukkasmassan olevan peräisin mittausaseman läheisyydestä ja edustavan hyvin paikallista keväistä katupölyä.



**Kuva 18.** Ilman kokonaisleijuma (TSP) Tikkurilassa keväällä 2002. Huomattakoon, että mittauksia tehtiin kahden päivän välein, joten vuorokausiohjearvon ylityksiä ( $>120 \mu\text{g m}^{-3}$ ) on todennäköisesti ollut havaittua enemmän.

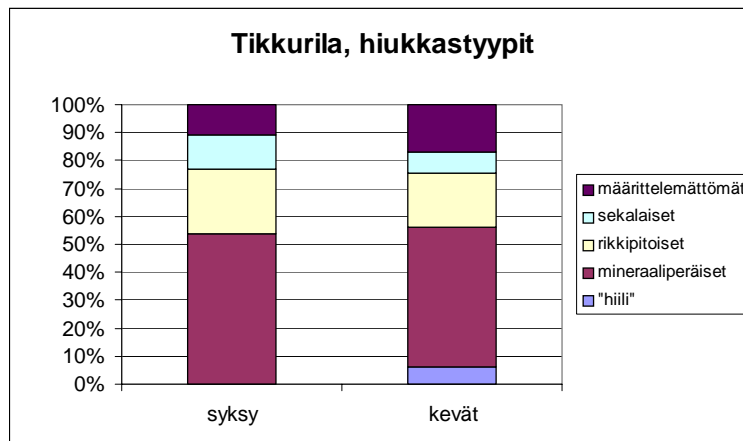
Asfaltin kiviaineksesta ja hiekoitusmurskeista oli käytettävissä taulukossa 7 esitettävät tiedot. Niiden mukaan materiaalit erosivat selkeimmin siinä suhteessa, että asfaltin kiviaineksessa oli huomattavasti suurempi osuus sarvivälkettä kuin hiekoitusmurskeessa. Tätä eroa käytettiin tutkimuksen laskelmien lähtökohtana. Kiviainekset erosivat myös kvartsin ja kalimaasälvän osalta, mutta ei niin selvästi kuin sarvivälkkeen.

Keväältä 2002 oli 7 kpl TSP-hiukkasnäytteitä, joista jokaisesta analysoitiin noin 150 hiukkasta, yhteensä 1095 hiukkasta. Syksyn vertailunäytteestä tehtiin kaksi preparaattia, joista analysoitiin 309 hiukkasta. Hiukkaset luokiteltiin niiden alkuaineiden prosentiosuuksien perusteella eri hiukkastyyppeihin, joista tämän tutkimuksen kannalta tärkeimmät olivat mineraalihiukkaset. Hiukkasten lähteitä tulkittiin koostumuksen avulla tehdyn luokittelun perusteella. Hiukkastyypin jakauma syksyllä ja keväällä on esitetty kuvassa 19.



**Kuva 19.** Syksyn 2000 (27.11.) ja kevään 2002 hiukkastyypit Tikkurilan TSP-aineistossa.

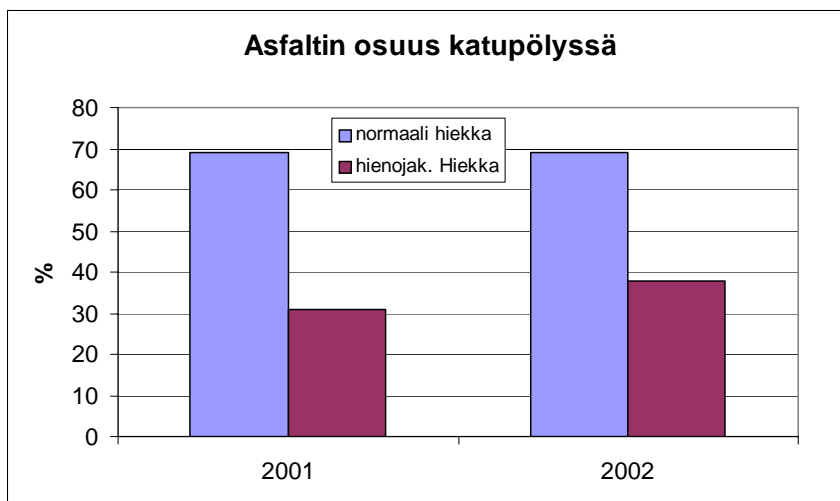
Saaduista hiukkastyypeistä kiinnitettiin päähuomio mineraaliperäisiin. Niitä koskevat tulokset on esitetty kuvassa 20. Suurin ero syksyn ja kevään välillä on sarvivälkkeen kohdalla, jota on syksyllä suhteellisesti ottaen enemmän kuin keväällä. Tämä johtuu siitä, että sarvivälkkeen osuus oli selvästi suurempi asfaltin kiviaineksessa kuin hiekoitusmurskeessa (taulukko 7), joten keväällä hiekoitus vähentää sarvivälkkeen suhteellista määrää syksyyn verrattuna. Graniittisen hiekoitusmateriaalin vaikutus näkyy myös kvartsin ja kalimaasälvän suurempina osuuksina keväänäytteissä. Kalimaasälvän ja kvartsin osalta syksyn ja kevään ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Sen sijaan sarvivälkkeellä vastaava ero oli tilastollisesti merkitsevä (Wilcoxon rank sum test,  $p=0.0227$ ) ja siksi sitä käytettiin laskelmien perustana arvioitaessa asfaltin ja hiekoituksen osuuksia.



**Kuva 20.** Syksyn 2000 (27.11.) ja kevään 2002 mineraalishiukkastyypit Tikkurilan TSP-aineistossa.

Sarvivälkkeen perusteella saatiin hiekoituksen osuudeksi Tikkurilan mineraalishiukkasista 80 %. Tulos on siten jokseenkin sama kuin edellisen vuoden Tikkurilan aineistolla saatu, joka kahdella eri tavalla laskettuna oli 84 ja 70 %

(Tervahattu ja Kupiainen 2001a). Hiekoitusmurskeen osuus on huomattavasti suurempi kuin kokeellisissa tutkimuksissa keskimäärin saatu (hiekoituksen osuus noin 30 %, Kupiainen et al. 2003a). Kuitenkin kokeellisissa tutkimuksissa oli havaittu, että käytettäessä karkeamman hiekan (2/5.6 mm) sijasta hienojakoisempaa (1/5.6 mm) hiekoituksen osuus kohosi n. 70 %:iin (kuva 21). Tikkurilassa oli käytetty vieläkin hienojakoisempaa hiekkaa (ajoradoilla 0.5/3 mm, jalkakäytävillä 1/6 mm; vastaava tiemestari Erkki Tammisto, kirjallinen ilmoitus). Näin ollen hiekoituksesta peräisin olevan hiukkasten suuri osuus Tikkurilan leijuvassa hiukkasmassassa voisi selittyä sillä, että alueella käytetty hienojakoinen hiekoitusmurske tuottaa suhteellisesti paljon enemmän hiekoituksesta peräisin olevaa hiukkasmassaa. Huomattakoon, että hienojakoinen hiekoitusmurske lisää suuresti myös asfaltin kulumista karkeampaan murskeeseen verrattuna eli sillä on voimakkaampi hiekkapaperivaikutus (Tervahattu ja Kupiainen 2002, Kupiainen ym. 2004).



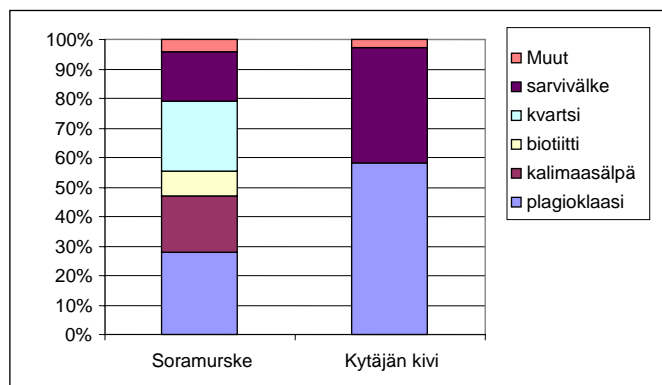
**Kuva 21.** Asfaltin osuus katupölystä koeolosuhteissa, vuosien 2001 ja 2002 kokeissa käytettäessä Ämmäsuon hiekoitusmursketta normaalia raekokoa (2/5.6 mm) tai hienojakoisempaa mursketta (1/5.6 mm).

Koska Tikkurilassa tutkittiin TSP-hiukkasmassaa PM<sub>10</sub>-aineistojen sijasta, haluttiin selvittää, eroavatko TSP- ja PM<sub>10</sub>-näytteiden hiukkasmassat toisistaan sen suhteen, mikä niissä on asfaltin ja hiekoituksen osuus. Oletettiin, että hiekoituksen osuus saattaa olla TSP:ssä suhteellisesti korkeampi kuin PM<sub>10</sub>:ssä ainakin hienojakoista hiekkaa käytettäessä. Tämän asian selvittämiseen käytettiin aikaisempia kokeellisia tutkimuksia. Ne osoittivat, että hienojakoista hiekkaa käytettäessä PM<sub>10</sub>-massa oli suhteellisesti suurempi TSP-massaan verrattuna (kuva 9). Toisaalta PM<sub>10</sub>:ssä hiekoituksen osuus (62%) hienojakoisella hiekalla oli pienempi kuin TSP-massassa (74%), kun taas karkeammalla murskeella sekä PM<sub>10</sub>:ssä että TSP:ssä muodostui suhteellisesti yhtä paljon (31%) hiekoituksesta peräisin olevaa pölyä. Nämä kokeet osoittaisivat siten, että olettamuksemme (hiekoituksen osuus on TSP:ssä suhteellisesti korkeampi kuin PM<sub>10</sub>:ssä ainakin hienojakoista hiekkaa käytettäessä) pitää paikkansa. Näistä havainnoista seuraa myös se johtopäätös, että hienojakoista hiekkaa käytettäessä hiekkapaperiefekti tuottaa enemmän asfaltista peräisin olevia hengittettäviä hiukkasia (PM<sub>10</sub>) suhteessa TSP-hiukkasiin.

Tikkurilan TSP-hiukkasmassan mineraalifraktiossa oli tämän tutkimuksen perusteella noin 80 % peräisin hiekoitusmurskeesta ja 20 % asfaltin kiviaineksesta. Tulos on jokseenkin sama kuin edellisessä samalta paikalta tehdyssä tutkimuksessa. Poikkeuksellisen korkeana pidettävä hiekoituksen osuus johtuu siitä, että hiekoitukseen käytettiin hienojakoista mursketta. Koska hienojakoinen hiekoitusmateriaali lisää tuntuvasti sekä hiekoituksesta että asfaltista hiekkapaperiefektin vaikutuksesta peräisin olevan leijuvan pölyn määrää, tulisi Tikkurilassa siirtyä karkearakeisemman murskeen käyttöön. Alue sopisi erittäin hyvin tätä asiaa selvittävän kenttätutkimuksen kohteeksi, koska siitä on käytettävissä pitkäaikainen mittausarja leijuvan pölyn määrästä sekä kahdelta vuodelta yksityiskohtaiset tutkimukset pölyn koostumuksesta ja lähteistä.

#### 4.4. HIUKKASTUTKIMUKSET POHJOISRANNASSA (HELSINKI)

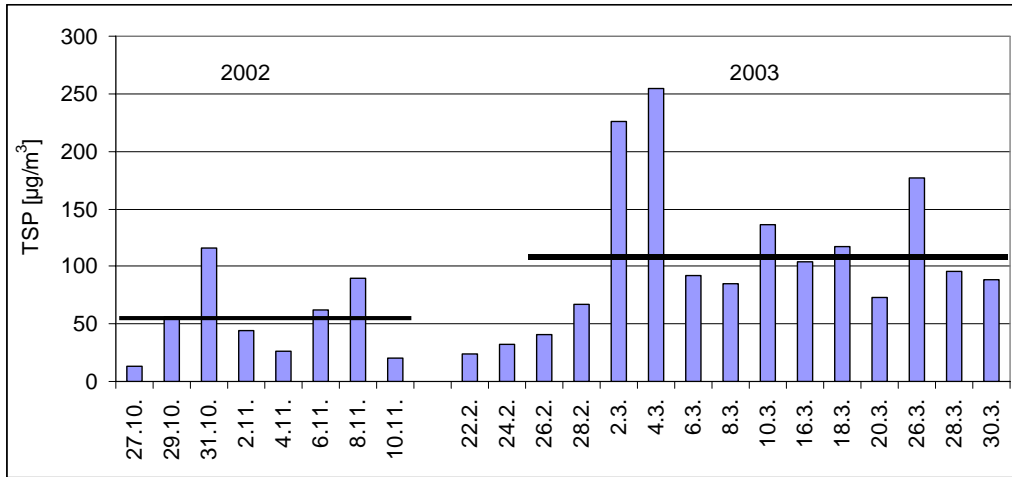
Talvikaudella 2002-2003 toteutettiin katupölyn kenttätutkimus Helsingin Pohjoisrannassa (Nordic Envicon 2003). Paikka valikoitui tutkimuskohteeksi asfaltin kiviaineksen ja sijaintinsa perusteella. Pohjoisrannan asfaltin kiviaines on tummaa Kytäjän intermediääristä vulkaniittia, joka eroaa mineralogialtaan hiekoituksessa käytetyistä graniittisista soramurskeista (kuva 22). Lisäksi keräinten paikka rajautuu itäpuoleltaan mereen siten että katu on meren ja keräinten välissä. Näin oletettiin saatavan mereltä tulevilla tuulensuunnilla tietoa hiukkasista, jotka olisivat pääosin kadulta peräisin. Pohjoisrannassa pääasiallinen liukkaudentorjuntamuoto on tiesuolan käyttö, tarvittaessa käytetään hiekoitusta (pääsääntönä: kun lämpötila alle  $-6^{\circ}\text{C}$  tai lumiolot vaativat). Vuonna 2002 hiekoitus jouduttiin aikaisen lumen tulon takia aloittamaan jo marraskuun alkupuolella myös Pohjoisrannassa.



