

Työpaperi 5/2024

Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit - Ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo)

Hanna Leppänen, Miina Juntunen, Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto, Taina Siponen, Kaisa Jalkanen, Martin Täubel, Maria Valkonen, Anne Hyvärinen

Ilmanpuhdistimia on käytetty rakennusten toiminnan turvaamiseksi jo pitkään ja niiden käyttö on yleistä esimerkiksi kuntien käytössä olevissa rakennuksissa. Tällä hetkellä tutkimustieto ilmanpuhdistimien tehokkuudesta sisäilman kaasumaisten, mikrobiologisten ja hiukkasmaisten epäpuhtauksien poistossa perustuu pitkälti kammio- ja testihuonekokeisiin, ja laitteiden toimivuudesta käytännön olosuhteissa on erittäin vähän tutkimustietoa.

Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo) -hankkeessa tuotettiin tutkittua tietoa ilmanpuhdistimien toimivuudesta erilaisten sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksien vähentämiseksi alakouluympäristöissä. Lisäksi selvitettiin, kuinka ilmanpuhdistimien käyttö vaikuttaa työntekijöiden ja oppilaiden oireiden sekä olosuhdehaittojen raportointiin. Tutkimus toteutettiin kuudessa kuopiolaisessa alakoulussa, yhteensä 29 luokkahuoneessa vuosien 2021–2022 aikana.

Ilmanpuhdistimien käyttö (suodatus) pienensi tilastollisesti merkitsevästi pienhiukkas- ja TVOC-pitoisuuksia verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Tilan perusilmanvaihdon määrällä oli merkitystä sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Pitoisuudet olivat pienempiä luokkahuoneissa, joissa oli tehokkaampi perusilmanvaihto. Tutkimuksessa käytetyllä ja myös Kuopion kaupungin käyttämällä ilmanpuhdistimien mitoituksella, ilmanpuhdistimen käytön vaikutus mikrobipitoisuuden oli heikko tai se jopa lisäsi tutkimusluokkien laskeutuneen pölyn mikrobipitoisuuksia pölyn resuspendoituessa tasoilta ilmaan ja laskeutumisella yläpinnoille tehokkaamman ilmavirtauksen mukana. Epäpuhtauspitoisuudet olivat lähtökohtaisesti pieniä tutkimuskouluissa, jonka vuoksi mitatausepävarmuuden vaikutus on huomioitava tuloksia tarkasteltaessa. Ilmanpuhdistimien käyttö (suodatus) tutkimuksessa käytetyllä mitoituksella sekä, kun ilmanpuhdistin pelkästään kierrätti ilmaa (ei suodattanut, sham-jakso), vähensi raportoitujen ylä- ja alahengitystieoireiden sekä muiden

oireiden määrää tilastollisesti merkitsevästi. Vastaava vaikutus havaittiin oppilaiden kokemien sisäympäristön olosuhdehaittojen osalta. Lisätutkimusta tarvitaan vaikutuksen taustalla olevista syistä.

Tutkimus korostaa epäpuhtauspitoisuuksien lähtötason huomioimista ilmanpuhdistusratkaisuja harkittaessa ja ilmanpuhdistimia tulisi käyttää ainoastaan väliaikaisratkaisuna silloin, kun tilassa on kohonnut epäpuhtauspitoisuus. Ensisijaisesti huomiota tulisi kiinnittää rakennuksen kunnossapitoon sekä energiatehokkaaseen ja oikein mitoitettuun ilmanvaihtoon, jossa myös tuloilman suodatus on huomioitu.

Lukijalle

Sisäilman laadulla on suuri merkitys ihmisten viihtyvyydelle ja hyvinvoinnille, sillä vietämme suurimman osan ajastamme erilaisissa sisäympäristöissä. Sisäilmassa voi olla lukuisia erilaisia mikrobiologia, hiukkasmaisia ja kaasumaisia epäpuhtauksia, jotka voivat heikentää viihtyvyyttä ja jotkut epäpuhtauksista voivat kohonneina pitoisuuksina aiheuttaa mm. hengitystieoireita. Ilmanpuhdistimia käytetään melko yleisesti turvaamaan rakennusten käyttöä, vaikka niiden tehokkuudesta tähän tarkoitukseen on verrattain vähän tutkittua tietoa.

Tutkimustieto ilmanpuhdistimien tehokkuudesta poistaa sisäilman epäpuhtauksia perustuu pitkälti kontrolloituihin kammio- ja testihuonekokeisiin, jotka eivät kuvaa normaaleja käytännön olosuhteita esimerkiksi luokahuoneissa. Normaaliolosuhteissa ilmavirtauksiin vaikuttavat muun muassa ihmisten aiheuttama lämpökuorma, aktiiviteetit ja ikkunoiden ja ovien avaaminen. Lisäksi sisäympäristöissä on kammiokokeisiin nähden useampia erilaisia epäpuhtauslähteitä. Epäpuhtaudet voivat kulkeutua sisätiloihin ulkoilmasta, maaperästä ja rakennusten rakenteista sekä monista sisätiloissa olevista lähteistä, kuten rakennus- ja sisustusmateriaaleista, siivouskemikaaleista sekä tilan käyttäjistä ja heidän aktiiviteeteistaan.

Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo) -hankkeessa selvitettiin ilmanpuhdistimien toimivuutta erilaisten sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksien vähentämiseksi alakouluympäristöissä. Hankkeessa selvitettiin myös ilmanpuhdistimien käytön merkitystä työntekijöiden ja oppilaiden kokemien olosuhdehaittojen sekä oireiden raportointiin. Tutkimus tehtiin kuudessa kuopiolaisessa alakoulussa vuosien 2021–2022 aikana.

Hanke on Työsuojelurahaston (hanke 200355), opetus- ja kulttuuriministeriön, sosiaali- ja terveysministeriön, ympäristöministeriön, Kuopion Tilapalveluiden, Kuopion Ympäristöterveydenhuollon sekä Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen rahoittama. Kiitämme rahoittajia sekä yhteistyökumppaneita: VTT:tä, Sisäilmayhdistystä, Hengitysliittoa, Iho-, allergia- ja astmaliittoa sekä Asumisterveysliittoa, hankkeen mahdollistamisesta. Lisäksi haluamme kiittää UniqAir Oy:ta ja Inspector Sec Oy:ta ilmanpuhdistimien lainaamisesta tutkimusta varten. Tutkimusryhmä haluaa kiittää erityisen lämpimästi Susanna Haataista Kuopion Tilapalveluista tutkimuskohteiden rekrytoinnista, kohteiden rakennusteknisten tietojen luovuttamisesta ja erittäin hyvin sujuneesta yhteistyöstä hankkeen aikana. Kiitämme Servica Oy:n henkilökuntaa vastaamisesta kyselyyn tutkimuksen aikaisesta siivouksesta tutkimuskouluilla. Haluamme kiittää myös Marianne Strangeria (VITO, Belgia) VOC-näytteiden analysoinnista ja VTT:n Inga Ehder-Gahmia asiantuntevista kommentteista. Lämmin kiitos Asko Vepsäläiselle tilastoanalyysien teosta ja Katja Saarniolle, Mervi Ojalalle ja Heli Martikaiselle laboratorioanalyysistä. Erityiskiitos myös tutkimuskoulujen henkilökunnalle, oppilaille sekä heidän perheilleen tutkimukseen osallistumisesta.

Tiivistelmä

Hanna Leppänen, Miina Juntunen, Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto, Taina Siponen, Kaisa Jalkanen, Martin Täubel, Anne Hyvärinen. Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo). Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). Työpäperi 5/2024. 66 sivua. Helsinki 2024. ISBN 978-952-408-257-0 (verkkojulkaisu)

Opettajat ja oppilaat viettävät suuren osan arkipäivistään kouluympäristössä, joten sen laadulla on suuri merkitys heidän viihtyvyyteensä ja hyvinvointinsa. Kunnat ja muut kiinteistöjen omistajat tarvitsevat tutkittua tietoa ilmanpuhdistimien sopivasta mitoituksesta ja kyvystä poistaa epäpuhtauksia käytännön olosuhteissa pystyäkseen tekemään oikeita ratkaisuja ilmanpuhdistimien käytöstä esimerkiksi kouluympäristöissä. Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo)-hanke vastaa tähän tarpeeseen.

Tutkimukseen valittiin alakouluja, jotka edustivat erilaisia altistumisolosuhteita (vanha rakennus, liikenneympäristö, puun pienpolton alue, mahdollinen mikrobivaurio). Tutkimus tehtiin kuopiolaisissa alakouluissa, joiden rakenteiden ja teknisten järjestelmien kunto tunnettiin. Tutkimukseen valittujen ilmanpuhdistimien toiminta oli testattu ennen hankkeen aloittamista VTT:llä ja Kuopion kaupunki käytti osassa kohteistaan tutkimukseen valittua ilmanpuhdistustekniikkaa. Tutkimuksessa käytettiin samaa ilmanpuhdistimien ilmamäärän mitoitus, joka oli kuopiolaisissa kouluissa jo ennestään käytössä kyseisillä ilmanpuhdistimilla.

Tutkimuksessa oli mukana yhteensä 29 luokkatilaa 6 koulusta. Mittaukset tehtiin pääasiallisesti normaaliluokissa ja lisäksi muutamassa käsityöluokassa, jotta altistumistilanteita pystyttiin arvioimaan laajemmin. Luokkahuoneissa tehtiin hiukkas-, mikrobi- (sieni, bakteeri ja SARS-CoV-2-virus) ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) mittaukset sekä seurattiin jatkuvatoimisesti lämpötilaa, ilman suhteellista kosteutta, hiilidioksidipitoisuutta ja paine-eroa. Ulkoilman laadun karakterisoimiseksi VOC-, hiukkas- ja mikrobimittaukset tehtiin myös ulkona. Luokkahuoneiden siivoustasoa arvioitiin pintapölykertymämittauksilla, ilmanvaihtoa määritettiin mittaamalla luokkahuoneiden tulo- ja poistoilmamäärät ja melua mitattiin sekä ilmanpuhdistimen toimiessa että laitteen ollessa suljettuna. Myös luokkahuoneiden päivittäistä käyttöastetta seurattiin. Lisäksi tiloja säännöllisesti käyttävät työntekijät (n=24) ja 3–6. luokan oppilaat (n=209) täyttivät koettuja olosuhdehaittoja ja oireita selvittävää päiväkirjaa arkipäivisin kuuden viikon mittausjakson ajan.

Ilmanpuhdistimien (mekaaninen suodatus ja adsorptiotekniikka) vaikutusta sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksiin ja tilankäyttäjien kokemiin oireisiin ja olosuhdehaittoihin selvitettiin toistamalla mittaukset ilmanpuhdistimien käytön lisäksi ilmanpuhdistimien pelkästään kierrättäessä ilmaa (ei suodatusta, sham-jakso) ja vertaamalla tuloksia tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin oli luokassa, mutta ei käynnissä.

Tutkimuksessa ilmanpuhdistimien käytöllä havaittiin tilastollisesti merkitsevä alenema pienhiukkaspitoisuuteen ja TVOC-pitoisuuteen verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin oli luokassa, mutta ei ollut käynnissä. Sen sijaan karkeiden ja hengitettävien hiukkasten sekä mustan hiilen pitoisuuksiin ja mikrobipitoisuuksiin ilmanpuhdistimen käytöllä ei ollut merkittävää vaikutusta tutkimuksessa käytetyillä ilmanpuhdistimien mitoituksella ja ilmansuodatus jopa nosti mikrobipitoisuuksia laskeutuneen pölyn näytteissä, kun mikrobipitoisuus luokissa oli lähtökohtaisesti pieni. Oppilaiden raportoimissa ylähengitystie-, alahengitystie- ja muissa oireissa havaittiin pieni, mutta tilastollisesti merkitsevä lasku ilmanpuhdistimien käytön aikana. Huomattavaa on, että pelkällä ilman kierrätyksellä (sham-jakso) vaikutus oli suurempi. Lisätutkimusta tarvitaan oireiden vähenemisen taustalla vaikuttavista tekijöistä.

