

*Raimo O. Salonen*, dosentti, ylilääkäri

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), Ympäristöterveysyksikkö, Kuopio

*Taina Siponen*, DI, TtK, tutkija

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), Ympäristöterveysyksikkö, Kuopio

*Pekka Taimisto*, suunnittelija

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), Ympäristöterveysyksikkö, Kuopio

*Erkki Pärjälä*, FM, ympäristönsuojelutarkastaja

Kuopion kaupunki, Kaupunkiympäristön palvelualue

# Katupölylle altistuminen Kuopion keskustassa keväällä 2019

Kiristyneiden päästörajojen ja autokannan uusiutumisen on ennustettu johtavan liikenteen pakokaasupäästöjen vähenemiseen tulevaisuudessa. Ne eivät kuitenkaan tule vähentämään katupölystä peräisin olevien päästöjen määrää. Kaupunkikeskustoissa liikutaan paljon lyhyitä matkoja kävelen, jolloin erityisesti keväällä katupölyaikaan voidaan altistua hetkittäin hyvin suurille hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) ja siitä valtaosan muodostavien karkeiden hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10-2.5}$ ) pitoisuuksille. Hengitysilman laadusta saadaan tietoa kaupunkien ilmanlaadun mittausasemilta, jotka eivät liikenneympäristöissä kuitenkaan välttämättä kuvaa hyvin todellisia altistumistasoja. Tässä tutkimuksessa mitattiin Kuopion ydinkeskustassa 2,5 km pituista vakioreittiä yhteensä 40 kertaa kävelleen tutkijan henkilökohtaisia altistumistasoja eri kokoluokkien hiukkasille ( $PM_{10}$ ,  $PM_{10-2.5}$ ,  $PM_{2.5}$ , pienhiukkasten musta hiili BC eli noki) kolmessa erilaisessa jaksossa viime kevään katupölykaudella (28.3.–8.5.2019). Saatuja mittaustuloksia altistumispitoisuuksista verrattiin kävelyreitit keskivaiheilla sijainneella ilmanlaadun mittausasemalla mitattuihin samojen hiukkaskokoluokkien samanaikaisiin pitoisuustasoihin. Näin saatiin selvitettyä, kuinka hyvin kiinteässä mittapisteessä mitatut pitoisuustasot kuvastivat lähistöllä keskisuuren kaupungin ydinkeskustassa erilaisten säätilojen ja kadunhoidon vaiheiden aikana liikkuneen kävelijän henkilökohtaista altistumista.



Kuva: Pixabay

**K**aupunkiympäristöjen lähipäästölähteistä tehty, väestöjen altistumista ja terveyttä koskeneet tutkimukset ovat useimmiten kohdistuneet pienhiukkasiin ( $PM_{2,5}$ ; hiukkasten halkaisija alle 2,5 mikrometriä), jotka ovat peräisin ajoneuvojen pakokaasuista. Liikenteen aiheuttamien pakokaasupäästöjen on ennustettu vähenevän reilusti jo lähitulevaisuudessa kiristyneiden päästörajojen ja Suomen vanhan autokannan uusiutumisen seurauksena (Suonheimo ym. 2015).

Moottoripäästöjen pienentämistä koskevat määräykset eivät tule pienentämään maaperän mineraaleja ja orgaanisia ainesosia runsaasti sisältävän katupölyn päästöjä ja niistä ilmaan hengitysvyöhykkeelle muodostuvien erikokoisten hiukkasten pitoisuuksia, vaan siihen tarvitaan muunlaisia toimia. Ennusteiden mukaan katupölypäästöt ja ikääntyvän kaupunkiväestön altistuminen niille saattavat jopa suurentua,

mikäli kaupungeissa liikkuvien autojen määrä jatkaa kasvuaan voimakkaan kaupungistumisen myötä. Katupölyn  $PM_{2,5}$ :lle altistumisen on arvioitu aiheuttaneen 55 ennenaikaista sydän-, verisuoni- ja hengityssairauskuolemaa vuonna 2015 Suomessa. Toisin kuin pakokaasujen kohdalla, katupölyn pienhiukkasille altistumiseen liittyvien ennenaikaisten tautikuolemien määrän on arvioitu kasvavan vuoteen 2030 mennessä (Karvosenoja ym. 2017).

Katupölyaikana kaupunkien viranomaisten ylläpitämällä liikenneympäristöjen ilmanlaadun mittausasemilla mitatut, päiväsaikaan voimakkaasti kohonneet hengitettävien hiukkasten kokonaispitoisuudet ( $PM_{10}$ ; hiukkasten halkaisija alle 10 mikrometriä) koostuvat suurimmaksi osaksi ns. karkeista hengitettävistä hiukkasista ( $PM_{10-2,5}$ ; hiukkasten halkaisija 2,5–10 mikrometriä), mutta mukana on myös noin 10 prosenttia  $PM_{2,5}$ -hiukkasia. Isompien

kaupunkien vilkasliikenteisten katujen varrella olevilla ilmanlaadun mittausasemilla  $PM_{10}$ -hiukkasten tunti-, vuorokausi- ja kuukausipitoisuudet ovat keväisin katupölyn vaikutuksesta keskimääräistä korkeampia noin kolme kuukauden ajan eli helmikuun lopusta – maaliskuun alusta toukokuuhun asti. Loppupalvesta-alkukevästä lumen ja jään alta paljastuva epäorgaaninen ja orgaaninen pölisevä aines kuivuu asfalttipinnoilla. Talven aikana tien pinnalle monesta lähteestä – mukaan lukien asfaltin sekä autojen renkaiden ja metalliosien kulumisesta – syntynyt hienojakoisin katupölyfraktio nousee erityisen helposti kuivalta tien pinnalta ilmaan ja leijuu ilmassa pisimpään liikennevirroista aiheutuvien ilmapvirtausten ja tuulen vaikutuksesta.

$PM_{10-2.5}$ -kokoluokan hiukkaset pystyvät tunkeutumaan ylähengitysteiden lisäksi ihmisen henkitorveen ja keuhkoputkiin, ja pieni osa keuhkojen ääreisosiinkin  $PM_{2.5}$ -hiukkasten ohella. Siellä ne pääsevät läheiseen kontaktiin keuhkojen, sydämen ja verisuonten toimintaan haitallisesti vaikuttavien hermopäätteiden sekä keuhkoja kaikenlaisista hiukkasista (kuolleiden solujen osat, bakteerit, pienet pölyhiukkaset) puhdistavien syöjäsolujen eli makrofagien kanssa. Keuhkojen vaurioituminen hiukkasten käynnistämässä solukuolemissa ja tulehduksessa vaikuttaa myös keuhkoissa kiertävän veren ominaisuuksiin. Verenkierron tulehdussoluista vapautuu koko elimistöön vaikuttavia tulehduksen välittäjäaineita ja muun muassa veren hyytymistai-pumus kasvaa lisäten verisuonitukoksista aiheutuvia sydämen, keuhkojen ja aivojen infarkteja (Salonen ja Pennanen 2006; Lanki 2013; USEPA 2018).