**Kuva 22.** Kiviainesten keskimääräiset koostumukset Pohjoisrannan asfaltissa (Kytäjän intermediäärinen vulkaniitti) ja hiekoitusmateriaalina soramurske. Hiekoitusmateriaalin koostumusvaihtelut ovat suuria.

YTV keräsi hiukkasnäytteet TSP- ja  $\text{PM}_{10}$ -suurtehokeräimillä samalla tavalla kuin aikaisemmissakin tutkimuksissa. Hiukkasnäytteet kerättiin joka toinen päivä. Tarkempaan analyysiin valittiin kaksi jaksoa: syksyltä jakso keräysten aloittamisesta

hiekoituksen alkamiseen, kevätkaudelta jakso, jolloin hiukkaspitoisuudet olivat korkeimmillaan ja näytteet oletettavasti edustivat parhaiten keväistä katupölyä. Analyysseihin käytettiin TSP-näytteitä sen vuoksi, että varsinkin syksyllä PM<sub>10</sub>-pitoisuudet olivat alhaisia (keskimäärin 11 µg/m<sup>3</sup>, korkein 25 µg/m<sup>3</sup>) eikä kunnan hiukkasnäytteitä sen vuoksi ollut saatavana.



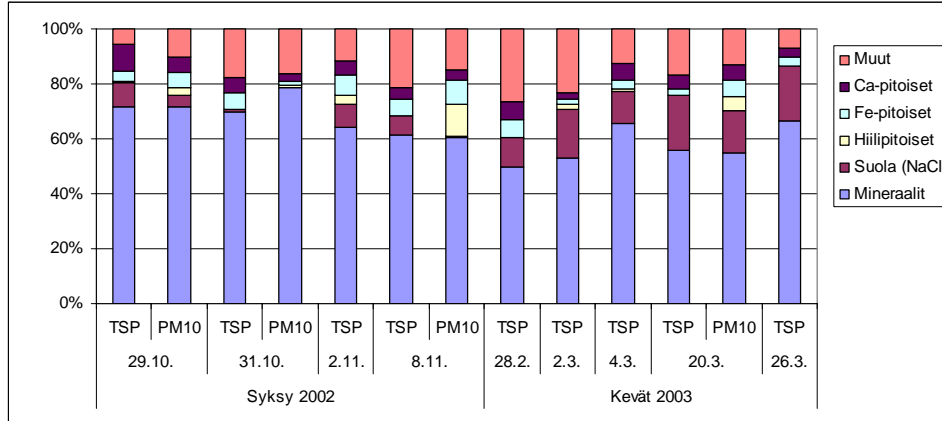
**Kuva 23.** TSP-leijumat Pohjoisrannan Liisanpuistossa viikoilla 43-45/2002 ja 8-13/2003, viivat edustavat jaksojen keskimääräistä leijumatasoa.

TSP-pitoisuudet olivat keskimäärin viisinkertaisia PM<sub>10</sub>-pitoisuuksiin verrattuna, korkeimmillaan 11-kertaisia 31.10. TSP-pitoisuudet (kuva 23) olivat keskimäärin 53 µg/m<sup>3</sup> syyskaudella ja 107 µg/m<sup>3</sup> kevätkaudella. Kevätkaudella TSP vuorokausiohjearvo ylittyi (120 µg/m<sup>3</sup>) neljä kertaa. Kun näytteitä oli joka toiselta päivältä, on todennäköistä, että Pohjoisrannassa oli vuonna 2003 ainakin ohjearvon sallimat 7 ylitystä (taulukko 1b). TSP-pitoisuuksien perusteella Pohjoisranta tutkimuskohteena soveltui hyvin katupölytutkimuksen tarpeisiin. TSP-näytteiden arvioitiin myös edustavan paremmin paikallista katupölyä, koska PM<sub>10</sub>-näytteissä on suhteellisesti enemmän kauempaa ilmanvirtausten mukana kulkeutunutta hiukkasmassaa.

Sopivia tuulioloja (tuuli itäsektorilta 45°-135°) havaittiin tutkimusjaksojen aikana vain kahtena päivänä (syyskaudella 2.11. ja kevätkaudella 4.3., osin 26.2. sekä 2.3.), joten koostumusanalyysseihin valittiin näytteitä pääasiassa päiviltä jolloin mitattiin korkeita pitoisuuksia. PM<sub>10</sub>-pitoisuuksien alhaisen tason vuoksi pääaineistoksi valittiin TSP-näytteet. Koostumusanalyysseissä on analysoitu syyskaudelta neljä TSP-näytettä ja kolme PM<sub>10</sub>-näytettä vastaavilta päiviltä sekä kevätkaudelta seitsemän TSP-näytettä ja yksi PM<sub>10</sub>-näyte. Yhteensä analysoitiin noin 2400 hiukkasen koostumukset ja ne luokiteltiin samalla tavalla kuin aikaisemmissa tutkimuksissa (esim. Nordic Envicon 2003).

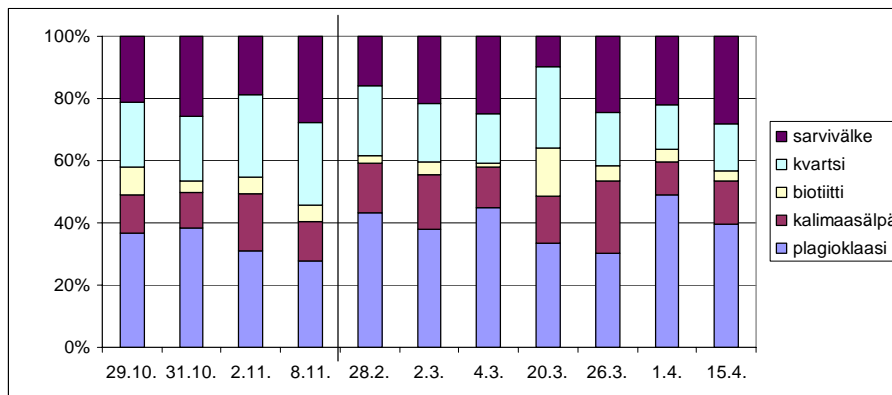
Hiukkasten pääryhmien osuudet näytteissä on esitetty kuvassa 24. Mineraalihiukkaset muodostivat suurimman osan hiukkasmassasta, toiseksi suurin luokka (Muut) muodostui hiukkasista, jotka koostuivat rikistä ja mahdollisesti hiilestä

yhdistyneenä Al-Ca-Fe-K-Mg-Na-Si kanssa. Kyseinen koostumus on aikaisemmissa tutkimuksissamme esitetty rikkipitoisten hiukkasten ryhmänä ja liitetty lentotuhkaan, rengasperäiseen pölyyn ja asfaltin sideaineeseen (Kupiainen ym. 2002). Suolahiukkasia havaittiin useana päivänä ja ne ovat todennäköisesti peräisin tiesuolauksesta. Keväällä suolapitoisuudet olivat selvästi suuremmat kuin syksyllä. Merisuola on myös mahdollinen lähde.



**Kuva 24.** Hiukkasten pääryhmät Pohjoisrannasta analysoiduissa näytteissä.

Hiukkasmassan mineralogialla tutkittiin tarkemmin, jotta saataisiin selville, miten eri mineraalilähteet ilmenevät pölyssä. Asfaltin kiviaineksen mineralogialla luonnehti sarvivälke ja plagioklaasi, kun taas hiekoitusmateriaali sisälsi plagioklaasia, kvartssia, kalimaasälpää ja biotiittia sekä vähemmän sarvivälkettä (kuva 25). Yllättävänä tuloksena havaittiin (kuva 26), että TSP-mineraalihiukkaset muistuttivat enemmän soramurskeen keskimääräistä koostumusta myös syksyn näytteissä. Sekä syksyn että kevään pöly oli mineraalikoostumukseltaan varsin samankaltaista. Erityisesti kvartsin ja myös kalimaasälvän huomattavan suuri osuus syksyn näytteissä viittaa voimakkaasti jonkin muun kuin paikallisen asfalttikiven vaikutukseen.

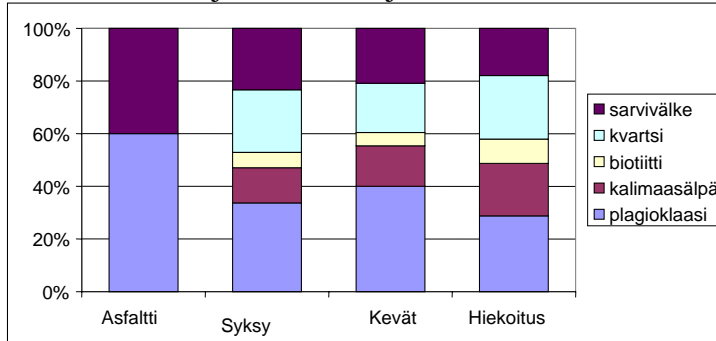


**Kuva 25.** Eri mineraalityyppien osuudet analysoiduissa TSP-näytteissä.

Paikallisilla lähteillä ei välttämättä ole ratkaisevan suurta merkitystä pölyn koostumukseen, vaan myös mineraalipölyä kulkeutuu kauempaa. Vastaava havainto tehtiin myös Museokadulla ja Tikkurilassa (Kupiainen ym. 2002). Sitä voi tulla



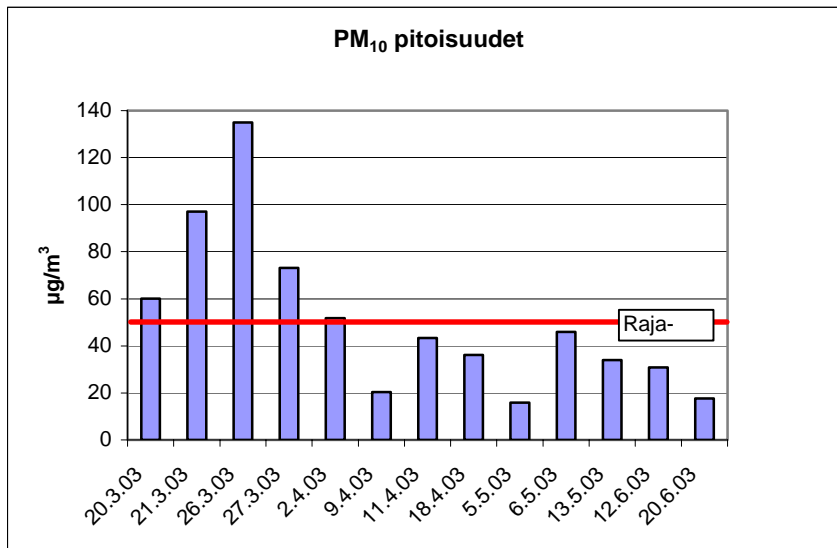
ilmavirtausten mukana, mutta merkittävämpää voi olla erilaisen maa-aineksen kulkeutuminen autojen renkaissa ja alustoissa.



**Kuva 26.** Päämineraalien keskimääräiset osuudet syksyn ja kevään TSP-näytteissä sekä lähilähteiden kiviaineksessa (asfaltti - Kytäjän intermediäärinen vulkaniitti; hiekoitusmateriaali – graniittinen soramurske).

#### 4.5. HIUKKASTUTKIMUKSET LAPPEENRANNASSA

Lappeenrannan kaupungissa on mitattu vuosittain korkeita PM<sub>10</sub>- ja TSP-pitoisuuksia. Etenkin kevättalvella havaitaan lukuisia PM<sub>10</sub>-vuorokausiraja-arvon (50 µg/m<sup>3</sup>) ylityksiä (kuva 27), kun kaduille laskeutunut pöly vapautuu ilmaan katujen kuivuessa keväällä (Imatran kaupungin ympäristötoimi 2001, 2002 ja 2003). Leijuvan pölyn ongelma on näin ollen merkittävä Lappeenrannassa. Korkeat pölypitoisuudet ajoittuvat usein katupölyajanjaksolle maaliskuulta huhtikuulle. Lappeenrannan mantereisessa ilmastossa saattavat katupölyn haitalliset vaikutukset korostua, sillä tyynellä säällä ilman epäpuhtaudet sekoittuvat ja laimenevat hitaasti. Lappeenrannassa on myös useita teollisuuden ja energiantuotannon laitoksia, joiden päästöt voivat vaikuttaa ilman PM-pitoisuuksiin (Räisänen ym. 2004).



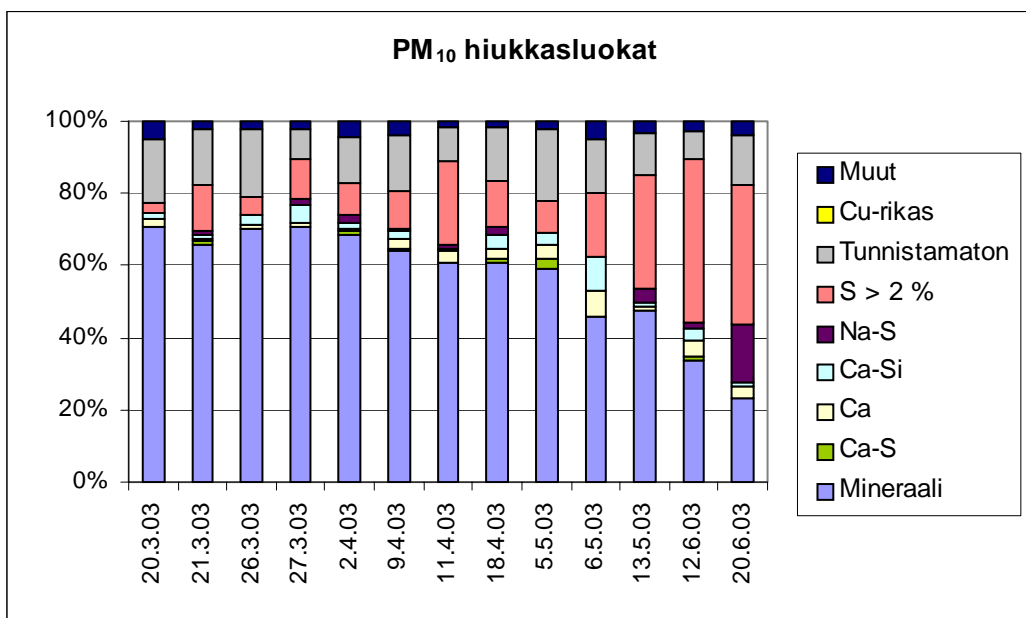
**Kuva 27.** Keskustan monitorointiasemalla mitattuja PM<sub>10</sub>-vuorokausipitoisuuksia.

