

Työpaperi 33/2022

Puun pienpolton savuille altistuminen ja hiukkaspitoisuuden alueellinen vaihtelu asuinalueella

Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto ja Taina Siponen

Puunpoltto heikentää ilmanlaatua tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla, joilla matalan piipun päästä purkautuvat päästöt jäävät etenkin talvipakkasella usein leijumaan matalalle pihapiireihin, ja osa niistä kulkeutuu ilmanvaihdon kautta asuntojen sisätiloihin. Puun polttaminen ja päästöjen syntyminen painottuu ilta-aikaan sekä viikonloppuihin, jolloin asuinalueilla oleskellaan ja siten altistutaan savuille.

Puun pienpoltto on Suomessa suurin pienhiukkasten ja mustan hiilen päästöjen lähde. Poltossa ilmaan vapautuu myös kaasumaisia yhdisteitä ja ultrapieniä hiukkasia (halkaisija alle 100 nm). Pienhiukkasille ei ole tunnistettu kynnyspitoisuutta, jonka alittavilla pitoisuuksilla terveyshaittoja ei esiinny. Lisäksi tieteellinen näyttö sekä mustan hiilen että ultrapienien hiukkasten haitallisuudesta on vahvistunut.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin pienhiukkasten, mustan hiilen sekä hiukkasten lukumäärän ja keuhkocodeposituvan pinta-alan ajallista ja alueellista pitoisuusvaihtelua puun pienpoltoa suosivalla pientalovaltaisella asuinalueella Kuopion Niiralassa talvikaudella 2020–2021. Mittauksia tehtiin samanaikaisesti kiinteällä ilmanlaadun mittausasemalla ja liikkuvana mittauksena 2,5 km ympyräreitillä.

Kaikkien tutkittujen ilmansaasteiden pitoisuudet olivat alueellisesti epätasaisesti jakautuneet eikä asemalla mitattu pitoisuusvaihtelu kuvannut hyvin altistumispitoisuutta alueen pientalojen lähellä. Reitillä mitattiin hyvinkin suuria ilmansaastepitoisuuksia, jotka olivat yleensä lyhytaikaisia. Etenkin vähätuulisina pakkasiltoina pitoisuus pysyi kuitenkin suurena koko illan ajan. Näissä tilanteissa yksittäisten talojen päästöllä saattoi olla suuri merkitys lähialueen ilmansaastepitoisuuksiin. Mitatuista ilmansaasteista musta hiili toimi parhaiten puunpolton savun hajun indikaattorina.

Esipuhe

Puun pienpoltoa pidetään usein ympäristöystävällisenä lämmitysmuotona ja savunhaju koetaan luonnollisena ja kodikkaana. Puun polton savu on kuitenkin terveydelle haitallista ja vanhat tulisijat, virheelliset polttotavat sekä kostea polttopuu voivat johtaa suuriin ilmansaastepäästöihin ja -pitoisuuksiin. Tämä on ongelma etenkin tiheästi rakennetuilla asuinalueilla, joilla savuille altistuu muutkin kuin polttaja itse. Terveyshaittojen lisäksi savu aiheuttaa viihtyvyyshaittoja eikä puulämmitystä voi pitää ympäristöystävällisenäkään, sillä päästöt kiihdyttävät ilmastonmuutosta.

Puun pienpolton savuille altistuminen ja hiukkaspitoisuuden alueellinen vaihtelu asuinalueella (PUUHA)-tutkimuksessa selvitettiin pienhiukkasten, mustan hiilen sekä hiukkasten lukumäärän ja keuhkodesoituvan pinta-alan ajallista ja alueellista pitoisuusvaihtelua puun pienpoltoa suosivalla pientalovaltaisella asuinalueella Kuopion Niiralassa talvikaudella 2020–2021.

Tutkimusta ovat rahoittaneet Kuopion kaupungin ympäristönsuojelu- ja ympäristöterveyspalvelut sekä Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. Kiitämme ympäristönsuojelutarkastaja Erkki Pärjälää, sekä ympäristötarkastajia Olli Pärjälää ja Mikko Sokuraa hyvästä yhteistyöstä sekä kaupungin mittausaineistojen käsittelystä.

Tiivistelmä

Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto ja Taina Siponen. Puun pienpolton savuille altistuminen ja hiukkaspitoisuuden alueellinen vaihtelu asuinalueella. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). Työpaperi 33/2022. 35 sivua. Helsinki 2022. ISBN 978-952-343-897-2 (verkkojulkaisu)

Suomessa puun pienpolton merkitys ilmansaasteiden lähteenä on kasvanut 2000-luvulla, sillä puun käyttö on lisääntynyt merkittävästi samalla kun liikenteen ja teollisuudet päästöt ovat vähentyneet. Pienpolton päästöt onkin nostettu yhdeksi keskeiseksi asiaksi myös kansallisessa ilmansuojeluohjelmassa, jonka tavoitteena on vähentää päästöjen määrää vuoteen 2030 mennessä. Käyttömäärän lisäksi päästöihin vaikuttavat polttopuiden ja tulisijan laatu sekä polttotavat. Puunpoltto heikentää ilmanlaatua tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla, joilla matalan piipun päästä purkautuvat päästöt jäävät etenkin talvipakkasella usein leijumaan matalalle pihapiireihin, ja osa niistä kulkeutuu ilmanvaihdon kautta asuntojen sisätiloihin. Puun polttaminen ja päästöjen syntyminen painottuu ilta-aikaan sekä viikonloppuihin, jolloin asuinalueilla oleskellaan ja siten altistutaan savuille.

Suomessa suurin osa ilmanlaadun mittausasemista on sijoitettu valvomaan liikenteen päästöjä kaupungeissa. Pienpoltoa suosivilla asuinalueilla mittausasemia on vain muutama, vaikka puun polton savun tiedetään olevan terveydelle haitallista ja pitoisuudet ovat ajoittain suurempia kuin liikenneympäristöissä. Mittausasemat antavat yleiskuvan alueen ilmanlaadusta, mutta lisäksi altistumisen arviointia varten tarvitaan tarkempaa tietoa pitoisuuksien alueellisesta ja ajallisesta vaihtelusta. Tässä tutkimuksessa selvitettiin pienhiukkasten, mustan hiilen sekä hiukkasten lukumäärän ja keuhkocodeposituvan pinta-alan ajallista ja alueellista pitoisuusvaihtelua puun pienpoltoa suosivalla pientalovaltaisella asuinalueella Kuopion Niiralassa talvikaudella 2020–2021.

Mittaukset toteutettiin yhdellä noin 2,5 km pituisella ympyräreitillä ja samanaikaisesti reitin varrella sijaitsevalla mittausasemalla. Ilmansaastepitoisuuksia mitattiin arkipäivisin ja lauantaisin sekä aamuisin että iltaisin 27.11.2020–13.2.2021. Hankkeen aikana mittauskiirroksia kertyi 96 kpl. Pitoisuuksien lisäksi talletettiin mittausvaunun sijainti GPS-laitteella. Tuloksista tarkasteltiin pitoisuuksien vaihtelua mittauskerran ja kunkin kierroksen keskiarvona sekä vuorokaudenajan, viikonpäivän, tutkijan havainnoiman savun hajun voimakkuuden sekä sääolosuhteiden vaikutusta pitoisuuksiin. Ilmansaastepitoisuuksien alueellista vaihtelua tutkittiin yhdistämällä pitoisuusdata sijaintitietoon ja esittämällä tulos graafisesti.

Kaikkien tutkittujen ilmansaasteiden pitoisuudet olivat alueellisesti epätasaisesti jakautuneet eikä asemalla mitattu pitoisuusvaihtelu kuvannut hyvin altistumispitoisuutta alueen pientalojen lähellä. Reitillä mitattiin hyvinkin suuria ilmansaastepitoisuuksia, jotka olivat yleensä lyhytaikaisia. Etenkin vähätuulisina pakkasiltoina pitoisuus pysyi kuitenkin suurena koko illan ajan. Näissä tilanteissa yksittäisten talojen päästöllä saattoi olla suuri merkitys lähialueen ilmansaastepitoisuuksiin. Mitatuista ilmansaasteista musta hiili toimi parhaiten puunpolton savun hajun indikaattorina.

Avainsanat: puun pienpolto, altistuminen, alueellinen vaihtelu, pienhiukkaset, musta hiili, hiukkasten lukumääräpitoisuus, hiukkasten keuhkocodeposituva pinta-ala

Sammandrag

Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto ja Taina Siponen. Puun pienpolton savuille altistuminen ja hiukkaspitoisuuden alueellinen vaihtelu asuinalueella [Exponering för rök från småskalig vedeldning och lokal variation i partikelhalten i bostadsområdet]. Institutet för hälsa och välfärd (THL). Diskussionsunderlag 33/2022. 35 sidor. Helsingfors 2022. ISBN 978-952-343-897-2 (nätpublikation)

I Finland har småskalig vedeldning som källa till luftföroreningar fått större betydelse på 2000-talet, eftersom användningen av ved har ökat betydligt samtidigt som utsläppen från trafiken och industrin har minskat. Utsläppen från småskalig eldning har lyfts fram som en central fråga även i det nationella luftvårdsprogrammet, vars mål är att minska utsläppen före 2030. Utöver mängden ved som eldas påverkas utsläppen av vedens och eldstadens kvalitet samt eldningssättet. Vedeldning försämrar luftkvaliteten i tätt bebyggda småhusområden där utsläpp från en låg skorsten ofta blir kvar lågt nere i luften på gårdsplanerna, i synnerhet kalla vinterdagar, och en del av utsläppen hamnar inne i bostäderna via ventilationen. Vedeldningen och uppkomsten av utsläpp koncentreras till kvällar och veckoslut då man vistas i bostadsområdena och därmed exponeras för rök.

I Finland har största delen av mätstationerna för luftkvaliteten placerats för att övervaka utsläppen från trafiken i städerna. I bostadsområden där det är populärt med småskalig vedeldning finns det endast ett fåtal mätstationer, även om man vet att rök från vedeldning är hälsofarlig och halterna tidvis är högre än i trafikmiljöer. Mätstationerna ger en allmän bild av luftkvaliteten i området, men för att bedöma exponeringen behövs dessutom mer specifik information om halternas lokala och tidsmässiga variation. I den här undersökningen utreddes mängden fina partiklar, svart kol och partiklar och den tidsmässiga och lokala variationen i partikelhalternas lungdeponerade ytearea. Undersökningen genomfördes under vintersäsongen 2020–2021 i ett småhusdominerat bostadsområde i Niirala i Kuopio där det är populärt med småskalig eldning.

Mätningarna gjordes på en cirka 2,5 km lång cirkelled och samtidigt vid en mätstation längs leden. Halterna av luftföroreningar uppmättes vardagar och lördagar både morgon och kväll under perioden 27 november 2020–13 februari 2021. Under projektets gång gjordes det 96 mätrundor. Utöver halterna registrerades mätvagnens placering med GPS-utrustning. Utifrån resultaten granskades halternas variation som medelvärde för mätningen och varje runda samt hur halterna påverkades av tiden på dygnet, veckodagen, hur stark röklukt forskaren observerat och väderförhållandena. Den lokala variationen i luftföroreningshalterna undersöktes genom att data om partikelhalter kombinerades med positionsdata. Resultatet presenterades grafiskt.

Alla de halter av luftföroreningar som undersöktes var ojämnt fördelade lokalt och variationen i halterna som uppmättes på stationen avspeglade inte exponeringshalten i närheten av småhusen i området. Längs leden uppmättes även mycket höga halter av luftföroreningar, som i allmänhet var kortvariga. Men särskilt under kalla kvällar med lite blåst var halten hög hela kvällen. I dessa situationer kunde utsläpp från enskilda hus ha stor betydelse för halterna av luftföroreningar i närområdet. Av de uppmätta luftföroreningarna fungerade svart kol bäst som indikator för rökdof från vedeldning.

Nyckelord: småskalig vedeldning, exponering, lokal variation, fina partiklar, svart kol, partikelhalter, partiklarnas lungdeponerade ytearea

Abstract

Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto ja Taina Siponen. Puun pienpolton savuille altistuminen ja hiukkaspitoisuuden alueellinen vaihtelu asuinalueella [Exposure to smoke from the small-scale wood combustion and regional variation in the concentration of particulate matter in residential area]. Finnish institute for health and welfare (THL). Discussion Paper 33/2022. 35 pages. Helsinki, Finland 2022. ISBN 978-952-343-897-2 (online publication)

The significance of small-scale burning of wood as a source of air pollution has grown in Finland in the 21st century; residential wood combustion has increased substantially, while emissions from transport and industry have declined. Emissions from small-scale burning have been raised as a key issue also in the National Air Pollution Control Programme aimed at reducing emissions by 2030. In addition to the amount of wood used, emissions are also affected by the quality of the firewood and the hearth that is used, and by the different methods of burning the wood. Wood smoke harms air quality in densely built areas where detached houses predominate and where emissions from short chimneys often end up hovering in the area at low altitudes, especially in cold winter weather. Some of the smoke can get inside the homes through the ventilation. The burning of wood and the resulting emissions are greatest in the evenings and at weekends, when people spend more time in their residential areas, and are thus exposed to the wood smoke.

In Finland most air quality monitoring sites have been set up to monitor transport emissions in cities. In residential areas that favour small-scale burning there are only a few monitoring sites, even though the smoke from burning wood is known to be harmful to health, and concentrations occasionally exceed the concentrations observed next to busy roads. The monitoring sites give a general picture of air quality in an area, but evaluating exposure also requires more detailed information on the regional and temporal variation of pollution levels. This study was conducted in the Niirala neighbourhood of Kuopio, an area favouring small-scale wood combustion, in the winter of 2020–2021. The study examined temporal and regional variation of fine particles, black carbon, particle number concentration, and the lung deposited surface area.

The measurements were made in a single circular route about 2.5 km in length, and at the same time, at a monitoring site located on the route. Air pollution levels were measured on weekdays and Saturdays and on mornings and evenings between 27 November 2020 and 13 February 2021. Pollution levels were measured for 96 rounds during the project. In addition to the concentrations of pollutants, the location of the monitoring trailer was recorded using a GPS device. The averages of each measurement and each round were calculated, and the effects that the time of day, the day of the week, the intensity of the smell of wood smoke detected by the researcher, and the weather conditions had on the levels were examined. Regional variation of the concentrations of air pollutants were studied by combining concentration data with location information and by presenting the result graphically.

The concentrations of all air pollutants that were studied were unevenly distributed according to area, and the variation of concentration at the monitoring station did not give a good description of exposure content near the detached houses in the area. Fairly high air pollution levels were measured along the route, but they were generally short-lived. However, especially in evenings with cold weather and low wind speed the pollution concentrations remained high all evening. In these situations, emissions from individual houses could have a significant impact on the concentration of air pollutants nearby. Of the air pollutants that were measured, black carbon was the best indicator of the smell of wood combustion.