$PM_{10-2.5}$ -kokoluokan hiukkasten merkityksestä terveyshaittojen aiheuttajana on selvästi vähemmän tutkimustietoa kuin pakokaasupäästöistä peräisin olevista pienhiukkasista. Useat suomalaiset ja olosuhteiltaan niihin verrattavissa olevat

länsimaiset tutkimukset ovat kuitenkin raportoineet  $PM_{10-2.5}$ -hiukkasten olleen yhteydessä kenties eniten suhteellisen lieviin hengityshaittoihin, kuten lasten hengityselinoireisiin, astman pahenemiseen ja lisääntyneisiin keuhkoputkentulehduksiin. Erityisesti astmaa sairastavat ja muista kroonisista hengityssairauksista kärsivät henkilöt kokevat lisää oireita ja heidän hengitysteidensä toimintaa kuvaavat puhallusarvot heikkenevät jo lyhyissä altistumisissa pölyiselle ilmalle. Tämän lisäksi on havaintoja lisääntyneistä ennenaikaisista kuolemista ja sairaalahoidoista pahentuneiden kroonisten hengityselinsairauksien vuoksi, sekä viime vuosina myös yhteyksistä sydän- ja verisuonisairauksien pahentumiseen (Brunekreef & Forsberg 2005; Lanki 2013; USEPA 2018).

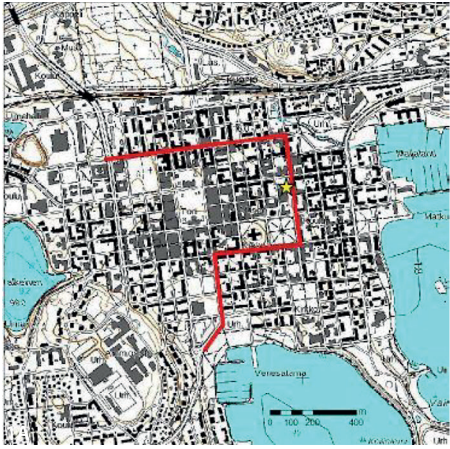
Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten hyvin EU-määräysten mukaisella liikenneympäristön mittausasemalla mitattujen eri hiukkaskokoluokkien ( $PM_{10}$ ,  $PM_{10-2.5}$ ,  $PM_{2.5}$ ) keskimääräiset ja 10-min pitoisuudet kuvasivat keskisuuren kaupungin ydinkeskustassa katupölyaikana liikkuneiden ihmisten henkilökohtaista altistumista.

## Tutkimusaineisto ja menetelmät

### Tutkimusasetelma

Mittaukset toteutettiin viidellä liikennemäärien, maksimijonopeuden ja rakennetun lähiympäristön suhteen toisistaan poikkeavilla osareiteillä 28.3.–8.5.2019 välisenä aikana. Osareittien muodostama yhteenlaskettu kävelyreitit kokonaispituus oli 9 km. Tässä artikkelissa raportoidaan tulokset suurinta altistunutta ihmismäärää koskeneella 2,5 km:n pituisella, Kuopion ydinkeskustassa sijainneella kävelyreitillä syntyneistä tutkijan henkilökohtaisista altistumisista (Kuvat 1A ja 1B).

Tutkija työnsi mittalaitteet sisältävää mittauskärryä ajoväylien vieressä olleilla



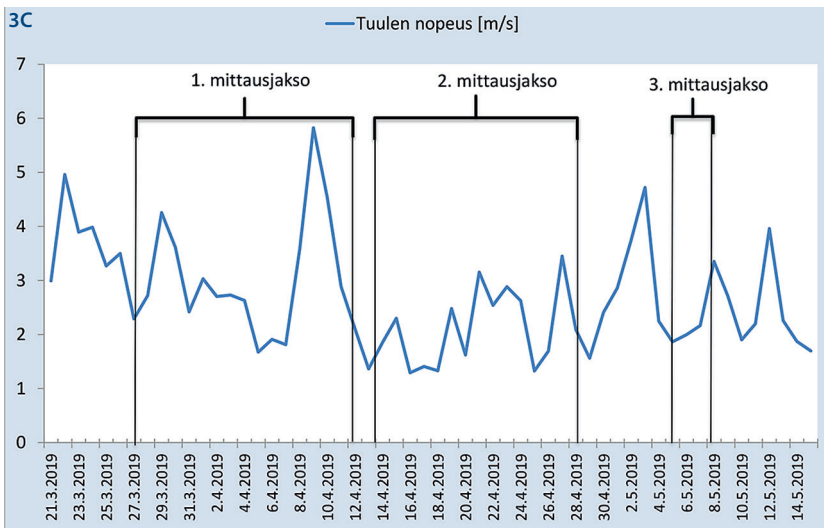
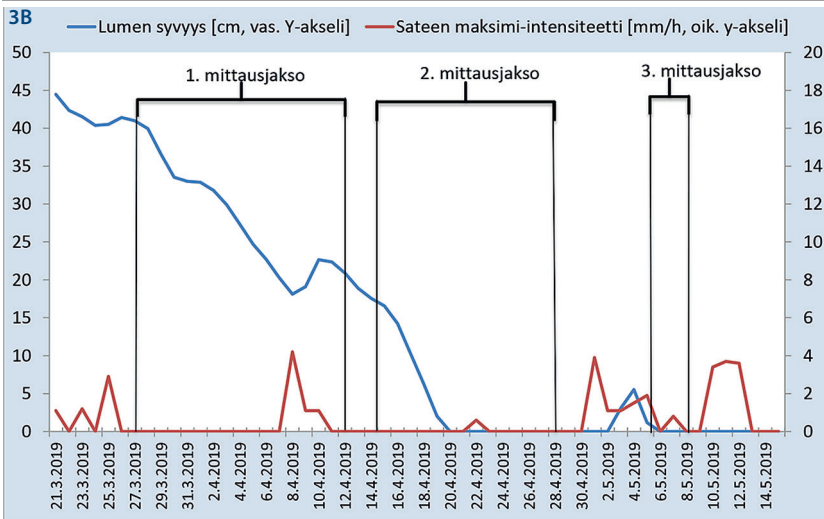
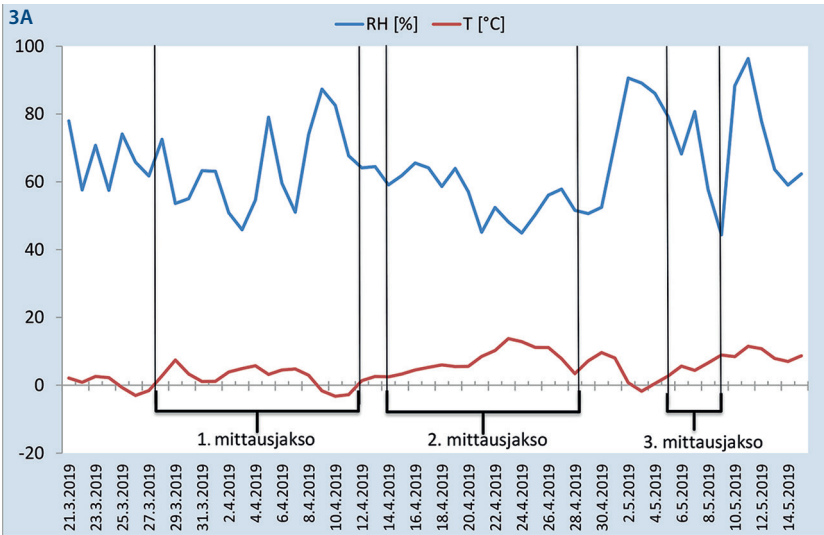
**Kuvat 1A ja 1B. Kävelyreitti henkilökohtaisen altistumisen mittauksessa. A. Karttakuva Kuopion ydinkeskustaan sijoittuneesta 2,5 km pituisesta osareitistä. Keskellä näkyvä avoin alue on kaupatori ja keltainen tähti osoittaa Maaherrankadun ilmanlaadun mittausaseman sijainnin. Kartta sisältää Maanmittauslaitoksen Peruskarttarasterin 09/2019 aineistoa. B. Näkymä mittausreitiltä. Kuva: Pekka Taimisto.**