Havaittiin, että korkeat PM<sub>10</sub>-pitoisuuden keväällä johtuivat etenkin hiekoitushiekasta ja asfaltista peräisin olevista hiukkasista. Lappeenrannan tehostettu katujen kevätsiivous (Operaatio hiekkamyrsky) suoritettiin 26-28.3.2003. Puhdistuksen alkaminen näkyy kohonneina pitoisuuspiikkeinä, koska osa puhdistuksesta suoritetaan ilman vettä ja se nostaa pölyä ilmaan. PM<sub>10</sub>-pitoisuudet pienenevät kevään edetessä ja samaan aikaan mineraalipölyjen suhteellinen osuus muihin pölyihin nähden pieneni (kuva 28). Vastaavasti rikkipitoisten hiukkasten suhteellinen osuus kasvoi. Samana ajanjaksona PM<sub>10</sub>-hiukkasten keskimääräinen raekoko pieneni noin 6,5 µm:stä noin 3,5 µm:iin, mikä osoittaa myös kookkaampien mineraalipölyjen osuuden vähentymistä.

Ihalaisen teollisuusalueen päästöt näkyivät lähinnä Ihalaisen ja Mäntylän TSP-näytteiden kohonneina Ca-rikkaiden, Ca-Si- ja Ca-S-rikkaiden hiukkasten pitoisuuksina. Keskustan monitorointipisteessä kyseisiä hiukkasia tavataan etelätuulilla. Ihalaisen alueen teollisuuslaitosten piippujen pölypäästöt ovat laskeneet huomattavasti viimeisen 15 vuoden aikana. Paperiteollisuuden päästöjen osuus oli pieni. Soodakattilan päästöt näkyivät parhaiten näytteissä, joiden kokonaispitoisuus oli alhainen ja kun vallitsivat otolliset sääolosuhteet. Kuorikattiloiden päästöjä ei näytteistä kyetty erottamaan.

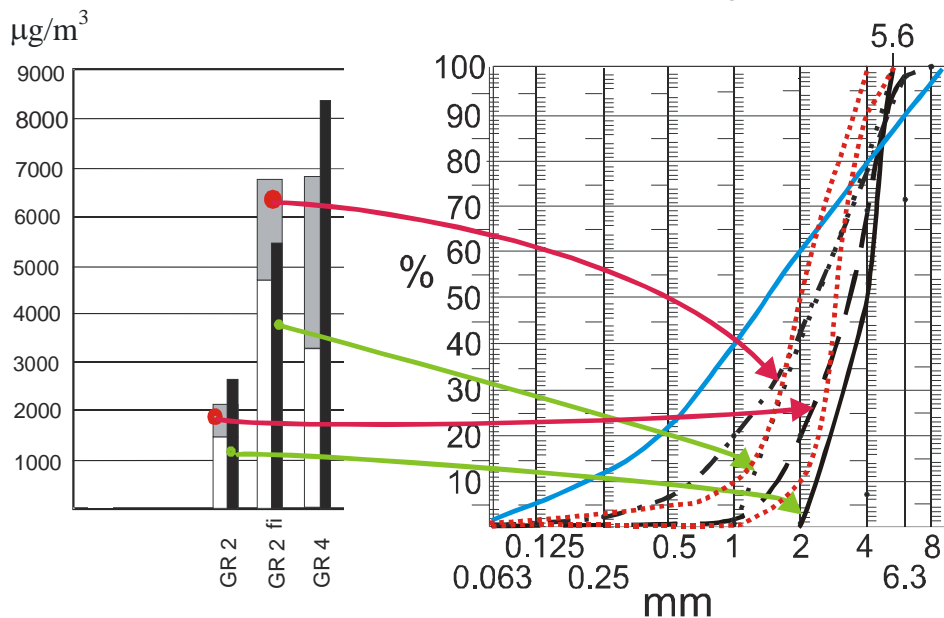
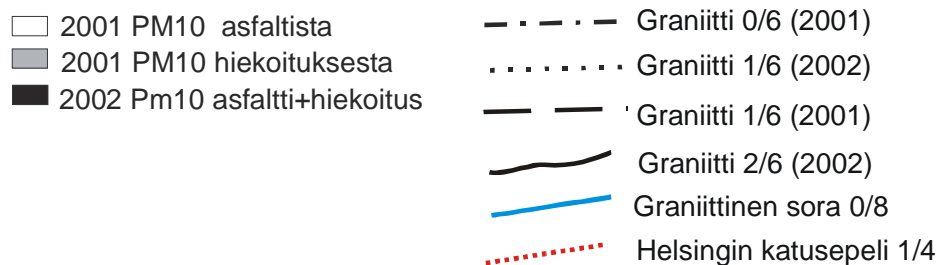
Tutkimuksessa kiinnitettiin huomiota siihen, että Lappeenrannan katualueita hiekoitettiin hienojakoisella 0/8 mm seulomattomalla hiekalla. Hienojakoinen hiekka sisältää moninkertaisen määrän hiekkapartikkeleita verrattuna karkeamman rakeisuuskäyrän omaavaan hiekkaan. Tämän seurauksena siinä on enemmän toisaalta renkaiden alla kuluvia hiekkapartikkeleita ja toisaalta asfalttia kuluttavia partikkeleita. Koeradalla suoritettujen tutkimusten perusteella hienorakeinen hiekoitushiekka (0/1 mm tai 0/2 mm) lisää selvästi sekä hiekoitushiekasta että asfaltista peräisin olevan pölyn määrää (esim. Kupiainen ym. 2003; Räisänen ym. 2002b ja 2003). Asfalttiperäisen pölyn määrän lisääntyminen voidaan selittää sillä, että hienorakeisessa hiekassa on runsaammin asfalttia kuluttavia hiekkapartikkeleita. Lisäksi keski- tai karkearakeisesta (kiven mineraalien raekoko) graniitista valmistettu hiekoitushiekka on usein iskunkestävyydeltään heikompaa kuin enemmän tummia mineraaleja sisältävät kivilajit ovat. Iskunkestävyydeltään heikot hiekkapartikkelit murskautuvat helpommin auton renkaiden alla aina PM<sub>10</sub>-hiukkasiin asti.

Kuvassa 29 on esitetty hiekoitushiekan raekokojakauman (graniittinen kalliomurske) ja levitysmäärän vaikutus syntyvän PM<sub>10</sub>-pölyn määrään koeolosuhteissa. Lappeenrannan katujen hiekoitukseen käytettävän 0/8 mm Salpausselästä otetun hiekoitushiekan rakeisuuskäyrä on merkitty *sinisellä viivalla*. Tämä hiekka sisältää noin 40 % < 1 mm hiekkafraktiota ja noin 60 % < 2 mm hiekkafraktiota. Eli hiekoitushiekka sisältää erittäin paljon hienojakoista hiekkaa. Kuvassa on *punaisella katkoviivalla* Helsingin kaupungin rakennusviraston (HKR) käyttämän pestyn hiekoitussepelin rakeisuuden ylä- ja alarajat. HKR:n hiekka saa sisältää 10 % < 1 mm hiekkafraktiota ja 1 % < 0,063 fraktiota. Tämäkään rakeisuuskäyrä ei ole paras mahdollinen, sillä kyseinen hiekoitusmateriaali voi sisältää jopa 50 % < 2 mm hiekkarakeita, mutta sen avulla saadaan joka tapauksessa suuri osa haitallisimmista hiekkapartikkeleista poistetuiksi.



**Kuva 28.** Merkittävimpien hiukkastyypin suhteelliset osuudet PM<sub>10</sub>-näyteissä Lappeenrannan keskustassa keväällä ja alkukesällä 2003.

Lappeenrannan kevätpölyepisodin hiukkaset koostuivat suurimmaksi osaksi mineraalihiukkasista, joiden tärkeimmät lähteet ovat hiekoitushiekkan ja asfaltin kulumisen. Tutkimuksen mukaan hiekoitushiekasta peräisin olevan pölyn määrä oli suurempi kuin asfalttiperäisen. Lisäksi hiekoitushiekka aiheuttaa asfaltin kulumista, mikä kiinnittää huomion hiekoitushiekkaan tärkeänä pölyn lähteenä ja aiheuttajana. Asfaltin kulumisen seurauksena muodostuu katupölyä. Katupölyn määrää voidaan taten vähentää, mikäli käytetään kulutuskestävämpää asfalttia. Lappeenkadun asfaltissa on 28 % biotiittimineraalia, joka kuuluu pehmeensä vuoksi. Useat keskusta-alueen kadut on päällystetty asfaltilla, jonka kiviaineksena on keski- tai karkearakeista graniittia, mikä ei ole korkealuokkaista asfaltin kiviainesta. Kaakkois-Suomessa on puutetta I-luokan kiviaineksista, mutta keskustan vilkkaimmin liikennöidyillä kaduilla tulisi käyttää vähintään II-luokan kiviainesta ja SMA-päällystettä (kivimastikiasfaltti). Tutkimuksessa kiinnitettiin huomiota myös Lappeenrannan katujen puhtaanapitoon ja esitettiin siihen liittyviä suosituksia.



**Kuva 29.** Hiekoitushiekan rakeisuuden vaikutus pölyn määrään (koeratatutkimuksissa) sekä eri kohteissa käytettyjen hiekoitusmateriaalien rakeisuuskäyrät. Yhden Lappeenrannan 0/8 mm hiekoitushiekanäytteen (**sininen käyrä**) rakeisuuskäyrä. Helsingin katualueiden hiekoitussepin rakeisuuden ylä- ja alaraja (**punainen pisteviiva**), GR = graniitti, fi = sisältää runsaammin < 2 mm hiekoitushiekkaa, 2 = hiekoitushiekan levitysmäärä 1000 g/m<sup>2</sup>, 4 = hiekoitushiekan levitysmäärä 2000 g/m<sup>2</sup>.

## 4.6. KALSIUMKLORIDIN KÄYTTÖ KATUPÖLYN SIDONTAAN

### 4.6.1. Kalsiumkloridin käyttö kaupunkiliikenteessä

Keväisen katupölyn haittojen torjunnassa on viime aikoina ollut esillä kalsiumkloridin (CaCl<sub>2</sub>) käyttö katupölyn sidontaan. Keväällä 2004 tähän turvauduttiin laajalti pääkaupunkiseudulla pitkän sateettoman kauden aikana, jolloin ilman hiukkaspitoisuudet kohosivat useina peräkkäisinä päivinä yli 50 µg/m<sup>3</sup>. Tässä tutkimuksessa selvitetään, miten tässä pölyntorjunnassa onnistuttiin ja mitä tekijöitä tulee ottaa huomioon kalsiumkloridin käytössä.

Kalsiumkloridia käytetään kaupunkien kaduilla neljällä tavalla:

1. Liuossuolauksena liukkaudentorjunnassa talvella. Vuorisuolaan (tiesuola, natriumkloridi) verrattuna etuina pidetään liuoksen homogeenisuutta ja puhtautta

sekä alhaisempaa jäätympistettä. Kalsiumkloridi on huomattavasti tavallista suolaa kalliimpaa, mutta toisaalta sitä tarvitaan vähemmän.

2. Hiekoitushiekkaan sekoitettuna. Estää hiekan paakkuuntumista ja auttaa pitämään tien pinnan sulana sekä vähentää pölyämistä.

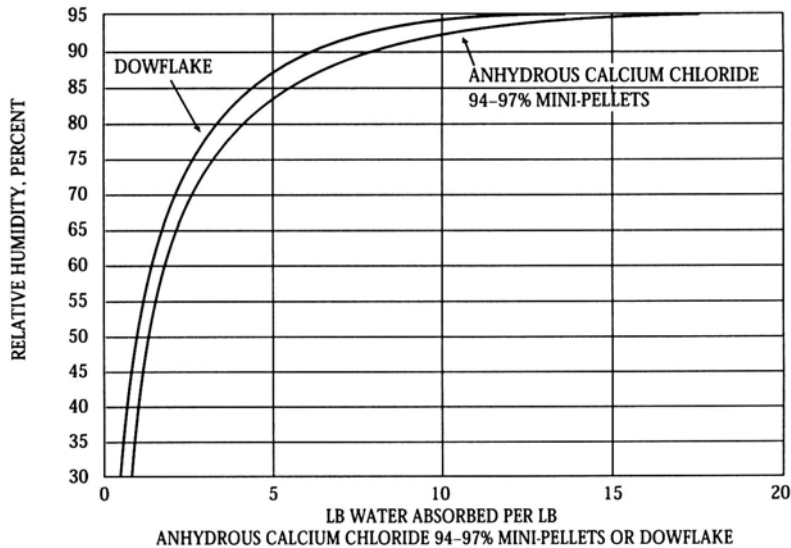
3. Katupölyn sitomiseen liuoslevityksenä.

4. Pölymassan kostuttamiseen hiekanpoiston yhteydessä. Pölyämisen estämiseksi on välttämätöntä käyttää kasteluvettä. Laimealla kalsiumkloridiliuoksella vettä voidaan käyttää myös pakkasaamuina, jolloin tehollinen työaika pitenee. Samalla vähennetään pölyämistä.

Kaikki neljä käyttötapaa huomioiden kalsiumkloridin käyttö saattaa muodostua niin merkittäväksi, että sen kaikki vaikutukset on syytä selvittää huolellisesti.

#### 4.6.2. Fysikokemiallinen tausta

**Figure 7 — Atmospheric Humidities in Equilibrium with Anhydrous Calcium Chloride 94–97% Mini-pellets and DOWFLAKE Calcium Chloride at 25°C (77°F)**



**Kuva 30.** Kalsiumkloridin pidättämä vesi ilman kosteuden (Y-akseli) funktiona. X-akselilla  $\text{CaCl}_2$ :n ja absorboidun veden suhdeluku. Kokeessa käytetty kahta Dow Chemicalsin  $\text{CaCl}_2$ -valmistetta (lähde DOW CHEMICALS 2004).