Avainsanat: koulut, sisäilma, ilmanpuhdistin, pienhiukkaset, mikrobit, haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Sammandrag

Hanna Leppänen, Miina Juntunen, Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto, Taina Siponen, Kaisa Jalkanen, Martin Täubel, Anne Hyvärinen. Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo). [Partiklar, mikrober och kemikalier – luftrenarnas inverkan på exponeringen i skolorna (HiMiKKo)]. Institutet för hälsa och välfärd (THL). Diskussionsunderlag 5/2024. 66 sidor. Helsingfors 2024. ISBN 978-952-408-257-0 (nätpublikation)

Lärare och elever tillbringar en stor del av vardagen i skolmiljön. Därför är kvaliteten på skolmiljön av stor betydelse för deras trivsel och välbefinnande. Kommuner och andra fastighetsägare behöver forskningsdata om luftrenarnas funktion och dimensionering för att kunna fatta rätt beslut om användningen av luftrenare till exempel i skolmiljöer. Projektet Partiklar, mikrober och kemikalier – luftrenarnas inverkan på exponeringen i skolorna (HiMiKKo) svarar på detta behov.

Till undersökningen valdes lågstudier som representerade olika exponeringsförhållanden (gammal byggnad, trafikmiljö, småskalig vedeldning, eventuell mikroskada). Undersökningen gjordes i lågstadieskolor i Kuopio, i skolor där man var bekant med konstruktionerna och de tekniska systemen. Funktionen av de luftrenare som valts ut för undersökningen hade testats vid VTT innan projektet inleddes och Kuopio stad använde luftreningstekniken i fråga vid en del av sina objekt. I undersökningen användes samma dimensionering av luftrenarnas luftmängd som redan tidigare hade använts med dessa luftrenare i skolorna i Kuopio.

I undersökningen deltog sammanlagt 29 klassrum från 6 skolor. Mätningarna gjordes huvudsakligen i normala klassrum, och dessutom i några klassrum för handarbete, för att man skulle kunna göra en mer omfattande bedömning av exponeringssituationerna. I klassrummen gjordes mätningar av partiklar, mikrober (svamp, bakterie och SARS-CoV-2-virus) och flyktiga organiska föreningar (VOC) och man följde kontinuerligt upp temperaturen, luftens relativa fuktighet, koldioxidhalten och tryckskillnaden. För att karakterisera kvaliteten på utomhusluften gjordes också partikel- och mikrobmätningar utomhus. Städning i klassrummen bedömdes genom mätningar av mängden ytdamm, ventilationen fastställdes genom mätning av till- och frånluftsmängderna i klassrummen och bullret mättes både när luftrenaren var på och när den var avstängd. Klassrummens dagliga användningsgrad följdes också upp. Under en mättningsperiod på sex veckor fyllde de anställda (n=24) och de elever i årskurs 3–6 (n=209) som använde lokalerna regelbundet dessutom i en dagbok där man tog reda på upplevda olägenheter och symtom under vardagarna.

Luftrenarnas (mekanisk filtrering och adsorptionsteknik) inverkan på halterna av föroreningar i inomhusluften utreddes genom att upprepa mätningarna genom luftrenarens normala funktion (filtrering) med den dimensionering som användes i undersökningen, samt genom att enbart återvinna luften (ingen filtrering, sham-period) och jämföra resultaten med bakgrundskoncentrationerna i utrymmet (luftrenare i klassrummet, men den inte var påslagen).

Med luftrenarnas normala funktion observerades i undersökningen en statistiskt signifikant minskning av partikelhalten och TVOC-halten jämfört med en situation där det fanns en luftrenare i klassrummen, men utan att vara påslagen. Däremot hade luftrenaren ingen betydande inverkan på mikrobalterna med den dimensionering som använts i projektet och luftfiltreringen höjde till och med mikrobalterna i proverna av damm som sjunkit, medan mikrohalten i klassrummen i princip var liten. I de symtom i de övre luftvägarna, de nedre luftvägarna och andra symtom som eleverna rapporterade kunde man observera en liten, men statistiskt signifikant, minskning med luftrenarnas normala funktion. Det är anmärkningsvärt att effekten av enbart luftcirkulation (sham-period) var större. Ytterligare undersökningar behövs om de faktorer som ligger bakom minskningen av symtomen.

Nyckelord: skolor, inomhusluft, luftrenare, fina partiklar, mikrober, flyktiga organiska föreningar

Abstract

Hanna Leppänen, Miina Juntunen, Tarja Yli-Tuomi, Pekka Taimisto, Taina Siponen, Kaisa Jalkanen, Martin Täubel, Anne Hyvärinen. Hiukkaset, mikrobit ja kemikaalit – ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen kouluissa (HiMiKKo) [Particles, microbes and chemicals – the effects of air cleaners on exposure at schools (HiMiKKo)]. Finnish institute for health and welfare (THL). Discussion Paper 5/2024. 66 pages. Helsinki, Finland 2024. ISBN 978-952-408-257-0 (online publication)

As teachers and pupils spend a large part of their day-to-day life in the school environment, its quality plays an important role in their comfort and wellbeing. Municipalities and other property owners need research knowledge on the functionality and dimensioning of air cleaners to make the right decisions on the use of air cleaners in school environments, for instance. The Particles, microbes and chemicals – the effects of air cleaners on exposure at schools (HiMiKKo) project responds to this need.

Primary schools representing different exposure conditions (old buildings, traffic environment, area with small-scale wood burning, possible microbial damage) were selected for the study. The study was conducted in primary schools in Kuopio, where the condition of the structures and technical systems was known. The functioning of the air cleaners selected for the study had been tested before the start of the project at VTT, and the City of Kuopio was using the air cleaner technology in some of its sites. The study used the same air volume dimensions in the air cleaners that the schools from Kuopio were already using with these air cleaners.

A total of 29 classrooms from 6 schools were included in the study. The measurements were mainly performed in normal classrooms and also in a few crafts classrooms to assess exposure situations more extensively. Measurements of particulate, microbial (fungi, bacteria and SARS-CoV-2 virus) and volatile organic compounds (VOCs) were carried out in the classrooms and the temperature, relative air humidity, carbon dioxide concentration and differential pressure were continuously monitored. To characterise outdoor air quality, the VOC, particulate and microbial measurements were also performed outdoors. The cleanliness level in the classrooms was assessed using surface dust accumulation measurements, ventilation was determined by measuring supply and exhaust air volumes in the classrooms, and noise levels were assessed both when the air cleaner was operating and when the device had been switched off. The daily use rate of classrooms was also monitored. In addition, the employees (n=24) and pupils in grades 3–6 (n=209) who regularly use the facilities kept a diary on the experienced adverse conditions and symptoms on weekdays for a six-week measurement period.

The effect of air cleaners (mechanical filtration and adsorption technique) on the concentrations of indoor air impurities was examined by repeating the measurements during the normal operation of the air cleaner (filtration) with the dimensioning used in the study, and when the cleaner was only circulating air (no filtration, sham period) and comparing the results with the background concentrations in the space (air cleaner in the classroom but not switched on).

The study detected a statistically significant decrease in fine particulate matter and TVOC concentrations during the normal operation of air cleaners compared to a situation in which the air cleaner was in the classroom but had not been switched on. By contrast, the air cleaner operation had no significant effect on microbial concentrations with the used dimensioning, and air filtration even increased microbial concentrations in settled dust samples when the microbial concentration was primarily low in the classrooms. A small but statistically significant drop in symptoms of the upper and lower airways and other symptoms reported by the pupils was observed in the normal operation of air cleaners. It should be noted that air circulation alone (sham period) had a greater effect. Further research is needed on the underlying factors of reduced symptoms.

Keywords: schools, indoor air, air cleaner, fine particles, microbes, volatile organic compounds

Sisällys

Johdanto.....	9
Hiukkasmaiset epäpuhtaudet.....	9
Kaasumaiset epäpuhtaudet.....	10
Mikrobiologiset epäpuhtaudet	10
Ilmanpuhdistimien käyttö.....	11
Aineisto ja menetelmät.....	13
Tutkimuskohteet ja -asetelma	13
Ilmanpuhdistimet.....	13
Sää	13
Hiukkasmaisten epäpuhtauksien määrittäminen.....	15
PM _{2,5} ja PM ₁₀	15
Reflektanssi / absorptiokerroin	15
Kaasumaisten epäpuhtauksien määrittäminen	16
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	16
Hiilidioksidi.....	16
Mikrobiologisten epäpuhtauksien määrittäminen.....	16
Aktiivinen ilmanäyte	16
Laskeutunut pöly	17
Melumittaukset.....	17
Ilmanvaihto, lämpötila, suhteellinen kosteus sekä paine-ero.....	17
Pintapölykertymä	18
Siivouskysely	18
Oire- ja olosuhdepäiväkirja	18
Eettinen näkökulma	18
Tilastolliset analyysit.....	19
Tulokset.....	20
Hiukkasmaiset epäpuhtaudet.....	20
Mittausjaksojen ajankohdat ja hiukkaspitoisuuksien ajallinen vaihtelu ulkoilmassa.....	20
Keskimääräiset hiukkaspitoisuudet ulko- ja sisäilmassa kouluihmissä	21
Hiukkaspitoisuuden ajallinen vaihtelu sisätiloissa	23
Sisäpitoisuuden ja ulkopitoisuuden suhde luokahuoneittain	26
Ilmanpuhdistimen vaikutus.....	28
Ilmanvaihdon määrän vaikutus hiukkaspitoisuuksiin.....	29
Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus hiukkaspitoisuuksiin	30
Kaasumaiset epäpuhtaudet.....	31
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	31
Ilmanvaihdon määrän vaikutus TVOC-pitoisuuksiin	34
Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus TVOC-pitoisuuteen	35
Hiilidioksidi.....	35
Mikrobiologiset epäpuhtaudet	36
Laskeutuneen pölyn mikrobitulokset	36
Aktiivisten ilmanäytteiden mikrobitulokset.....	37
SARS-CoV-2 virusten esiintyminen laskeutuneen pölyn näytteissä	38
Ilmanvaihdon määrän vaikutus mikrobipitoisuuksiin laskeutuneen pölyn näytteissä.....	38
Ilmanvaihdon määrän vaikutus mikrobipitoisuuksiin aktiivisissa ilmanäytteissä	39
Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus mikrobipitoisuuksiin laskeutuneen pölyn näytteissä	40
Melu.....	41
Ilmanvaihto, suhteellinen kosteus, paine-ero	42
Siivouskysely	42

Pintapölykertymä	43
Oireiden raportointi.....	44
Oppilaiden ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet	44
Opettajien ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet	44
Olosuhteiden raportointi	45
Koettu ilmanpuhdistimien vaikutus.....	46
Tulosten tarkastelua	48
Johtopäätökset.....	52
Lähteet	53
Liitteet	55
Liite 1.....	55
Liite 2.....	57
Liite 3.....	59
Laskeutuneen pölyn näytteiden mikrobipitoisuudet	59
Aktiivisten ilmanäytteiden mikrobipitoisuudet	63

Johdanto

Sisäilman laadulla on suuri merkitys ihmisten viihtyvyydelle ja hyvinvoinnille, sillä vietämme suurimman osan ajastamme erilaisissa sisäympäristöissä. Sisäilmassa on lukuisia erilaisia mikrobiologisia, hiukkasmaisia ja kaasumaisia epäpuhtauksia, jotka voivat kohonneina pitoisuuksina aiheuttaa oireita ja heikentää tilan käyttäjien viihtyvyyttä. Epäpuhtaudet voivat kulkeutua sisätiloihin ulkoilmasta, maaperästä ja rakennusten rakenteista sekä monista sisätiloissa olevista lähteistä, kuten rakennus- ja sisustusmateriaaleista, siivouskemikaaleista sekä tilan käyttäjistä.