jalkakäytävillä keskimääräisellä kävelynopeudella noin 6 km tunnissa. Kävelyt ja mitaukset Kuopion ydinkeskustan osareitillä kestivät yhteen suuntaan kävellessä vajaan puolen tunnin ajan (Kuvat 2A ja 2B). Mittauksia tehtiin liikenteen ruuhka-aikojen ulkopuolella aamuisin klo 9–11 ja iltapäivisin klo 12:30–14:30 välillä. Mittaukset pyrittiin ajoittamaan poutapäiville, jotta kävellyt katuosuudet olisivat pääosin kuivia.

Kävellessä tehdyt henkilökohtaisen altistumisen mitaukset keskitettiin kolmeen tutkimusjaksoon: (1) ennen ydinkeskusta-alueen keskitettyä hiekanpoistoa 28.3.–12.4.2019; (2) välittömästi keskitetyn hiekanpoiston jälkeen 15.–29.4.2019; ja (3) välittömästi katuja puhdistaneen runsaan sateen jälkeen 6.–8.5.2019. Näitä kolmea mittausjaksoa koskevia yleisiä sään taustatietoja on esitetty kuvissa 3 A–C.



**Kuvat 2A ja 2B. Henkilökohtaisen altistumisen mittaus Kuopion keskusta-alueen katupölytutkimuksessa. A. Pölyävä näkymä reitiltä mittauskävelyn aikana. B. Altistumisen mittauksessa käytetty työntökärry, johon oli sijoitettuna taulukossa 1 esiteltävät mittalaitteet. Kuvat: Taina Siponen.**



**Kuvat 3A–C. Yleisiä säätietoja tutkimuksen kolmen mittausjakson ajalta: lämpötila (T), suhteellinen kosteus (RH), lumen syvyys, sateen maksimi-intensiteetti ja tuulen nopeus. Mittaustiedot ovat Ilmatieteen laitoksen Savilahden mittausasemalta, joka sijaitsee n. 3 km päässä Kuopion kaupungin Maaherrankadun mittausasemalta.**

## Kiinteän mittausaseman kuvaus

Kuopion ydinkeskustassa sijaitseva Maaherrankadun ilmanlaadun mittausasema sijaitsee liikenneympäristössä, pääkirjaston pysäköintialueella. Mittausasemasta 15 m:n päässä kulkevan Maaherrankadun liikennemäärä on keskimäärin 7000 ajoneuvoa/vrk ja 50 m:n päässä olevan Tulliportinkadun liikennemäärä on 5500 ajoneuvoa/vrk. Raskaan liikenteen osuus molemmilla kaduilla on 2–3 % ja keskimääräinen ajonopeus 30 km/h. Mittausaseman lähistöllä ei ole pistemäisiä päästölähteitä ja käytännössä kaikki ydinkeskustan kiinteistöt kuuluvat kaukolämpöverkkoon. Näin ollen asema mittaa valtaosin tieliikenteen vaikutuksia paikalliseen ilmanlaatuun. Ilmanäytteiden oton korkeus oli 4 m maanpinnasta (Kuopion kaupunki – alueelliset ympäristönsuojelupalvelut ja JPP-Kalibrointi Ky, 2019).

## Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet ja mittaustulosten tilastokäsittely

Henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa ja kaupungin mittausasemalla käytetyt laitteet on esitelty taulukossa 1. Altistumismittauksissa käytettyjen jatkuvatoimisten, optisten mittalaitteiden ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ) pitoisuuksille tehtiin tasokorjaus vakio muunnokertoimilla, jotka tuotettiin samoilla laitteilla kerättyjen suodatinnäytteiden punnituksen ja näytteenottoon käytetyn, mitatun ilmamäärän avulla lasketuista gravimetrisista hiukkaspitoisuuksista. Mittauspäiväkohtaisista suodatinnäytteistä määritettyä hiukkaspitoisuutta verrattiin optisten mittalaitteiden vastaavan mittausajan keskipitoisuuteen ja muodostettiin molemmille hiukkaskokoluokille regressioyhtälöt.

Regressioyhtälö optiselle (x) vs. gravimetriselle (y)  $PM_{10}$ -hiukkasten altistumismittaukselle oli:

$$y=0,33 \cdot x + 1,5 \quad (R^2=0,92; N=16)$$

ja vastaavasti  $PM_{2,5}$ -hiukkasille:

$$y=0,49 \cdot x + 0,57 \quad (R^2=0,75; N=16).$$

$PM_{10-2,5}$  kokoluokan hiukkasten pitoisuus laskettiin mitattujen  $PM_{10}$ - ja  $PM_{2,5}$ -kokoluokkien pitoisuuksien erotuksena.

Lyhytaikaista altistumista, joka on tyyppillistä ydinkeskustassa asioiville ja siellä sisätöissä käyville ihmisille, kuvattiin laskemalla jatkuvatoimisilla mittalaitteilla saadusta minuuttidatasta liukuvat 10-minuutin aritmeettiset keskiarvot ja niiden tilastollinen jakauma. Tästä tulosaineistosta laskettuja tilastollisia tunnuslukuja (keskiarvo, mediaani eli 50. prosenttipiste sekä 10. ja 90. prosenttipisteet) verrattiin Maaherrankadun kiinteän mittausaseman mittaustuloksista laskettuihin vastaaviin, samanaikaisiin arvoihin. Pitoisuusjakauman 10. prosenttipiste kuvasi mitatun ja tarkistetun tulosaineiston pienimpien pitoisuuksien joukkoa, kun taas 90. prosenttipiste antoi tiedon aineiston suurimpien pitoisuuksien joukosta. Näin saatiin selville, kuinka hyvin kaupungin ydinkeskustan liikenneympäristössä olevalla kiinteällä ilmanlaadun mittausasemalla mitatut erikokoisten hiukkasten massapitoisuudet edustivat reaaliaikaisesti mitattua kävelijän henkilökohtaista altistumista.