Kalsiumkloridi on sekä hygroskooppinen että vetistynvä (deliquescent). Kiinteänä aineena se absorboi kosteutta ilmasta ja liukenee vähitellen imemäänsä veteen. Liuos jatkaa kosteuden absorptiota niin kauan, että saavutetaan tasapaino liuoksen ja ilman höyrynpaineiden välillä. Jos ilman kosteus lisääntyy, liuos absorboi lisää kosteutta; ilman kosteuden pienentyessä vettä haihtuu liuoksesta ilmaan. Kalsiumkloridin käyttö katu- ja tiepölyn sidontaan perustuu juuri sen kykyyn imeä ilmasta vettä. Sen ansiosta kadun pinta pysyy kosteana ja hienojakoinen pöly ei pääse nousemaan ilmaan autoliikenteen tai tuulen vuoksi. Ilman lämpötilan ollessa  $25^\circ\text{C}$  ja suhteellisen kosteuden 95%, kalsiumkloridin imee noin 15 kertaa painonsa verran vettä. Ilman kosteuden laskiessa alle 70%:n vähenee veden määrä nopeasti ja ilman kosteuden ollessa 65% kalsiumkloridi imee vettä suunnilleen kaksi kertaa painonsa verran ja

45%:ssa enää oman painonsa verran (kuva 30). Tällöin myös kalsiumkloridin pölyn sidonta olennaisesti heikkenee.

#### **4.6.3. Kalsiumkloridin korroosiovaikutus**

Kalsiumkloridi on huomattavasti natriumkloridia voimakkaampi korroosion aiheuttaja. Se syövyttää kromi- ja alumiiniosia ja jopa ruostumatonta terästä. Kalsiumkloridin aiheuttama ajoneuvojen korroosio ja tien pinnan kuluminen on vakava ongelma Yhdysvalloissa, jossa mm. Coloradon osavaltiossa käytetään kalsiumkloridia vuorisuolan sijasta pitämään teiden pinnat jäättöminä.

#### **4.6.4. Kalsiumkloridin käyttökokeilu keväällä 1998**

Rakennusviraston HKR-Ympäristötuotanto kokeili laimeaa kalsiumkloridiliuosta kadulta nousevan pölyn sidontaan 1.4.1998 Vallilassa Mäkeläkadun ja Hämeentien-Vellamonkadun välisellä alueella (HKR 1998). Olosuhteet eivät kuitenkaan kokeilun kannalta olleet erityisen suotuisat, sillä edellisenä päivänä (31.3.) satoi vettä melko paljon ja jonkin verran myös seuraavana päivänä (2.4.) sekä runsaammin taas 5.4.

Lähellä kokeilualan keskipestettä sijaitsee YTV:n Vallilan mittausasema. Verrattaessa sen PM<sub>10</sub>-pitoisuuksia Töölön ja Hakunilan arvoihin ilmeni, että kastelun jälkeisinä kahtena ensimmäisenä päivänä Vallilan pitoisuudet ovat huomattavasti alhaisemmat kuin Töölön. Kuitenkin Töölössä usein havaitaan Vallilaa huomattavasti korkeampia arvoja, mm. kastelua edeltävinäkin päivinä. Hakunilaan verrattuna Vallilan hiukkaspitoisuudet ovat kastelun jälkeen suunnilleen samalla tasolla, mitä ne olivat myös ennen kastelua. 5.4. tulleet sateet ovat pudottaneet myös Töölön pitoisuudet hyvin alhaisiksi eikä sen jälkeen hiukkaspitoisuuksissa ole nähtävissä mitään, mikä viittaisi kalsiumkloridikastelun vaikutukseen. Näin ollen vuoden 1998 kokeilun perusteella ei voida sanoa, vaikuttiko kalsiumkloridin käyttö pölypitoisuuksien alenemiseen. Syynä tällaiseen tulokseen olivat ennen kaikkea kokeilua edeltäneet ja sen jälkeiset sateet.

#### **4.6.5. Kalsiumkloridin käyttö keväällä 2004**

Keväällä 2004 oli pitkä sateeton kausi, jonka vaikutuksesta ilmassa leijuvan katupölyn määrä nousi korkeaksi. Koska ilmatieteen laitos arvioi kuivan ilman jatkuvan useita vuorokausia, antoivat Helsingin kaupungin ympäristökeskus ja YTV ennakkovaroituksen 31.3. klo 9.00 ja toimenpidepyynnön 31.3. klo 12.00 ryhtyä kastelemaan katuja pölyhaittojen ehkäisemiseksi. Näihin toimenpiteisiin ryhdyttiin Helsingissä, Vantaalla ja Espoossa kastelemalla pääväylät ja osin muitakin katuja kalsiumkloridiliuoksella. Myös tielaitos suoritti kastelua Kehä I:llä. Käytetyn liuoksen konsentraatio ja määrä vaihtelivat.

Helsingissä suoritettiin kalsiumkloridiliuoksen levitystä laajasti heti 31.3. (työnjohtajien kirjalliset raportit/Jari Viinanen). Koillisessa tiepiirissä levitys oli aloitettu jo 29.3. Pölynsidontaliuoksen levitystä jatkettiin Helsingissä 1.4. ja

vähäisessä määrin vielä 2.4. Itä-Vantaalla pääkatuverkosto ja keskustojen (mm. Tikkurila) katuverkosto laajemminkin kasteltiin  $\text{CaCl}_2$ -liuoksella 1.4. ja 2.4. Senkin jälkeen käytettiin laimeaa  $\text{CaCl}_2$ -liuosta katujen puhdistuksen yhteydessä estämässä jään muodostusta (Erkki Tammiston tiedonanto). Espoon Leppävaarassa ja Tapiolassa  $\text{CaCl}_2$ -kastelu aloitettiin 30.3. Kastelua laajennettiin 31.3. ja 1.4. Leppävaarassa kasteltiin kaikkiaan kuutena päivänä 8.4. saakka. Espoossa kasteltiin keväällä 2004 vain noin 0.5 metrin leveydeltä kanttikiven vierestä ja muilta paikoilta, joihin hiekkaa oli kertynyt (Markku Koskisen tiedonanto).


Kevät 2004 oli katupölyn kannalta sääoloiltaan erittäin vaikea, koska sateita oli hyvin vähän. Ensimmäiset pölyepisodit esiintyivät jo ennen helmikuun puoliväliä. Maaliskuun loppupuolelle tultaessa kuiva kausi oli jatkunut jo viikkokausia ja ilman  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuudet nousivat joka päivä korkeiksi kaikilla pääkaupunkiseudun mittausasemilla. Raja-arvo  $\text{PM}_{10}$ -hiukkaspitoisuudelle  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (vuorokausikeskiarvo) ylittyi monilla mittausasemilla 29.3. ja 30.3. korkeimmat tuntipitoisuudet nousivat yli  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Hengitettävän pölyn määrä on yleensäkin riippuvainen ilman kosteudesta. Niin on ollut myös kalsiumkloridikastelun jälkeen. Tarkastelujakso ulottuu runsaan kahden viikon päähän käsittelystä. Tänä aikana ei ole satanut lainkaan. Mikäli pölynsidontakäsittelyä ei olisi suoritettu, olisi ilman  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuus noussut kaikkina päivinä korkeaksi kaikilla mittausasemilla. Nyt oli useita hyvin alhaisten pitoisuuksien päiviä, mutta välillä melko korkeitakin pölymääriä. Tarkasteluajalta voidaan erottaa seuraavat jaksot, joina ilman  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuudet vaihtelivat ilman kosteuden ja siitä riippuvaisen  $\text{CaCl}_2$ :n pölynsidontakyvyn mukaan (kuvat 31 ja 32, taulukko 9) :

- I.** Kastelupäivänä  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuuksien alenema on vaihdellut eri asemilla, mikä ehkä saattaa johtua kastelun erilaisesta ajoituksesta. Sen jälkeen runsaan vuorokauden ajan  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuudet olivat melko korkeat ilman kosteuden ollessa hyvin alhainen ja pölynsidontan heikkoa.
- II.**  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuudet suhteellisen alhaisia ilman kosteuden ollessa melko korkea.
- III.** Pitoisuudet vaihtelevat runsaasti vuorokauden mittaan: yöllä ne ovat alhaisia ilman kosteuden ollessa suuri ja päivällä korkeita ilman ollessa kuivaa ja pölynsidontakyky heikkoa. Päiväajan  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuuksia nostaa tietysti myös liikennemäärän lisäys. Kuitenkin esimerkiksi 5.4. (maanantai) pölypitoisuudet pysyvät myöhään korkeina, kun ilman kosteus illalla on normaalia alhaisempi.
- IV.** Pitoisuudet ovat pitkän ajan hyvin alhaisia, kun ilman suhteellinen kosteus on kohonnut.  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuudet olisivat varmasti olleet hyvin korkeita, ellei kalsiumkloridikastelua olisi suoritettu.
- V.** Pitoisuudet kohosivat jälleen selvästi ilman kuivuessa ja pölynsidontakyvyn heiketessä.
- VI.** Pölypitoisuudet laskivat vielä kerran ilman kosteuden noustessa. Vielä tämänkin jakson pitoisuuksien aleneminen katsotaan aiheutuneen

pölynsidonnasta. Näin ollen kastelun vaikutus näissä olosuhteissa säilyi kahden viikon ajan. Tämä jakso tosin osui pääosin yöaikaan, jolloin myös liikenteen pölyä aiheuttava vaikutus on pieni. Kuitenkin sekä alkuillan että aamuruuhkan PM<sub>10</sub>-pitoisuuksien vertailu edelliseen vuorokauteen osoittaa selvästi suurempia arvoja tällä jaksolla ilman kosteuden ollessa huomattavasti korkeampi.

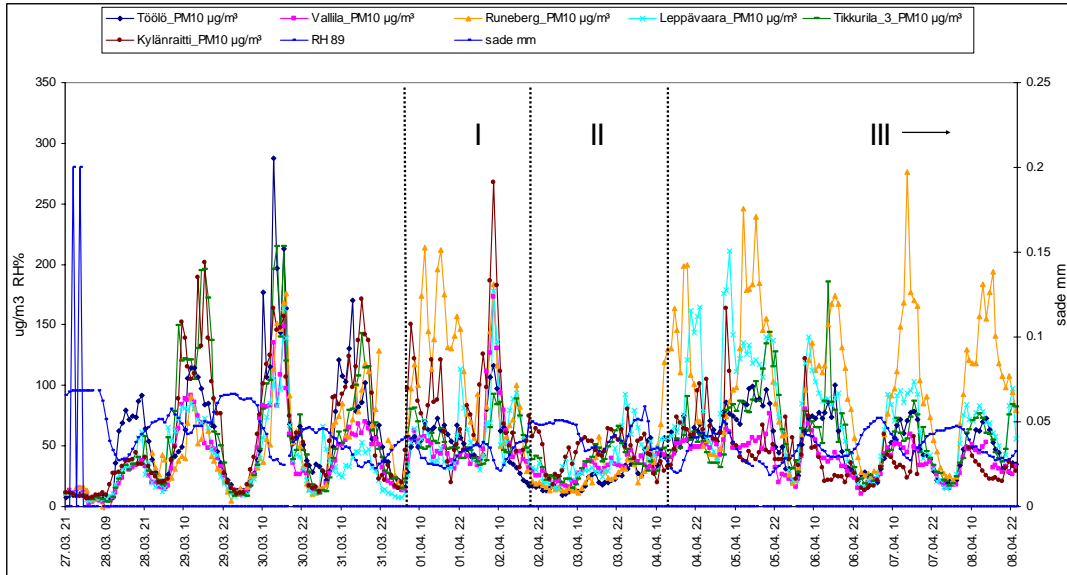
- VII.** Pitoisuudet alkavat pysyä korkeina, vaikka ilman kosteuspitoisuus on suuri. Tämä viittaa siihen, ettei kalsiumkloridin pölynsidontavaikutus enää tehoa.

Jakso	Aika	PM <sub>10</sub> keskiarvo min-max	RH keskiarvo min-max	Kevään hiekan poisto etenee 
I	1.4. klo 11- 2.4. klo 18	82,8 19,5-268	41,8 29-54	
II	2.4. klo 19- 4.4. klo 11	47,2 18,2-80,6	60,7 44-82	
III	4.4. klo 12- 9.4. klo 22	38,6 10,5-163	49,2 26-73	
IV	9.4. klo 23- 13.4. klo 8	23,6 3,6-108	65,4 36-91	
V	13.4. klo 9- 14.4. klo 16	66,0 14,4-128	50 23-78	
VI	14.4. klo 17- 15.4. klo 10	33,3 10-91,3	80,2 57-88	
VII	15.4. klo 18- 16.4. klo 23	49,0 12-96	72,7 32-94	

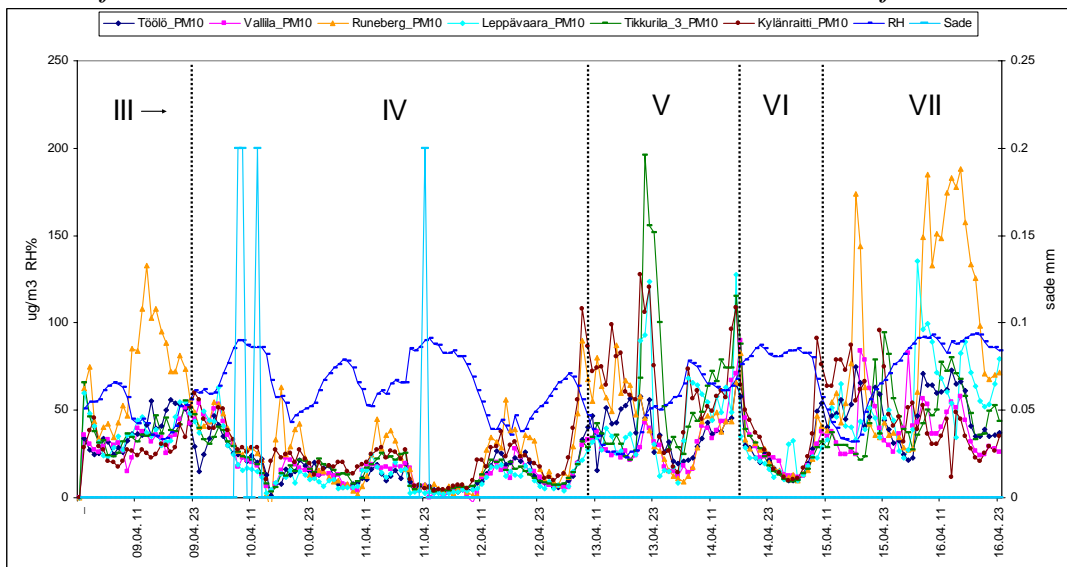
**Taulukko 9.** Ilman hiukkaspitoisuudet ja kosteus (RH) kalsiumkloridikastelun jälkeisinä päivinä.