Keywords: Small-scale wood combustion, exposure, regional variation, fine particles, black carbon, particle number concentration, lung deposited surface area

Sisällys

1 Johdanto	7
2 Aineisto ja menetelmät.....	8
2.1 Tutkimusasetelma.....	8
2.2 Henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa käytetyt laitteet ja suodatinnäytteet	9
2.3 Tutkimusalueella sijaitseva kiinteä mittausasema ja sääasema	10
2.4 Mittaustulosten käsittely	10
3 Tulokset ja pohdinta	11
3.1 Vertailumittaukset	11
3.2 PM _{2.5} ja BC koko talvikauden ajalta	12
3.3 Mittauspäivien tulokset	13
3.3.1 Sää.....	13
3.3.2 Päivittäinen vaihtelu	13
3.3.3 Kierroskeskiarvot	16
3.3.4 Vuorokaudenajan vaikutus	19
3.3.5 Viikonpäivän vaikutus.....	20
3.3.6 Havaitun puunpolton savun hajun yhteys pitoisuuksiin	21
3.3.7 Tuulen suunnan ja lämpötilan vaikutus	23
3.3.8 Ilmansaastepitoisuuksien alueellinen vaihtelu mittausreitillä	26
3.3.9 Pitoisuus puunpolttoympäristössä vs katupölymittaukset	31
4 Yhteenveto	32
Kirjallisuus	33
Liite 1. Laatikko ja janakaavion lukeminen.	34
Liite 2. Pitoisuusympyrän lukeminen.....	35

1 Johdanto

Puun pienpoltto on suurin pienhiukkasten (PM_{2,5}; hiukkasten halkaisija alle 2,5 mikrometriä) lähde Suomessa (Savolahti ym. 2016). Muita merkittäviä lähteitä ovat ajoneuvojen ja teollisuuslaitosten päästöt, joiden määriä on saatu vähennettyä lainsäädännöllisillä päästörajoituksilla. Puun pienpoltton päästöjä ei ole kuitenkaan tähän asti säädelty Suomessa. Vuosina 2020 ja 2022 voimaan tulleet ekosunnitteludirektiivit vaikuttavat arvioiden mukaan pienpoltton päästöjen määrään vain vähän seuraavan kymmenen vuoden sisällä, sillä rajoitukset koskevat vain uusia tehdasvalmisteisia polttolaitteita, laitekanta uusiutuu hitaasti, eivätkä rajoitukset koske saunankiukaita (Ympäristöministeriö 2019). Pienpoltton päästöt onkin nostettu yhdeksi keskeiseksi asiaksi myös kansallisessa ilmansuojeluohjelmassa, jonka tavoitteena on vähentää päästöjen määrää vuoteen 2030 mennessä.

Pienhiukkasilta ei ole tunnistettu kynnyspitoisuutta, jonka alittavilla pitoisuustasoilla terveyshaittoja ei esiinny. WHO julkaisi viime vuonna päivitettyt ilmansaasteiden ohjearvot ja päätyi pienhiukkasten osalta puolet aikaisempaa pienempään vuosiohjeeseen, kun näyttö terveysvaikutuksista alhaisilla tasoilla on vahvistunut (WHO 2021). Myös Suomessa esiintyvien maailmanlaajuisessa tarkastelussa verrattain matalien pitoisuustasojen on havaittu vaikuttavan haitallisesti terveyteen. Pienpoltton on arvioitu aiheuttavan Suomessa vuosittain noin 200 ennen aikaista kuolemantapausta (Soimakallio ym. 2017).

Mustaa hiiltä (BC) eli nokea ja useita orgaanisia yhdisteitä syntyy epätäydellisessä palamisprosessissa ajoneuvojen moottoreissa, voimalaitoksissa sekä kotitalouksien puunpoltossa. Maailman terveysjärjestö WHO:n systemaattisessa katsauksessa mustan hiilen on todettu olevan tärkeä terveyteen liittyvä hiukkasmaisten ilmansaasteiden komponentti (Janssen ym. 2012). Päätelmän mukaan musta hiili itsessään ei olisi kuitenkaan terveydelle haitallinen vaan pikemminkin sen pinnalle absorboituneet haitalliset orgaaniset ja epäorgaaniset ainesosat. Suomessa puun pienpoltto on suurin mustan hiilen päästöjen lähde (Ympäristöministeriö 2019), mutta mustaa hiiltä ei kuitenkaan velvoiteta mittaamaan viranomaismittauksilla.

Poltossa ilmaan vapautuu myös kaasumaisia yhdisteitä ja ultrapieniä hiukkasia (halkaisija alle 100 nm). Tieteellinen näyttö ultrapienien hiukkasten haitallisuudesta on vahvistunut, vaikkei pitoisuudelle ole vielä annettu ohjearvoa (WHO 2021).

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL) on tutkinut useina vuosina puun pienpoltton savuille altistumista kotien sisällä ja pihapiirissä. Jo lyhytaikaisen muutamia tunteja kestävä puun polttamisen on havaittu näkyvän asukkaiden altistumisessa vuorokausitasolla (Siponen ym. 2019). Alueilla, joilla on omia matalalla sijaitsevia päästölähteitä, kuten liikennettä tai puun polttoa, voi pitoisuustasojen vaihtelu olla alueen sisällä merkittäväkin, eikä keskusmittausasema tällöin välttämättä kuvaa hyvin todellista altistumista (Yli-Tuomi ym. 2015). Aikaisemmassa tutkimuksessa Kuopion Niiralassa hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat hie-man suurempia talojen pihoissa verrattuna asuinalueella olevan ilmanlaadun mittausaseman pitoisuuksiin, mikä indikoi lähipäästön merkitystä (Salonen ym. 2016). Jynkässä talvikaudella 2008–2009 toteutetun mittauskampanjan aikana, mustan hiilen (BC) pitoisuudet olivat tammi-helmikuussa usein koholla illalla 17–20 ja aamulla 7–9 välisenä aikana (Yli-Tuomi ym. 2015).

Tässä tutkimushankkeessa selvitettiin pienhiukkasten ja mustan hiilen alueellista pitoisuusvaihtelua puun pienpolttoa suosivalla pientalovaltaisella asuinalueella Kuopion Niiralassa.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusasetelma

Puun pienpolton savuille altistuminen ja hiukkaspitoisuuden alueellinen vaihtelu asuinalueella (PUUHA)-hankkeen mittaukset toteutettiin Kuopion Niiralan kaupungiosassa yhdellä noin 2,5 km pituisella ympyräreitillä, jonka suunnittelussa oli huomioitu myös asuinalueen korkeuserot. Ympyräreitin lähtöpiste oli Niiralan ilmanlaadun mittausaseman luona ja se seurasi reittiä Ruotsinkatu-Kehäkatu-Kaikukatu-Kipinäkatu-Ruotsinkatu-Ukkokodinkatu-Tupatie. Mittausreitti on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Mitattava reitti Kuopion Niiralassa. Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausaseman sijainti on merkitty punaisella pisteellä. Kartta sisältää Maanmittauslaitoksen Maastokartan 02/2022 ja Maastotietokannan 02/2022 aineistoa.

Mittaukset suoritettiin arkipäivisin sekä lauantaisin. Mittausajat olivat aamuisin klo 8–11 ja iltaisin klo 17–21. Viikoittaisia mittauspäiviä vaihdeltiin, tavoitteena oli suorittaa normaalin mittausviikon aikana yksi arki-aamun mittaus, yksi arki-illan mittaus sekä lauantaina joko aamu- tai iltamittaus. Mittauksia tehtiin arkipäivien lisäksi myös lauantaisin, koska Jynkässä 2008–2009 tehdyssä BIOHER-tutkimuksessa lauantai oli suosituin päivä puusaunan lämmittämiseksi. Mittauspäivät hankkeen aikana on esitetty taulukossa 1. Mittaukset aloitettiin 27.11.2020 ja lopetettiin 13.2.2021.

Taulukko 1. Mittauspäivät.

Päivämäärä	Viikonpäivä	Mittauksen tyyppi	Mittauskierrosten lkm
27.11.2020	Perjantai	Arkiaamu	4
30.11.2020	Maanantai	Arkiaamu	5
2.12.2020	Keskiviikko	Arki-ilta	4
7.12.2020	Maanantai	Arki-ilta	4
10.12.2020	Torstai	Arkiaamu	4
12.12.2020	Lauantai	Vkl-aamu	4
16.12.2020	Keskiviikko	Arki-ilta	4
18.12.2020	Perjantai	Arkiaamu	4
19.12.2020	Lauantai	Vkl-ilta	4
28.12.2020	Maanantai	Arkiaamu	4
5.1.2021	Tiistai	Arkiaamu	4
7.1.2021	Torstai	Arki-ilta	4
9.1.2021	Lauantai	Vkl-ilta	4
12.1.2021	Tiistai	Arki-ilta	4
13.1.2021	Keskiviikko	Arkiaamu	3
16.1.2021	Lauantai	Vkl-aamu	4
27.1.2021	Keskiviikko	Arki-ilta	3
28.1.2021	Torstai	Arkiaamu	3
30.1.2021	Lauantai	Vkl-aamu	3
4.2.2021	Torstai	Arkiaamu	4
5.2.2021	Perjantai	Arki-ilta	4
6.2.2021	Lauantai	Vkl-ilta	4
8.2.2021	Maanantai	Arki-ilta	4
10.2.2021	Keskiviikko	Arkiaamu	3
13.2.2021	Lauantai	Vkl-ilta	4

Tutkija työnsi mittalaitteet sisältävää mittausvaunua valittua reittiä keskimääräisellä kävelynopeudella 6 km/h. Mittauksen aikana tutkija teki havaintoja säätilasta sekä puunpolton savuista kenttäpäiväkirjaan. Yhden mittauskerran aikana 2,5 km ympyräreitti kierrettiin 3–5 kertaa. Kokonaisuudessaan hankkeen aikana mittauskierroksia kertyi 96 kpl, joista arkiamuina 38 kpl, arki-iltoina 31 kpl, viikonloppuamuina 11 kpl ja viikonloppuiltoina 16 kpl.

Samanaikaisesti ympyräreitillä tapahtuvan mittauksen kanssa suoritettiin vastaavat mittaukset Niiralan kiinteällä ilmanlaadun mittausasemalla. Asemalla laitteet oli sijoitettu katolla olevaan lämmitettävään laatikkoon.

2.2 Henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa käytetyt laitteet ja suodatinnäytteet

PM_{2.5}-pitoisuustasojen mittaamisessa käytettiin TSI DustTrak DRX-hiukkasmonitoreja varustettuina TSI 801565 Omni-directional sampling inletillä (TSI Inc., Shoreview, Minnesota, Yhdysvallat). Mustahiilipitoisuus määritettiin microAeth AE51-mikroetalometreillä (Aethlabs, San Francisco, Kalifornia, Yhdysvallat) ja hiukkasten lukumääräpitoisuus Oxilily Nanotracer XP-laitteilla (Oxilily B.V., Best, Alankomaat). Nanotracer havaitsee 10–300 nm kokoiset hiukkaset pitoisuuteen 10⁶ hiukkasta/cm³ asti. Kävelynopeutta ja sijaintia reitillä mitattiin Garmin GPSmap 64sx-paikantimella (Garmin Ltd., Schaffhausen, Sveitsi).

Mittauksissa käytettyjen jatkuvatoimisten laitteiden tallennusresoluutio oli DustTrak DRX:lle 30 sekuntia, AE51-mikroetalometrille 1 minuutti ja Oxilily Nanotracerille sekä Garmin GPSmap 64sx:lle 10 sekuntia. Henkilökohtaisen altistumisen arvioinnissa käytetyt mittalaitteet sijoitettiin työnnettävään mittausvaunuun, jossa näytteenottokorkeus oli noin 1 m maanpinnan tason yläpuolella (kuva 2). Lisäksi vastaavat mittalaitteet sijoitettiin mittausaseman katolle lämmitettävään mittalaitelaatikkoon (Dusttrak environmental enclosure

8537, TSI Inc., Shoreview, Minnesota, Yhdysvallat), jonka mittauskorkeus oli n. 3 m. Mittalaitelaatikossa käytettiin vastaavia inlettejä kuin mittausvaunussa.



Kuva 2. Mittausvaunu.

2.3 Tutkimusalueella sijaitseva kiinteä mittausasema ja sääasema

Kuopion kaupungilla on useita ilmanlaadun mittausasemia, joista neljä sijaitsee keskustassa tai sen lähialueilla. Tässä hankkeessa hyödynnettiin tutkimusalueelle sijoittuvaa Niiralan mittausasemaa, jossa mittalaitteina ovat pienhiukkasille Thermo Scientific TEOM 1405 ja hengitettävälle hiukkasille Thermo Scientific TEOM 1400a. Tutkimuksen ajaksi mittausasemalle sijoitettiin lisäksi Thermo Scientific 5012 MAAP-mustahiilimonitori (ThermoFisher Scientific, Waltham, Massachusetts, Yhdysvallat).

Niiralan asema sijaitsee tiiviisti rakennetulla ruotsalais- ja rintamamiestalovaltaisella pientaloalueella. Niirala on noin 3800 asukkaan kaupunginosa, jonka pohjoisosassa on kerrostaloja ja eteläosassa omakotitaloja. Osa alueen pientaloista on kaukolämpöverkossa, mutta alueella on myös sähkö- ja öljylämmitteisiä taloja sekä runsaasti puun pienpoltoa. Kuopion Energia Oy:n Haapaniemen voimalaitos sijaitsee kaakossa noin 1,5 kilometrin päässä ja Niiralan lämpölaitos lännessä vajaan kilometrin päässä mittausasemasta.

Tieto mittausten aikaisesta säätilasta saatiin Ilmatieteen laitoksen Kuopion Savilahden sääasemalta, jonka etäisyys Niiralan mittausasemalta on noin 1,1 km. Säädatana käytettiin 10 min aikaresoluutiolla Ilmatieteen laitoksen verkkosivuilta ladattavissa olevaa dataa.

2.4 Mittaustulosten käsittely

Mittaustulosten laadunvarmennusta ja vertailtavuutta varten suoritettiin vertailumittaukset Niiralan mittausasemalla 18.-22.12.2020 ja 19.-22.1.2021. Tutkimuksessa käytettävät pienmittalaitteet asennettiin mittaamaan ulkoilman ilmansaastepitoisuuksia rinnakkain ja eri pienmittalaitteyksilöillä mitattujen pitoisuuksien välille muodostettiin regressioyhtälöt. Yhtälöiden avulla muunnettiin mittausvaunuissa olleiden laitteiden tulokset vastaamaan mittausaseman laitteita. Osalle mittalaitteista ei vertailumittauksissa saatu tarvittavia regressioyhtälöitä sääoloista, laitteiden rikkoutumisista tai toimintahäiriöistä johtuen. Näille laitteille käytettiin aikaisemmissa duplikaattimittauskampanjoissa saatuja regressioyhtälöitä.

3 Tulokset ja pohdinta

3.1 Vertailumittaukset

Regressioyhtälöt, joita käytettiin muutettaessa mittausvaunussa olleen laitteen tulos vastaamaan aseman laitetta, on esitetty taulukossa 2. Kaikki yhtälöt laskettiin 10 minuutin keskiarvopitoisuuksista. Mittausasemalla olevat laitteet pysyivät samana kaikissa mittauksissa, mutta laiterikkojen takia vaunumittauksissa oli käytössä kaksi DustTrak ja Nanotracer laitetta.