Hiukkasmaiset epäpuhtaudet

Suomessa hiukkaspitoisuudet (pienhiukkaset, $PM_{2,5}$, halkaisija $\leq 2,5 \mu m$; hengitettävät hiukkaset, PM_{10} , halkaisija $\leq 10 \mu m$) ovat eurooppalaista tasoa selvästi pienemmät. Kuitenkin kaupunki-ilman hiukkaset aiheuttavat terveyshaittaa myös Suomen suhteellisen matalilla ulkoilman pitoisuuksilla (Kettunen ym. 2007, Lanki ym. 2006). Lyhytaikainen altistuminen korkeille ilman hiukkaspitoisuuksille aiheuttaa yleisimmin erilaisia ärsytysoireita ja lieviä hengityselinoireita. Tällaisia ovat muun muassa kurkun ja silmien kutina, nuha, yskä, hengenahdistus ja hengityksen vinkuna. Pitkäaikainen altistuminen hiukkasille voi pahentaa kroonisia sydän, verisuoni- ja hengityselinsairauksia, mutta myös nopeuttaa sairauksien kehittymistä. Koulut sijaitsevat usein hyvien liikenneyhteyksien varrella vilkkaasti liikennöidyissä ympäristöissä, jolloin ne ovat logistisesti hyvin sekä lasten että heitä kuljettavien aikuisten saavutettavissa. Koulujen ja muiden ns. herkkien kohteiden sijoitteluun huomioiden riittävät suojaetäisyydet vilkkaasti liikennöidyistä kaduista on kiinnitetty huomiota vasta viimeisimpien vuosien aikana. Liikenneympäristöissä esiintyy suuria pitoisuuksia hiukkasmaisia ilmansaasteita, joista erityisesti ultrapienet hiukkaset ovat usein polttoperäisiä, kuten pakokaasujen hiukkasia. Edelleen liikenne nostattaa muun muassa tien pinnalta ilmaan myös kokoluokaltaan suurempia hiukkasia, jotka kuitenkin ovat riittävän pieniä kulkeutuaakseen hengitysteihin. Puun pienpolton päästöt taas voivat heikentää pientaloalueilla tai niiden lähellä sijaitsevien koulujen ulko- ja sisäilman laatua. Kouluissa oleskellaan päivällä, jolloin liikenteestä peräisin oleva hiukkaspitoisuus on yleensä suurimmillaan. Puunpolton päästöt painottuvat iltoihin ja viikonloppuihin, mutta suuria pitoisuuksia voi esiintyä myös koulupäivien aikana.

Ulkoilman hiukkasia kulkeutuu sisäilmaan rakennusten epätiivetykskohdista, ilmanvaihtokanavien kautta sekä avoimista ovista ja ikkunoista. Hiukkasten ulko-sisäsiirtymä riippuu rakennuksen tiiveyden lisäksi muun muassa hiukkasten koosta, rakennuksen ilmanvaihdon toiminnasta, ulko- ja sisäilman välisestä paine-erosta ja tuloilman suodatuksesta. Jos tiloissa ei ole tehokasta tuloilman suodatusta, ulkoa peräisin olevien hiukkasten pitoisuudet voivat olla suuria. Mikäli sisätilat ovat alipaineiset ulkoilmaan nähden ja rakenteissa on epätiivetykskohtia, rakenteiden läpi virtaava korvausilma voi tuoda sisäilmaan myös rakenteista irronneita hiukkasia ja mineraalivillakuituja sekä mikrobiperäisiä epäpuhtauksia. Hiukkasia kulkeutuu sisään myös kengissä ja vaatteissa.

Sisäilman hiukkaspitoisuuksiin vaikuttavat ulkoilman laadun ja ulko-sisäsiirtymän lisäksi sisälähteet. Koululuokissa yksi tärkeimmistä sisälähteistä on pinnoille laskeutuneiden tai pintoihin tarttuneiden hiukkasten nouseminen uudelleen ilmaan ihmisten liikeyhdistä johtuvien ilmavirtausten takia. Tämä resuspendoituminen riippuu muun muassa hiukkasten koosta, pölyn määrästä, pintojen ominaisuuksista, liikkeen luonteesta, ilmavirran voimakkuudesta, ilmanvaihdesta sekä suhteellisesta ilmankosteudesta. Resuspendoituminen vaikuttaa etenkin karkeiden hiukkasten (halkaisija $> 2,5 \mu m$) pitoisuuteen. Kouluissa resuspendoitumista lisää ulkoa kengissä kulkeutuva hiekka sekä aktiivinen liikkuminen sisätiloissa. Tietokonealueissa sekä taide- ja taitoaineiden luokkahuoneissa, kuten kotitalous- ja käsityöluokissa, itse toiminnastakin voi aiheutua hiukkaspäästöjä. Koululuokissa liitutulun käytön on raportoitu lisäävän sisäilman hiukkaspitoisuuksia, mutta Suomessa liitua käytetään enää harvoin.

Suomessa sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (545/2015), jäljempänä asumisterveysasetus, määrittää toimenpiderajat sisäilman pienhiukkasten ($25 \mu g/m^3$) ja hengitettävien hiukkasten ($50 \mu g/m^3$)

vuorokausikeskiarvoille. Maailman terveysjärjestön (WHO) vuonna 2021 antamat terveysperusteiset vuorokausiohjeet ovat pienhiukkasille $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja hengitettävälle hiukkasille $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO 2021).

Kaasumaiset epäpuhtaudet

Ajoneuvojen polttomoottorit, puun pienpolto ja muut palamisperäiset lähteet tuottavat ympäristöönsä hiukkasmaisten epäpuhtauksien lisäksi myös kaasumaisia ilmansaasteita. Sekä hiukkasmaiset että kaasumaiset ilmansaasteet kulkeutuvat usein tehokkaasti ulkoa sisätiloihin. Lisäksi myös sisätiloissa esiintyy päästölähteitä, jotka tuottavat sisäilmaan kaasumaisia epäpuhtauksia. Tällaisia lähteitä ovat mm. siivouksessa käytettävät kemikaalit sekä rakennus- ja pintamateriaalit (Zhang ym. 2006, Mendel ym. 2007). Sisäilmassa voi esiintyä satoja kaasumaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC), joiden pääasialliset terveysvaikutukset sisäympäristöissä näyttäisivät liittyvän ohimeneviin ärsytys- ja hengitystieoireisiin (SCHER 2007, Hulin ym. 2012, Bernstein ym. 2008). Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen (545/2015) mukainen toimenpideraja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudelle (Total Organic Volatile Compounds, TVOC) huoneilmassa tolueenivasteella laskettuna on $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asetuksen soveltamisohjeen (Valvira 2016) mukaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden toimenpiderajan ylittyessä on ryhdyttävä toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa myös rajoittamiseksi tai poistamiseksi. Samoin toimitaan, mikäli yksittäisen yhdisteen toimenpideraja ylittyy. VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuuden toimenpiderajan ylittyessä on selvitettävä yksittäisten yhdisteiden merkitys. Mikäli ylittymisen todetaan johtuvan terveydelle haitattomasta yhdisteestä, muita toimenpiteitä ei tarvita. Asumisterveysasetuksen toimenpiderajat eivät ole terveysperusteisia, eli niiden määrittämiseksi ei ole tehty toksikologista riskinarviota eikä niiden perusteella voida osoittaa terveydellisiä vaikutuksia. Toimenpiderajat perustuvat 1990–2000-luvuilla sisäilmaongelmallisista kohteista kerättyyn mittausdataan ja ne on määritetty varovaisuusperiaatte huomioon ottaen.

TVOC-pitoisuudelle ei voida määrittää terveysperusteista ohjearvoa, koska kokonaispitoisuus koostuu eri kohteissa eri yhdisteistä ja yksittäisiä yhdisteitä esiintyy erilaisina pitoisuuksina. Mikäli yksittäisten yhdisteiden terveysperusteiset ohjeet eivät ylity, Saksan liittovaltion ympäristökeskuksen sisäilman hygienia-komission sisäilman laadun arviointistandardin mukaan $300\text{--}1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ TVOC-pitoisuus on hygieenisesti turvallinen (Umwelt Bundesamt 2023). Yksittäisten VOC:ien pitoisuudet ovat olleet kouluympäristöissä tyypillisesti matalia (Smedje ym. 1997, Zhang ym. 2006, Godwin & Batterman 2007, Zhong 2017) ja alittaneet WHO:n (2010) raja-arvot. Myös tuoreissa suomalaisissa katsauksissa sekä toimistotyypisten työpaikkojen ml. koulut ja asuntojen VOC-pitoisuudet ovat olleet pieniä ja huomattavasti eurooppalaisten ja saksalaisten terveysperusteisten raja-arvojen ja Suomen asumisterveysasetuksen toimenpiderajojen alapuolella (Juntunen ym. 2022, Wallenius ym. 2021). Keski-Euroopassa tehdyssä tutkimuksessa sisälähteet selittivät pääosan päiväkotien ja koululuokkien tutkittujen kaasumaisten yhdisteiden pitoisuuksista, mutta myös ulkolähteillä oli merkitystä (Villanueva ym. 2018).

Sisätiloissa tärkein hiilidioksidin (CO_2) lähde on ihmisen uloshengitysilma. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus kuvastaa ilmanvaihdon riittävyyttä suhteessa ihmisten aiheuttamaan kuormitukseen. Hiilidioksidin enimmäispitoisuudesta on Suomessa tehty viranomaispäätös asumisterveysasetuksessa. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden toimenpideraja ylittyy, jos pitoisuus on $2\ 100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($1\ 150 \text{ ppm}$) suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. Suomessa tyypillinen ulkoilman CO_2 -pitoisuus on 400 ppm .

Mikrobiologiset epäpuhtaudet

Koulujen sisäilman mikrobipitoisuuksiin vaikuttavat useat eri lähteet. Yksi tärkeimmistä sisäilman mikrobi-lähteistä on ulkoilma, josta mikrobeja siirtyy sisätiloihin mm. ilmanvaihdon sekä tilojen käyttäjien vaatetuksen välityksellä (Meadow ym. 2014). Ihmiset itse ovat yksi suurimmista sisäilman bakteerien sisälähteistä (Casas ym. 2013, Täubel ym. 2009, Yamamoto ym. 2015). Tilojen käyttäjien aktiivisuus sekä tilojen käyttötavat vaikuttavat mikrobipitoisuuksiin. Pitoisuudet voivat nousta hetkellisesti sisäilmassa, kun tilassa liikutaan (lattialle ja muille tasoille laskeutunut pöly, joka sisältää mikrobeja, nousee uudelleen ilmaan). Myös

siivous voi nostaa sisäilman mikrobipitoisuutta väliaikaisesti pölyn noustessa ilmaan. Toisaalta säännöllinen siivous voi pienentää sisäilman mikrobipitoisuutta huomattavasti (Sordillo 2011, Wu 2012).