16.4. jälkeisinä päivinä esiintyy verraten korkeita pölypitoisuuksia ilman kosteudesta riippumatta, mm. 19. ja 20.4. raja-arvon ylityksiä ilman kosteuden ollessa kohtalainen. 21.4. satoi jonkin verran, mikä yhdessä hiekanpoiston etenemisen kanssa vaikutti pölypitoisuuksiin niin, ettei kalsiumkloridin mahdollista vaikutusta ole enää mahdollista arvioida.





**Kuva 31.** Ilman  $PM_{10}$ -pitoisuudet Töölössä, Vallilassa, Runeberginkadulla, Leppävaarassa, Tikkurilassa ja Kylänraitilla 27.3.-8.4.2004 sekä ilman suhteellinen kosteus ja sademäärä samaan aikaan. Sateita ei ollut lainkaan 27.3. jälkeen.



**Kuva 32.** Ilman  $PM_{10}$ -pitoisuudet Töölössä, Vallilassa, Runeberginkadulla, Leppävaarassa, Tikkurilassa ja Kylänraitilla 9.-16.4.2004 sekä ilman suhteellinen kosteus ja sademäärä samaan aikaan. Erittäin vähäisiä sateita esiintyi vain 10. ja 11.4.

#### 4.6.6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Joka kevät toistuvien katupölyhaittojen ehkäisemiseksi Helsingin kaupungin ympäristökeskus, rakennusvirasto ja YTV ovat laatineet suunnitelman, joka sisältää myös toimenpiteet vaikeiden katupölyepisodien sattuessa (Helsingin kaupungin

ympäristökeskus 2002). Tällaisessa tilanteessa käytettiin keväällä 2004 toimenpiteenä katupintojen kastelua kalsiumkloridiliuoksella Helsingissä, Vantaalla ja Espoossa.

Kastelun vaikutuksia ilman  $PM_{10}$ -pitoisuuksiin tutkittiin YTV:n kuudella mittausasemalla. Hiukkaspitoisuuksien muutoksia verrattiin meteorologisiin tietoihin, ennen kaikkea ilman kosteuspitoisuuteen ja sademäärään. Tuloksista voidaan päätellä, että kalsiumkloridin vaikutus sateettomana aikana kesti kaksi viikkoa, mutta sen pölynsidontakyky oli suuresti riippuvainen ilman kosteudesta. Kuivina päivinä  $PM_{10}$ -pitoisuudet kohosivat heti kastelun jälkeisinä päivinä, mutta ilman kosteuden lisääntyessä kalsiumkloridi imi ilmasta vettä ja sitoi pölyä. Ilman kosteuden ollessa suuri on  $CaCl_2$ :n pölynsitomiskyky erittäin hyvä. Kosteuden laskiessa 60-70 prosenttiin pölynsidontakyky alkaa heiketä ja RH 40-50:ssä teho laskee suuresti.

Keväisen katupölyn sitomisessa kalsiumkloridin käyttö rajoittunee useimpina vuosina yhteen tai kahteen kertaan. Sitä voidaan käyttää myös rajoitetusti täsmälevityksenä, jolloin ei levitetä koko ajoradan aluetta vaan ainoastaan ongelmallisemmat kohdat. Kalsiumkloridin käyttö pölyn sidontaan voidaan siten rajoittaa niin vähäiseksi, ettei sillä pitäisi olla haitallisia vaikutuksia esimerkiksi autojen korroosion lisääjänä. Myöskään merkittäviä ympäristövaikutuksia näin vähäisellä käytöllä ei ole. Katupölyn vähentämisen toimenpiteet tulee kuitenkin kohdistaa pölyn muodostuksen vähentämiseen ja pölynsidontaa käyttää vain sellaisissa tilanteissa, joissa pölyn vähentämisessä ei ole riittävästi onnistuttu.

## *KATUPÖLYPROJEKTIN TIIVISTELMÄ*

*Katupölyprojekti on syntynyt tarpeesta selvittää hiekoituksen ja muiden tekijöiden vaikutus kaupunki-ilman hengitettävän pölyn koostumukseen erityisesti keväisen katupölyjakson aikana. Siinä on ollut kolme tavoitetta:*

*1. Päättävöitteena on ollut tutkia katupölyn koostumusta ja lähteitä. Ongelma on rajattu voimassa olevien säädösten perusteella hengitettäviin hiukkasiin eli sellaisiin, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 10 mikrometriä (kuvataan lyhenteellä  $PM_{10}$ ,  $PM = particulate matter$ ).*

*Erityisesti on ollut tarpeen tutkia, kuinka suuri osa katupölystä on peräisin*

- hiekoitushiekasta*
- nastarenkaiden aiheuttamasta tien kulumisesta*
- renkaiden kulumisesta*
- polttoperäisistä lähteistä, mm. autojen pakokaasuista*
- muista lähteistä*

*2. Toisena tavoitteena on ollut kehittää menetelmiä, joilla voidaan luotettavasti selvittää hiekoitushiekan ja asfaltin materiaalin osuus katupölyssä erilaisissa olosuhteissa.*

*3. Tärkeänä tavoitteena on myös ollut aineiston tuottaminen katupölyongelmiin liittyvään päätöksentekoon ja käytännön toimenpiteisiin.*

Projektin **TOTEUTUS** on koostunut kolmesta osaprojektista, joista kaksi ensimmäistä on sisältänyt menetelmien kehittämisen:

1.Kokeelliset tutkimukset, joissa on selvitetty erilaisten tekijöiden vaikutusta katupölyn muodostukseen.

2.Kenttätutkimukset, joissa katupölyn koostumusta ja lähteitä on tutkittu erilaisissa katuolosuhteissa.

3.Haastattelututkimus, jossa on selvitetty eri sektoreiden asiantuntijoiden näkemyksiä katupölyongelmasta sekä toimenpiteistä haittojen vähentämiseksi.

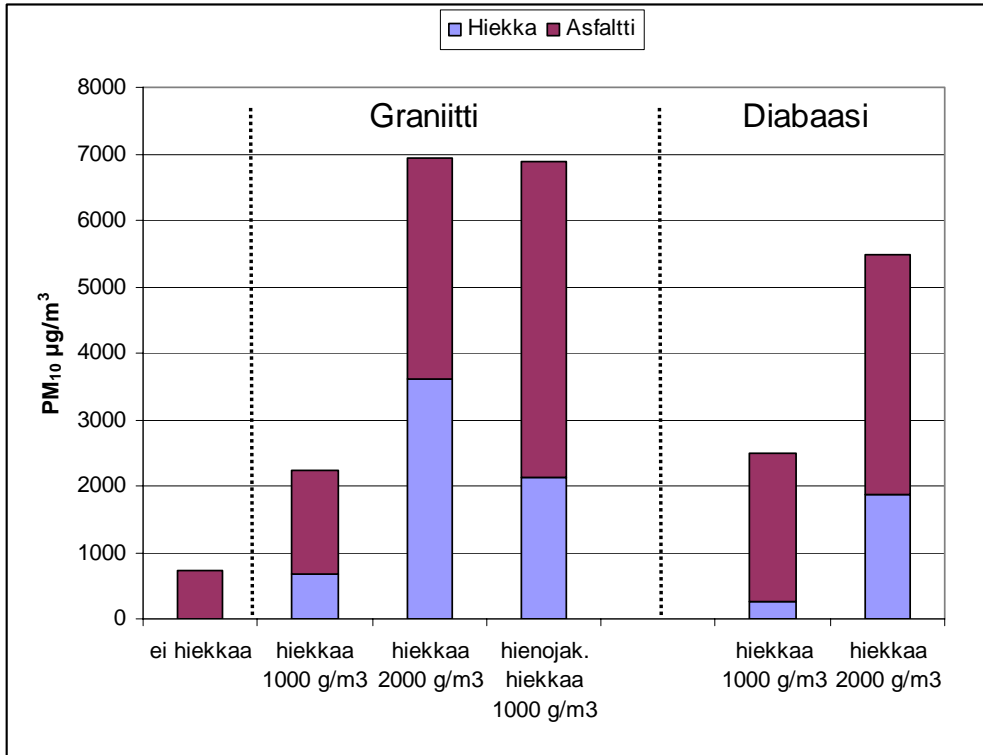
Tämä raportti sisältää kahden ensimmäisen osaprojektin tulokset. Projekti toteutuksesta on vastannut Nordic Envicon Oy laajassa yhteistyössä rahoittajien ja muiden yhteistyökumppaneiden kanssa. Toiminta on perustunut verkostoitumiselle, jossa eri tahojen asiantuntemusta ja laitteistoja on käytetty mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti.

## **TIIVISTELMÄ KOKEELLISTEN TUTKIMUSTEN TULOKSISTA**

Tutkittaessa koeolosuhteissa sitä, muodostaako hiekoitushiekasta vai asfaltista irronnut hienoaines pääosan keväisestä katupölystä, saatiin aivan uudenlainen ja odottamaton vastaus: hiekoitus lisää hienojakoisen pölyn määrää, mutta pääosa pölystä voi usein olla peräisin asfaltista. Se syntyy siten, että renkaan ja asfaltin välissä oleva hiekka irrottaa hienojakoista pölyä asfaltista. Tämä ilmiö on ensi kertaa osoitettu näissä tutkimuksissa ja annoimme sille nimen hiekkapaperi-ilmiö. Nämä tulokset osoittavat, että on tärkeää tuntea kaikki tekijät, jotka liittyvät renkaiden, hiekoituksen ja asfaltin vuorovaikutukseen. Ne kaikki on otettava huomioon selvitettyessä mahdollisuuksia vähentää katupölyn muodostusta.

Hiekoituksen lisääminen vaikutti voimakkaasti hengitettävän pölyn määrän kasvuun siten, että sekä hiekoituksesta että asfaltista peräisin olevan hiukkasmassan määrä lisääntyi. Hienojakoinen hiekka lisää pölyn muodostusta karkeampiin murskeisiin verrattuna. Hiekoitusmateriaalin mineraalikoostumus on myös tärkeä etenkin iskunkestävyydeltään heikoilla (helposti murskaantuvilla ja jauhautuvilla) kiviaineksilla. Jos hiekoitusmurske on heikkoa ja se koostuu lisäksi pääasiallisesti kovista mineraaleista (esimerkiksi kvartsista) muodostuu hiekoitusmurskeen jauhautumisen seurauksena tehokas kuluttava "hiekkapaperimateriaali".

Hiekoitusmateriaalin ja asfaltin kiviaineksen keskinäisillä ominaisuuksilla on myös merkitystä. Molempien ominaisuuksista riippuu, kumpi kuluu enemmän ja muodostaa hienojakoista hiukkasmassaa. Koetulosten perusteella kahdesta testatusta hyvälaatuisesta kiviaineksesta graniittinen oli parempi kuin vulkaniitti, koska pölypäästöt olivat vähäisemmät ja erityisesti asfaltin kuluminen pienempää. Malmgårdin graniitti asfaltissa ja Eurajoen diabaasi hiekoitusmurskeessa oli hyvä kombinaatio näissä koeolosuhteissa.



**Kuva I.** Havainnekuva kokeellisten tutkimusten tuloksista. Kaikissa kokeissa käytetty nastarenkaita sekä hiekoitusmateriaaleina Ämmäsuon graniittia (vasemmanpuoleiset pylväät) tai Eurajoen diabaasia (oikealla). Pääosa hengitettävästä pölystä muodostuu asfaltista. Hiekoitus lisää pölyn määrää, samoin hienojakoisen hiekan käyttö. Eurajoen diabaasilla muodostuu hiekoitusperäistä pölyä paljon vähemmän, mutta sen sijaan runsaasti asfaltista jauhautuvaa pölyä. Huomaa myös kuva 6, josta ilmenee asfaltin kiviaineksen vaikutus käytettäessä diabaasia hiekoitukseen.

*Nastarenkaiden käyttö synnytti enemmän hengitettävää pölyä kuin kitkarenkailla ajo. Kuitenkin arviomme mukaan kitkarenkaista on todennäköisesti muodostunut enemmän orgaanista kumipölyä kuin nastarenkaista.*

*Koeradalla muodostui myös pienhiukkasia siten, että  $PM_{2,5}$ -hiukkasmassaa oli 12 % ja  $PM_1$ -fraktiota 6 %  $PM_{10}$ -hiukkasista. Pienhiukkaset olivat mineraalihiukkasia eli peräisin asfaltista ja hiekoituksesta.  $PM_{10}$ - ja TSP-hiukkasmassoissa olivat asfaltin ja hiekoituksen osuudet muuten saman suuruiset paitsi käytettäessä hienojakoista hiekkaa, jolloin asfaltin osuus oli suurempi  $PM_{10}$ :ssä kuin TSP:ssä. Samanlaisen eron tuotti ajonopeuden nostaminen. Hienojakoista hiekkaa käytettäessä oli hengitettävän pölyn kokonaismassa suhteellisesti suurempi TSP-massaan verrattuna kuin karkeammalla hiekoitusmateriaalilla.*

## TIIVISTELMÄ KENTTÄTUTKIMUSTEN TULOKSISTA

Kenttätutkimuksia tehtiin useilla paikkakunnilla eteläisessä Suomessa. Niissä tutkittiin katupölyn koostumusta ja lähteitä vallitsevissa katuolosuhteissa. Erityisesti pyrittiin selvittämään hiekoituksen osuus hengitettävän pölyn koostumuksessa. Samalla arvioitiin muiden pölylähteiden osuuksia. Tutkimustulokset vaihtelivat sen mukaan, millaiset olosuhteet vallitsivat tutkimusalueilla tai mitkä hiukkaset (TSP tai  $PM_{10}$ ) olivat mielenkiinnon kohteena. TSP-hiukkasia käytettiin tutkimusmateriaalina silloin, kun  $PM_{10}$ -materiaalia ei ollut saatavana. Toisaalta kokeellisilla tutkimuksilla selvitettiin, että  $PM_{10}$  ja TSP hiukkasmassoissa asfaltin ja hiekoitusmateriaalin keskinäiset suhteet olivat useimmissa testeissä samanlaiset (luku 3.2.6.). TSP-hiukkasmassan voidaan myös katsoa kuvastavan paremmin mittauspaikeksen läheisen katupölyn koostumusta, sillä siinä on suuremman hiukkaskoon vuoksi suhteellisesti vähemmän kauempaa kulkeutunutta pienikokoista hiukkasmassaa.