## Tulokset ja pohdinta

### Keskitetyn hiekoitushiekan poiston vaikutus ydinkeskustassa kävelevän altistumiseen

Kolmen mittausjakson kävelypäivien keskimääräiset  $PM_{10}$ -,  $PM_{10-2,5}$ - ja  $PM_{2,5}$ -altistuspitoisuudet, kuten myös BC-altistuminen, olivat suurimmat ydinkeskustan alueella sunnuntaina 14.4. tehtyä keskitettyä hiekoitushiekkujen puhdistusta seuraavalla 2. mittausjaksolla. Kaikkein pienimmät pitoisuudet mitattiin 1.5.–3.5. olleiden melko voimakkaiden sateiden jälkeisellä 3. mittausjaksolla (Kuvat 4 A–D).

$PM_{10-2,5}$ - ja  $PM_{10}$ -pitoisuudet olivat keskimäärin (aritmeettinen keskiarvo ja mediaani) ja pitoisuusjakauman 90. prosentti-

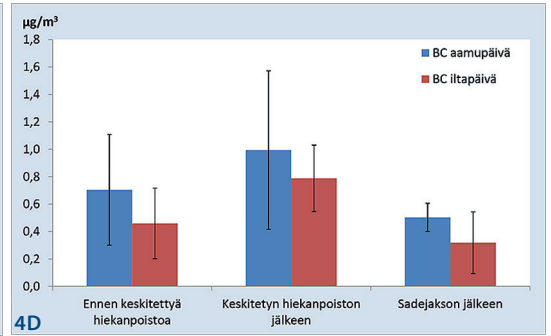
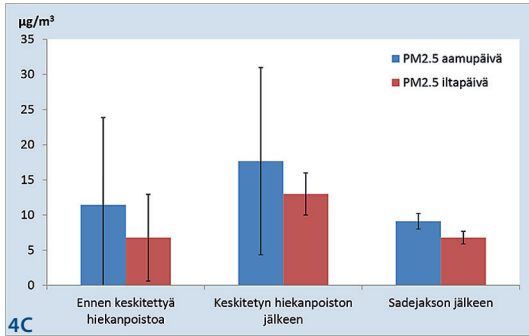
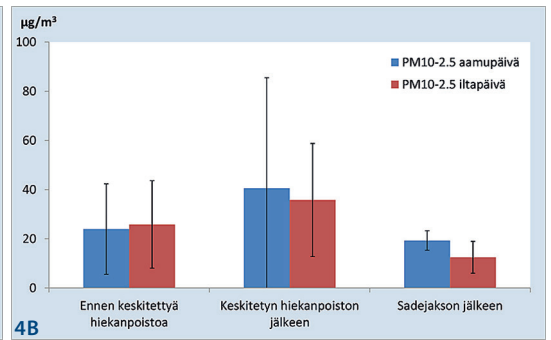
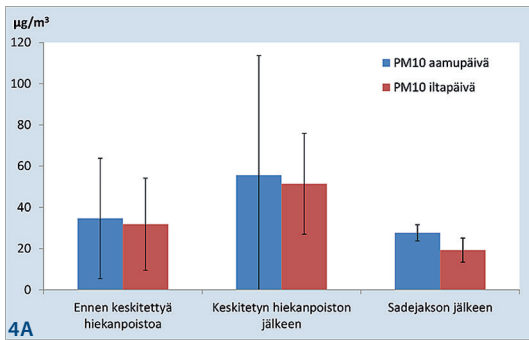
**Taulukko 1. Perustiedot henkilökohtaisen altistumisen mittauksessa käytetyistä laitteista (mittauskärri) sekä ydinkeskustan kävelyreitillä keskivaiheilla olevalla Kuopion kaupungin mittausasemalla käytetyistä vertailumittalaitteista.**

Laite	Mittausperiaate	Mitattava suure	Tallennus-resoluutio	Yhteys PM-päästölähteisiin
<b>THL:n jatkuvatoimiset altistumisen mittalaitteet + hiukkasmassan keräykset mittauskärriä</b>				
pDR-1200 X	Valon sirontaa mittaava fotometri + massakeräin (Harvard-esierotin / PM <sub>10</sub> )	PM <sub>10</sub>	1 min + suodatinkeräys	Kaikkien lähteiden tuottama karkeiden pienten hengitettävien hiukkasten reaaliaikainen massapitoisuus
pDR-1200 X	Valon sirontaa mittaava fotometri + massakeräin (Harvard-esierotin / PM <sub>2,5</sub> )	PM <sub>2,5</sub>	1 min + suodatinkeräys	Kaikkien lähteiden suorista kiinteiden pienhiukkasten primaaripäästöistä + ilmakehässä kaasupäästöistä muodostuvien sekundaarihiukkasten massapitoisuus
AE51	Suodattimelle keräytyvän PM-massan absorptio mittausta	Musta hiili (BC)	1 min	Pienhiukkasten kokoluokassa olevien polttoeräisten nokihiukkasten massapitoisuus
<b>Jatkuvatoimiset mittalaitteet Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausasemalla Maaherrankadulla</b>				
MP101	Beta-säteilyn absorptio	PM <sub>10</sub>	1 min	Kaikkien lähteiden tuottama karkeiden + pienten hengitettävien hiukkasten reaaliaikainen massapitoisuus
TEOM 1400a	Mikrovaaka: reaaliaikainen PM-massan punnitus	PM <sub>2,5</sub>	1 min	Kaikkien lähteiden suorista kiinteiden pienhiukkasten primaaripäästöistä + ilmakehässä kaasupäästöistä muodostuvien sekundaarihiukkasten massapitoisuus
AC32M	Typpioksidin (NO) ja otsonin reaktiossa muodostuva typpidioksidi (kemiluminesenssi)	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	1 min	Ilmakehän typestä palamisessa muodostuvia kaasuja (kaupungeissa erityisesti pakokaasujen NO <sub>2</sub> )
WXT520*	Sääasema* + tuulen suunta ja nopeus ultraäänellä*	T*, RH*	2 min	Ulkoilman lämpötila (T) ja suhteellinen kosteus (RH)  *Tiedot Ilmatieteen laitoksen sääasemalta Savilahdesta)

pisteen kohdallakin noin kaksinkertaiset 1. mittausjaksoon verrattuna. Vastaavasti mustan hiilen ja suurimmaksi osaksi myös PM<sub>2,5</sub>-hiukkasten pitoisuudet olivat 2. mittausjaksolla keskimäärin 30–40 prosenttia korkeammat kuin 1. mittausjaksolla. Nämä tulokset viittaavat lisääntyneeseen poltto-moottorilla toimivien työkonien käyttöön kaupungin keskitettyä hiekoitus- ja hiekkokojen puhdistuspäivää seuraavina viikkoina.

Kaupungille työtä tekevät urakoitsijat eivät jatkaneet ydinkeskustan katujen tai jalkakäytävien puhdistusta 14.4. jälkeen, mutta monet yksityiset kiinteistönomistajat aloittivat kaupungin virkamiesten mukaan omien alueidensa hiekkokojen poiston vasta silloin ja jatkoivat töitään usean viikon ajan.