Taulukko 2. Regressioyhtälöt mittausvaunun ja aseman laitteiden välille.

Ilmansaaste (mittauspäivät)	Yhtälö	Korrelaatio (r)
PM _{2.5} (27.11.–7.12.; 27.1.–13.2.)	$0,3249 \times \text{vaunu} + 1,6625$	0,93
PM _{2.5} (10.12.–13.1.)	$0,8269 \times \text{vaunu} + 1,2164$	0,92
BC (27.11.–13.2.)	$0,9929 \times \text{vaunu} - 0,0013$	0,97
PNC (27.11.–16.1)	$0,6926 \times \text{vaunu} + 345,7$	0,82
PNC (27.1.–13.2.)	$0,7568 \times \text{vaunu} + 370,5$	0,87
LDSA (27.11.–16.1)	$0,7796 \times \text{vaunu} + 0,9438$	0,89
LDSA (27.1.–13.2.)	$0,8396 \times \text{vaunu} + 0,4851$	0,94

Mittauskierrosten aikana asemalla rinnakkain toimineiden pienmittalaitteiden sekä TEOM:n ja MAAP:n väliset regressioyhtälöt määritettiin kierroskeskiarvoista ja on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Regressioyhtälöt mittausaseman laitteiden välille.

Ilmansaaste (mittauspäivät)	Yhtälö	Korrelaatio (r)
PM _{2.5}	$\text{TEOM} = 0,5873 \times \text{DustTrak} + 4,1399$	0,42
BC	$\text{MAAP} = 0,769 \times \text{mikroetalometri} + 0,4333$	0,70

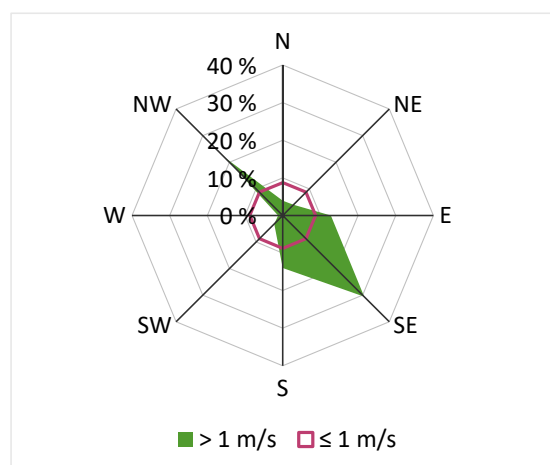
3.2 PM_{2.5} ja BC koko talvikauden ajalta

Niiralassa mitattiin pienhiukkasten ja mustan hiilen pitoisuuksia jatkuvatoimisesti koko mittauskampanjan ajan. Tunti- ja vuorokausikeskiarvojen jakaumat on esitetty taulukossa 4. Vertailun vuoksi Helsingissä vilkasliikenteisen Mäkelänkadun mittausasemalla 27.11.2020–13.2.2021 tuntikeskiarvoista laskettu keskiarvo oli pienhiukkasilta 7 µg/m³ ja mustalle hiilelle 0,7 µg/m³ (data <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>; 4.3.2022).

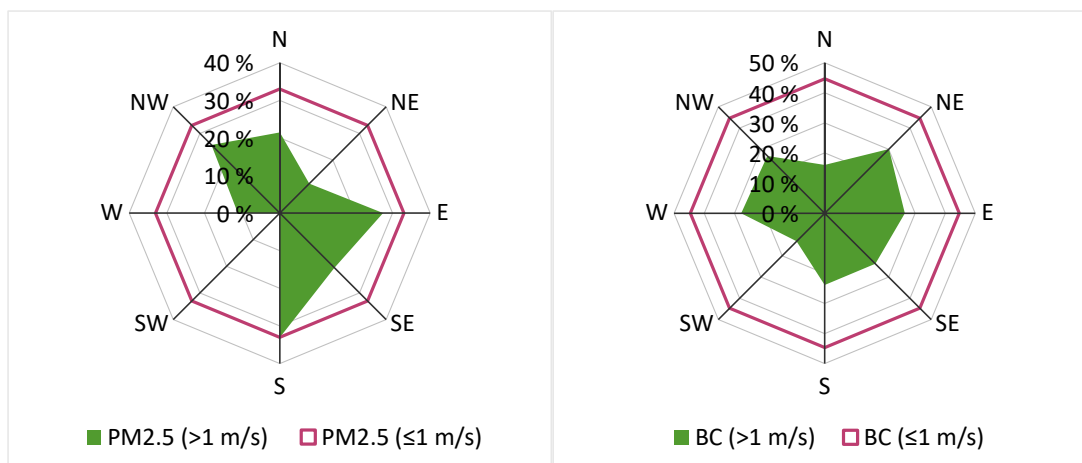
Mittauskampanjan aikana yleisimmät tuulen suunnat olivat kaakko (31 %) ja luode (22 %) (kuva 3). Tyynä (tuulen nopeus 1 m/s tai alle) oli 9 % ajasta. Tuulensuunnittain laskettiin todennäköisyys sille, että ilmansaastepitoisuus on suurempi kuin Niiralan mittausaseman tuntikeskiarvoista määritetty 75. persentiili ajalla 27.11.2020–13.2.2021. Etelätuulen vallitessa pienhiukkaspitoisuus ylitti 7 µg/m³ 33 % ajasta, samoin tyynellä ilmalla (kuva 4). Tyynellä ilmalla saasteet laimenevat hitaasti ja heikoilla tuulilla havaittiinkin suuria pienhiukkaspitoisuuksia 33 % ajasta ja suuria mustahiilipitoisuuksia 45 % ajasta.

Taulukko 4. Pienhiukkasten (TEOM, Kuopion kaupunki) ja mustan hiilen (MAAP) pitoisuuksien jakauma Niiralassa 27.11.2020 – 13.2.2021.

Ilmansaaste	aikajakso	keskiarvo	min	P5	P25	P50	P75	P95	max
PM _{2.5} [µg/m ³]	tunti	6	0	1	3	5	7	12	52
PM _{2.5} [µg/m ³]	vuorokausi	6	0	2	4	5	7	9	13
BC [µg/m ³]	tunti	0.7	0	0.1	0.2	0.4	0.8	1.9	9.1
BC [µg/m ³]	vuorokausi	0.6	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	1.2	1.6



Kuva 3. Tuulen suuntien yleisyys Ilmatieteen laitoksen Savilahden sääasemalla 27.11.2020–13.2.2021. Yleisyys on laskettu 10 s välein otetuista havainnoista. Tässä kuvassa tuuli on luokiteltu tyneksi eikä sille ole annettu suuntasektoria, jos nopeus on ≤ 1 m/s. Havainnot <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (21.2.2022).



Kuva 4. Tuulensuunnittain todennäköisyys sille, että ilmansaastepitoisuus on suurempi kuin Niiralan mittausaseman tuntikeskiarvoista määritetty 75. persenttiili ajalla 27.11.2020–13.2.2021. Tuuli on luokiteltu tyyneksi eikä sille ole annettu suuntasektoria, jos nopeus on ≤ 1 m/s. PM_{2.5} on mitattu Kuopion kaupungin TEOM:illa ja BC-pitoisuus MAAP:illa. Säähavainnot <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (21.2.2022).

3.3 Mittauspäivien tulokset

3.3.1 Sää

Mittausten aikana sää oli talvinen (taulukko 5). Vuoden 2020 lopulla lämpötila oli lähellä nollaa, mutta tammi- ja helmikuussa 2021 mittauksia tehtiin enimmäkseen pakkaspäivinä. Lämpötila oli kuitenkin vain yhtenä mittauspäivänä alle -20 °C. Talvi oli luminen, mutta lumisadetta oli vain kuuden mittauspäivän aikana. Lämpötilainversioon viittaavia olosuhteita (selkeä taivas, kylmä ilma ja heikko tuuli) havaittiin 16.1. ja 13.2.2021.

3.3.2 Päivittäinen vaihtelu

Mittausjakson keskimääräinen PM_{2.5}-pitoisuus vaihteli $4\text{--}27$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vaunumittauksissa ja $1\text{--}14$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mittausasemalla (kuva 5). Vaunumittauksissa suurimmat pitoisuudet mitattiin keskiviikkoiltana 2.12. ja lauantai-iltana 13.2., mutta tammikuun lopusta mittauksen loppuun asti (13.2.) pitoisuus oli vähintään 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. PM_{2.5}-tuntikeskiarvolle ei ole olemassa ohje- tai raja-arvoja.

Mustan hiilen pitoisuus vaihteli $0,4\text{--}4,6$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vaunumittauksissa ja $0\text{--}4,5$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mittausasemalla (kuva 6). Vaunumittauksissa suurin pitoisuus mitattiin 9.1., jolloin Haapaniemen voimaloiden savuviuhkat kulkivat Niiralan yli, ja Kehäkadun ja Kaikukadun risteyksen tienoilla oli "sumua", josta satoi maahan jäähilettä. Toinen yli 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oleva pitoisuus mitattiin lauantai-iltana 13.2, jolloin mustan hiilen pitoisuus oli korkea myös mittausasemalla. Asemalla oli tyypillisesti pienempi pitoisuus kuin reitin varrella, mutta maanantai-iltana 8.2. asemalla mitattu pitoisuus ($4,5$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oli lähes kolminkertainen reittikeskiarvoon verrattuna. Mustan hiilen pitoisuuksille ei ole vielä pystytty antamaan terveysperusteisia suositusarvoja riittämättömän tieteellisen näytön takia, joten WHO:n työryhmä suosittelee lisäämään mustahiilimittauksia muiden ilmanlaatumittausten rinnalle (WHO, 2021).

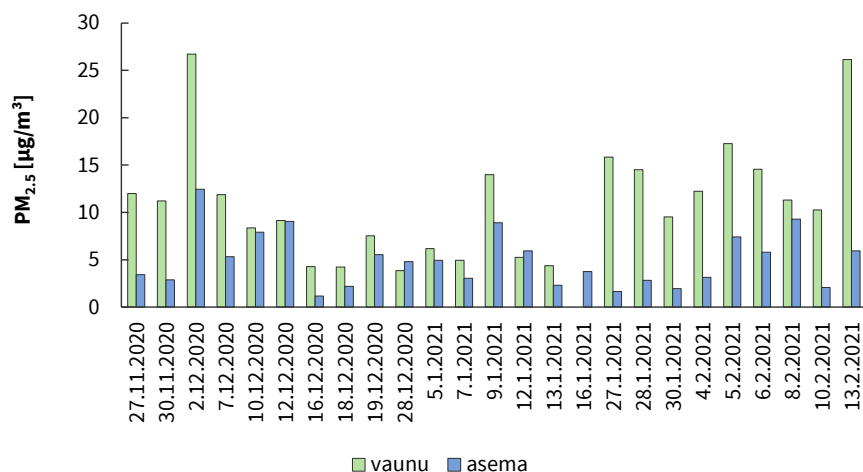
Hiukkasten lukumääräpitoisuus vaihteli vaunumittauksissa $1100\text{--}26700$ hiukkasta/ cm^3 ja mittausasemalla $1100\text{--}9800$ hiukkasta/ cm^3 (kuva 7). Vaunumittauksissa suurimmat pitoisuudet mitattiin keskiviikkoiltana 2.12. ja lauantai-iltana 13.2. samoin kuin suurimmat PM_{2.5}-pitoisuudet. WHO:n ilmanlaadun ohjearvoja käsittelevässä raportissa (WHO, 2021) suositellaan mittaamaan hiukkasten lukumääräpitoisuutta laitteella, jonka alaleikkausraja on 10 nm tai pienempi. Näin mitattua lukumääräpitoisuutta voidaan pitää korkeana, jos sen tuntikeskiarvo ylittää 20000 hiukkasta/ cm^3 .

Hiukkasten keuhkodepositoivan pinta-alan (LDSA) pitoisuus korreloi hyvin hiukkasten lukumääräpitoisuuden kanssa ($r=0.95$) ja pitoisuus vaihtelee vaunumittauksissa $3\text{--}33 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ja mittausasemalla $2\text{--}24 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (kuva 8). LDSA-pitoisuuksille ei ole vielä olemassa raja- tai ohjearvoja.

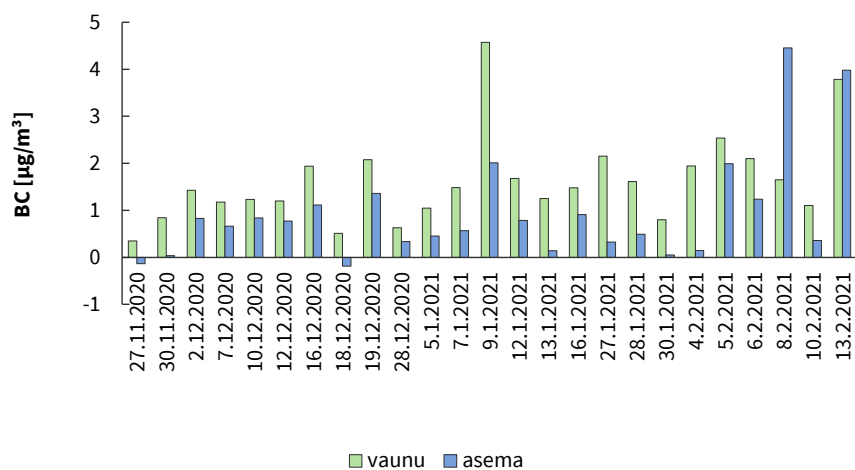
Asemalla mitatut pitoisuudet aliarvioivat etenkin pienhiukkasten ja mustan hiilen pitoisuuksia reitin varrella. Hiukkasten lukumäärän ja keuhkodepositoivan pinta-alan osalta asemalla mitattiin kahdeksana päivänä vähintään yhtä suuri pitoisuus kuin reitin varrelta.

Taulukko 5. Sääolosuhteet mittausten aikana. Tiedot Ilmatieteen laitoksen Savilahden mittausasemalta.