Tutkimuksia varten kerättiin ilman hiukkasmassaa keräimillä, jotka samalla mittasivat ilman hiukkaspitoisuuksia. Hiukkasnäytteistä tutkittiin yksittäishiukkasten alkuainekoostumus pyyhkäisyelektorinimikroskoopilla (SEM), johon oli kytketty röntgenmikroanalysaattori (EDX). Jokainen hiukkanen identifioitiin sen kemiallisen koostumuksen perusteella ja sijoitettiin sille kuuluvaan hiukkastyyppiin, jotka samalla edustivat tiettyjä päästölähteitä. Jokaisesta näytteestä laskettiin eri hiukkastyypin suhteelliset osuudet ja sen perusteella pääteltiin, minkä verran hiukkasia oli tullut eri lähteistä.

Kenttätutkimuksiin kuului myös työ, jossa selvitettiin, miten keväisen katupölykauden aikana suoritettu katujen kastelu kalsiumkloridiliuoksella vaikutti hengitettävän pölyn määrään.

### Hangon-Tammisaaren tutkimus

Hangon  $PM_{10}$ -näytteissä oli hiekoitusmateriaalista noin 10 % ja muista mineraalilähteistä (pääosin asfaltista) n. 50 % kokonaismassasta. Hiekoituksen osuus pelkässä mineraalifraktiossa oli noin 20 % (Tervahattu ja Kupiainen 2001a, Kupiainen ja Tervahattu 2003a). Samaa hiekoitusmateriaalia (masuunikuonamurske) käytettiin myöhemmin kokeellisissa tutkimuksissa rinnan muiden murskeiden kanssa (Tervahattu ja Kupiainen 2002, Kupiainen et al. 2003b). Arvioimme, että pienillä hiekoitusmäärillä koeradalla olisi päädytty jokseenkin samaan hiekoituksen suhteelliseen osuuteen (noin 20% mineraalifraktiosta) kuin Hangossa. Tulosten yleistettävyyden suhteen esitettiin kuitenkin varauksia mm. sen vuoksi, että käytetty hiekoitusmateriaali oli poikkeuksellinen. Muista kenttätutkimuksista poikkeaviin tuloksiin Hangossa ovat voineet vaikuttaa lisäksi käytetyn murskeen vähäisyys ja/tai asfaltin kiviaineksen heikkolaatuisuus.

### Museokadun tutkimus

Karkea arvio hiekoituksen osuudesta  $PM_{10}$ -mineraalifraktiossa oli noin 50%. Täällä, kuten Hangossakin, muista lähteistä (esim. polttoperäisistä) peräisin olevien

hiukkasten osuus oli merkittävä (Tervahattu ja Kupiainen 2001a). Museokadulla saatiin tulokseksi suurempi hiekoituksen osuus keväisessä katupölyssä kuin Hangossa. Saman suuruisia arvoja saatiin koeolosuhteissa käyttämällä suuria hiekoitusmääriä tai hiekoitusta, jossa oli mukana hienojakoista <2 mm raekokoa (Kupiainen ym. 2004). Museokadun tutkimuksiin liittyi monia epävarmuustekijöitä. Ilmeisesti muualta tulleella pölyllä on ollut vaikutusta myös mineraalipölyn koostumukseen.

#### Tikkurilan tutkimus

Talven 2000-2001 aineistosta saatiin hiekoituksen osuudeksi TSP-massasta 70-84 % (Tervahattu ja Kupiainen 2001a). Talven 2001-2002 tutkimuksissa Tikkurilan TSP-hiukkasista oli 80 % peräisin hiekoituksesta ja 20 % asfaltista. Hiekoituksen osuudeksi saatiin siten vielä korkeampia arvoja kuin Museokadulla. Tikkurilassa tutkittiin kuitenkin muista kohteista poiketen TSP-hiukkasia. Pääsyy siihen, että Tikkurilan leijuvasta pölystä niin suuri osa oli peräisin hiekoitusmateriaalista, oli se, että siellä käytettiin hienojakoista hiekkaa. Kokeelliset tutkimukset osoittivat, että tällainen hiekoitus nostaa suuresti leijuivan pölyn määrää. Sama ongelma tuli esiin Lappeenrannassa.

#### Pohjoisrannan tutkimus

Pohjoisrannassa oli vaikeuksia määritellä hiekoituksen ja asfaltin osuuksia katupölyn mineraalifraktiossa. Paikallisilla lähteillä ei välttämättä ole ratkaisevan suurta merkitystä pölyn koostumukseen, vaan myös mineraalipölyä kulkeutuu kauempaa. Sitä voi tulla ilmajvirtausten mukana, mutta merkittävämpää voi olla erilaisen maa-aineksen kulkeutuminen autojen renkaissa ja alustoissa. Vastaava havainto tehtiin myös Museokadulla ja Tikkurilassa (Kupiainen ym. 2002). Chemical Mass Balance-reseptorimallinnusmenetelmä (CMB) saatiin keväisessä katupölyssä hiekoitukselle suurempi osuus kuin asfaltille.

#### Lappeenrannan tutkimus

Kevätpölyepisodin  $PM_{10}$ -hiukkaset koostuivat suurimmaksi osaksi mineraalihiukkasista. Hiekoitushiekasta peräisin olevan hengitettävän pölyn määrä oli suurempi kuin asfaltiperäisen pölyn. Lappeenrannassa käytetään erittäin hienojakoista hiekoitushiekkaa, minkä vuoksi hiekoitushiekasta tulee runsaasti suoria pölypäästöjä. Lisäksi hienojakoinen hiekoitushiekka aiheuttaa asfaltin kulumista, mikä kiinnittää huomion hiekoitushiekkaan tärkeänä pölyn lähteenä ja aiheuttajana. Paikallisten teollisuuslaitosten emissiot vaikuttivat pölyn koostumukseen ja pitoisuuksiin, mutta niiden osuus tuli selvemmin esille lähinnä silloin, kun tuulen suunta oli päästölähteestä monitorointiasemalle ja kun pölypitoisuudet olivat alhaiset.

#### Pölyn sidonnan tutkimus

Kalsiumkloridin käyttökelpoisuus katupölyn sidonnassa osoittautui varsin suuresti riippuvaiseksi ilman kosteudesta. Kuivina päivinä  $PM_{10}$ -pitoisuudet kohosivat heti kastelun jälkeisinä päivinä, mutta ilman kosteuden lisääntyessä kalsiumkloridi imi ilmasta vettä ja sitoi pölyä kaikkiaan kahden viikon ajan. Ilman kosteuden ollessa

suuri on  $\text{CaCl}_2$ :n pölynsitomiskyky erittäin hyvä. Kosteuden laskiessa 60-70 prosenttiin pölynsidontakyky alkaa heiketä ja RH 40-50:ssä teho laskee suuresti. Kalsiumkloridin käyttö pölyn sidontaan voidaan hyvällä suunnittelulla rajoittaa niin vähäiseksi, ettei sillä pitäisi olla haitallisia ympäristö- tai korroosiota lisääviä vaikutuksia.

## YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Talven aikana kaduille kertyy hiukkasmassaa lukuisista eri lähteistä. Keväällä pölyn noustessa ilmaan se on monimuotoinen sekoitus. Lisäksi pölyn muodostukseen vaikuttavat tekijät poikkeavat toisistaan eri kohteissa. Tämä kaikki vaikeuttaa kenttätutkimusten analytiikkaa ja tulosten tulkintaa. Kokeellisten tutkimusten avulla voidaan olosuhteita yksinkertaistaa ja saatujen tulosten perusteella pystytään arvioimaan myös käytännön tilanteissa tapahtuvaa katupölyn muodostusta hiekoitushiekasta ja asfaltista. Meteorologia on myös merkittävä tekijä katupölyepisodeissa, joiden aikana vallitsee usein maanpintainversio. Tällöin alhainen sekoittumiskorkeus ja pienet tuulenopeedet aiheuttavat sen, ettei ilmassa laimene tehokkaasti (Pohjola ym. 2000).

Mineraalimassan osuus keväisessä  $\text{PM}_{10}$ -katupölyssä vaihteli välillä 50-80 prosenttia. Tämä arvio on ennemminkin liian pieni kuin suuri, sillä osa mineraalihiukkasista on agglomeroitunut muiden hiukkastyyppeiden kanssa eikä tullut luokitelluksi mineraaleiksi. Lisäksi mineraalihiukkaset ovat tiheämpiä ja suurempia kuin polttoperäiset hiukkaset, joten senkin vuoksi niiden osuus massasta on suurempi kuin lukumääräprosentteihin perustuneissa tutkimuksissamme. Tulokset ovat vastaavia Pakkasen ym. (2001b) arvion kanssa, jossa mineraaliaines muodostaa vuositason keskimäärin 59% kaupunkiympäristön (Helsinki, Vallila) pölyn karkeasta fraktiosta ( $\text{PM}_{2.3-15}$ ), mutta vain 12% hienoissa hiukkasissa ( $\text{PM}_{2.3}$ ). Keväällä maaperäksi luokiteltua mineraalimassaa mitattiin karkeassa fraktiossa peräti 71% ja hienoissa hiukkasissa 18% (Pakkanen ym. 2001a).

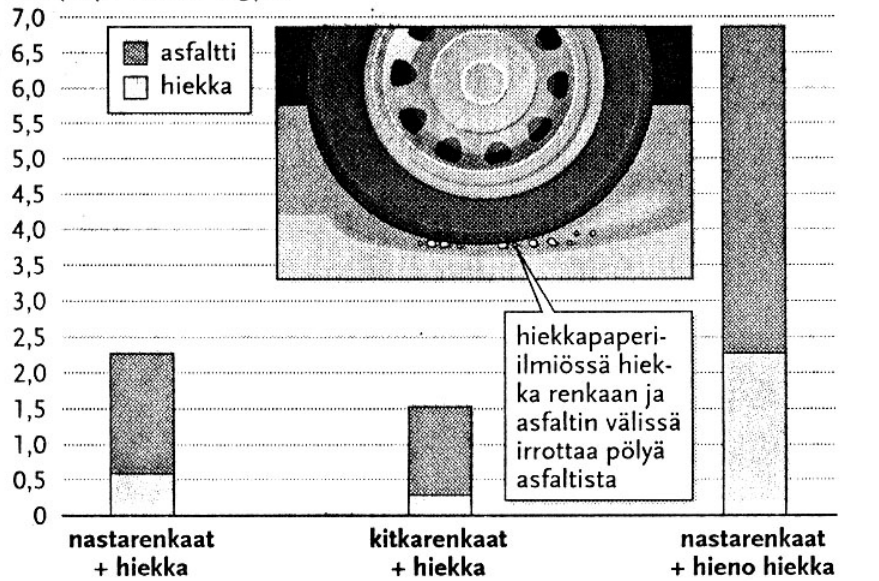
Muu osa hengitettävästä pölystä ( $\text{PM}_{10}$ ) oli peräisin monista eri lähteistä. Niistä tärkeimpiä olivat liikenteen pakokaasut, jotka tuottavat etupäässä hiiltä sisältäviä hiukkasia, sekä erilaiset rikkipitoiset hiukkaset, jotka ovat peräisin energiantuotannon ja teollisuuden päästöistä ja ovat merkittävältä osaltaan kaukokulkeutuneita. Myös renkaiden ja muiden autonosten kulumisen sekä asfaltin bitumi tuottavat hengitettäviä hiukkasia. Muita hiukkastyyppejä olivat mm. natriumkloridi (tiesuolauksesta ja merivedestä), kalsiumrikkaat hiukkaset monista eri lähteistä sekä rauta- ja muut metallihiukkaset.

Hengitettävien hiukkasten ( $\text{PM}_{10}$ ) mineraaliaines on peräisin asfaltista ja hiekoitushiekasta. Osa pölystä syntyy siten, että renkaan ja tien pinnan välissä oleva hiekka kuluttaa asfalttia. Tämän prosessin nimesimme hiekkapaperi-ilmiöksi ja sitä on havainnollistettu kuvassa II. Se ilmeni hyvin selvänä kaikilla hiekoitus- ja asfalttilaaduilla. Koeolosuhteissa keskimäärin yli puolet  $\text{PM}_{10}$ -massasta oli peräisin asfaltista, mutta siitä hiukkasmassasta valtaosa syntyi hiekkapaperiefektin

vaikutuksesta. On kuitenkin tähdennettävä, että sekä renkaat että hiekoitusmateriaalit kuluttavat asfalttia ja tämä kulumistuote samoin kuin kaikki muukin riittävän kova irtain materiaali kuluttaa edelleen asfalttia niin kitka- kuin nastarenkaidenkin alla muodostaen lisää katupölyä. Lisäksi nastarenkaiden aiheuttama asfaltin kuluminen on moninkertaista märällä tienpinnalla kuivaan verrattuna. Teiden suolauksella voi näin olla merkitystä katupölyn muodostumiseen etenkin katuosuuksilla, joilla ei käytetä hiekoitusta (Räisänen 2004). Kuitenkin sellaisillekin ajoväylille kulkeutuu hiekkaa jalkakäytäviltä ja muilta alueilta.