Toinen osaselittäjä suuremmalle altistumiselle voi olla se, että 2. mittausjaksolla oli keskimäärin pienempi tuulen nopeus kuin



Kuvat 4A–D. Hengitettävien hiukkasten kokonaispitoisuus ( $PM_{10}$ ) sekä sen muodostavien karkeiden hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10-2.5}$ ) ja pienihiukkasten ( $PM_{2.5}$ ) pitoisuudet, ja polttoeräisiä pienihiukkasia osoittavan mustan hiilen (BC) pitoisuudet kevään katupölyepisodin kolmessa jaksossa tehdyissä altistumismittauksissa Kuopion ydinkeskustan kävelyreiteillä: (1) ennen keskitettyä hiekanpoistoa; (2) heti sunnuntaina 14.4.2019 toteutetun keskitetyn hiekanpoiston jälkeen; ja (3) sitä 1.–3.5. seuranneen runsaan sateen jälkeen. Pylväiden osoittamat pitoisuudet ovat aamu- ja iltapäivinä kävelyillä reiteillä tehdyistä jatkuvista mittauksista saatujen keskiarvopitoisuuksien mediaaneja  $\pm$  keskiahajonta. Onnistuneiden mittausten lukumäärät (N) eri muuttujissa mittauskävelyjen aikana olivat: jakson-1 aamupäivällä (ap) N=9 ja iltapäivällä (ip) N=9 sekä jakson-2/ap N=5 ja jakson-2/ip N=5 kaikissa muuttujissa; jakson-3/ap N=2 eri PM-kokoluokkien massapitoisuuksien mittauksessa ja N=3 mustassa hiilessä sekä jakson-3/ip N=3 kaikissa mitatuissa muuttujissa.

1. mittausjaksolla (Kuva 3C), mikä saattoi kohottaa samanaikaisesti kaikkien ilman hiukkasmaisten epäpuhtauksien pitoisuuksia. Kolmas mahdollinen osaselittäjä on 2. mittausjaksolla esiintynyt selvästi korkeampi ilman lämpötila ja matalampi ilman suhteellinen kosteus kuin 1. ja 3. mittausjaksoilla. Tämä todennäköisesti edisti hienojakoisemman, kadun pinnalle karkean hiekan poistamisen jälkeen jääneen pölyaineksen kuivumista ja kohoamista työkonoiden käytössä ja autoliikenteessä ilmaan sekä sen pysymistä ilmassa paikallisesti pitempään kuin 1. mittausjaksolla.

### Keskitetyn hiekoitushiekan poiston vaikutus kiinteän mittausaseman hiukkaspitoisuuksiin

Altistumismittauksissa ja Maaherrankadun mittausasemalla samanaikaisesti määritettyjen 10-minuutin liukuvien keskiarvopitoisuuksien välillä ei ollut regressioanalyysissä minkäänlaista yhteyttä ja mittauksien väliset korrelaatiot olivat hyvin matalia, esimerkkinä  $PM_{10}$ :  
 $y = 0,22 \cdot x + 49$ ;  $R^2=0.07$ ;  $N=544$ .

Kaupungin ilmanlaadun mittausasemalla, joka sijaitsi liikenneympäristössä tutkijan kävelyreitien puolivälissä, nähtiin



**Taulukko 2.** Tutkijan henkilökohtaiset altistuspitoisuudet Kuopion kaupungin ydinkeskustan kävelyreitillä: hengitettävien hiukkasten kokonaispitoisuus (PM<sub>10</sub>), sekä sen muodostavien kärkeiden hengitettävien hiukkasten (PM<sub>10-2,5</sub>) ja pienhiukkasten (PM<sub>2,5</sub>) pitoisuudet, ja polttoperäisiä pienhiukkasia osoittavan mustan hiilen (BC) pitoisuus loppupalven ja kevään katupölykauden kolmessa eri vaiheessa tehdyissä altistumismittauksissa. Tilastoaanlyysissä käytetyt pitoisuusarvot ovat liikenteen ruuhka-aikojen ulkopuolella tehdyistä mittauksista laskettuja 10-min liukuvia keskiarvoja kunkin aamu- ja iltapäivän aikana toteutettujen reittikävelysten aikana tehdyistä mittauksista jatkuvatoimisilla pienlaitteilla.

Katupölyepisodin vaihe	Tilastollinen tunnusluku	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10-2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	BC [µg/m <sup>3</sup> ]
<b>Ennen keskitettyä hiekanpoistoa (28.3.-12.4.2019)</b>	keskiarvo	47	33	14	1,0
	keskihajonta	29	23	9,8	0,6
	mediaani	46	34	11	0,8
	10. persentiili	15	6,3	6,6	0,4
	90. persentiili	89	62	23	1,5
	N=	295	295	295	295
<b>Keskitetyn hiekanpoiston jälkeen (15.4.-29.4.2019)</b>	keskiarvo	87	67	20	1,4
	keskihajonta	59	48	12	0,7
	mediaani	65	50	15	1,1
	10. persentiili	40	28	10	0,6
	90. persentiili	165	129	39	2,7
	N=	173	173	173	173
<b>Sadejakson jälkeen (6.5.-8.5.2019)</b>	keskiarvo	36	27	8,4	0,8
	keskihajonta	21	20	1,8	0,4
	mediaani	30	22	7,9	0,7
	10. persentiili	17	9,9	6,3	0,4
	90. persentiili	79	68	11	1,2
	N=	76	76	76	90

altistumismittauksiin verrattuna aivan samanlaiset, noin kaksinkertaiset nousut 2. mittausjakson samanaikaisissa PM<sub>10-2,5</sub>- ja PM<sub>10</sub>-pitoisuuksissa mutta pienempi nousu PM<sub>2,5</sub>-pitoisuudessa 1. ja 2. mittausjakson välillä (Taulukko 3). Näin tapahtui silti, vaikka 10-minuutin liukuvissa keskiarvopitoisuuksissa eri hiukkaskokoluokissa ei nähty mitään yhteyttä henkilökohtaisten altistuspitoisuuksien ja mittausasemalla samanaikaisesti mitattujen samojen muutujen pitoisuuksien välillä. Ehkä pitemmän

aikavälin kuin 10-minuutin keskiarvopitoisuuksissa löytyisi jokin tilastollinen yhteys näiden kahden erilaisen ilman hiukkasille altistumisen arviointimenetelmän välillä. Mustan hiilen pitoisuuksista ei voitu tehdä samanlaista vertailua, koska sitä mitattiin vain henkilökohtaisen altistumisen tutkimusasetelmassa.

Kaupungin mittausasemalla mitattu typidioksidin (NO<sub>2</sub>) pitoisuus ei osoittanut minkäänlaista systemaattista vaihtelua 1.–3. mittausjaksojen välillä (Taulukko 3).

**Taulukko 3.** Kuvaus hengitettävien hiukkasten kokonaispitoisuuden (PM<sub>10</sub>) sekä sen muodostavien karkeiden hengitettävien hiukkasten (PM<sub>10-2,5</sub>) ja pienhiukkasten (PM<sub>2,5</sub>) pitoisuuksien ja tyypidioksidin (NO<sub>2</sub>) pitoisuuden vaihteluista kevään katupölykauden kolmessa eri vaiheessa tehdyissä mittauksissa kiinteässä mittapisteessä. Tilastoaanlyysissä käytetyt pitoisuusarvot ovat 10-min liukuvia keskiarvoja kuvassa 1A ja taulukossa 2 kuvatun kävelyreitit keskivaiheilla sijaitsevalta Kuopion kaupungin Maaherrankadun ilmanlaadun mittausasemalta. Tässä esitettävät tilastolliset tunnusluvut on laskettu samanaikaisista saman muuttujan mittausravoista kuin taulukossa 2 esitetyt kunkin aamu- ja iltapäivän tutkimuskävelyn aikana mitatut henkilökohtaisen altistumisen mittausravot.