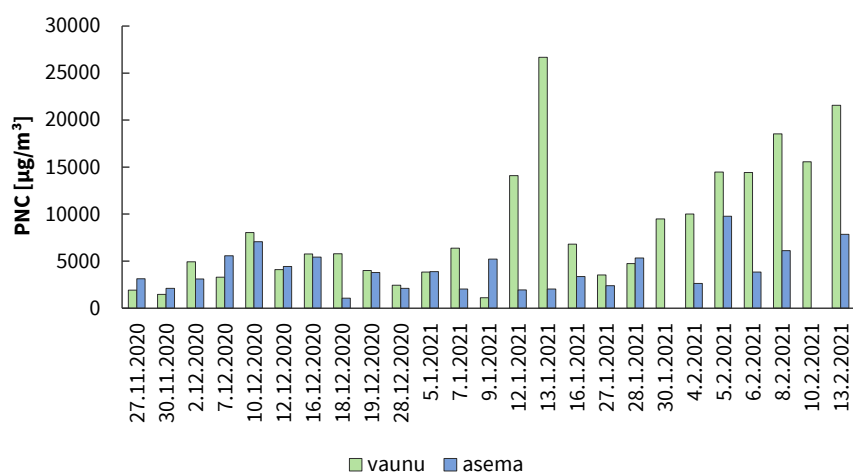
Päivä	LT [°C]	RH [%]	Tuulen		Sateen intensiteetti [mm/h]	Ilmanpaine [hPa]	Näkyvyys [m]	Lumen syvyys [cm]
			nopeus [m/s]	Pilvisyys [%]				
27.11.2020	0,6	92	3,9	96	0,0	1013	29201	0,0
30.11.2020	-2,0	91	2,8	96	0,1	1022	7261	2,0
2.12.2020	1,7	92	3,1	89	0,0	1025	14728	3,8
7.12.2020	-0,6	81	3,9	0	0,0	1025	50000	0,0
10.12.2020	-3,4	87	2,3	93	0,0	1027	22148	0,0
12.12.2020	-1,9	93	1,6	97	0,0	1020	13687	1,8
16.12.2020	0,3	99		98	0,1	1004	17686	8,0
18.12.2020	-4,0	91		97	0,1	1021	5369	7,3
19.12.2020	-0,2	97	3,1	97	0,1	1015	3181	9,0
28.12.2020	-2,0	82	4,6	93	0,0	1014	46380	8,8
5.1.2021	-12,1	89	1,6	39	0,0	1034	25269	19,0
7.1.2021	-7,2	91	2,9	96	0,0	1023	48886	17,0
9.1.2021	-18,5	84	1,2	60	0,0	1023	13465	17,8
12.1.2021	-14,5	82	5,1	94	0,0	1015	4260	20,9
13.1.2021	-18,7	75	4,3	0	0,0	1023	50000	21,0
16.1.2021	-21,2	82	1,0	0	0,0	1021	44823	21,0
27.1.2021	0,0	99	1,4	97	0,3	998	2552	34,3
28.1.2021	-1,9	96	1,0	96	0,2	1002	3086	35,6
30.1.2021	-7,4	90	2,7	96	0,0	988	8441	45,7
4.2.2021	-14,8	86	3,8	50	0,0	1010	5093	46,0
5.2.2021	-17,6	86	3,1	34	0,0	1023	42448	46,0
6.2.2021	-11,9	89	3,8	92	0,0	1023	14871	44,9
8.2.2021	-14,0	90	2,3	0	0,0	1022	50000	44,4
10.2.2021	-15,7	84	1,1	91	0,0	1021	3054	51,0
13.2.2021	-13,9	89	1,1	0	0,0	1023	49909	47,9



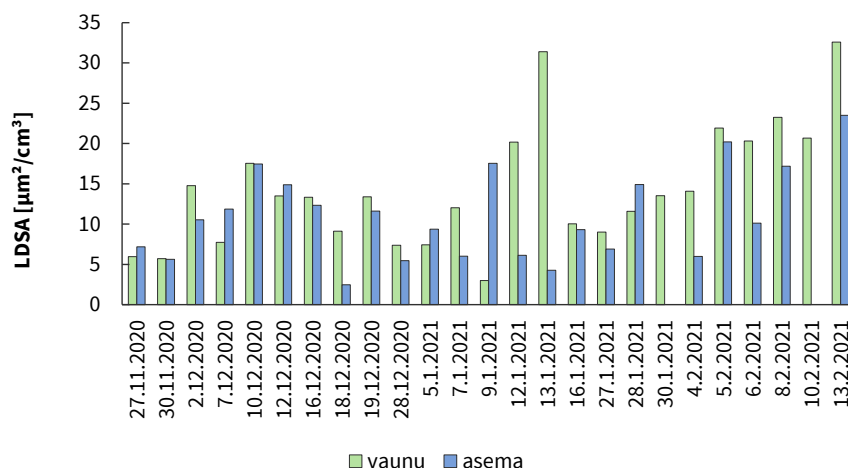
Kuva 5. PM_{2.5}-pitoisuuden keskiarvo mittausten aikana. Kukin mittaus kesti 1–2 tuntia.



Kuva 6. Mustan hiilen pitoisuuden keskiarvo mittausten aikana. Kukin mittaus kesti 1–2 tuntia.



Kuva 7. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvo mittausten aikana. Kukin mittaus kesti 1–2 tuntia.



Kuva 8. Keuhkocodepoituvan pinta-alan pitoisuuden keskiarvo mittausten aikana. Kukin mitaus kesti 1–2 tuntia.

3.3.3 Kierroskeskiarvot

Ilmansaasteiden kierroskeskiarvoissa ja samaan aikaan asemalla mitattujen pitoisuuksien keskiarvoissa oli suurta vaihtelua (taulukko 6). Yksi kierros kesti noin 25 minuuttia. Näin lyhyen ajan keskiarvoille ei ole olemassa ohje- tai raja-arvoja.

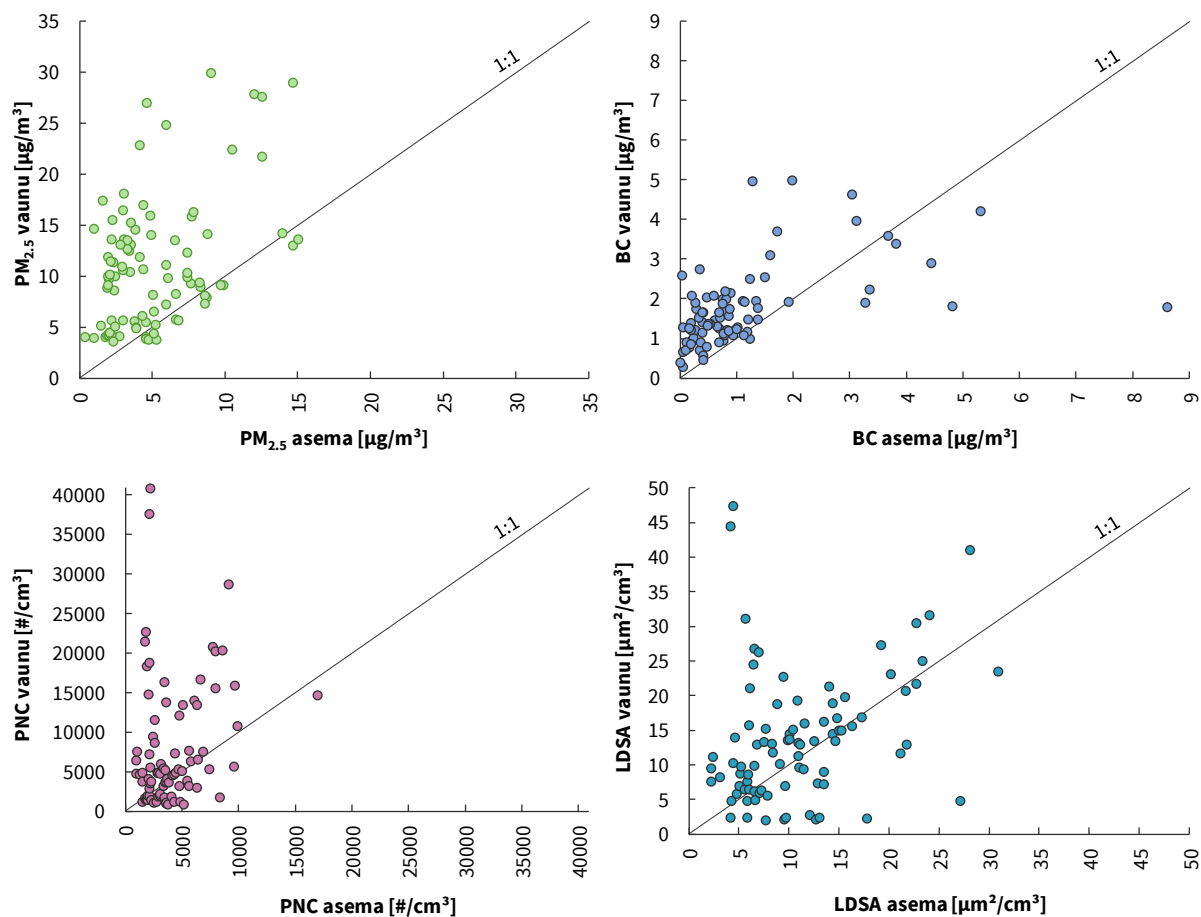
Asemalla mitattu pitoisuus oli yleensä pienempi kuin reittimittauksissa ja pitoisuuksien välinen korrelaatio oli huono kaikille mitatuille ilmansaasteille (kuva 9). Vaikka asema sijaitsi reitin varrella, siellä mitattu pitoisuus ei siis kuvannut hyvin altistuspitoisuutta alueen pientalojen lähellä.

Vaunumittauksissa samalla Nanotracer laitteella mitattujen PNC- ja LDSA-pitoisuuksien välinen korrelaatio oli erittäin hyvä ($r=0.96$), mutta muiden ilmansaasteiden väliset korrelaatiot olivat huonoja (kuva 10). Syitä tähän voivat olla esimerkiksi eri lähteiden suhteelliset osuudet, erilaiset päästökertoimet puunpolton eri vaiheissa sekä erot siinä miten poltto-olosuhteet ja meteorologia vaikuttavat päästöihin ja epäpuhtauksien muutuntaan.

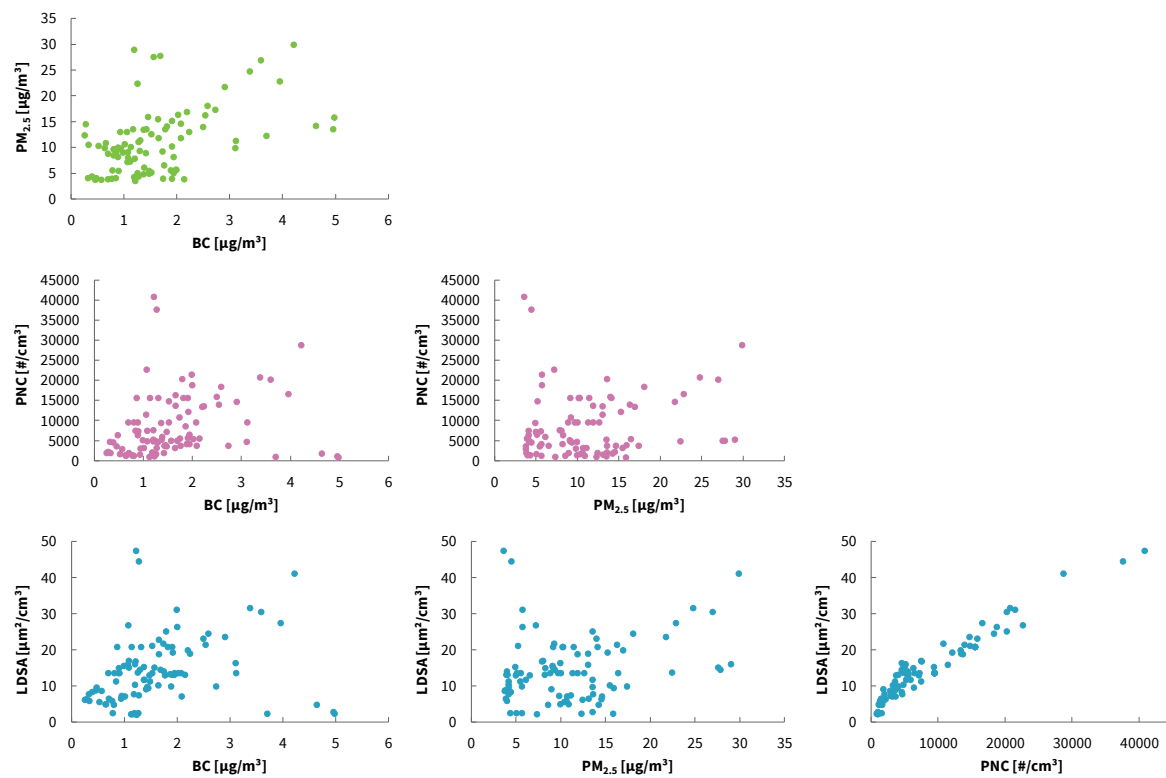
Kaikkiin mitattuihin pitoisuuksiin vaikuttaa lähilähteiden lisäksi kauempaa kulkeutuneet ilmansaasteet. Kuopion seudulla ei ole ilmanlaadun tausta-asemaa, mutta vertaamalla useamman Kuopion ja Siilinjärven mittausaseman tuloksia, voidaan merkittävät $PM_{2.5}$ -taustatason nousut erottaa muusta vaihtelusta (Erkki Pärjälä, 17.2.2022). Kaukokulkeutuneen pienhiukkaspitoisuuden maksimia arvioitiin karkeasti Maaherrankadun (Kuopio), Savilahden (Kuopio) ja Sulkavanniityn (Siilinjärvi) mittausasemien tuntikohtaisten $PM_{2.5}$ -tulosten minimin avulla (kuva 11). Samassa kuvassa on esitetty vaunumittausten kierroskohtaiset keskiarvot. Keski- viikkoiltana 2.12. ja lauantai-iltana 13.2. mitatut suurimmat $PM_{2.5}$ -pitoisuudet eivät johdu kaukokulkeumasta.

Taulukko 6. Mittauskierrosten keskiarvoista määritetyt tilastolliset tunnusluvut. Kutakin kierrosta vastaa samalta ajanjaksolta asemalla mitattu pitoisuus.

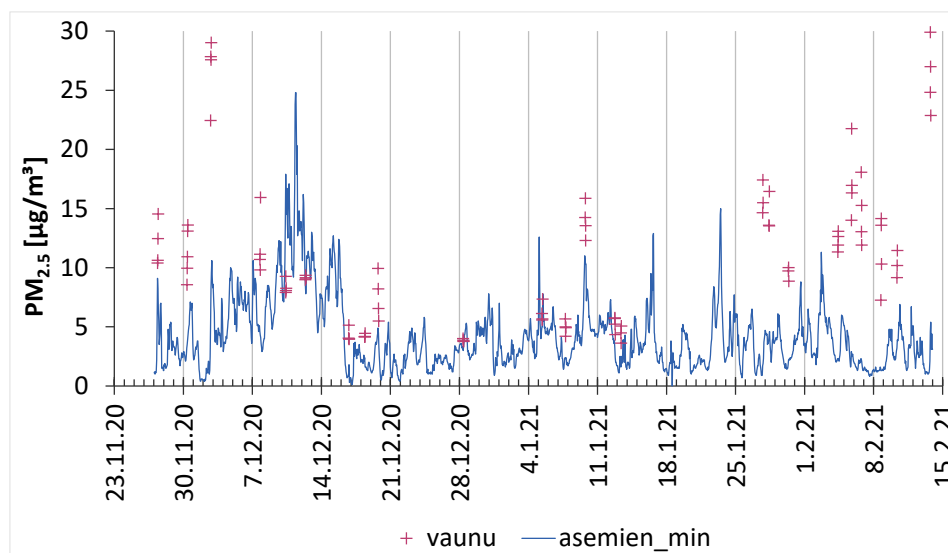
Mittaus	N	keskiarvo	min	P5	P25	P50	P75	P95	max
$PM_{2.5_vaunu}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	92	11	4	4	6	10	14	26	30
$PM_{2.5_asema}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	92	5	0	2	2	4	7	13	15
BC_vaunu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	84	1,7	0,3	0,7	1,1	1,5	2,0	3,9	5,0
BC_asema [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	84	1,1	0,0	0,1	0,4	0,8	1,2	3,8	8,6
PNC_vaunu [$\#/ \text{cm}^3$]	86	7800	800	1100	2300	4900	11300	21300	40800
PNC_asema [$\#/ \text{cm}^3$]	86	4100	900	1500	2200	3500	5100	9000	17000
$LDSA_vaunu$ [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	86	14	2	2	7	13	18	31	47
$LDSA_asema$ [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	86	11	2	4	6	10	14	23	31



Kuva 9. Keskiarvopitoisuus mittausreitillä versus samaan aikaan asemalla mitattu pitoisuus kierroksittain.