Edellä mainitut mikrobipitoisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat ns. normaaleja lähteitä. Kosteusvaurioista johtuva mikrobikasvu rakennuksen pinnoilla ja rakenteissa on puolestaan epätavallinen lähde sisäilman mikrobeille. Mikrobikasvustoista voi kulkeutua sisäilmaan mikrobi-itiöiden, -solujen ja rakenneosien lisäksi myös mikrobien aineenvaihduntatuotteita, kuten toksiineja ja kaasumaisia aineenvaihduntatuotteita (THL 2018). Kosteusvauriot ovat astman riskitekijä ja voivat aiheuttaa hengitystieoireita. Kuitenkin on vielä epäselvää, mitkä tekijät näitä terveyshaittoja aiheuttavat ja millä mekanismeilla (WHO 2009, Kosteus- ja homevaurioista oireileva potilas: Käypä hoito -suositus, 2016). Myös virusinfektioiden aikana viruspitoisuudet sisäilmassa voivat osoittautua ongelmallisiksi, kuten kausi-influenssan ja muiden hengitystievirusinfektioiden aikana. Virusinfektioiden leviämistä mallintavissa tutkimuksissa koulujen on osoitettu olevan merkittävässä roolissa virusinfektioiden tartunnassa (Ferguson ym. 2006, Zivkovic Gojovic ym. 2009).

Ilmanpuhdistimien käyttö

Ilmanpuhdistimia käytetään melko yleisesti turvaamaan rakennusten käyttöä, vaikka niiden tehokkuudesta tähän tarkoitukseen on verrattain vähän tutkittua tietoa (Hyvärinen ym. 2017). Osana valtioneuvoston kanslian rahoittamaa Avaimet terveelliseen ja turvalliseen rakennukseen (AVATER) -hanketta selvitettiin ilmanpuhdistimien käytön yleisyyttä ja kokemuksia kunnissa (Hyvärinen ym. 2017). Kunnille suunnatun kyselyn mukaan lähes 90 % kyselyyn vastanneista 149 kunnasta oli käyttänyt ilmanpuhdistimia ensiapuna tai tilanteissa, joissa korjaukset olivat viivästyneet. Ilmanpuhdistimia oli käytössä 1–49 kappaletta useimmissa vastanneista kunnista. Yli 200 ilmanpuhdistinta oli käytössä kahdessa kunnassa. Ilmanpuhdistimia käytettiin useissa kunnissa yleisesti väliaikaisratkaisuna, kun odotettiin kosteusvauriokorjausta. Myös korjaustöiden aikainen ympäröivien tilojen suojaus oli yleistä. Ilmanpuhdistimista koettiin olleen apua kosteus- ja homevauriokohteissa useimmiten tai joskus.

Institute of Medicine (IOM 2000) mukaan ilmanpuhdistimien käyttö voi auttaa vähentämään ilmassa olevia allergeeneja ja hiukkasia ja joissakin tapauksissa käyttö voi vähentää allergia- ja astmaoireita. Tämänhetkiset kokeelliset tutkimukset ovat kuitenkin puutteellisia osoittamaan ilmanpuhdistimien hyötyjä allergioita ja astmaa sairastaville henkilöille. Tulokset ilmanpuhdistimien kyvystä poistaa sisäilman mikrobiologisia, hiukkasmaisia ja kaasumaisia epäpuhtauksia perustuvat pitkälti kontrolloituihin kammio- ja testihuonetutkimuksiin. Tarvitaan lisää tutkimustietoa ilmanpuhdistimien todellisesta suoriutumisesta ”normaaleissa käytännön olosuhteissa” kuten kouluissa, joissa on paljon ihmisiä ja muita sisäilman epäpuhtauslähteitä, erilaisia toimintoja, jotka nostavat epäpuhtauspitoisuuksia (esim. käsityö ja kuvaamataito) sekä vaihtuvia ilmvirtauksia. Ilmanpuhdistimen puhtaan ilman tuotto (clean air delivery rate, CADR) on laitteen ilmavirran ja erotusasteen tulo. Ilmanpuhdistimen puhtaan ilman tuotto tulee mitoittaa puhdistettavan tilan ilmatilavuuteen ja ilmanvaihtoon suhteutettuna. Ilmanpuhdistin on tärkeä sijoittaa tilan käyttäjien ja ilman jakautumisen kannalta optimaalisesti. Myös mahdolliset katvealueet tulisi huomioida riittävällä laitteiden määrällä ja oikealla asettelulla. Laitteiden huollosta ja puhdistuksesta, kuten suodattimien riittävästä vaihtovälistä, tulee huolehtia valmistajan ohjeiden mukaisesti.

Kunnat ja kiinteistöjen omistajat tarvitsevat tutkittua tietoa ilmanpuhdistimien kyvystä poistaa erilaisia sisäilman epäpuhtauksia käytännön olosuhteissa, jotta he pystyvät tekemään oikeita päätöksiä mahdollisissa ilmanpuhdistimien hankinnoissa. Lisätiedon avulla rakennuksen kunnosta vastaavia ja omistajia pystyttäisiin nykyistä paremmin ohjeistamaan ilmanpuhdistimien käytöstä sekä kohdentamaan käyttö oikein esim. uusien tilojen käyttöönoton yhteydessä, odotettaessa perus- tai muiden korjausten alkamista tai sisäympäristöissä, joissa esiintyy toiminnan takia poikkeavaa altistumista.

Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen aikaisemman ”Ilmanpuhdistimien vaikutukset altistumiseen ja oireisiin koululuokissa” (PUHKO) -tutkimuksen (Leppänen ym. käsikirjoitus) perusteella havaittiin pieni, mutta ei tilastollisesti merkitsevä alenema hiukkaspitoisuuksiin (PM_{2,5}; hiukkasten halkaisija alle 2,5 µm ja PM₁₀; hiukkasten halkaisija alle 10 µm), kun verrattiin ilmanpuhdistimen suodatusta pelkkään ilman kierrätykseen (sham-jakso). Ilmanpuhdistimien suodatus vähensi hieman, mutta ei tilastollisesti merkitsevästi haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta (TVOC). Ilmanpuhdistimet vähensivät myös eri

mikrobiryhmien pitoisuutta sisäilmassa, mutta tulokset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Sen sijaan ilmanpuhdistimien käytöllä ei ollut vaikutusta luokkahuoneiden mikrobiomiin eli ilmanpuhdistimien käyttö ei vaikuttanut siihen, mitä mikrobiryhmiä ja missä suhteessa toisiinsa, luokkahuoneissa esiintyi. Ilmanpuhdistimien suodatuksen havaittiin vähentävän ylä- ja alahengitystie- sekä muuta koettua oireilua, mutta lähes vastaava vaikutus havaittiin pelkällä ilman kierrätyksellä (sham-jakso). Tulosten tulkinnassa on huomioitava mahdollinen plasebovaikutus, koska oireita raportoivat henkilöt eivät tieneet, milloin ilmanpuhdistimissa oli suodattimet paikoillaan ja milloin ilmanpuhdistimet pelkästään kierrättivät ilmaa. Toisaalta ilmanpuhdistimen tuottama ilman kierrätys paransi luokkahuoneen sisäilman sekoittumista, mikä nähtiin pienentyneinä epäpuhtauspitoisuuksina. Kyseessä on yksittäinen tutkimus, joten sen perusteella ei voida tehdä kovin pitkälle vietyjä johtopäätöksiä. Tutkimusta ja tutkimuskohteita tarvitaan lisää, jotta ilmanpuhdistimien käyttöä erilaisissa altistusolosuhteissa voitaisiin arvioida luotettavammin.

Ilmanpuhdistimissa käytetään erilaisia ilmanpuhdistustekniikoita, jotka vaikuttavat epäpuhtauspitoisuuksiin erilaisten fysikaalisten ja kemiallisten ilmiöiden kautta. Mekaanisella suodatuksella voidaan poistaa sisäilmasta hiukkasmaisia epäpuhtauksia kuten siitepölyä, huonepölyä, viruksia, bakteereita, homeitiöitä, eläinten hilsettä ja pienhiukkasia (Cheong ym. 2004, EPA 2009, Wen ym. 2014). Suodattimet voivat toimia kasvualustana mikrobeille ja voivat siten olla kontaminaatiolähde (Yu ym. 2009), joten niiden riittävän tiheään vaihtoväliin tulee kiinnittää huomiota. Adsorptiolla (fysisorptio tai kemisorptio) voidaan poistaa tehokkaasti pienhiukkasia, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, erilaisia kemiallisia yhdisteitä ja mikrobeja (Chen ym. 2005, Cheng ym. 2012, Lorimier ym. 2008, Sidheswaran ym. 2012, Zhang ym. 2011). Adsorboituneet yhdisteet voivat emittoitua uudelleen ja myös adsorbentit voivat toimia kasvualustana mikrobeille, joten niidenkin säännöllinen vaihto on tärkeää. Joidenkin ilmanpuhdistustekniikoiden haittapuolena ovat niissä mahdollisesti sivutuotteina syntyvät kohonneina pitoisuuksina terveydelle haitalliset yhdisteet, mutta mekaanisessa suodatuksessa ja adsorptiossa ei näitä sekundääriepäpuhtauksia synny.

Aineisto ja menetelmät

Tutkimuskohteet ja -asetelma

Tutkimus toteutettiin kuudessa kuopiolaisessa alakoulussa, yhteensä 29 luokkahuoneessa vuosina 2021–2022. Koulurakennusten tietoja on esitetty taulukossa 1. Tutkimukseen valittiin mukaan 26 tavallista luokkahuonetta, 1 tavallinen luokka, jossa järjestettiin myös tekstiilikäsityön opetusta sekä 2 teknisen käsityön luokkaa.

Tutkimuksessa toteutettiin jokaisessa luokkahuoneessa kolme peräkkäistä kahden viikon mittaista tutkimusjaksoa: 1) ilmanpuhdistin oli luokkahuoneessa, mutta ei käynnissä (EI), 2) ilmanpuhdistin käytössä suodattaen ilmaa (ON) ja 3) ilmanpuhdistin oli käynnissä ja kierrätti ilmaa, mutta puhdistimissa ei ollut suodatimia paikallaan (SHAM). SHAM-jakson aikana ilmamäärä asetettiin niin, että laitteen aiheuttama äänitaso vastasi ON-jaksoa, jotta nämä kaksi vaihetta olivat sokkoutettuja ja tilassa oleskelevat eivät tienneet, milloin puhdistimissa oli suodatimet paikoillaan. SHAM-jakson aikana toisesta ilmanpuhdistinmallista poistettiin aktiivihiihi- ja HEPA-suodatin, mutta esisuodatin oli paikallaan. Toisen ilmanpuhdistinmallin esisuodatin oli SHAM-jakson aikana viilletynä ilmanpuhdistimessa. Ilmamäärät ON- ja SHAM-jaksojen aikana on esitetty liitteen 1 taulukossa L1. Koululla D SHAM-jakso toteutettiin vain yhden viikon mittaisena ja ennen ON-jaksoa, koska kunta-alan lakon vuoksi kouluilla ei järjestetty opetusta 3.–9.5.2023 välisenä aikana.

Luokkien käyttöasteen seuraamiseksi opettajia pyydettiin kirjaamaan päivittäin ylös ensimmäisen oppitunnin alkamisaika, oppituntien lukumäärä luokkahuoneessa, oppilaiden määrä luokkahuoneessa (keskiarvo), ikkunatuuletuksen määrä minuutteina sekä viimeisen oppitunnin päättymisaika (liite 1, taulukko L1).