## Pääosa:

katupölyn määrä, mg/m<sup>3</sup>



Lähde: Heikki Tervahattu ja Kaarle Kupiainen

MV / HS

**Kuva II.** Hiekkapaperi-ilmion havainnekuva. Hiekoitus lisää suuresti hengitettävän pölyn määrää. Kuitenkin pääosa pölystä on peräisin asfaltista, joka jauhautuu pölyksi renkaiden alla hiekan vaikutuksesta. Hienojakoinen hiekka lisää suuresti pölyä (oikea pylväs) sekä asfaltista että hiekasta. Nastarenkaat tuottavat enemmän hienojakoista pölyä kuin kitkarenkaat.

**Hiekkapaperi-ilmio merkitsee katupölyn lähdeanalyysille myös sitä, että hiekoituksen aiheuttamaan hengitettävän pölyn kuormitukseen tulee laskea myös se asfaltista jauhautunut osa, jota ei muodostuisi ilman hiekoitusta. Asfaltista peräisin oleva katupöly on vain osaksi nastarenkaiden irrottamaa.**

Hiekoituksen määrällä oli suuri vaikutus syntyvän pölyn määrään. Käytettäessä 300 g/m<sup>2</sup> hiukkaspitoisuus lisääntyi kaksinkertaiseksi hiekoittamattomaan tilanteeseen verrattuna (kuva II). Levitettäessä hiekkaa 1000 g/m<sup>2</sup> kohosi ilman PM<sub>10</sub>-pitoisuus nelinkertaiseksi ja jopa 9-kertaiseksi, kun hiekkaa käytettiin 2000 g/m<sup>2</sup>.



*Levitysmäärän kasvaessa lisääntyy pölyn muodostus sekä hiekoituksesta että asfaltin kulumisesta. Arvioitaessa hiekoituksen osuutta kokeellisten tutkimusten pohjalta on otettava huomioon kaduilla käytetty hiekoitusmäärä sekä katuolosuhteet. Helsingin katujen hiekoitusta koskevan ohjeen mukaan on hiekoitusmäärä ajoradoilla 100 - 350 g/m<sup>2</sup>. Kerralla levitetään vain yksi kerros, mutta tarpeen vaatiessa joudutaan hiekoitus uusimaan hyvinkin pian liikenteen määrän ja keliolosuhteiden niin vaatiessa. (Olli Dolkin kirjallinen ilmoitus). Kokeissamme käytetyt korkeimmat hiekoitusmäärät kuvaavat katuolosuhteita erityisolissa, kun kadulla on suuria määriä irtoainesta, alhaisemmat paremmin tilannetta kertahiekoituksen jälkeen.*

*Hiekoituksen on havaittu nostavan PM<sub>10</sub>-pitoisuuksia heti hiekoitustapahtuman jälkeen (Kantamaneni ym. 1996; Kuhns ym. 2003). Vaikutus on rajautunut paikkoihin, joilla hiekoitusta käytetään liukkaudentorjunnassa ja on saatu myös viitteitä siitä, että hiekoituksen aiheuttama hengitettävän pölyn lisääntyminen olisi myös ajallisesti rajautunut. Kuhns ym. (2003) mittasivat PM<sub>10</sub>-pitoisuuksien laskeneen 8 tunnin jälkeen hiekoitustapahtumasta tasolle, joka vallitsi ennen hiekoitusta. Keväiset katupölyongelmat eivät kuitenkaan liity suoranaisesti hiekoitustapahtumiin. Välillisesti kuitenkin mainittu materiaalin kulkeutuminen on tärkeää, sillä ajan kuluessa pölyä siirtyy esimerkiksi tienkohtiin, joilla ei liikennöidä – talvella myös lumivalleihin. Niistä tämä pölymateriaali sitten vapautuu keväällä lumen sulaessa ja aiheuttaa uudelleen hiukkaspitoisuuksien kasvun.*

*Hiekoitusta ei useinkaan tehdä koko katuosuuksille, vaan se kohdistetaan bussipysäkeille, risteysalueille ja mäkiin. Pääkatujen liukkaudentorjunnassa käytetään yleensä suolausta, mutta myös hiekoitusta vaikeimmissa olosuhteissa (Helsingin pääkaduilla käytetään hiekoitusta, kun lämpötila laskee alle -6°C tai kun lumiolut sitä vaativat). Toisaalta ajoradoille leviää hiekkaa jalkakäytäviltä ja ajoneuvojen mukana hiekkaa kulkeutuu myös hiekoittamattomille katuosuuksille. Myös tuuli levittää hiekkaa usein laajoillekin alueille. Hiekka ja muu irtain materiaali on siten talven ja kevään mittaan jatkuvassa kiertokulussa nousten välillä ilmaan ja laskeutuen taas uudelleen vähän eri kohteisiin. Tämä kannattaa huomioida talvikunnossapidossa: likainen lumi tulee aurauksen lisäksi poistaa riittävän usein katujen varsilta, koska sen mukana poistuu paljon itse pölyä sekä asfalttia kuluttavaa kiviainesta.*

*Katupölyn muodostuksen kannalta tärkeitä ovat myös hiekoitusmateriaalin ominaisuudet (Kupiainen ym. 2003a; Kupiainen ym. 2003c; Räisänen ym. 2002; Räisänen ym. 2003). Hiekoitusmateriaalin valinnassa tärkeää on erityisesti sen raekokojakauma. Hienojakoinen hiekka lisää pölyn muodostusta karkeampiin murskeisiin verrattuna. Hiekoitusmateriaalin mineraalikoostumus on myös tärkeä etenkin iskunkestävyydeltään heikoilla (helposti murskaantuvilla ja jauhautuvilla) kiviaineksilla. Jos hiekoitusmurske on heikkoa ja se koostuu lisäksi pääasiallisesti kovista mineraaleista (esimerkiksi kvartsista) muodostuu hiekoitusmurskeen jauhautumisen seurauksena tehokas kuluttava "hiekkapaperimateriaali".*

*Hiekoitusmateriaalin ja asfaltin kiviaineksen keskinäisillä ominaisuuksilla on myös merkitystä. Molempien ominaisuuksista riippuu, kumpi kuuluu enemmän ja muodostaa hienojakoista hiukkasmassaa. Kahdesta hyvälaatuisesta kiviaineksesta valmistetuista asfalteista graniitista valmistettu asfaltti oli parempi kuin tummasta vulkaniitista valmistettu, koska pölypäästöt olivat vähäisemmät ja erityisesti asfaltin kuluminen pienempää. Malmgårdin graniitti asfaltissa ja Eurajoen diabaasi hiekoitusmurskeessa oli hyvä kombinaatio näissä koeolosuhteissa (kuva 6, A2-kokeet).*

*Nastarenkaiden käyttö synnytti enemmän hengitettävää pölyä kuin kitkarenkailla ajo. Kuitenkin arviomme mukaan kitkarenkaista on todennäköisesti muodostunut enemmän orgaanista kumipölyä kuin nastarenkaista.*

*Katupölyn mineraaliaines sisältää myös pienhiukkasia ( $PM_{2.5}$ ). Koeolosuhteissa  $PM_{2.5}$ -hiukkasmassaa muodostui noin 12 %  $PM_{10}$ -hiukkasmassasta. Alle mikrometrin kokoluokan fraktion ( $PM_{0.9}$ ) osuus  $PM_{10.7}$  hiukkasista oli noin 6 prosenttia. Hienoja hiukkasia oli kaikissa näytteissä. Kokojakauma oli samanlainen kuin päällystetyiltä teiltä (Chow ym. 1996, 2003, Kuhns ym. 2003), kvartsihiukkasista (Puleda ym. 1999) ja maaperän pölystä tehdyissä kenttämittauksissa. Keväisessä katupölyssä pienhiukkaset (mineraalihiukkaset, pakokaasuista peräisin olevat ym.) ovat sekoittuneena suureen hiukkasmassaan ja usein agglomeroituneina isompien pinoilla. Niiden osuutta tällaisessa sekoituksessa on mahdoton arvioida. Hiukkasmassa sisältää myös kaduille kertyneet mikrobit, joilla voi olla osuutta hengityselimistöön kohdistuvissa terveydellisissä vaikutuksissa (Salonen ym. 2004).*

*Keväisen katupölyn haittojen torjunnassa on ryhdytty käyttämään kaduille levitettävää kalsiumkloridiliuosta, joka sitoo pölyä ja estää sen nousun ilmaan. Kalsiumkloridin käyttökelpoisuus katupölyn sidonnassa osoittautui tutkimuksessamme varsin suuresti riippuvaiseksi ilman kosteudesta. Kuivina päivinä  $PM_{10}$ -pitoisuudet olivat korkeita heti kastelun jälkeenkin, mutta ilman kosteuden myöhemmin lisääntyessä kalsiumkloridi imi ilmasta vettä ja sitoi pölyä. Vaikutus kesti kaikkiaan kahden viikon ajan. Ilman kosteuden ollessa suuri on  $CaCl_2$ :n pölynsitomiskyky erittäin hyvä. Kosteuden laskeessa 60-70 prosenttiin pölynsidontakyky alkaa heiketä ja RH 40-50:ssä teho laskee suuresti. Kalsiumkloridin käyttö pölyn sidontaan voidaan hyvällä suunnittelulla rajoittaa niin vähäiseksi, ettei sillä pitäisi olla haitallisia ympäristö- tai korroosiota lisääviä vaikutuksia.*

## LÄHDELUETTELO

Birch, M.E., Cary, R.A., 1996. Black carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Sci. Technol.* 5, 221-241.

Chow, J. C., Watson, J.G. ym., 1994. A Laboratory Resuspension Chamber to Measure Fugitive Dust Size Distributions and Chemical Compositions. *Atmos. Environ.* 28(21), 3463-3481.

Chow, J.C., Watson, J.G., Lowenthal, D.H., 1996. Sources and chemistry of PM<sub>10</sub> aerosol in Santa Barbara County, CA. *Atmos. Environ.* 30, 1489-1499.

Chow, J.C., Watson, J.G., Ashbaugh, L.L., Magliano, K.L., 2003. Similarities and differences in PM<sub>10</sub> chemical source profiles for geological dust from the San Joaquin Valley, California. *Atmos. Environ.* 37, 1317-1340.

DOW CHEMICALS, 2004. Calcium Chloride Handbook. A Guide to Properties, Forms, Storage and Handling.  
<http://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=calcium/pdfs/noreg/173-01534.pdf&pdf=true>

Fan, X.-B., Okada, K. ym., 1996. Mineral Particles Collected in China and Japan During the Same Asian Dust-Storm Event. *Atmos. Environ.* 30(2), 347-351

Fukuzaki, N., Yanaka, T., Urushiyama, Y., 1986. Effects of studded tires on roadside airborne dust pollution in Niigata, Japan. *Atmos. Environ.* 20 (2), 377-386.

Helsingin kaupungin ympäristökeskus, 2002. Suunnitelma katupölyhaittojen ehkäisemiseksi. 19.12.2002/JVI.

HKR 1998. HKR-tiedote 7.4.1998.

Holopainen, M., 1997. Kansallinen ympäristöterveysohjelma. *Ilmansuojelu* 5/97, 8-14.

Hosiokangas, J., Vallius, M., Ruuskanen, J., Mirme, A., Pekkanen, J., 2004. Resuspended dust episodes as an urban air-quality problem in subarctic regions. *Scand. J. Work Environ. Health*, 30 suppl.2, 28-35.

Imatran kaupungin ympäristötoimi, 2001. Imatran, Joutsenon, Lappeenrannan ja Svetogorskin ilman laatu vuonna 2000.

Imatran kaupungin ympäristötoimi, 2002. Imatran, Joutsenon, Lappeenrannan ja Svetogorskin ilman laatu vuonna 2001.

Imatran kaupungin ympäristötoimi, 2003. Imatran, Joutsenon, Lappeenrannan ja Svetogorskin ilmanlaatu vuonna 2002. 108 s.

Kantamaneni, R., Adams, G. ym., 1996. The Measurement of Roadway PM<sub>10</sub> Emissions Rates Using Atmospheric Tracer Ratio Techniques. *Atmos. Environ.* 30, 4209-4223.

Kanzaki, H., Fukuda, Y., 1993. Regulations on Studded Tire Usage and Winter Road Administration in Japan, Proceedings of the International Workshop on Winter Road Management, Jan. 26-29. Sapporo, Japan.

Kindratenko, V.V., Van Espen, P.J.M., Treiger, B.A., Van Grieken, R.E., 1994. Fractal Dimensional Classification of Aerosol-Particles by Computer-Controlled Scanning Electron-Microscopy. *Environ. Sci Technol.* 28, 2197-2203.

Kuhns, H., Gillies, J. ym. 2003. Vehicle-based road dust emissions measurements, 12<sup>th</sup> USEPA International Emission Inventory Conference, San Diego April 29-May 1.

Kunzli, N., Kaiser, R., ym., 2000. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet* 356 (9232), 795-801.

Kupiainen, K., Tervahattu, H., Paatero, P., 2002. Katupölyn koostumus pääkaupunkiseudulla – yksittäishiukkastutkimukset Museokadulla ja Tikkurilassa. Tutkimusraportti, Nordic Envicon Oy, Helsinki, 18 s.

Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., 2003b. Experimental studies about the impact of traction sand on urban road dust composition. *Sci. Total Environ.*, 308(1-3), 175 - 184.

Kupiainen, K., Tervahattu, H., 2004. The Effect of Traction Sanding on Urban Suspended Particles in Finland. *Environ. Monit. Ass.*, 93, 287-300.

Kupiainen, K.J., Tervahattu, H., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M., Hillamo, R., 2004. Size and composition of airborne particles from pavement wear, tires and traction sanding. *Environ. Sci. Technol.* 39(3), 699 - 706; DOI: [10.1021/es035419e](https://doi.org/10.1021/es035419e).