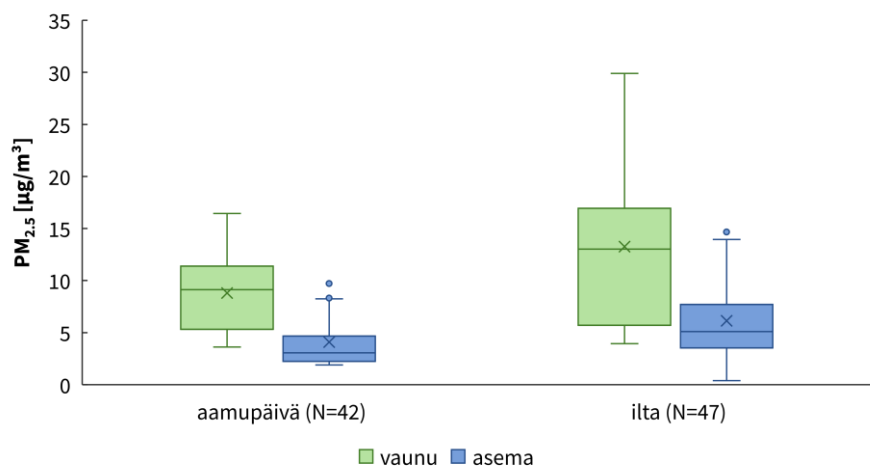
Kuva 10. Korrelaatiodiagrammit pienhiukkasten, mustan hiilen, hiukkaslukumäärän ja keuhko-depositoivan pinta-alan pitoisuuksille. Pitoisuudet ovat vaunumittausten kierroskeskiarvoja.



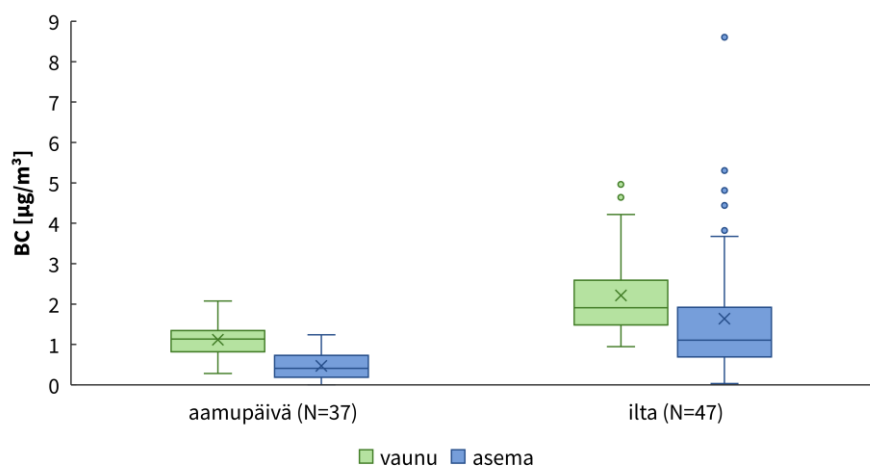
Kuva 11. Pienhiukkaspitoisuuden kierroskohtainen keskiarvo sekä mahdollista kaukokulkeuma kuvaava Maaherrankadun (Kuopio), Savilahden (Kuopio) ja Sulkavanniityn (Siilinjärvi) mittausasemien tuntikohtaisten tulosten minimi. Mittausasemien data: Kuopion kaupungin alueelliset ympäristönsuojelupalvelut.

3.3.4 Vuorokaudenajan vaikutus

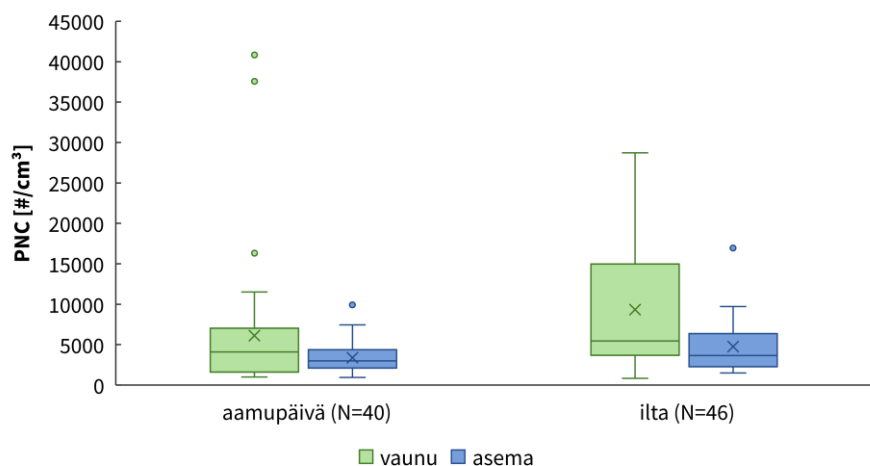
Kaikilla mitatuilla ilmansaasteilla kierrosten keskimääräiset pitoisuudet olivat selkeästi suuremmat ilta- mittauksissa kuin aamupäivän mittauksissa (kuvat 12–15; tulkintaohje liitteessä 1). Iltaisin myös vaihteluväli oli suurempi. Ero aseman ja mittausreitin välillä oli selkeämpi PM_{2,5}- ja BC-pitoisuuksissa kuin PNC- ja LDSA-pitoisuuksissa.



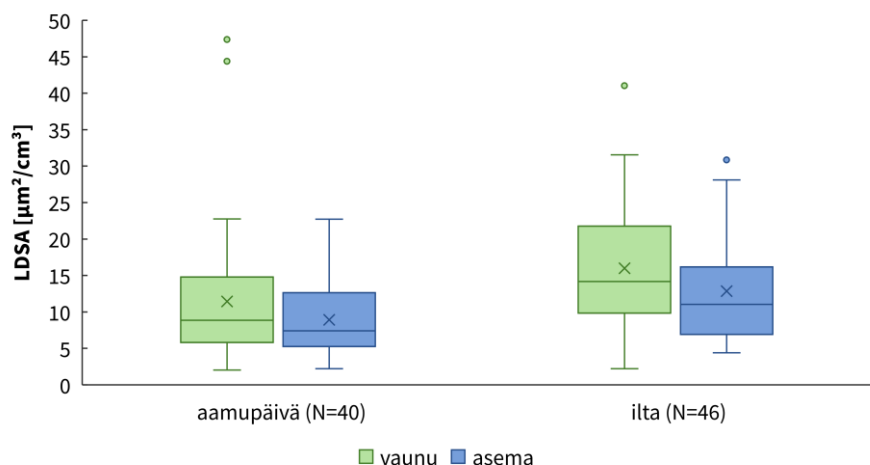
Kuva 12. Pienhiukkaspitoisuuden kierroskohtaisten keskiarvojen jakauma vuorokaudenajan mukaan.



Kuva 13. Mustan hiilen pitoisuuden kierroskohtaisten keskiarvojen jakauma vuorokaudenajan mukaan.



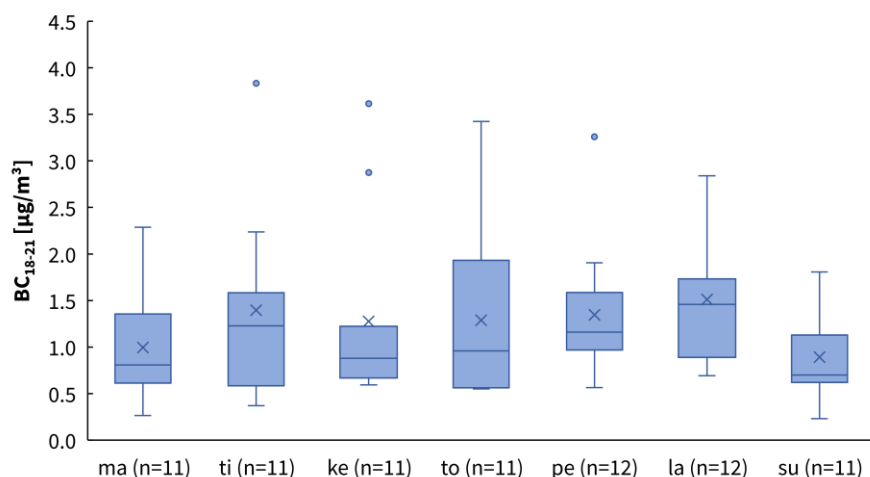
Kuva 14. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden kierroskohtaisten keskiarvojen jakauma vuorokaudenajan mukaan.



Kuva 15. Keuhkodeposituvan pinta-alan pitoisuuden kierroskohtaisten keskiarvojen jakauma vuorokaudenajan mukaan.

3.3.5 Viikonpäivän vaikutus

Kuopion Jynkässä 2008–2009 tehdyssä ”Biomassa ja öljy lämmitysjärjestelmissä: kasviuonekaasujen ja hiukkasten päästöt ja terveysriskit” (BIOHER) -tutkimuksessa havaittiin puun pienpoltosta peräisin olevien PM_{2.5}-pitoisuuksien olevan usein muita viikonpäiviä suurempia keskiviikkoisin ja lauantaan (Yli-Tuomi ym. 2015). Niiralan reittimittauksissa suoraa vertailua eri viikonpäivien välillä ei voitu tehdä, koska iltamittausten osuus kaikista mittauksista vaihteli viikonpäivittäin (taulukko 1), kaikkien mitattujen ilmansaasteiden pitoisuudet olivat suurempia illalla kuin aamupäivällä ja koska mittauksia oli vain 1–4 illalta päivästä riippuen. Kuvassa 16 on esitetty Niiralan mittausasemalta 27.11.2020–13.2.2021 mitattu mustan hiilen iltajan (klo 18–21) keskiarvojen jakauma. Iltapitoisuuksien keskiarvo ja mediaani ovat hieman suuremmat lauantaina kuin muina viikonpäivinä. Pitoisuuksien vaihtelu on kuitenkin suurta.

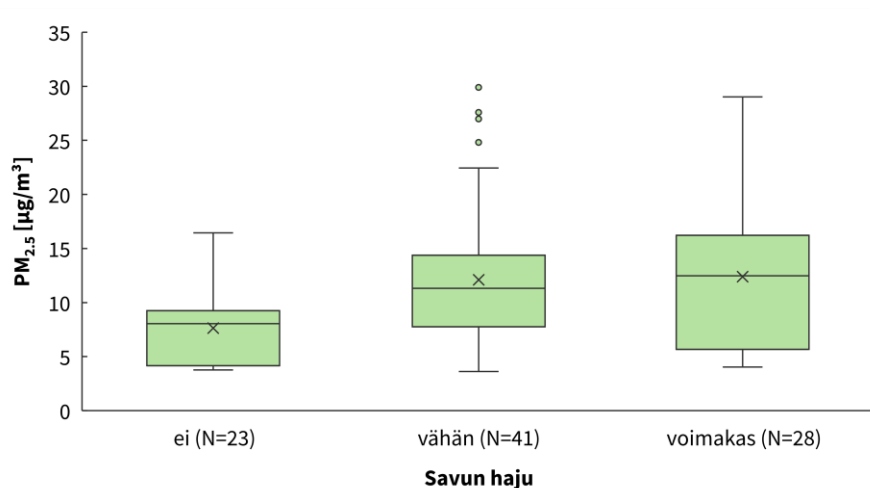


Kuva 16. Mustahiilipitoisuuden ilta-ajan (18–21) keskiarvojen jakauma eri viikonpäivinä Niiralan mittausasemalla 27.11.2020–13.2.2021.

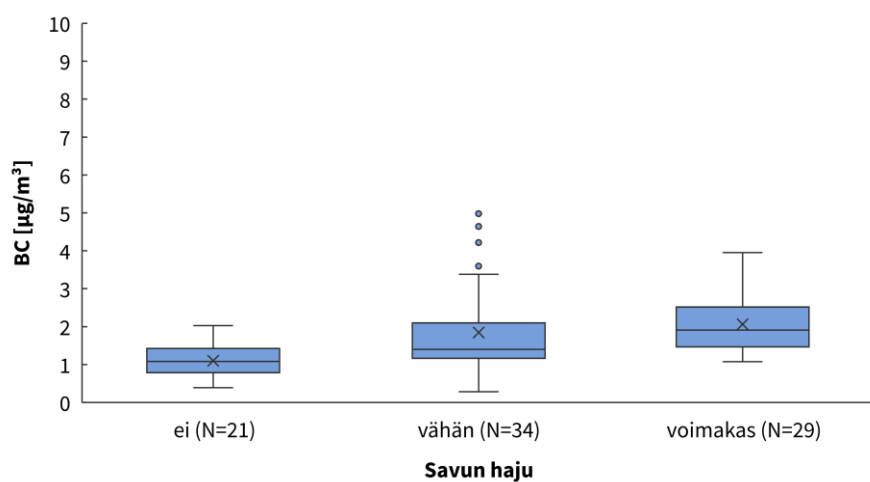
3.3.6 Havaitun puunpolton savun hajun yhteys pitoisuuksiin

Mittauksen aikana tutkija arvioi aistinvaraisesti puunpolton savujen hajun voimakkuuden kolmiportaisesti (ei savua, vähän savua, voimakas savu) jokaiselle kierrokselle. Kuvissa 17–20 (tulkintaohje liitteessä 1) on esitetty kierroskeskiarvojen jakauma luokiteltuna savun hajun voimakkuuden mukaan. Mustalla hiilellä sekä kierroskeskiarvojen mediaani että keskiarvo suurenevat hajun voimistuessa. Pienhiukkaspitoisuuden mediaani suurenee hajun voimistuessa, mutta keskiarvossa ei ole juurikaan eroa vähäisen ja voimakkaan hajun välillä. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden ja keuhkodesoitoivan pinta-alan pitoisuudet ovat suurimmat, kun kierroksella on ollut voimakas savun haju. Tilanteissa, joissa savun hajua on ollut vähän tai ei ollenkaan, muut tekijät kuin savu vaikuttavat PNC- ja LDSA-pitoisuuksiin enemmän. Näin ollen mitatuista epäpuhtauskomponenteista musta hiili näyttäisi toimivan parhaiten puunpolton savun indikaattorina. Savun hajun ja mustan hiilen pitoisuuden yhteyttä ei ole aiemmin katsottu lyhyissä reaaliaikaisissa mittauksissa ja tätä asiaa olisi syytä tutkia lisää. BIOHER-tutkimuksessa mustan hiilen pitoisuus määritettiin vuorokausitasolla, jolloin lyhytaikaiset savuallistumiset ja hajuhavainnot eivät näy tuloksessa. Joissain aiemmissa tutkimuksissa on mitattu mustan hiilen pitoisuuksia kotien sisä- ja ulkoilmasta minuutin tarkkuudella, mutta käytännössä ajan-käyttöpäiväkirjoihin päätyminen olisi vaatinut savun hajun kulkeutumisen sisälle.