Ilmanpuhdistimet

Ilmanpuhdistimien mitoituksessa käytettiin Kuopion kaupungin yleisesti käyttämää ilmanpuhdistimien mitoitusperiaatetta kyseisillä ilmanpuhdistinmalleilla. Tutkimusluokissa käytetty ilmanpuhdistimen ilmamäärä oli 20–50 % perusilmanvaihdon määrästä. Tutkimuksessa käytettiin kahden eri valmistajan ilmanpuhdistimia, joiden toiminta perustui HEPA-suodatukseen ja adsorptiotekniikkaan (aktiivihiihisuodatin). Ilmanpuhdistimissa oli käytössä esisuodatin ja lisäksi joko E11- tai H13-hiukkassuodatin. Aktiivihiihien määrä vaihteli ilmanpuhdistimissa 2–10 kg välillä. Ilmanpuhdistimet asetettiin luokkahuoneissa mahdollisimman keskeisille paikoille, yleensä lähelle tuloilmaventtiileitä ja mahdollisimman kauas poistoilmaventtiileistä. Puhdistimen vaatiessa ilmapirran suuntausta se suunnattiin kohti aluetta, jossa suurin osa oppilaista istui. Lisäksi sijoittelussa jouduttiin huomioimaan sähkön saatavuus, puhdistimesta aiheutuva melu ja mahdollinen näköeste lähimmille oppilaille. Myös voimakasta ilmapirtta suoraan kohti lähimpiä oppilaita pyrittiin välttämään. Kahteen luokkahuoneeseen (34 ja 40) sijoitettiin tutkimuksessa kaksi ilmapuhdistinta ja näitä tuloksia verrataan tilanteeseen, jossa oli käytössä vain yksi ilmanpuhdistin. Ilmanpuhdistimissa käytetty ilmamäärä on esitetty liitteessä 1 taulukossa L1.

Sää

Tutkimuksessa hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen Kuopion Savilahden havaintoaseman säädataa. Hyödynnetyt havaintosuureet olivat lämpötila (°C), ilman suhteellinen kosteus (%), tuulen nopeus (m/s), sadessumma (mm) sekä lumen syvyys (cm). Lämpötilalle, ilman suhteelliselle kosteudelle sekä tuulen nopeudelle laskettiin mediaanit tutkimusjaksoittain (EI/ON/SHAM). Sademäärälle laskettiin summa ja lumen syvyydelle keskiarvo vastaaville jaksoille.

Taulukko 1. Tutkimuskoulujen perustiedot.

Koulu	Rakennusvuosi	Runkomateriaali	Rakennusten lukumäärä	Rakennuksen pinta-ala ja kerrosten lukumäärä	Ilmanvaihdotekniikka/suodatus	Mahdollinen sisäilmatekijä/ valintakriteeri /	Kuvaus ympäristöstä	Tutkimusjakso
A	1904 (laajennus 1940 (3. krs))	Tiili, betoni	1	3123 m ² (huoneala), 3 krs + ullakko ja kellari-kerros	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto jatkuvatoiminen, CO ₂ -ohjaus ohitettu / ISO ePM1 60 %	Koulu sijaitsee kaupungin keskustassa, liikenneympäristö	Kaupungin keskusta, vieressä puisto	01.09.2021–13.10.2021
B	1986	Betoni	1	4944 m ² , 2 krs	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto (käynnistys 2 h ennen ja sammutus 2 h rakennuksen käytön jälkeen) / ISO ePM1 60 %	Mahdollinen vauriokohde	Koulun ympärillä kerrostaloja, lähiympäristössä myös pientaloja sekä runsaasti viheralueita	26.10.2021–9.12.2021
C	1967	Betoni, tiili	1	2419 m ² (huoneisto-ala), 2 krs + ullakko ja kellarikerros	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto (käynnistys 2 h ennen ja sammutus 2 h rakennuksen käytön jälkeen) / ePM1 60 %	Koulu sijaitsee pientaloalueella, jossa tutkimusjakson aikana puun pienpolttoa	Pientaloalue	19.01.2022–02.03.2022
D	1954	Betoni	1	4472 m ² (huoneisto-ala), 4 krs + ullakko ja kellarikerros	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, jatkuvatoiminen/ ISO ePM1 60 %	Koulu sijaitsee pientaloalueella ja liikenneympäristö	Pientalo- ja kerrostaloalue, liikenneympäristö	20.04.2022–01.06.2022
E	1882 (peruskorjaus 1979), toinen rakennus 1987	Puu	2	418 m ² ja 905 m ² , 1 krs	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto (käynnistys 2 h ennen ja sammutus 2 h rakennuksen käytön jälkeen) / ISO ePM1 60 %	Vanha rakennus, haja-asutusalue	Suuri hiekkapiha, metsäympäristö, pientaloalue	31.08.2022–11.10.2022
F	2003	Betoni, tiili	1	5761 m ² , 3 krs + kellari-kerros	Koneellinen poisto- ja tuloilmanvaihto (käynnistys 2 h ennen ja sammutus 2 h rakennuksen käytön jälkeen) / ISO ePM1 60 %	Liikenneympäristö	Pientaloalue	26.10.2022–02.12.2022

Hiukasmaisten epäpuhtauksien määrittäminen

PM_{2.5} ja PM₁₀

Tutkimuksessa määritettiin pienhiukkasten (PM_{2.5}) ja hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) pitoisuudet luokkahuoneiden ilmassa sekä ulkoilmassa käyttäen gravimetristä analyysiä. Mittausmenetelmässä ilmaa imettiin pumpulla kokoluokittelevan (PM_{2.5} tai PM₁₀) Harvard-impaktorin (Air Diagnostics and Engineering Inc., Naples, Maine, Yhdysvallat) läpi esipunnitulle 37 mm Fluoropore FSLW03700-suodattimelle (Merck KGaA, Darmstadt, Saksa). Pumpuina käytettiin sisällä luokkahuoneissa mallia Air diagnostics Indoor Pump (Air Diagnostics and Engineering Inc., Naples, Maine, Yhdysvallat) ja ulkona mallia ASP-100R (Wageningen yliopisto, Alankomaat). Pumpun virtaus säädettiin mittausta aloitettaessa välille 9,5–10,5 l/min ja tarkistettiin mittausta lopetettaessa, virtauksen mittaukseen käytettiin Mesalabs Defender 510-virtauskalibraattoreita (Mesa Laboratories Inc., Lakewood, Colorado, Yhdysvallat). Näytteenottokorkeus sisällä oli keskimäärin 1,1 m ja ulkona 3,2 m. Sisällä näytteenottopiste sijoitettiin siten, että se ei ollut tuloilmaventtiilien tai ilmanpuhdistimien välittömässä läheisyydessä. Pumpujen käyntiajaksi määritettiin viikkokellolla arkipäivät välillä klo 8–16 ja käyntiaikaa seurattiin käyntiaikalaskurilla.

Suodatin punnittiin ennen näytteenottoa ja uudelleen näytteenoton jälkeen olosuhdevakioidussa (T, RH) vaakahuoneessa käyttäen Mettler Toledo XP6 (Mettler-Toledo International Inc, Columbus, Ohio, Yhdysvallat) ultramikrovaakaa. Punnitusten välissä puhtaita suodattimia säilytettiin jääkaapissa ja kerättyjä suodattimia pakastimessa. Säilytyksessä ja kuljetuksessa suodattimet oli sijoitettu suodatinkehyksissä petrimaljoihin ja suljetut petrimaljat uudelleensuljettavaan muovipussiin. Kuljetuksissa suodattimet olivat kylmälaukussa yhdessä kylmäpatruunan kanssa.

Varsinaisten gravimetristen suodatinnäytteiden lisäksi kerättiin kenttänollanäytteitä n. 10 % suodatinten kokonaismäärästä. Kenttänollanäytteet kerättiin erikseen pienhiukkasille ja hengitettävälle hiukkasille. Kenttänollanäytesuodattimia käsiteltiin muuten vastaavasti kuin varsinaisia suodattimia, mutta niiden läpi ei imetty näyteilmaa. Kenttänollanäytteiden mediaanimassa tutkimuksen aikana oli PM_{2.5}:lle 5 µg ja PM₁₀:lle 4 µg. Koska massassa ei ollut suurempaa eroa kenttänollanäytteet huomioitiin tuloksia laskettaessa yhtenä ryhmänä.

Suodattimen sähköinen varaus poistettiin juuri ennen punnitsemista käyttäen säteilylähdettä sekä Ion-Care Stat-Pen-varauksenpoistajaa (Ion-Care AB, Vellinge, Ruotsi). Ennen keräystä ja keräyksen jälkeen punnittujen massojen erotuksena, kenttänollanäytteiden massa huomioiden, saatiin hiukkasmassa suodatinnäytteessä. Lisäksi menetelmässä määritettiin suodatetun ilmamäärän tilavuus hyödyntäen pumpun alku- ja loppuvirtauksen keskiarvoa sekä käyntiaikalaskuria. Jakamalla kerätty hiukkasmassa suodatetun ilmamäärän tilavuudella saatiin laskettua hiukkasten pitoisuus mittausaikana.

Gravimetrisen analyysin lisäksi yhden luokkahuoneen/koulu sekä koulujen ulkoilman hiukkaspitoisuudet määritettiin jatkuvatoimisilla EN16450-standardin täyttävillä Palas Fidas 200-hiukkasmittareilla (Palas GmbH, Karlsruhe, Saksa), jotka mittaavat samanaikaisesti usean eri hiukkaskokoluokan (mm. PM_{2.5} ja PM₁₀) hiukkasia. Valitettavasti tutkimuksen loppua kohden käytössä olleet laitteet vikaantuivat ja jatkuvatoimisista mittauksista jouduttiin tutkimuksen loppuvaiheessa luopumaan.

Reflektanssi / absorptiokerroin

Gravimetristä analyysiä varten kerättyistä PM_{2.5}-suodattimista mitattiin loppupunnituksen jälkeen reflektanssi standardin ISO9835:1993 mukaisesti käyttäen EEL M43m-reflektometriä (Diffusion Systems Ltd., Lontoo, Iso-Britannia). Mitatuista suodatinkohtaisista reflektansseista laskettiin absorptiokerroin (ABS), joka kuvaa suodattimelle kerättyjen hiukkasten mustuutta.

Kaasumaisten epäpuhtauksien määrittäminen

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) mitattiin jokaisella tutkimuskoululla 1–4 luokkahuoneesta, yhteensä 12 luokasta. Jokaisella tutkimusjaksolla kerättiin lisäksi näyte ulkoa koulun pihalta. Näytteen keräysaika oli 7 vuorokautta ja näytteenotto tapahtui passiivisella radiello®-keräimellä (ICS Maugeri, Italia) (BTEX- ja VOC-yhdisteille tarkoitettu keräyskasetti, CS₂-desorptio, ø5,8 mm) jokaisen tutkimusjakson jälkimmäisellä viikolla. Luokkahuoneissa keräin pyrittiin asettamaan opettajan pöydän läheisyyteen opettajan hengitysvyöhykettä vastaavalle korkeudelle. Jokaisella tutkimusjaksolla otettiin myös yksi kenttänollanäyte; keräyskasetin säilytysputken korkkia käytettiin lyhyesti auki luokkahuoneessa. Jokaista keräyskasettilaatikkoa kohti otettiin lisäksi yksi nollanäyte.

Näytteenoton jälkeen passiiviset keräimet esivalmisteltiin analysoitavaksi kemiallisen desorption avulla käyttämällä hiilidisulfidia (CS₂). Saadut uutteen ruiskutettiin kaasukromatografiin (GC), joka oli varustettu ei-polaarisella kolonnilla ja massaspektrometrillä (MS). MS-detektiolla pystytään samanaikaisesti tekemään skannaus ja valittu ionivalvonta (SIM), jonka avulla keräimeen absorboituneet epäpuhtaudet pystytään tunnistamaan yksiselitteisesti. Orgaanisten yhdisteiden tunnistaminen perustuu toisaalta retentioaikaan ja toisaalta ominaisiin häiriöttömiin m/e-ioneihin. Kvantitointi perustuu 2-fluoritolueenin käyttöön sisäisenä standardina vertaamalla määritettävän haihtuvan orgaanisen yhdisteen ja sisäisen standardin tyypillisimpien ionien integroitua piikin pintaa. VOC-kokonaiskonsentraatio laskettiin kokonais-ionikromatogrammin huippupinnan perusteella täydestä pyyhkäisytalasta (TOC) ja käyttämällä sisäisen standardin (2-fluoritolueeni) vastetta. Lisäksi 17 yleisimmän sisäilmassa esiintyvän tai mahdollisia terveysvaikutuksia aiheuttavan yksittäisten VOC-yhdisteiden pitoisuudet laskettiin. Lisäksi tarkasteltiin semikvantitatiivisesti korkeiden TVOC-pitoisuuksien taustalla olevia yksittäisiä yhdisteitä, jotka eivät olleet kalibrointisuoralla.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksia verrattiin asumisterveysasetuksen toimenpiderajoihin sekä saksalaisiin terveysperusteisiin RW I ja II ohjearvoihin (Umwelt Bundesamt, 2023). Saksalaiset ohjearvot valittiin vertailuarvoksi koska Suomessa ei ole olemassa terveysperusteisia ohjearvoja VOC-yhdisteille, ja lisäksi luokkahuoneista mitattuja pitoisuuksia ei voida suoraan verrata asumisterveysasetuksen tolueenivasteella määritettyihin pitoisuuksiin.