Katupölyepisodin vaihe	Tilastollinen tunnusluku	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10-2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>2,5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	RH [%]
<b>Ennen keskitettyä hiekanpoistoa (28.3.-12.4.2019)</b>	keskiarvo	36	29	8,0	26	5,2	51
	keskihajonta	44	41	7,2	15	3,0	14
	mediaani	25	11	5,1	21	4,8	53
	10. persentiili	4,3	1,0	2,6	10	0,4	32
	90. persentiili	69	60	18	47	10	68
	N=	154	150	152	156	156	156
<b>Keskitetyn hiekanpoiston jälkeen (15.4.-29.4.2019)</b>	keskiarvo	60	52	8,4	23	11	40
	keskihajonta	75	74	4,8	14	4,9	8,9
	mediaani	34	26	7,9	19	10	39
	10. persentiili	23	16	3,6	9,3	5,7	26
	90. persentiili	112	90	13	45	18	50
	N=	93	93	93	93	93	93
<b>Sadejakson jälkeen (6.5.-8.5.2019)</b>	keskiarvo	26	22	3,6	20	6,9	59
	keskihajonta	21	20	1,0	8,2	1,4	10
	mediaani	18	15	3,2	22	6,2	63
	10. persentiili	8,5	5,5	2,6	12	5,7	42
	90. persentiili	56	51	5,1	26	9,0	69
	N=	47	47	47	47	47	47

Se onkin ilmakehässä muodostuva, auringonvalon voimakkuudesta riippuva ns. sekundaarinen ilman epäpuhtaus, joka kuvastaa paljon laajemman kaupunkialueen liikenteen päästöjen vaikutusta kuin polttomoottorien primäärinen päästökomponeentti musta hiili (Salonen ja Pennanen 2006).

### Henkilökohtaisen altistumisen ja kiinteän mittausaseman hiukkaspitoisuuksien vertailu

Kaupungin mittausasemalla mitatut 10-minuutin liukuvat keskiarvot PM<sub>10</sub>-, PM<sub>10-2,5</sub>- ja PM<sub>2,5</sub>-pitoisuuksissa olivat keskimäärin (aritmeettinen keskiarvo ja etenkin mediaani) ja tutkimusjaksojen pitoisuusjakaumien

90. prosenttipisteen osalta systemaattisesti noin 20–50 prosenttia pienempiä kuin tutkijan mittaamat henkilökohtaiset altistuspitoisuudet. Näin oli silti, vaikka altistumisen mittauksessa optisilla mittalaitteilla saadut eri kokoluokkien hiukkasten pitoisuusarvot oli korjattu kenttätutkimuksessa tehtyjen gravimetristen PM<sub>10</sub>- ja PM<sub>2,5</sub>-vertailumittausten avulla vastaamaan viranomaismittausten yleisiä pitoisuustasoja.

Tähän mitattujen pitoisuuksien tasoeroon ovat todennäköisinä syinä muun muassa matalampi 1–1,5 m maanpinnasta, lähellä hengitysvyöhykettä oleva ilmanäytteen otto tutkijan henkilökohtaisiin mittalaitteisiin, kun taas mittausaseman ilmanäytteen

otto oli 4 m korkeudessa. Ilmanäytteen otto korkeammalta lisää etäisyyttä kadun pinnan sekä autojen renkaiden ja pakoputkien tasoista, mikä puolestaan suurentaa raskaampien  $PM_{10-2.5}$ -hiukkaspitoisuuksien vertikaalista laimenemistä enemmän kuin mitä tapahtuu kevyemmälle  $PM_{2.5}$ -jakeelle, BC-pitoisuudelle ja etenkin hyvin kevyille ultrapienille hiukkasille (UFP – hiukkasten halkaisija alle  $0,1 \mu m$ ) tai niistä nopeasti päästön jälkeen muodostuneille hieman suuremmille kertymähiukkasille (halkaisija yleisesti  $0,1-0,3 \mu m$  Suomen kaupunkien liikenneympäristöissä).

Kertymähiukkasten muodostumisnopeus ja halkaisijan kasvu riippuvat muun muassa muista samanaikaisista päästöistä, ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Musta hiili kuvaa liikenneympäristössä mitattuna hyvin polttoperäisten kertymähiukkasten pitoisuutta ja antaa epäsuorasti tietoa ihmisten altistumisesta tunnetusta lähipäästölähteestä samanaikaisesti vapautuneille, mustaan hiileen kiinnittyneille myrkyllisille orgaanisille yhdisteille (esim. PAH-yhdisteet) (Janssen ym. 2012).

### **Erot henkilökohtaisessa altistumisessa aamu- ja iltapäivän välillä**

Iltapäivisin mitatut  $PM_{10}$ - ja  $PM_{10-2.5}$ -altistuspitoisuudet olivat selvästi aamupäiväarvoja pienemmät vain katuja puhdistaneiden sateiden jälkeisellä 3. mittausjaksolla, kun taas  $PM_{2.5}$ :n ja BC:n altistuspitoisuuksissa oli nähtävissä tämä ero systemaattisena kaikilla kolmella mittausjaksolla (Kuvat 4A–D).

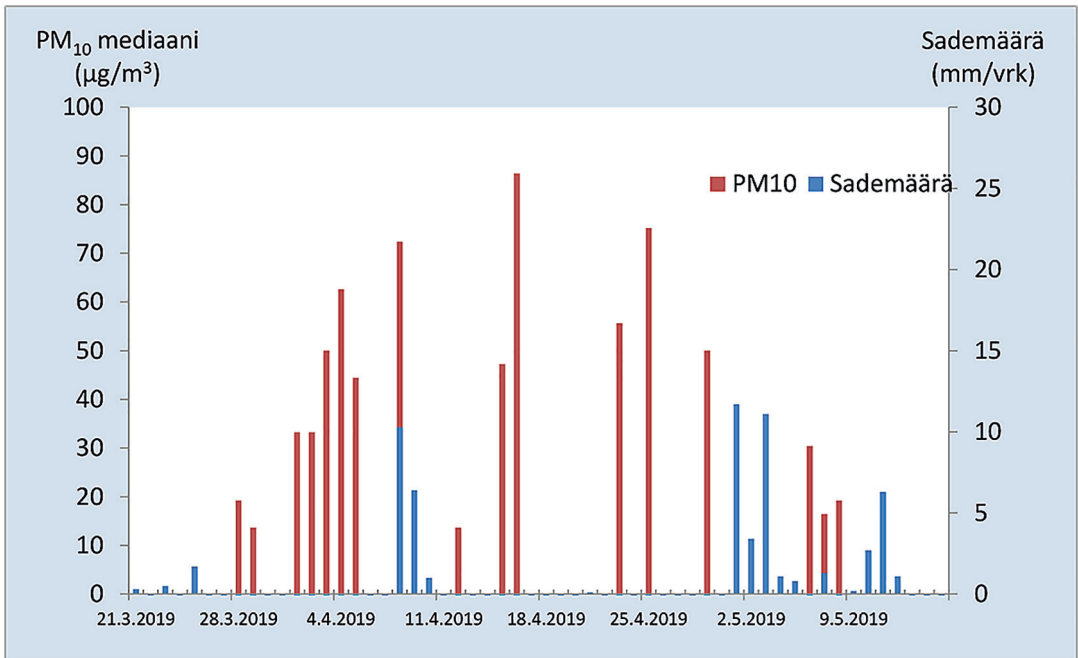
Isojen kaupunkien vuosittaisissa ilmanlaaturaporteissa esitetyissä liikenneasemien  $PM_{2.5}$ -, BC- $NO_2$ -pitoisuuksien vuorokauden sisäistä vaihtelua osoittavissa kuvaajissa näkyy yleisenä ilmiönä, että arkisin työhön ja muuhun kaupunkikeskusta-asiointiin liittyvä menoliikenne näyttäisi jakautuvan selvästi lyhyemmälle ajalle kuin töistä tai muista syistä kaupunkikeskustasta tapahtuva paluuliikenne (HSY 2019). Illan ja yön