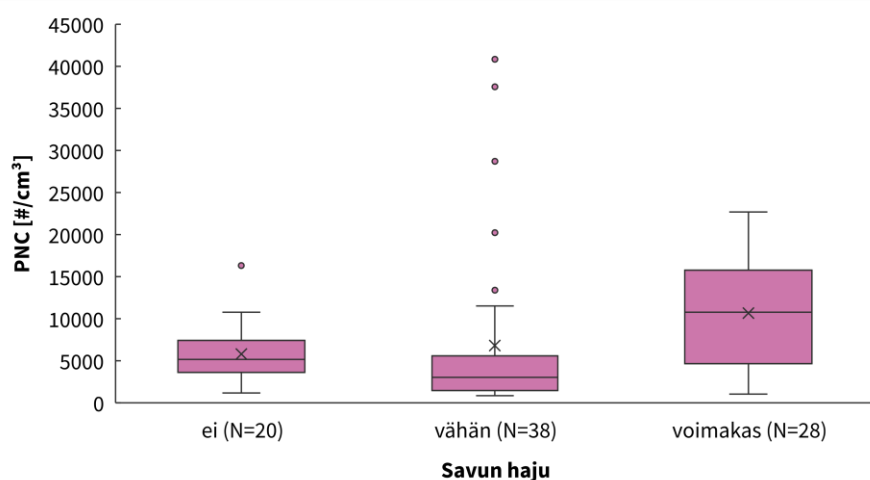
Alueellisessa taustapitoisuudessa on suurta vuorokausivaihtelua ainakin pienhiukkasissa, mutta mahdollisesti myös muilla mitatuilla ilmansaasteilla. Taustapitoisuuden vaihtelua ei pystytty ottamaan huomioon tässä tutkimuksessa, sillä lähialueilla ei ole taustapitoisuuksia mittaavaa asemaa.



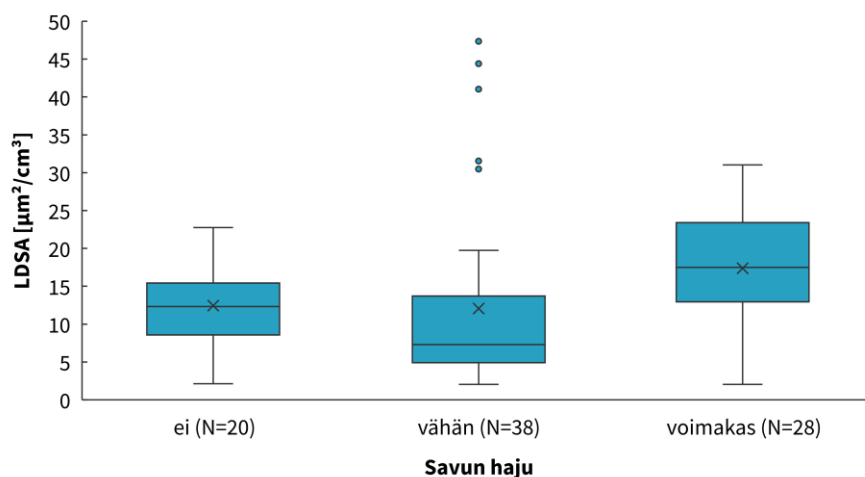
Kuva 17. Kierroskohtaisten pienhiukkaspitoisuuksien jakauma savuhavainnon voimakkuuden mukaan.



Kuva 18. Kierroskohtaisten mustahiilipitoisuuksien jakauma savuhavainnon voimakkuuden mukaan.



Kuva 19. Kierroskohtaisten hiukkasten lukumääräpitoisuuksien jakauma savuhavainnon voimakkuuden mukaan.

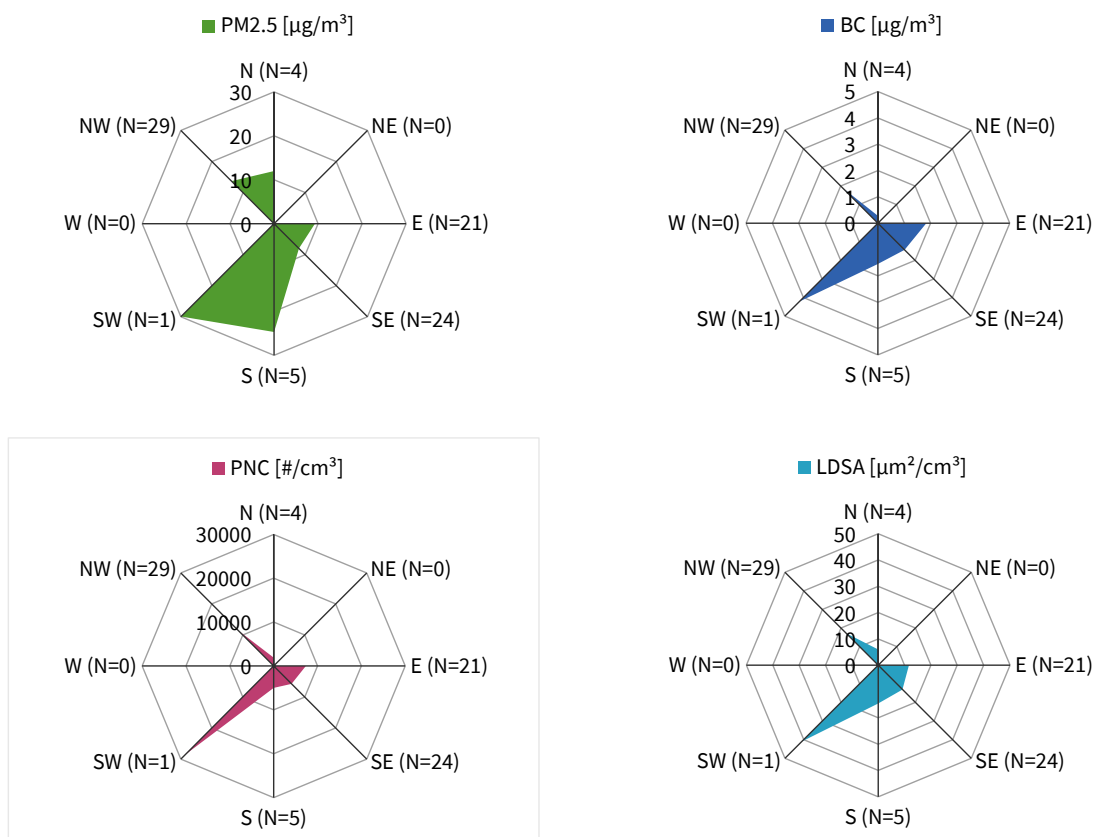


Kuva 20. Kierroskohtaisten hiukkasten keuhkodepositoivan pinta-alan pitoisuuksien jakauma savuhavainnon voimakkuuden mukaan.

3.3.7 Tuulen suunnan ja lämpötilan vaikutus

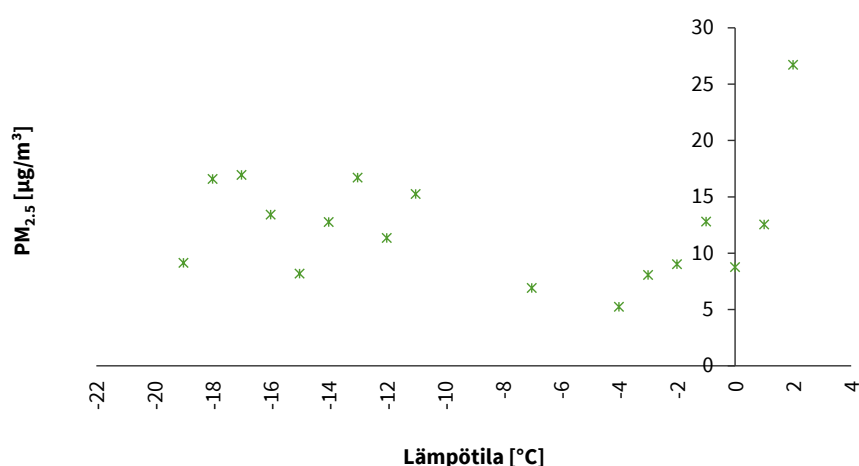
Kaikkien mitattujen epäpuhtauskomponenttien suurimmat pitoisuudet mitattiin lauantai-iltana 13.2. kierroksella, jonka aikana tuuli lounaasta moottoritien Tasavallankadun liittymän suunnasta (kuva 21). Liittymästä on matkaa noin 500 metriä mittausreitintä lähimpään kohtaan. Reitintä eteläpuolelle jäävä Huuhanmäki estää osittain pakokaasujen laimenemistä ja ohjaa ilmvirran kohti mittausreittiä. Toisaalta kuvan 4 saasteisuusruusun mukaan $PM_{2.5}$ - ja BC-pitoisuudet olivat Niiralan mittausasemalla harvoin koholla lounaistuulella. Kaukokulkeumakaan ei selitä Niiralassa 13.2. mitattuja suuria pitoisuuksia, sillä $PM_{2.5}$ -pitoisuudet eivät olleet koholla Maaherrankadun (Kuopio), Savilahden (Kuopio) ja Sulkavanniityn (Siilinjärvi) mittausasemilla. Illan sääolosuhteet eli alhainen tuulen nopeus (keskimäärin 1,1 m/s) yhdessä pakkasen ($-13,9\text{ °C}$) ja pilvetömän taivaan kanssa ovat voineet aiheuttaa inversion, jolloin epäpuhtauksien laimeneminen on vähäistä. Siten paikalliset puun polton päästöt ovat todennäköisin syy suurille ilmansaastepitoisuuksille.

Lähes yhtä suuria $PM_{2.5}$ -pitoisuuksia mitattiin keskiviikkoiltana 2.12. etelätuulella. Niiralan eteläpuolella kulkee vilkasliikenteinen Tasavallankatu, joten pakokaasupäästöt voivat vaikuttaa pitoisuuteen. Tutkija havaitsi voimakasta puunpolton savun hajua kahden kierroksen aikana, joten liikenteen lisäksi myös puun poltto vaikutti pienhiukkaspitoisuuteen. BC-, PNC- ja LDSA-pitoisuudet eivät kuitenkaan olleet keskimääräistä suurempia 2.12.

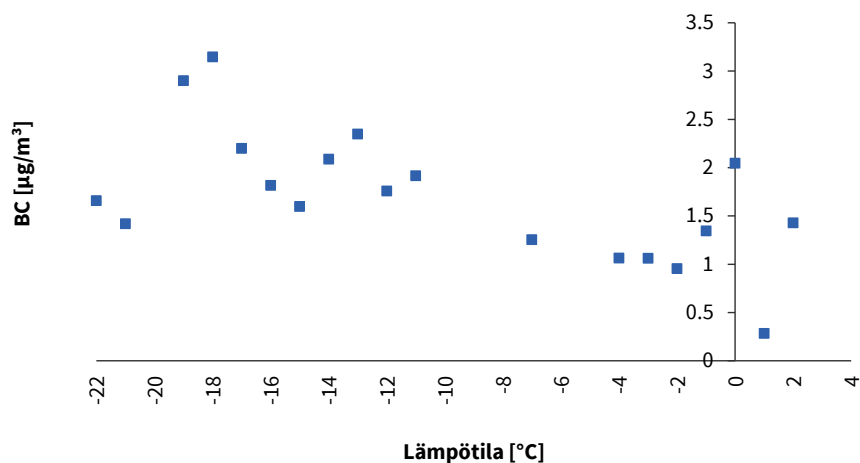


Kuva 21. Reittikeskiarvot eri tuulen suunnilla.

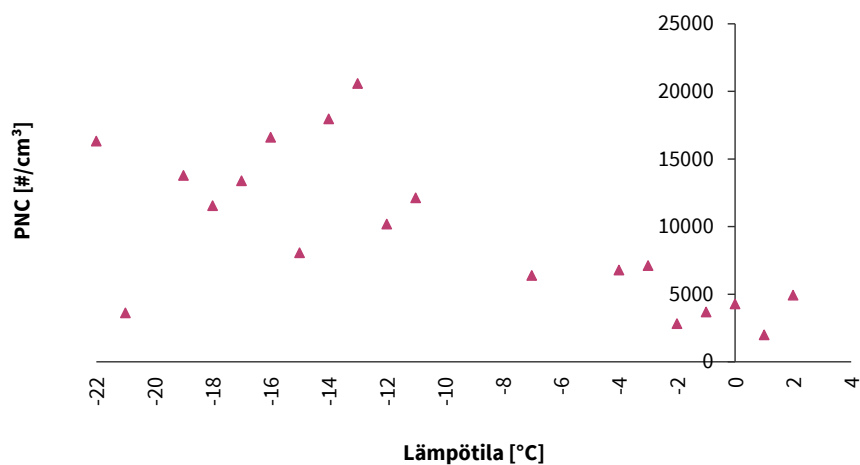
Lämpötilan ja epäpuhtauspitoisuuden välinen korrelaatio oli paras ($r=-0.67$) hiukkasten lukumääräpitoisuudelle, mutta myös mustalla hiilellä ja keuhkodespositiivalla pinta-alalla on havaittavissa, muutamaa poikkeavaa pistettä lukuun ottamatta, pitoisuuden suurenevan ilman kylmetessä (kuvat 22–25). Lämpötila vaikuttaa pitoisuuksiin lämmitystarpeen kautta, mutta kylmä ilma myös lisää hiukkasten nukleaatiota eli kooltaan 1–20 nm hiukkasten muodostumista savukaasussa.