Hiilidioksidi

CO₂-pitoisuutta määritettiin luokista jatkuvatoimisesti käyttäen TSI Velocicalc 9565-monitoimimittaria (TSI Inc., Shoreview, Minnesota, Yhdysvallat). Mittari oli varustettu kaasusondilla (CO₂) pitoisuuksien määrittämistä varten. Kaasusondi kalibroidtiin aina mittausta aloitettaessa (alkavan tutkimusjakson alussa) nolla- ja kalibrointikaasuilla tutkimusluokissa. CO₂-nollakaasuna käytettiin 5 ppm CO/ilmaseosta ja kalibrointikaasuna 1000 ppm CO₂/ilmaseosta (Air Products and Chemicals Inc., Allentown, Pennsylvania, Yhdysvallat).

Mikrobiologisten epäpuhtauksien määrittäminen

Aktiivinen ilmanäyte

Ultrasonic Personal Air Sampler (UPAS) -keräimellä (Access Sensor Technologies, Yhdysvallat) kerättiin aktiivisesti ilmanäytteet kolmesta luokkahuoneesta jokaisen tutkimusjakson jälkimmäisellä viikolla (7 vrk keräysaika). Keräin asetettiin luokkahuoneissa opettajan pöydän läheisyyteen opettajan hengitysvyöhykettä vastaavalle korkeudelle. Keräimessä käytettiin Fluoropore™ 3.0 µm PTFE Membrane-suodattimia (Millipore Corporation, Yhdysvallat), PM₁₀-kokoisten hiukkasten keräämiseen soveltuvia osia sekä tilavuusvirtaa 2,0 l/min. Jokaisen keräysjakson jälkeen otettiin yksi nollanäyte; puhdistettuun keräimeen asetettiin laboratoriossa suodatin, jonka annettiin olla keräimessä noin viikon ajan ilman, että keräintä käynnistettiin.

Ennen laboratorioanalyysijä suodattimia säilytettiin -20°C lämpötilassa. Kerätyistä näytteistä eristettiin DNA käyttäen Chemagic DNA plant -kittiä (PerkinElmer chemagen Technologie GmbH, Saksa) ja

KingFisher™ DNA-eristysautomaattia (Thermo Fisher Scientific, Inc., Yhdysvallat). Näytteistä määritettiin qPCR-menetelmällä mikrobipitoisuudet (soluekvivalenttia/m³) seuraavista mikrobiryhmistä: sienten kokonaispitoisuus (Unifungi), *Penicillium/Aspergillus* spp. (Haugland ja Vesper 2002), Gram-positiiviset bakteerit ja Gram-negatiiviset bakteerit (Kärkkäinen ym. 2010).

Laskeutunut pöly

Laskeutunutta pölyä kerättiin mikrobiologisten epäpuhtauksien määrittämistä varten sekä jokaisesta tutkimusluokasta että ulkoa koulujen pihalta jokaisena tutkimusjaksona. Keräysaika oli koko tutkimusjakso, eli 14 vuorokautta. Laskeutunutta pölyä kerättiin kuudelle rinnakkaiselle petrimaljalle, jotka sijoitettiin luokkahuoneissa 177–230 cm korkeudelle, esimerkiksi kaappien tai hyllyjen päälle kauemmas lämmönlähteistä ja ilmavirroista. Ulkona keräyskorkeus oli 280 cm. Kenttänotat otettiin jokaisella tutkimusjaksolla yhdestä luokkahuoneesta; kuusi parafilmillä suljettua maljaa asetettiin luokkahuoneissa muiden maljojen tapaan kaappien tai hyllyjen päälle tutkimusjakson ajaksi.

Tutkimusjakson päätteeksi maljat toimitettiin laboratorioon, jossa maljat säilytettiin huoneenlämmössä ennen esikäsittelyä. Maljat pyyhittiin kahden viikon kuluessa laboratorioon saapumisesta kahdella kostutetulla (steriili vesi + 0,05 % Tween 20) FLOQSwabs®-puikolla (Copan, Yhdysvallat). Yhdellä puikolla pyyhittiin kolme maljaa, ja puikoista toinen varattiin DNA-eristykseen ja toinen RNA-eristykseen. Lisäksi laboratoriossa tehtiin myös laboratorionollanäytteet, jotka käsiteltiin samalla tavalla. Näytteitä säilytettiin -80°C lämpötilassa ennen analysointia. RNA-eristys pölynäytteistä tehtiin Chemagic Viral300 DNA/RNA -kitillä ja Chemagic 360 -nukleiinihappoeristyslaitteella. DNA-eristykseen käytettiin aktiivisten ilmanäytteiden tavoin Chemagic DNA plant -kittiä ja KingFisherin DNA-eristysautomaattia. Eristetystä DNA:sta määritettiin qPCR-menetelmällä mikrobipitoisuudet (soluekvivalenttia/m²/päivä) seuraavista mikrobiryhmistä: sienten kokonaispitoisuus (Unifungi), *Penicillium/Aspergillus* spp. -ryhmä (Haugland ja Vesper 2002), Gram-positiiviset bakteerit ja Gram-negatiiviset bakteerit (Kärkkäinen ym. 2010). SARS-CoV-2 virusanalyysi tehtiin eristetystä RNA:sta syntetisoidusta cDNA:sta (Vilo SuperScript™ IV VILO™ Master Mix, Invitrogen) kuten aiemmin kuvattu (Lu ym. 2020). Sienten ja bakteerien qPCR-sovellukset analysoitiin käyttäen QuantStudio 6 Flex Real-Time PCR System laitteistoa (Applied biosystems) ja virukset käyttäen QuantStudio 6 Pro Real-Time PCR System laitteistoa (Applied Biosystems).

Melumittaukset

Melumittaus suoritettiin käyttäen Norsonic NOR150-äänitasomittaria (Norsonic AS, Tranby, Norja) varustettuna saman valmistajan NOR1451-tuulisuojalla. Äänitasomittari kalibroitiin luokan 1 äänitasokalibraattorilla ennen mittausten alkua. Mittaukset suoritettiin neljässä pisteessä (ilmanpuhdistinta lähimmän oppilaan istumapaikka, kauimmaisen oppilaan istumapaikka, 1 m laitteen edessä, opettajan pöydän takaa) ilmanpuhdistimen ollessa käynnissä ja kolmessa pisteessä (ilmanpuhdistinta lähimmän oppilaan istumapaikka, kauimmaisen oppilaan istumapaikka, opettajan pöydän takaa) ilmanpuhdistimen ollessa pois päältä. Mittauskorkeus mittauspisteissä oli 1 m, paitsi opettajan pöydän takana 1,5 m. Ilmansaasteiden mittalaitteet luokkahuoneessa sammutettiin melumittausten ajaksi. Mittauksia varten äänitasomittari kiinnitettiin kolmijalkaan, mikrofonin korkeus säädettiin vastaamaan haluttua korkeutta ja mikrofoni suunnattiin kohti ilmanpuhdistinta. Useamman ilmanpuhdistimen luokkahuoneessa suuntaus tehtiin kohti lähintä ilmanpuhdistinta. Mittausten kesto jokaisessa mittauspisteessä oli 1 minuutti. Minuutin ajalta laskettiin A-painotettu keskiäänitaso L_{Aeq} .

Ilmanvaihto, lämpötila, suhteellinen kosteus sekä paine-ero

TSI Velocicalc 9565 -monitoimimittarilla mitattiin luokkatilojen sisäilman hiilidioksidipitoisuuden lisäksi lämpötilaa, suhteellista ilmankosteutta sekä paine-eroa rakennuksen vaipan yli ulkoilmaan verrattuna.

Paine-eromittauksia varten laitteen monitoimimittariin liitettiin 40 cm kapillaariputki yhdysletkuineen. Paine-eromittaus kalibroitiin nollaamalla kapillaariputkesta ja laiteyksiköistä mitattujen paineiden erotus ennen kapillaariputken vetämistä ikkunan tiivisteiden välistä rakennuksen vaipan ulkopuolelle. Kalibrointi

toistettiin kahden mittausviikon välein. Negatiivinen paine-ero tarkoittaa sitä, että sisäilma on alipaineinen ulkoilmaan verrattuna.

Paine-eromittauksen vuoksi monitoimimittari oli sijoitettava lähelle ikkunoita, usein ikkunalaudalle. Sijoituspaikasta johtuen laitteella samanaikaisesti mitatut lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus eivät välttämättä kuvaa todellista tilannetta muualla luokkahuoneessa, vaan mitattuihin arvoihin vaikuttavat veto ikkunoista sekä ikkunoiden alle sijoitetut lämpöpatterit.

Luokkien ilmanvaihtoa kuvaavina tulo- ja poistoilmamäärinä käytettiin Kuopion kaupungin tilapalveluilta saatuja luokkahuoneiden mittausraporttien tietoja. Tulo- ja poistoilmamäärien mittaukset toteutettiin myös itse käyttäen TSI Velocicalc 9565 monitoimimittaria tai Testo-siipipyöranemometriä (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Saksa). Omien mittauksien tuloksia verrattiin Kuopion Tilapalveluilta saatuihin luokkahuoneiden ilmanvaihtotietoihin ja huomattiin, että tilastollisesti tulokset korreloivat keskenään. Koska käytettävissä olevilla mittauslaitteistoilla ei saatu mitattua kaikkia luokkahuoneita, päädyttiin käyttämään kattavampia Kuopion Tilapalveluiden IV-tietoja.

Pintapölykertymä

Pintapölykertymää mitattiin BM Dust Detector® -laitteella (BM Environmental Engineering, Alankomaat) luokkatiloissa 175–230 cm korkeudelle sijoitetuilta petrimaljoilta geeliteipin avulla. Maljat sijoitettiin luokkahuoneissa siten, ettei niiden välittömässä läheisyydessä ollut ilmanvaihtoventtiileitä, ovia tai ikkunoita. Kahden viikon näytteenkeräys ja pölykertymän mittaus suoritettiin jokaisessa tutkimusluokassa kaikkina tutkimusjaksoina (EI-, ON- ja SHAM-jaksot) ja näytteet otettiin kahdelta rinnakkaiselta maljalta.

Pintapölykertymän määrittäminen BM Dust Detector® -laitteella perustuu geeliteippiin tarttuneiden hiukkasten peittämän pinta-alan mittaamiseen. Laite mittaa pinta-alan laservalon läpäisevyyden vähentymisen kautta, ja tulos ilmoitetaan prosentteina. Näyte otettiin asettamalla geeliteippi tutkittavalle pinnalle, tässä tutkimuksessa petrimaljalle, ja painamalla geeliteippiä BM Dust Roller -työkalan avulla pintaa vasten. Tämän jälkeen geeliteippi irrotettiin pinnalta ja asetettiin laitteeseen mitattavaksi.

Siivouskysely

Tutkimuskoulujen siivouksesta vastaavalle Servica Oy:lle lähetettiin kysely, jossa selvitettiin muun muassa mahdollisia muutoksia siivouksessa tutkimuksen aikana. Tällä haluttiin varmistaa, että muutokset siivouksessa eivät vaikuttaisi mittaustuloksiin.