jälkeen yleisesti kylmistä auton moottoreista syntyvät suuremmat pakokaasupäästöt ja etenkin loppupalvesta ja alkukevällä usein aamuisin esiintyvät heikot tuulet ja lämpötilainversiot voivat osaltaan vaikuttaa näiden läheisesti pakokaasupäästöihin liittyvien, kevyiden hiukkaskomponenttien ( $PM_{2.5}$ , BC) esiintymiseen korkeampina pitoisuuksina tämän vuodenajan aamuliikenteen aikana.

Maaperän lumen, sulamisvesien ja sadeveden kanssa loppupalvesta ja alkukevällä tekemisiin joutuvien isompien, orgaanisen aineksen osalta hygroskooppisten ja raskaampien  $PM_{10-2.5}$ -hiukkasten pitoisuuksissa ei oikeastaan voi odottaa suurta eroa aamu- ja iltapäiväliikenteen välillä. Sama koskee tietenkin katupölykauden alkuvaiheen aikana myös  $PM_{10}$ -pitoisuuksia. Enemmän  $PM_{2.5}$ -pitoisuutta muistuttavaan käyttäytymiseen ilmakehässä tarvitaan hiekoitushiekan poiston ja runsaiden sateiden jälkeen tapahtuvaa katujen kuivumista, jotta muodostuu halkaisijaltaan pienempiä ja kevyempiä  $PM_{10-2.5}$ -kokoluokan hiukkasia (Sillanpää ym. 2006). Näissä oloissa aamujen heikkotuulisuuden ja lämpötilainversioiden vaikutukset alkoivat tässäkin tutkimuksessa todennäköisesti näkyä mittauspäivien  $PM_{10-2.5}$ - ja  $PM_{10}$ -pitoisuuksissa selvemmin (Kuvat 4A–D; Kuva 5).

### **Yhteenveto ja tutkimusaineiston jatkoanalyysi**

Tutkimuksessamme todettiin, että suomalaisen keskisuuren kaupungin ydinkeskustan autoliikenteen läheisyydessä kävelevä henkilö altistuu todellisuudessa huomattavasti suuremmille keväisestä katupölystä peräisin oleville hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) sekä sen muodostavien karkeiden hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10-2.5}$ ) ja pienhiukkasten ( $PM_{2.5}$ ) massapitoisuuksille kuin mitä kaupungin kiinteän mittauspisteen laakisäätteiset hiukkasmittaukset osoittavat. Noin 2,5 km pitkän, kaupunkikeskustassa



**Kuva 5. Sateen vaikutus seuraavina tutkimuspäivinä mitattuihin henkilökohtaisen altistumisen PM<sub>10</sub>-pitoisuuksiin Kuopion ydinkeskustan kävelyreitillä. Kuvassa on aamu- ja iltapäivinä tehdyistä mittauksista laskettu keskiarvo. Talven hiekoitushiekkojen keskitetty poistokampanja oli kaupungin ydinkeskustan ajoväylillä ja jalkakäytävillä ja sunnuntaina 14.4., mutta yksityisten kiinteistöomistajien teettämä hiekkojen poisto jatkui viikkoja tämän jälkeen. Loppuviikon 1.–3.5. runsas sade laski kohonneita hiukkaspitoisuuksia tehokkaasti 6.–8.5.2019 olleina henkilökohtaisen altistumisen mittauspäivinä.**

olevan kävelyreitit puolivälissä olleen kiinteän mittausaseman laitteiden osoittamat eri hiukkaskokoluokkien pitoisuudet olivat tässä tutkimuksessa 20–50 % pienemmät kuin mitä tutkijan katupölyajan eri olosuhteissa tekemien 34 kävelykerran aikana mitatut todelliset altistumiset olivat.

Alustavasti voidaan päätellä, että keskustan alueen katujen ylläpidosta vastaavien julkisten toimijoiden (kaupunki – keskustan alueen kadut ja jalkakäytävät; ELY-keskus – mm. katujen yli menevä moottoritie) ja yksityisten kiinteistöjen omistajien kannattaisi ajoittaa hiekoitushiekkojen keskitetty poisto ja sen jälkeinen katujen pesu yhteisesti mahdollisimman lyhyelle ajanjaksolle, jotta tutkimuksessa havaittu voimakkain

altistuminen katupölyn erikokoisille hiukkasille jäisi mahdollisimman lyhyeksi. Vasta runsaat kevätsateet laskivat päiväajan keskimääräiset hiukkaspitoisuudet ja 10-minuutin huippupitoisuudet sekä mittausasemalla että henkilökohtaisessa altistumisessa alle puoleen verrattuna kaikkein pölyisimpään mittausjaksoon.

Tutkimusaineiston jatkoanalyysissä tulemme vertaamaan kävelijän henkilökohtaisia altistumistasoja eri kokoluokan hiukkasille tutkimuksen viidellä, ominaisuuksiltaan erilaisilla osareiteillä Kuopion ydinkeskustassa ja sen läheisyydessä. Näillä 1,3–2,5 km pitkillä osareiteillä on hyvin erilaisia päivittäisiä liikennemääriä (suurin yli 30000 ajoneuvoa/vrk) ja suurimpia sallittuja

ajonopeuksia (40–60 km/h). Myös ajoneuvo-  
päästöjen laimenemisolosuhteet poikkeavat  
suuresti toisistaan (esim. rakennetulta ympä-  
ristöltään avoin runkoväylä vs. keskusta-  
alueen kerrostalojen suojaamat kadut). Koko  
9 km:n kävelyreitillä varrella oli kolme Kuopion  
kaupungin varustamaa ilmanlaadun  
mittausasemaa, mikä tekee mahdolliseksi  
vertailla mitattua henkilökohtaista altistu-  
mista useammanlaisissa liikenneympäristöissä  
olevien kiinteiden mittausasemien  
samanaikaisiin tulosaineistoihin.