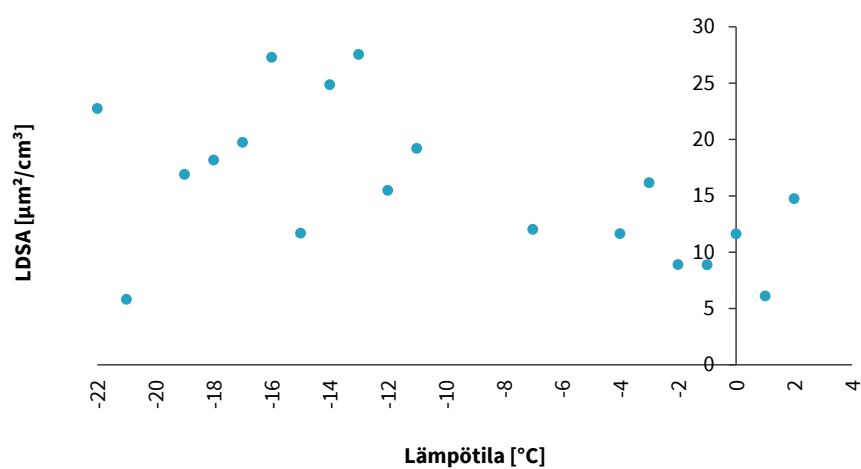
Kuva 22. Pienhiukkaspitoisuuden keskiarvo eri lämpötiloissa (yhden asteen luokissa).



Kuva 23. Mustahiilipitoisuuden keskiarvo eri lämpötiloissa (yhden asteen luokissa).



Kuva 24. Hiukkasten lukumääräpitoisuuden keskiarvo eri lämpötiloissa (yhden asteen luokissa).



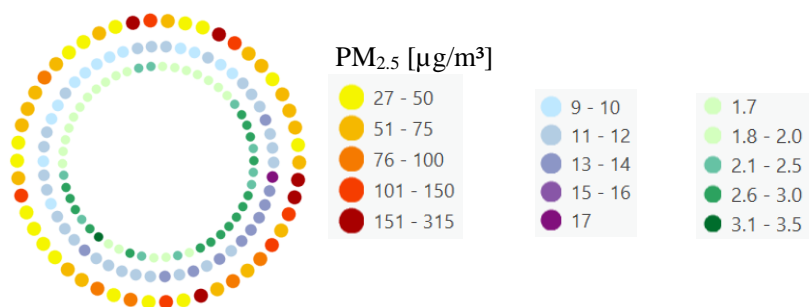
Kuva 25. Hiukkasten keuhkodesoituvan pinta-alapitoisuuden keskiarvo eri lämpötiloissa (yhden asteen luokissa).

3.3.8 Ilmansaastepitoisuuksien alueellinen vaihtelu mittausreitillä

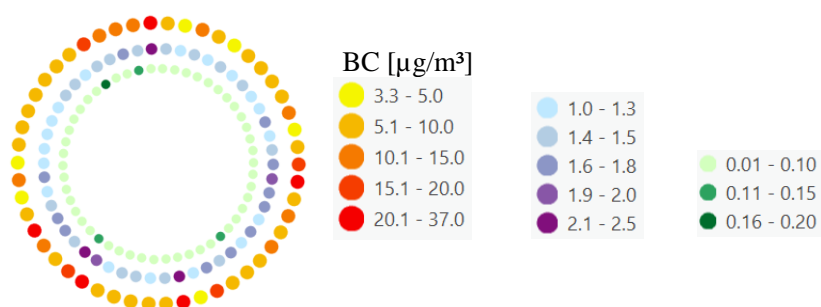
Alueellisen vaihtelun tutkimista varten mittausreitille asetettiin ArcGIS Pro -karttaohjelmassa havaintopiste 50 metrin välein. GPS:n avulla mittalaitteiden tulokset yhdistettiin aina lähimpään havaintopisteeseen, ja tuloksista laskettiin jokaiselle pisteelle kierroksittain keskiarvo. Jotta yksittäisiä asuintaloja ei voisi yhdistää mitattuihin pitoisuuksiin, tulokset esitetään ympyrässä, jonka lähtöpistettä ja kiertosuuntaa ei julkaista. Kuvissa 26–29 on esitetty pisteittäin kaikkien kierrosten tuloksista laskettu minimi (sisäkehä), keskiarvo ja maksimi (ulkokehä). Vierekkäisten pisteiden pitoisuuksissa on suuria eroja kaikilla tutkituilla epäpuhtauskomponenteilla eli ilmansaasteet olivat epätasaisesti jakautuneet. Suurimmillaan ero kahden rinnakkaisen pisteen keskiarvopitoisuuksien välillä oli pienhiukkasilla $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mustalla hiilellä $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hiukkasten lukumäärässä $2200 \text{ hiukkasta}/\text{cm}^3$ ja keuhkodespositiivalla pinta-alalla $3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Pisteiden keskiarvot vaihtelivat seuraavasti: $\text{PM}_{2.5}$ 9–17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, BC 1,0–2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PNC 6700–12000 hiukkasta/ cm^3 ja LDSA 11–19 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Kuhunkin havaintopisteeseen yhdistettiin myös maaston korkeus (Maanmittauslaitoksen Korkeusmalli 2 m), mutta korkeus ei selittänyt eroja keskimääräisissä pitoisuuksissa.

Kuvissa 30 ja 31 (tulkintaohje liitteessä 2) on esitetty pienhiukkasten ja mustan hiilen pitoisuudet havaintopisteissä jokaisen kierroksen aikana. Päivän ensimmäinen kierros on sisimpänä. Osa mittauspäivistä on ollut sellaisia, että $\text{PM}_{2.5}$ - ja BC-pitoisuudet olivat pieniä koko alueella kaikkien kierrosten aikana (perjantai-aamu 18.12. ja maanantai-aamu 28.12.) tai joissain yksittäisissä pisteissä tai reittiosuuksilla oli lyhytaikaisesti kohonneita pitoisuuksia. Toisena ääripäänä erottuvat mittaukset, joiden aikana pitoisuudet olivat suuria kaikissa tai lähes kaikissa havaintopisteissä koko mittauksen ajan ($\text{PM}_{2.5}$ maanantai-aamu 30.11. ja keskiviikkoilta 2.12.; BC lauantai-ilta 9.1. ja perjantai-ilta 5.2.). Kolmas tulostyyppi kuvaa tilannetta, jossa vaihtelu alueen sisällä on suurta. Joillain reittiosuuksilla pitoisuus on koholla kaikkien kierrosten aikana eli yli tunnin, kun taas toisilla osuuksilla pitoisuus on alhainen koko mittauksen ajan. Näissä tilanteissa yksittäisten talojen päästöllä voi olla suuri merkitys lähialueen ilmansaastepitoisuuksiin. Toisaalta kuvista ei erotu reittiosuutta, jolla olisi aina suuri pitoisuus.

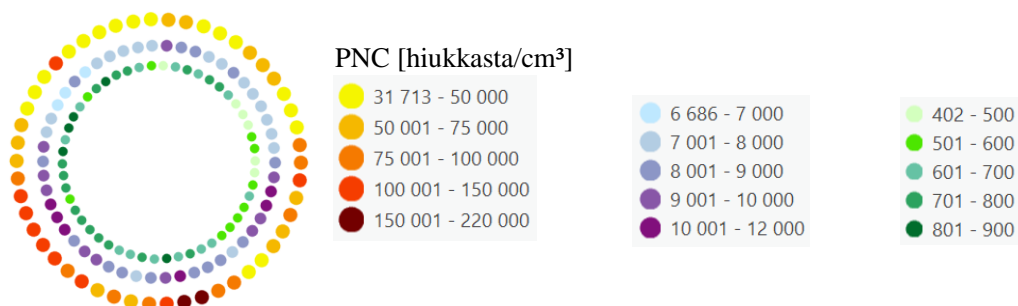
Hiukkasten lukumääräpitoisuuden vaihtelussa (kuva 32) esiintyy edellä mainittujen tyyppien lisäksi tilanteita, joissa pitoisuus muuttuu koko reitillä nopeasti. Esimerkiksi tiistai-aamuna 5.1.2021 PNC-pitoisuus on kahden ensimmäisen kierroksen aikana keskimäärin 6600 ja kahden seuraavan kierroksen aikana 1100 hiukkasta/ cm^3 . Säätilassa ei tapahtunut muutosta kierrosten välissä. Näissä tilanteissa päästö on todennäköisesti ollut lyhytaikainen ja hiukkasten koko on kasvanut nopeasti päästön loputtua. LDSA-pitoisuuksille ei esitetä vastaavaa havaintopisteittäistä kuvaajaa, koska sen pitoisuusmuutoksissa oli sama trendi kuin PNC-pitoisuudella.



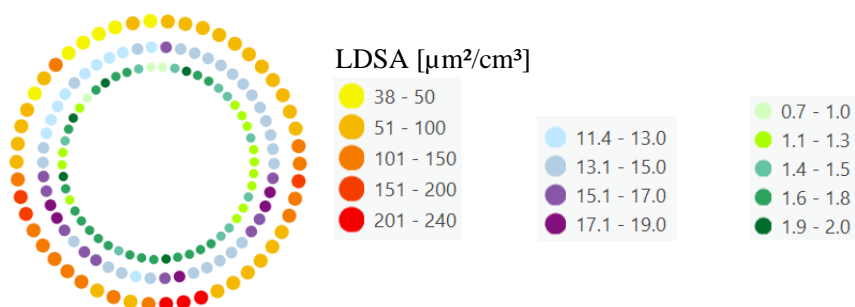
Kuva 26. PM_{2.5}-pitoisuuden maksimi (ulkokehä), keskiarvo ja minimi (sisäkehä) pisteittäin.



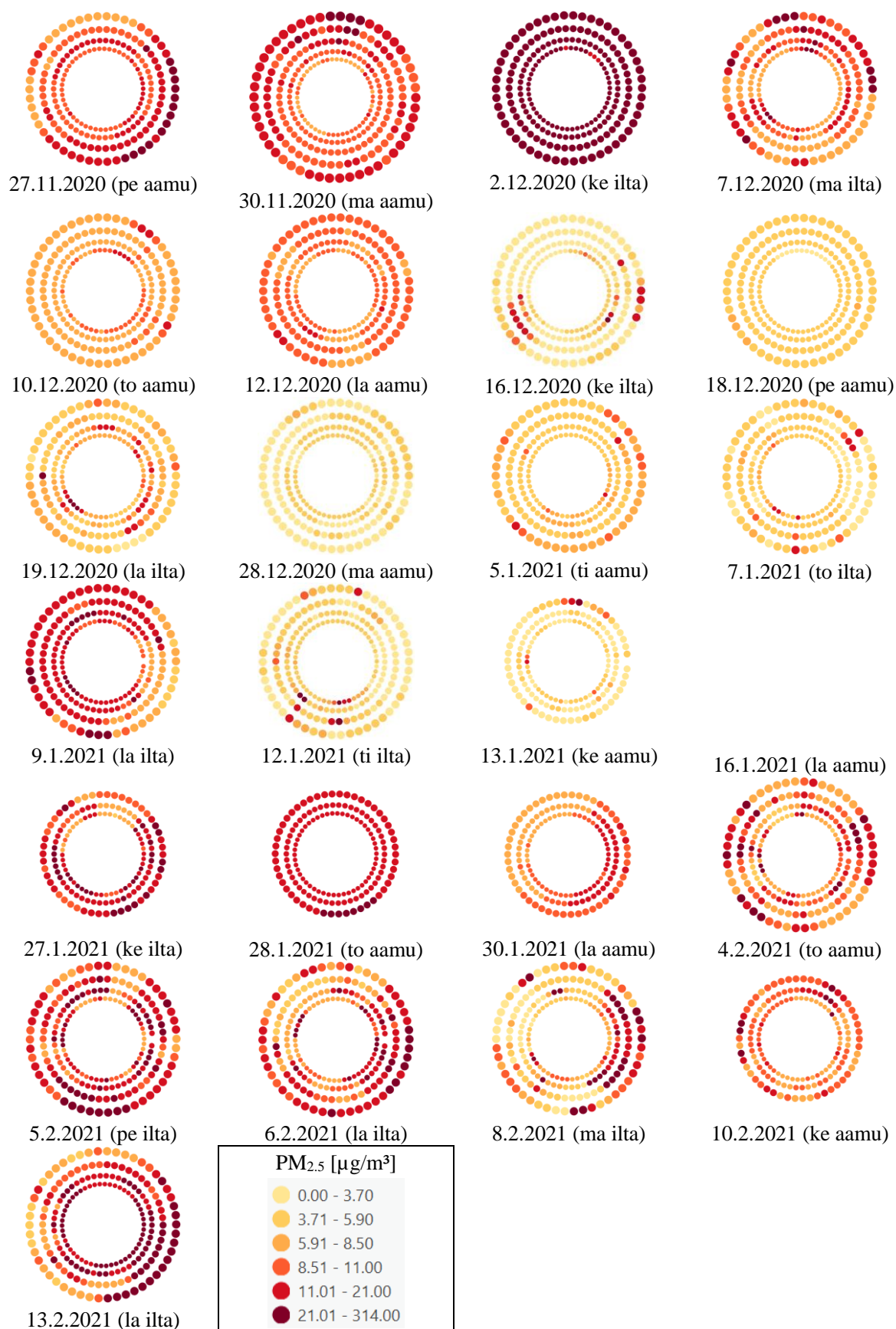
Kuva 27. BC-pitoisuuden maksimi (ulkokehä), keskiarvo ja minimi (sisäkehä) pisteittäin.



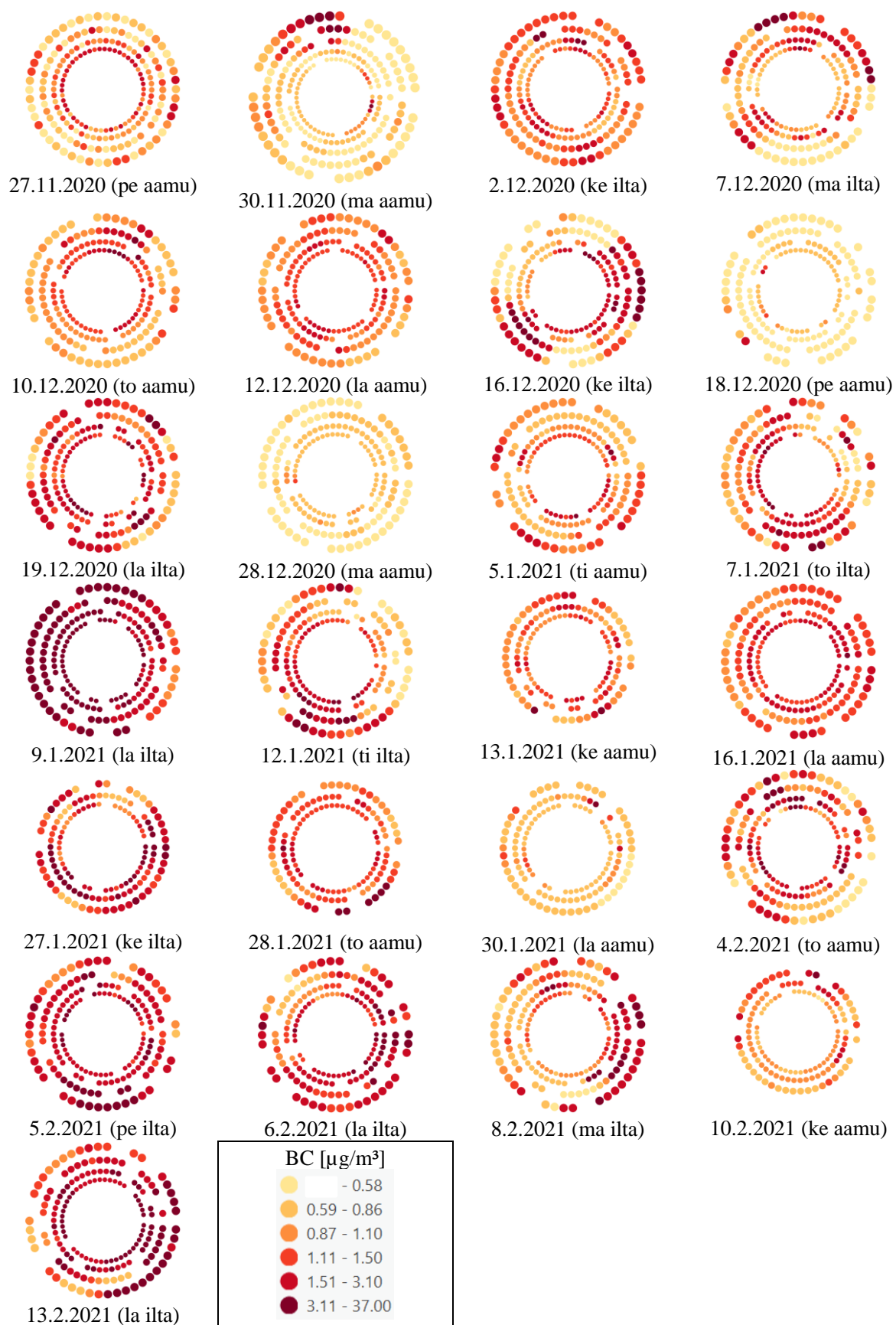
Kuva 28. PNC-pitoisuuden maksimi (ulkokehä), keskiarvo ja minimi (sisäkehä) pisteittäin.