Oire- ja olosuhdepäiväkirja

Tutkimukseen osallistuvat henkilöt täyttivät sisäympäristön koettuja oire- ja olosuhdehaittoja selvittävää päiväkirjaa jokaisena arkipäivänä kaikkien kolmen tutkimusjakson ajan. Osallistujia ohjeistettiin täyttämään päiväkirjaa mahdollisuuksien mukaan päivittäin koulussa viimeisen oppitunnin lopussa. Oire- ja olosuhdepäiväkirjan vastausprosentti oli oppilaiden osalta 32 % (n=209) ja opettajien osalta 86 % (n=24). Oppilaiden huoltajilta pyydettiin suostumus tutkimukseen osallistumiseen.

Eettinen näkökulma

Tutkimuksella on puolto THL:n tutkimuseettiseltä työryhmältä. Kaikkia kerättyjä tietoja ja tutkimustuloksia käsitellään luottamuksellisesti tietosuojasäännösten sekä Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen ohjeiden mukaisesti. Saatua tietoa käytetään tieteelliseen tutkimustarkoitukseen siten, ettei kenenkään henkilöllisyys paljastu. Tutkimus toteutettiin niin, että siitä ei aiheutunut osanottajille haittaa. Tutkimukseen ei sisällynyt merkittäviä terveydellisiä riskejä tai haittoja.

Tilastolliset analyysit

Oirepäiväkirjan oireet jaettiin kolmeen kategoriaan niiden lääketieteellisen ryhmittelyn mukaan: alahengitystie-, ylähengitystie- ja muut oireet. Jokainen yhtä oiretta koskeva vastaus pisteystettiin yhdestä neljään: ei ollenkaan = 1, vähän = 2, melko paljon = 3 ja paljon = 4 ja kaikki oireet kussakin kategoriassa laskettiin yhteen ja yhdistettiin alempien, ylempien ja muiden oireiden osalta. Oirepistesummamuuttujat saivat siten arvot välillä 5–20, 4–16 ja 4–16 alempien hengitysteiden, ylähengitysteiden ja muiden oireiden osalta. Koetut olosuhdehaitat jaettiin kahteen luokkaan “Ei (luokat: ei ja vähän)” ja “Kyllä (luokat melko paljon ja paljon)” ja vastauksista tehtiin ristiintaulukointi tutkimusjakson kanssa. Tilastollista testausta varten asetimme vähimmäisvaatimukseksi vastaukset vähintään kolmelta päivältä jokaiselta oppilaalta kussakin interventiovaiheessa.

Tilastollisena menetelmänä oire- ja olosuhdepäiväkirjojen, kaasumaisten, hiukkasmaisten ja mikrobiologisten epäpuhtauksien analyyseissä käytettiin yleistettyjä estimointiyhtälöitä (GEE, generalized estimation equations). Analyysit suoritettiin GENMOD-proseduurilla käyttäen Gamma-jakaumaa ja tyypiltään vaihdettavaa (exchangeable) korrelaatorakennetta. Hiilidioksididata oli normaalijakautunut, joten se analysoitiin GENMOD-proseduurilla käyttäen normaalijakaumaa ja ero tutkimusjaksojen välillä testattiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Mallissa selittävinä tekijöinä käytettiin koulua ja tutkimusjaksoa (ilmanpuhdistin ei käynnissä, ilmanpuhdistin käynnissä ja sham-jakso). Oire- ja olosuhdepäiväkirjojen analyyseissä käytettiin toistettujen mittausten muuttujana oppilaan tai opettajan ID-tunnusta ja muissa analyyseissä luokkatunnusta.

Ei-parametrinen Kruskal-Wallis -testiä käytettiin selvittämään eroa eri tutkimusjaksojen aikaisissa epäpuhtauspitoisuuksissa, lukuun ottamatta hiilidioksidia. Eri tuloilmamääräluokkien epäpuhtauspitoisuuksien erot analysoitiin Mann-Whitney U -testillä. Pintapölykertymämäärityksessä käytettyjen rinnakkaisten maljojen välistä korrelaatiota tarkasteltiin käyttämällä ei-parametrinen Spearmanin korrelaatiotestiä. Tilastolliset analyysit tehtiin käyttämällä SAS Enterprise Guide 8.3 -tilasto-ohjelmaa (SAS Institute Inc., Cary, NC, Yhdysvallat).

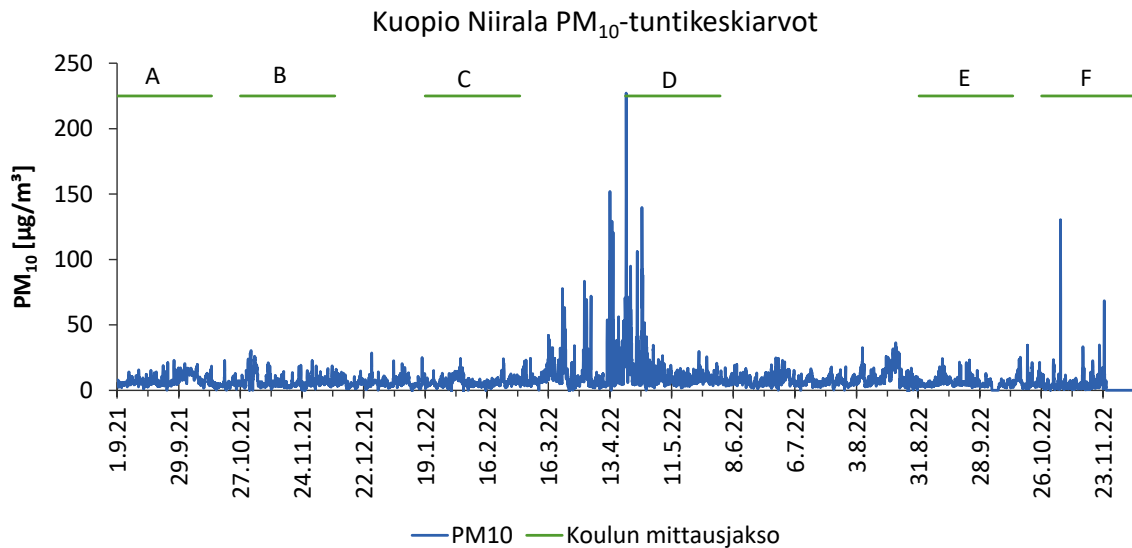
Tulokset

Hiukkasmaiset epäpuhtaudet

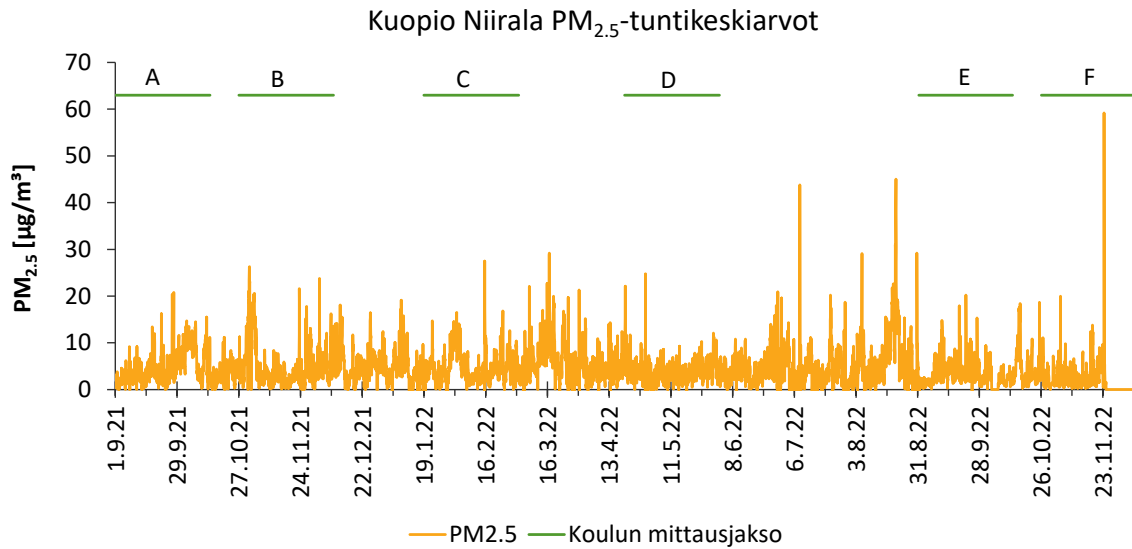
Mittausjaksojen ajankohdat ja hiukkaspitoisuuksien ajallinen vaihtelu ulkoilmassa

Mittaukset tehtiin 1.9.2021–7.12.2022 ja mittausten tarkempi ajoittuminen on esitetty kuvissa 1 ja 2. Sääolosuhteet ja ulkoilman hiukkaspitoisuudet olivat erilaiset eri koulujen mittausten aikana, koska mittauksia pysytettiin tekemään vain yhdessä koulussa kerrallaan. Tutkimusjaksokohtaiset säätiedot on esitetty liitteessä 2 taulukossa L1. Tutkimusjaksoista käytetään lyhenteitä EI (ilmanpuhdistin on luokassa, mutta ei käynnissä), ON (ilmanpuhdistin käytössä suodattaen ilmaa) ja SHAM (ilmanpuhdistin on käynnissä ja kierrättää ilmaa, mutta puhdistimissa ei ole suodattimia paikallaan).

Koulujen ulkopuolelta on tiedossa vain kunkin tutkimusjakson keskimääräiset hiukkaspitoisuudet, joten kuvissa 1 ja 2 on esitetty pitoisuuksien tuntivaihtelu Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausverkostoon kuuluvalla Niiralan mittausasemalla. Hengitettävien hiukkasten pitoisuusvaihtelussa erottuu erityisesti katu-pölykausi maaliskuusta huhtikuuhun. Koulun D ensimmäinen tutkimusjakso (EI-jakso) ajoittuu tälle kaudelle.



Kuva 1. PM₁₀-pitoisuuden vaihtelu Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausasemalla Niiralassa koulumittausten aikana. Koulun D mittaus ajoittuu osittain kevätpölykauteen, jolloin karkeiden hengitettävien hiukkasten pitoisuudet (kooltaan 2,5–10 µm) ovat suuria etenkin vilkasliikenteisillä alueilla. (Data <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>; 15.3.2023)



Kuva 2. PM_{2.5}-pitoisuuden vaihtelu Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausasemalla Niiralassa koulumittausten aikana. (Data 15.3.2023)

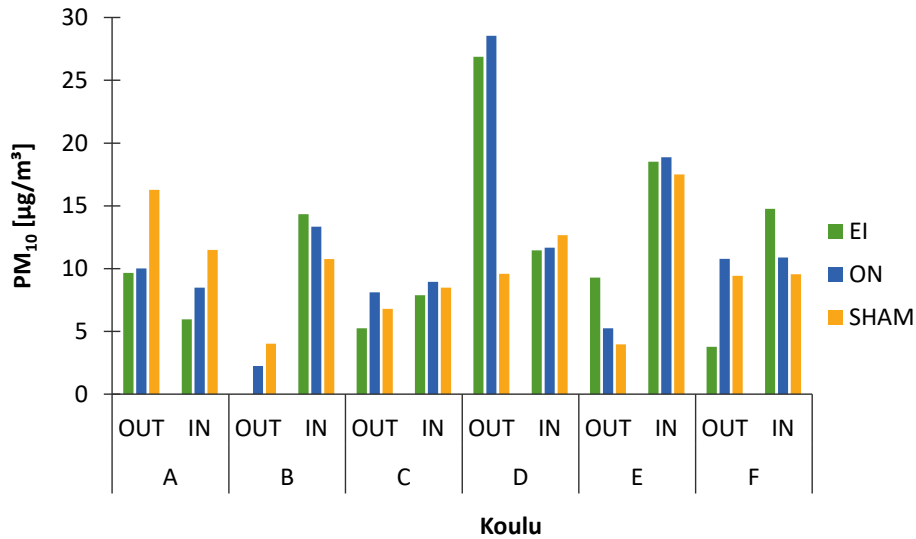
Keskimääräiset hiukkaspitoisuudet ulko- ja sisäilmassa kouluittain

Sisäilman keskimääräinen PM₁₀-pitoisuus oli suurin koulussa E (18 µg/m³), kun muissa kouluissa se oli 8–13 µg/m³ (kuva 3). Ulkoilman keskimääräinen pitoisuus oli 3–12 µg/m³ muissa kouluissa, mutta 22 µg/m³ koulussa D. Jaksokohtaisesti tarkasteltuna PM₁₀-pitoisuus oli muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta sisäilmassa suurempi kuin ulkoilmassa, mikä viittaa sisälähteisiin. Vain koulussa F sisäilman PM₁₀-pitoisuus oli selvästi pienempi ON-jaksolla kuin EI-jaksolla.