Karkeat hengitettävät hiukkaset (PM<sub>10-2.5</sub>)  
eivät tule hyvin ajoneuvojen tai talojen sisäl-  
le, mutta autoliikenneväylän vieressä kä-  
velevä tai pyöräilevä ihminen altistuu niille  
voimakkaasti pahan katupölyjakson aikana.  
Silloin kohoaa kuitenkin myös katupölystä  
peräisin olevien PM<sub>2.5</sub>-hiukkasten pitoisuus,  
josta pienimmät saattavat tunkeutua eten-  
kin vilkkaiden liikenneväylien varrella  
olevien vanhempien, vähemmän tiiviisti  
rakennettujen asuintalojen sisätiloihin. Tätä  
ilmiötä ei ole Suomessa tutkittu, vaan tähän  
mennessä tehty PM<sub>2.5</sub>-hiukkasten, mustan  
hiilen ja PAH-yhdisteiden ulko-sisäsiirtymän  
tutkimus on keskittynyt pääasiassa  
kokojakaumaltaan hienojakoisempiin lii-  
kenneympäristöjen pakokaasuhiukkasiin  
sekä hiljattain myös tiiviisti rakennettu-  
jen pientaloalueiden puulämmityksestä  
peräisin oleviin pienhiukkasiin. Ulkona  
liikkuessa tapahtuvasta altistumisesta syn-  
tyvää katupölyhiukkasten tunkeutumista  
ylähengitysteihin ja keuhkoihin sekä siitä  
aiheutuvia epämiellyttäviä ärsytysoireita  
voi yleiskunnoltaan normaali henkilö vä-  
hentää merkittävästi kasvoille tiiviisti aset-  
tuvalla, uloshengitysventtiilillä varustetulla  
P2-luokan hengityssuojaimella.

## Kiitokset

Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet Kuopion  
kaupungin ympäristönsuojelu- ja ympäris-  
töterveyspalvelut sekä THL. Tutkimusryh-

mä kiittää projektin ohjausryhmää hyödylli-  
sistä taustatiedoista ja hyvästä yhteistyöstä.

## Kirjallisuus

- Brunekreef B, Forsberg B. Epidemiological  
evidence of effects of coarse airborne  
particles on health. *European  
Respiratory Journal* 2005; 26: 309–318.
- Janssen NAH, Gerlofs-Nijland ME, Lanki  
T, Salonen RO, Cassee F, Hoek G, Fisher  
P, Brunekreef B & Krzyzanowski M.  
Health effects of black carbon.  
Copenhagen: WHO Regional Office for  
Europe. Report for the Joint Task Force  
on Health Aspects of Air Pollution of  
the WHO/UNECE Convention of  
Long-range Transboundary Air  
Pollution 2012, 50p. + 3 Annexes.  
ISBN 978-92-890-0265-3. Saatavilla:  
[http://www.euro.who.int/en/what-  
we-do/health-topics/environment-and-  
health/air-quality/publications/2012/  
health-effects-of-black-carbon](http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2012/health-effects-of-black-carbon)
- Karvosenoja N, Savolahti M, Lanki T,  
Salonen R & Tiittanen P. Vaikutukset  
ilmanlaatuun. In: Soimakallio S, ym.  
Energia- ja ilmastostrategian ja kes-  
kipitkän aikavälin ilmastopolitiikan  
suunnitelman ympäristövaikutusten  
arviointi. Helsinki: Valtioneuvoston  
kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tut-  
kimustoiminnan julkaisusarja 59/2017:  
26–33. Internet: [http://tietokayttoon.fi/  
julkaisu?pubid=21005](http://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=21005)
- Kuopion kaupunki – alueelliset ympä-  
ristönsuojelupalvelut ja JPP-Kalibrointi  
Ky. Kuopion seudun ilmanlaatu vuonna  
2018. Kuopion kaupunki, 2019.  
Saatavissa: [https://www.kuopio.fi/  
documents/7369547/7616060/Kuopion+  
seudun+ilmanlaatu+vuonna+2018/7107c  
37c-c47b-4342-b14c-fd41bcc75742](https://www.kuopio.fi/documents/7369547/7616060/Kuopion+seudun+ilmanlaatu+vuonna+2018/7107c37c-c47b-4342-b14c-fd41bcc75742)
- Lanki T. Katupölyn vaikutukset tervey-  
teen. NASTA-tutkimusohjelma 2011–  
2013, loppuraportti 2013. Saatavissa:

- [https://asiakas.kotisivukone.com/files/nastatutkimus.kotisivukone.com/tiedostot/tutkimus-raportit/lanki\\_thl\\_katupolyn\\_terveysvaikutukset.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/nastatutkimus.kotisivukone.com/tiedostot/tutkimus-raportit/lanki_thl_katupolyn_terveysvaikutukset.pdf)
- Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) – Ohtonen K, Loukkola K, Aarnio P, Portin H. Ilmanlaatu pääkaupunki-seudulla vuonna 2018. HSY:n raportti 2019. ISBN (pdf): 978-952-7146-43-9. Saatavissa: [https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/4-2019\\_ilmanlaatu\\_paakaupunkiseudulla\\_vuonna\\_2018.pdf](https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/4-2019_ilmanlaatu_paakaupunkiseudulla_vuonna_2018.pdf)
- Salonen RO, Pennanen A (toim. Pauku T). Pienhiukkasten vaikutus terveyteen. Tuloksia ja päätelmiä teknologiaohjelmasta FINE Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys. Helsinki: Tekes, 2006. ISBN 952-457-250-8. Saatavissa: <https://docplayer.fi/418274-Pienhiukkasten-vaikutus-terveyteen-tuloksia-ja-paatelmia-teknologiaohjelmasta-fine-pienhiukkaset-teknologia-ymparisto-ja-terveys.html>
- Sillanpää M, Hillamo R, Saarikoski S, Frey A, Pennanen AS, Makkonen U, Spolnik Z, van Grieken R, Branis M, Brunekreef B, Chalbot M-C, Kuhlbusch T, Sunyer J, Kerminen V-M, Kulmala M, Salonen RO. Chemical composition and mass closure of particulate matter at six urban sites in Europe. *Atmospheric Environment* 2006; 40(Suppl 2):212-223. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231006005735>
- Suonheimo P, Grönroos J, Karvosenoja N, Petäjä J, Saarinen K, Savolahti M, Silvo K. Päästökattodirektiiviehdotuksen ja keskisuurten polttolaitosten direktiiviehdotuksen toimeenpanon vaikutukset Suomessa. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 6/2015. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/153981/SYKEra\\_6\\_2015.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/153981/SYKEra_6_2015.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, October 2018). Integrated science assessment for particulate matter. External review draft EPA/600/R18/179. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment – RTP Division. Saatavissa: [https://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/264cb1227d55e02c85257402007446a4/932D1DF8C2A9043F85258100048170D/\\$File/PM-1STERD-OCT2018.PDF](https://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/264cb1227d55e02c85257402007446a4/932D1DF8C2A9043F85258100048170D/$File/PM-1STERD-OCT2018.PDF) ■