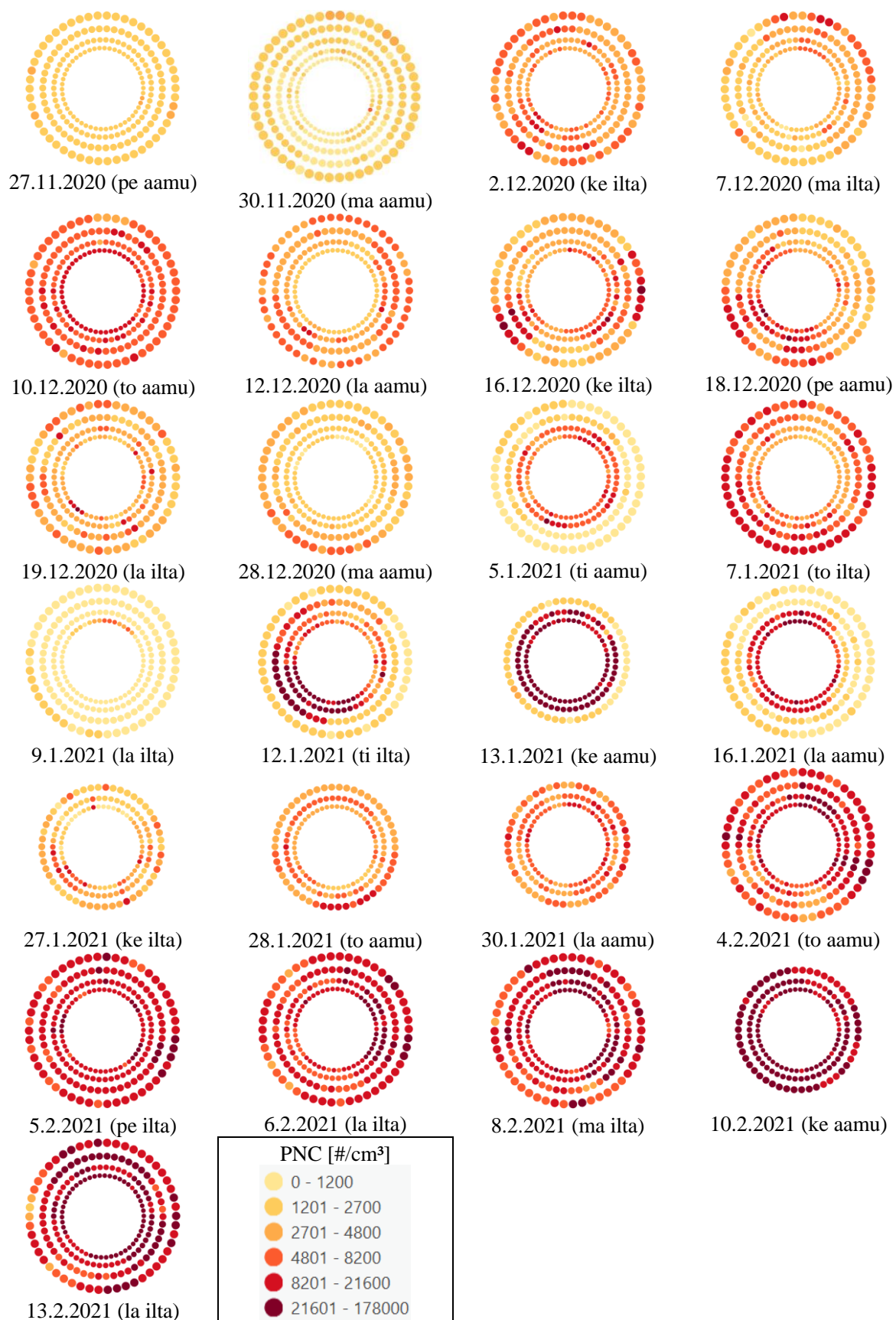
Kuva 29. LDSA-pitoisuuden maksimi (ulkokehä), keskiarvo ja minimi (sisäkehä) pisteittäin.



Kuva 30. PM_{2.5}-pitoisuus kierroksittain. Päivän ensimmäinen kierros on sisimpänä. Pisteet sijaitsevat 50 m välein. Tulkintaohje on liitteessä 2.



Kuva 31. BC-pitoisuus kierroksittain. Päivän ensimmäinen kierros on sisimpänä. Pisteet sijaitsevat 50 m välein. Tulkintaohje on liitteessä 2.



Kuva 32. Hiukkasten lukumääräpitoisuus kierroksittain. Päivän ensimmäinen kierros on sisimpänä. Pisteet sijaitsevat 50 m välein. Tulkintaohje on liitteessä 2.

3.3.9 Pitoisuus puunpolttoympäristössä vs katupölymittaukset

Kuopiossa tutkittiin kävelijän altistumista ilmansaasteille vastaavilla mittalaitteilla 28.3.–14.4.2019 (Siponen ym. 2021). Tuolloin pienhiukkaspitoisuuden keskiarvo oli $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mustan hiilen $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja hiukkasten lukumääräpitoisuuden 7100 \#/cm^3 . Niiralassa puunpolttoympäristössä 27.11.2020–13.2.2021 keskimääräiset pitoisuudet olivat $\text{PM}_{2.5}$ $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, BC $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja PNC 7800 \#/cm^3 . Talviaikana asuinalueella kävelijä altistui siis hieman suuremmille BC- ja PNC-pitoisuuksille kuin autotien vieressä kävelijä kevätaikaan.

4 Yhteenveto

Tässä tutkimushankkeessa selvitettiin pienhiukkasten, mustan hiilen, hiukkasten lukumäärän ja keuhko-depositoivan pinta-alan alueellista pitoisuusvaihtelua puun pienpoltoa suosivalla pientalovaltaisella asuin-alueella Kuopion Niiralassa. Mittaukset toteutettiin yhdellä noin 2,5 km pituisella ympyräreitillä ja saman-aikaisesti reitin varrella sijaitsevalla mittausasemalla. Ilmansaastepitoisuuksia mitattiin arkipäivisin ja lauantaissäin sekä aamuisin että iltaisin. Mittaukset aloitettiin 27.11.2020 ja lopetettiin 13.2.2021. Hankkeen aikana mittauskierroksia kertyi 96 kpl.

Mittauskierroksen keskiarvopitoisuudet vaihtelivat seuraavasti: pienhiukkaset 4–30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, musta hiili 0,3–5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, hiukkasten lukumääräpitoisuus 800–40800 hiukkasta/ cm^3 ja hiukkasten keuhkodepositoiva pinta-ala 2–31 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Asemalla mitattu pitoisuus oli yleensä pienempi kuin reittimittauksissa, eikä asemalla mitattu pitoisuusvaihtelu kuvannut hyvin altistumisepitoisuutta alueen pientalojen lähellä.

Kaikilla mitatuilla ilmansaasteilla kierrosten keskimääräiset pitoisuudet olivat selkeästi suuremmat iltamittauksissa kuin aamupäivän mittauksissa. Mittausasemalla iltan ajan mustahiilipitoisuudet olivat hieman suurempia lauantaissäin kuin muina viikonpäivinä.

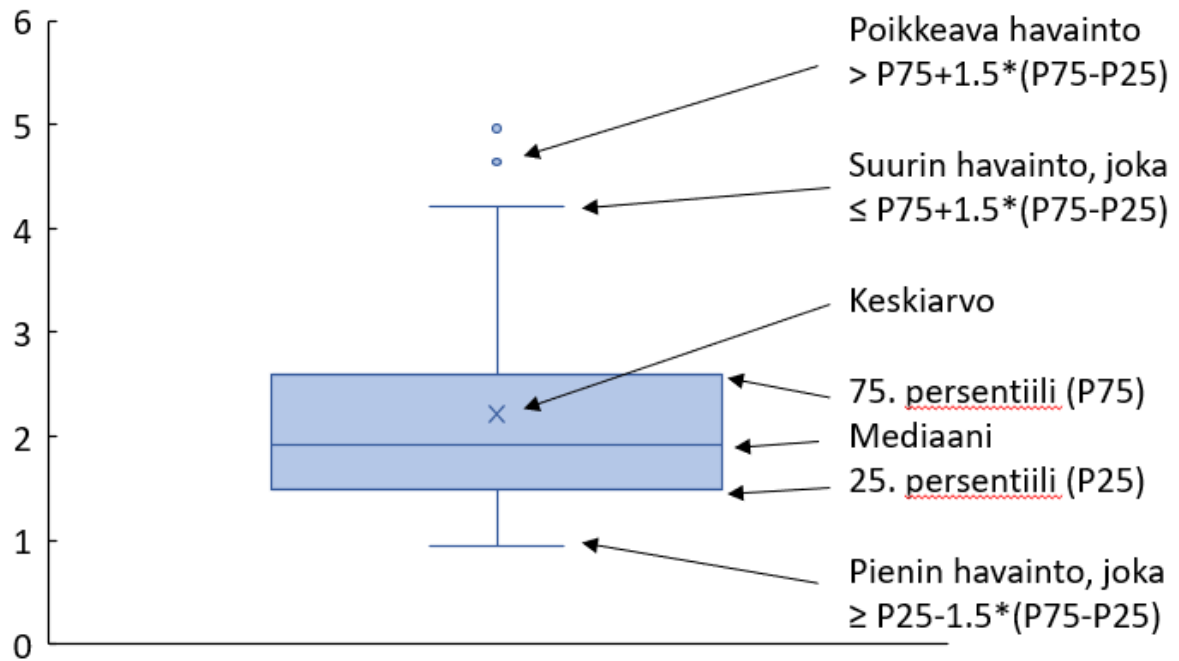
Mittauksen aikana tutkija arvioi aistinvaraisesti puunpolton savujen hajun voimakkuuden jokaisen kierroksen aikana. Mustalla hiilellä sekä kierroskeskiarvojen mediaani että keskiarvo suurenevät hajun voimistuksessa, joten se näyttäisi tämän tutkimuksen perusteella toimivan tutkimuksessa mitatuista komponenteista parhaiten puunpolton savun indikaattorina.

Kaikkien tutkittujen ilmansaasteiden pitoisuudet olivat alueellisesti epätasaisesti jakautuneet ja lyhyilläkin etäisyyksillä havaittiin suuria pitoisuuseroja. Suuret pitoisuudet olivat usein lyhytaikaisia, mutta joillain reittiosuuksilla pitoisuus pysyi suurena kaikkien kierrosten aikana eli yli kaksi tuntia. Näissä tilanteissa yksittäisten talojen päästöllä saattoi olla suuri merkitys lähialueen ilmansaastepitoisuuksiin.

Kirjallisuus

- Janssen NA, Gerlofs-Nijland ME, Lanki T, Salonen RO, Cassee F, Hoek G, Fischer P, Brunekreef B, Krzyzanowski M. Health Effects of Black Carbon. Copenhagen: World Health Organisation; 2012: 86. ISBN: 978 92 890 0265 3
- Salonen RO, Pasanen K, Pulkkinen A-M, Pennanen A, Pärjälä E, Koskentalo T, Pukkala E. Puun pienpolton savuja ulkoisille ja pitkäaikaisesta altistumisesta syöpiä. Ympäristö ja terveys -lehti 8/2016. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201702281887>
- Savolahti M, Karvosenoja N, Tissari J, Kupiainen K, Sippula O, Jokiniemi J. Black carbon and fine particle emissions in Finnish residential wood combustion: Emission projections, reduction measures and the impact of combustion practices. *Atmospheric Environment*. 2016; 140: 495-505. DOI:10.1016/j.atmosenv.2016.06.023
- Siponen T, Taimisto P, Yli-Tuomi T, Salonen RO. Kuopion katupölytutkimus 2019: hankkeen loppuraportti. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). Työpäperi 11/2021. 33 sivua. Helsinki 2021. ISBN:978-952-343-641-1 (verkkojulkaisu).
- Siponen T, Yli-Tuomi T, Tiittanen P, Taimisto P, Pekkanen J, Salonen RO, Lanki T. Wood stove use and other determinants of personal and indoor exposures to particulate air pollution and ozone among elderly persons in a Northern Suburb. *Indoor Air*. 2019; 29: 413-422. DOI: 10.1111/ina.12538
- Soimakallio S, Hildén M, Lanki T, Eskelinen H, Karvosenoja N, Kuusipalo H, Lepistö A, Mattila T, Mela H, Nissinen A, Ristimäki M, Rehunen A, Repo A, Salonen R, Savolahti M, Seppälä J, Tiittanen P, Virtanen S. Energia- ja ilmastostrategian ja keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelman ympäristövaikutusten arviointi. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 59/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-444-3>
- Yli-Tuomi T, Siponen T, Taimisto RP, Aurela M, Teinilä K, Hillamo R, Pekkanen J, Salonen RO, Lanki T. Impact of wood combustion for secondary heating and recreational purposes on particulate air pollution in a suburb in Finland. *Environmental Science and Technology*. 2015; 49: 4089- 4096. <https://doi.org/10.1021/es5053683>
- Ympäristöministeriö. Kansallinen ilmansuojeluohjelma 2030. Ympäristöministeriön julkaisu 7/2019. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-008-8>
- WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization. 2021. ISBN 978-92-4-003422-8 (verkkojulkaisu).

Liite 1. Laatikko ja janakaavion lukeminen.



Liite 2. Pitoisuusympyrän lukeminen.