Lampinen, A. 1993. Kestopäällysteiden urautuminen. VTT julkaisuja 781. Espoo.

Lighty, S.J., Veranth, J.M., Sarofim, A.F., 2000. Combustion Aerosols: Factors Governing Their Size and Composition and Implications to Human Health. *J. Air & Waste Management Assoc.* 50, 1565-1618.

Lindgren, Å., 1998. Road Construction Materials as a Source of Pollutants. Doctoral Thesis 1998:05. Division of Traffic Engineering, Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

Maenhaut, W., Hillamo, R.E. ym., 1996. A New Cascade Impactor for Aerosol Sampling with Subsequent PIXE Analysis. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 109/110, 482-487.

Myllynen, M., 2001. Katujen hiekoituksesta vuonna 2000, ja huomioita kevästä 2001. YTV, muistio 9.4.2001.

Myllynen, M., Koskentalo, T., Alaviippola, B., 2004 Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2003-raportti. Pääkaupunkiseudun Julkaisusarja B 2004:5.

Mäkelä, K., 2000. Kirjallisuusselvitys nastarenkaiden irrottaman asfalttipölyn määrästä. VTT Yhdyskuntateknikka. Tutkimusraportti 538/2000. Espoo. 17 s.

Neuvoston direktiivi 1999/30/EY. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L 163/41.

Noguchi, I., Kato, T., Akiyama, M., Otsuka, H., Matsumoto, Y., 1995. The Effect of alkaline dust decline on the precipitation chemistry in northern Japan. *Water, Air, Soil Pollut.* 85, 2357-2362.

Nordic Envicon Oy, 2003. MOBILE<sup>2</sup> Katupölyn tutkimusprojektin M2Y0025 Loppuraportti, Helsinki.

Paatero, P., 1999. The Multilinear Engine - a Table-driven Least Squares Program for Solving Multilinear Problems, Including the n-way Parallel Factor Analysis Model. *J. Comput. Graph. Stat.* 8(4), 854-888.

Pakkanen, T., Loukkola, K., Hillamo, R., Aarnio, P., Koskentalo, T., 2001a. Hengitettävien hiukkasten kokojakauma pääkaupunkiseudulla – jatkotutkimukset. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 2001:14.

Pakkanen, T.A., Loukkola, K. ym., 2001b. Sources and chemical composition of atmospheric fine and coarse particles in the Helsinki area. *Atmos. Environ* 35, 5381-5391.

PANK (Päällystealan neuvottelukunta), 2000. *Asfalttinormit 2000*. ISBN 951-97197-6-8., 74 s.

Pietarila, H., Salmi, T., Saari, H., Pesonen, R., 2001. Ilmanlaadun alustava arviointi Suomessa. Rikkidioksidi, typenoksidit, PM<sub>10</sub> ja lyijy. Ilmatieteen laitos, Ilmanlaadun tutkimus. Helsinki, <http://www.fmi.fi/kuvat/arviointi1.pdf>

Pohjola, M.A., Kousa, A. ym., 2002. The spatial and temporal variation of measured urban PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Helsinki Metropolitan Area. *Water, Air, Soil Pollut. Focus* 2, 189-201.

Puledda, S., Paoletti, L., Ferdinandi, M., 1999. Airborne quartz concentration in an urban site. *Environ. Pollut.* 104, 441-448.

Rautenberg-Wulff, A., Israel, G.W., Pesch, M., Schlumps, C., 1995. Bestimmung des Beitrags von Reifenabrieb zur Rußimmission an stark befahrenen Straßen. *VDI Berichte Nr. 1228*, 81-92.

Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R., 1993. Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dusts: roads as sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 27, 1892-1904.

Räisänen, M., 2004. From outcrops to dust – mapping, testing, and quality assessment of aggregates. Academic dissertation, University of Helsinki. Publications of the Department of Geology D1.

Räisänen, M., Niemi, J., Tervahattu, H., Kupiainen, K., 2004. Lappeenrannan leijuvan pölyn hiukkaskoostumus, Lappeenrannan kaupungin ympäristötoimi, 58 s.

Salonen, R.O., Hälinen, A.I. ym., 2004. Chemical and in vitro toxicological characterization of wintertime and springtime urban-air particles with an aerodynamic diameter below 10 µm in Helsinki. *Scand. J. Work Environ. Health*, 30 suppl.2, 80-90.

SFS 1994. SFS 5794 Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Sammalpallomenetelmä. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki.

SFS 1998a. EN 1097-2, Suomen standardoimisliitto. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Iskunkestävyyden määrittämismenetelmät, 22 s.

SFS 1998b. EN 1097-9, Suomen standardoimisliitto. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 9: Nastarengaskulutuskestävyyden määrittämismenetelmä. Pohjoismainen testi (kuulamylymenetelmä), 7 s.

Suomen ympäristökeskus, 2004. Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=6323&lan=fi>

Tervahattu, H., Kupiainen, K., 2001a. Katupölyn tutkimusprojekti. Tutkimusraportti. Teoksessa Mäkelä, S. (toim.), Liikenteen ja kuljetusten ympäristövaikutukset ja energiankäyttö, MOBILE<sup>2</sup> Vuosikirja, Espoo, 235-247.

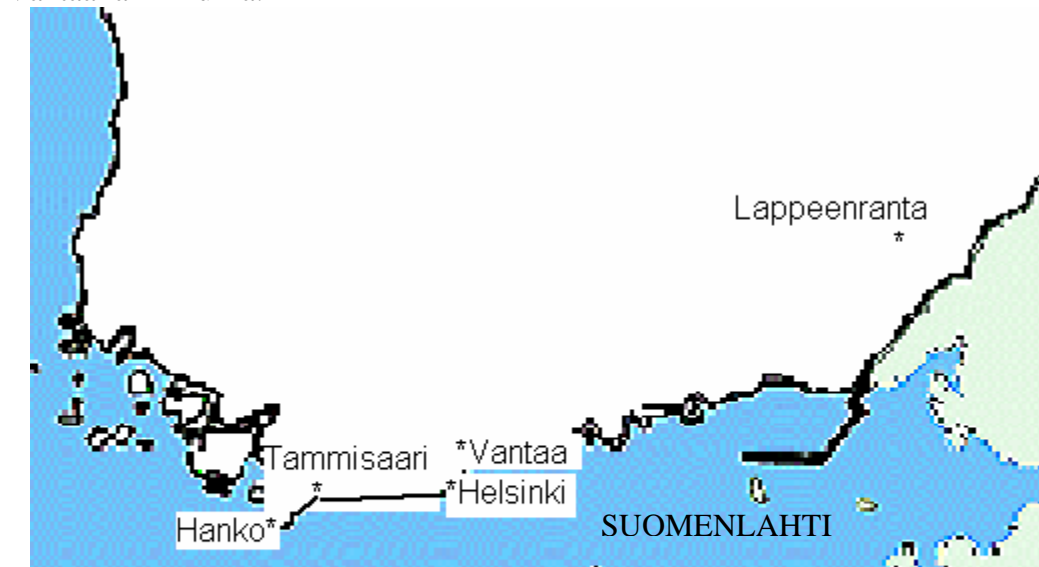
Tervahattu, H., Kupiainen, K., 2002. Katupölyn muodostuminen ja koostumus koeolosuhteissa. Teoksessa Nobell, S. (toim.), Liikenteen ja kuljetusten ympäristövaikutukset ja energiankäyttö MOBILE<sup>2</sup> Vuosikirja, Espoo, 163-178.

Unhola, T., 2004. Nastarenkaiden kuluttavuus. Ajoneuvotekijöiden vaikutus. Yliajokoe 2004. VTT, Raporttiluonnos 3.11.2004.

World Health Organization (WHO), 2000. Air quality guidelines for Europe. 2<sup>nd</sup> ed. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. WHO regional publications, European series, no. 91.

Zhang, D., Iwasaka, Y., 1999. Nitrate and Sulfate in Individual Asian Dust-Storm Particles in Beijing, China in Spring of 1995 and 1996. Atmos. Environ. 33, 3213-3223.

LIITE 1. Kartta tutkimuspaikoista. Helsingissä sijaittivat Museokatu ja Pohjoisranta; Vantaalla Tikkurila.



## LIITE 2. KATUPÖLYN TUTKIMUSPROJEKTIN JULKAISUT

1. Kupiainen, K.J., Tervahattu, H., Mäkelä, T., Räisänen, M., Hillamo, R. 2002. The size distribution and composition of abrasion components in road dust. –Report Series in Aerosol Science, 58, 34-36.
2. Kupiainen, K.J., Mäkelä, T., Räisänen, M., Tervahattu, H., Hillamo, R. 2002. The size distribution and composition of abrasion components in road dust. – Abstract in NOSA Aerosol Symposium, Kjeller, Norway, 7-8 November 2002.
3. Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., 2002: Studies on the composition of road dust under controlled conditions. – Poster presentation in FISITA2002, World Automotive Congress in Helsinki, June 2-7, 2002.

4. Kupiainen, K., Tervahattu, H., Paatero, P., 2002: Katupölyn koostumus pääkaupunkiseudulla – yksittäishiukkastutkimukset Museokadulla ja Tikkurilassa. Tutkimusraportti, Nordic Envicon Oy. 18 s.
5. Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., 2003: Experimental studies about the impact of traction sand on urban road dust composition. –The Science of the Total Environment 308, 175-184.
6. Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M., Hillamo, R., 2003: Katupölyn muodostuminen ja koostumus koeolosuhteissa. II vaihe. Nobell, S., Liikenteen ja kuljetusten ympäristövaikutukset ja energiankäyttö MOBILE<sup>2</sup> Vuosikirja, Espoo, ss. 197-215.
7. Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., 2003: Katupölyn tutkimusprojekti M2Y0025, Menetelmät. Tutkimusraportti, Nordic Envicon Oy, 23 s.
8. Kupiainen, K.J., Tervahattu, H., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M., Hillamo, R. 2004. Size and composition of airborne particles from pavement wear, tires and traction sanding. – Environmental Science & Technology 39(3), 699 - 706; DOI: [10.1021/es035419e](https://doi.org/10.1021/es035419e).
9. Kupiainen, K., Tervahattu, H., Räisänen, M., 2004: Katupölyn hiukkastutkimukset Helsingin Pohjoisrannassa.- Tutkimusraportti, Nordic Envicon Oy. 6 s.
10. Kupiainen, K. and Tervahattu, H. 2004: The Effect of Traction Sanding on Urban Suspended Particles in Finland. - Environmental Monitoring and Assessment 93, 287-300.
11. Nordic Envicon Oy 2003. MOBILE<sup>2</sup> Katupölyn tutkimusprojektin M2Y0025 Loppuraportti 2003.
12. Räisänen, M., Kupiainen, K., Tervahattu, H. 2002: Mineralogy, texture and mechanical properties of anti skid and asphalt aggregates contributing to urban dust. - In the 9th Nordic Aggregate Research Conference 12-14.9.2002 Reykjavik, Island. 3 p.
13. Räisänen, M., Tervahattu, H., Kupiainen, K., 2002: Esitutkimus Lappeenrannan leijuvan pölyn hiukkaskoostumuksesta. – Nordic Envicon Oy, Helsinki, 15 s.
14. Räisänen, M., Kupiainen, K., Tervahattu, H., 2003: The effect of mineralogy, texture and mechanical properties of anti skid and asphalt aggregates on urban dust. – Bulletin of Engineering Geology and the Environment. DOI: 10.1007/s10064-003-0200-y.
15. Räisänen, M., Kupiainen, K., Tervahattu, H. 2003: In: Geologia ympäristötoiminnassa 2003, Heikki Niini ym. (toim.), Rakennusgeologinen yhdistys ry.
16. Räisänen, M., Kupiainen, K. and Tervahattu, H. 2004. Part II: The Effect of Mineralogy, Texture and Mechanical Properties of Anti-skid and Asphalt Aggregates on Urban Dust. - Bulletin of Engineering Geology and the Environment, in press.
17. Räisänen, M., Kupiainen, K., Tervahattu, H., 2004. Suspended particles from industrial emissions and abrasion of anti-skid and asphalt aggregates in Lappeenranta, Southeastern Finland. In the 10th Nordic Aggregate Research Conference 8-10.9.2004 Tampere, Finland. 4 pp.
18. Räisänen, M., Niemi, J., Tervahattu, H., Kupiainen, K. 2004. Lappeenrannan leijuvan pölyn koostumus vuodelta 2002. Lappeenrannan kaupunki, Ympäristötoimi ja Nordic Envicon Oy.
19. Tervahattu, H. and Kupiainen, K., 2001: Katupölyn tutkimusprojekti. - Tutkimusraportti, Mäkelä, S., Liikenteen ja kuljetusten ympäristövaikutukset ja energiankäyttö, MOBILE<sup>2</sup> Vuosikirja, Espoo, ss. 235-247.
20. Tervahattu, H. and Kupiainen, K., 2002: Katupölyn muodostuminen ja koostumus koeolosuhteissa. – Tutkimusraportti. Nobell, S., Liikenteen ja kuljetusten ympäristövaikutukset ja energiankäyttö, MOBILE<sup>2</sup> Vuosikirja, Espoo, ss. 163-178.

21. Tervahattu, H., Kupiainen, K., Mäkelä, T., Räisänen, M., Aurela, M., Hillamo, R. 2003. Source apportionment of urban road dust. – Nordic Seminar “Particle air pollution and its health effects”, Oslo, Norway, 10-11 March, 2003.
22. Tervahattu, H., Kupiainen, K., Räisänen, M., 2003: Katupölyn koostumus ja lähteet Vantaan Tikkurilassa. Tutkimusraportti, Nordic Envicon Oy. 9 s.
23. Tervahattu, H., Kupiainen, K.J., Räisänen, M., Mäkelä, T., Hillamo, R., 2004. Generation of urban road dust from anti-skid and asphalt aggregates – Journal of Hazardous Materials, in press.
24. Tervahattu, H., Kupiainen, K., Räisänen, M., Mäkelä, T., Aurela, M., Hillamo, R. 2004. The influence of studded tires and traction sanding on respirable dust emissions from road abrasion, Winter Cities 2004 Forum, Anchorage, Alaska, USA. CD, 2004.