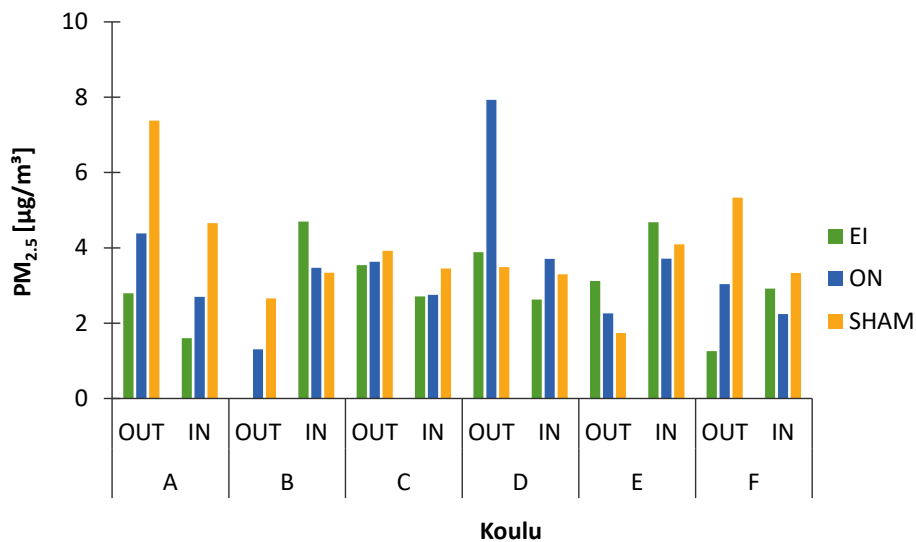
Päinvastoin kuin PM₁₀-hiukkasilla, PM_{2.5}-pitoisuus oli yleensä pienempi luokkahuoneissa kuin koulun ulkopuolella (kuva 4), mutta tutkituissa kouluissa PM_{2.5}-pitoisuudet olivat hyvin pieniä sekä ulkona (keskimäärin 4 µg/m³) että sisällä (keskimäärin 3 µg/m³). Koulujen välillä ei ollut suuria eroja keskimääräisessä sisäilman PM_{2.5}-pitoisuudessa.

Karkeiden hengitettävien hiukkasten (PM₁₀ miinus PM_{2.5}) keskimääräinen pitoisuus sisäilmassa oli koulussa E selvästi suurempi (14 µg/m³) kuin muissa kouluissa (5–9 µg/m³) (kuva 5). Ulkoilmassa keskimääräinen pitoisuus oli 1–7 µg/m³ muissa kouluissa, mutta 17 µg/m³ koulussa D. Jaksokohtaisesti tarkasteltuna PM_{10-2.5}-pitoisuus oli muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta sisäilmassa suurempi kuin ulkoilmassa. Vain koulussa F pitoisuus oli sisäilmassa selvästi pienempi ON-jaksolla kuin EI-jaksolla.

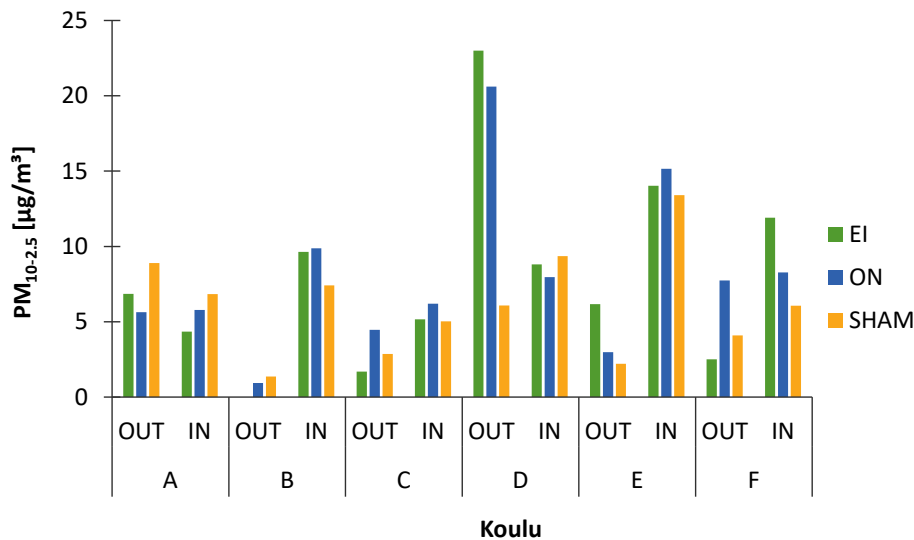
Hankkeessa kerätyistä pienhiukkasnäytteistä määritettiin suodattimien mustuus eli reflektanssi ja siten mustan hiilen pitoisuutta kuvaava absorptiokerroin (ABS). Koulujen välillä ei ollut suuria eroja keskimääräisessä sisäilman absorptiokertoimessa (kuva 6). Kaikissa kouluissa keskimääräinen ABS oli aina pienempi luokkahuoneissa kuin koulun ulkopuolella.



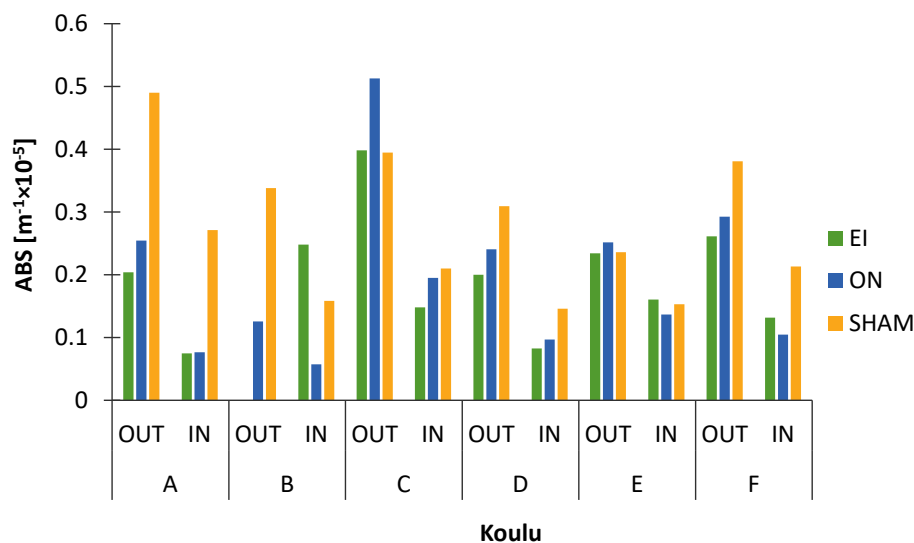
Kuva 3. Hengitettävien hiukkasten keskiarvopitoisuus koulun pihalla (OUT) ja luokkahuoneissa (IN) eri tutkimusjaksojen aikana. Tutkimusjakso oli 2 viikkoa paitsi koulun D SHAM-jakso, joka oli viikon mittainen ja tehtiin poikkeuksellisesti EI-jakson jälkeen. Koulun D EI-jakso, ajoittui kevätpölykaudelle.



Kuva 4. Pienihiukkasten keskiarvopitoisuus koulun pihalla (OUT) ja luokkahuoneissa (IN) eri tutkimusjaksojen aikana. Tutkimusjakso oli 2 viikkoa paitsi koulun D SHAM-jakso, joka oli viikon mittainen ja tehtiin poikkeuksellisesti EI-jakson jälkeen.



Kuva 5. Karkeiden hengitettävien hiukkasten keskiarvopitoisuus koulun pihalla (OUT) ja luokkahuoneissa (IN) eri tutkimusjaksojen aikana. Tutkimusjakso oli 2 viikkoa paitsi koulun D SHAM-jakso, joka oli viikon mittainen ja tehtiin poikkeuksellisesti EI-jakson jälkeen. Koulun D tutkimusjaksot ajoittuivat kevätpölykaudelle.

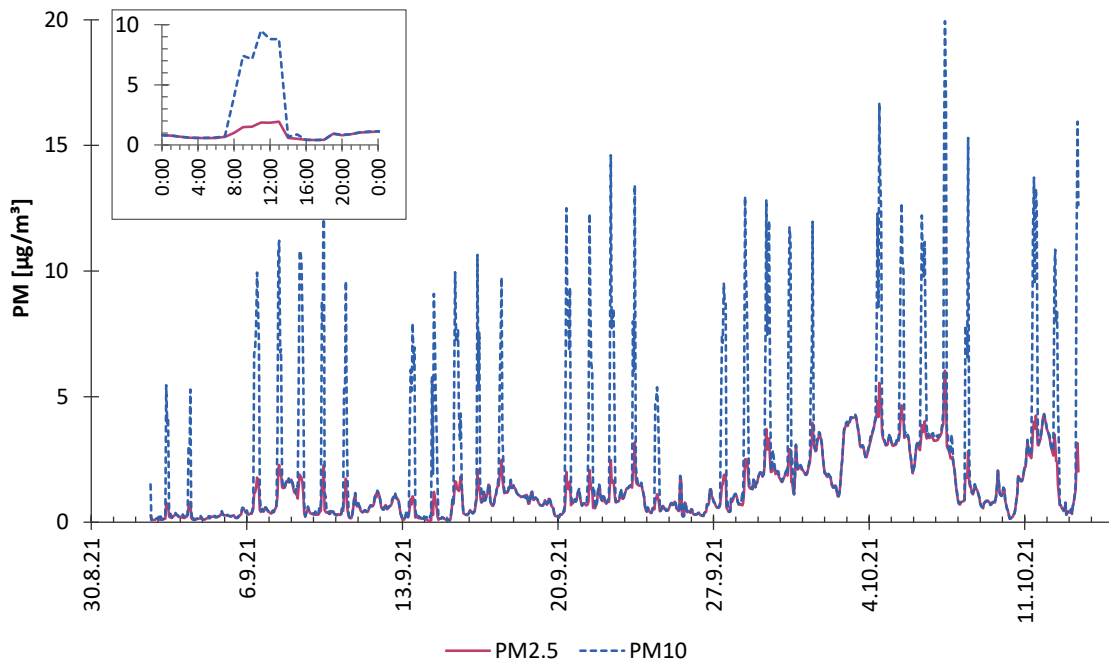


Kuva 6. Mustan hiilen pitoisuutta kuvaavan absorptiokertoimen keskiarvo koulun pihalla (OUT) ja luokkahuoneissa (IN) eri tutkimusjaksojen aikana. Tutkimusjakso oli 2 viikkoa paitsi koulun D SHAM-jakso, joka oli viikon mittainen ja tehtiin poikkeuksellisesti EI-jakson jälkeen.

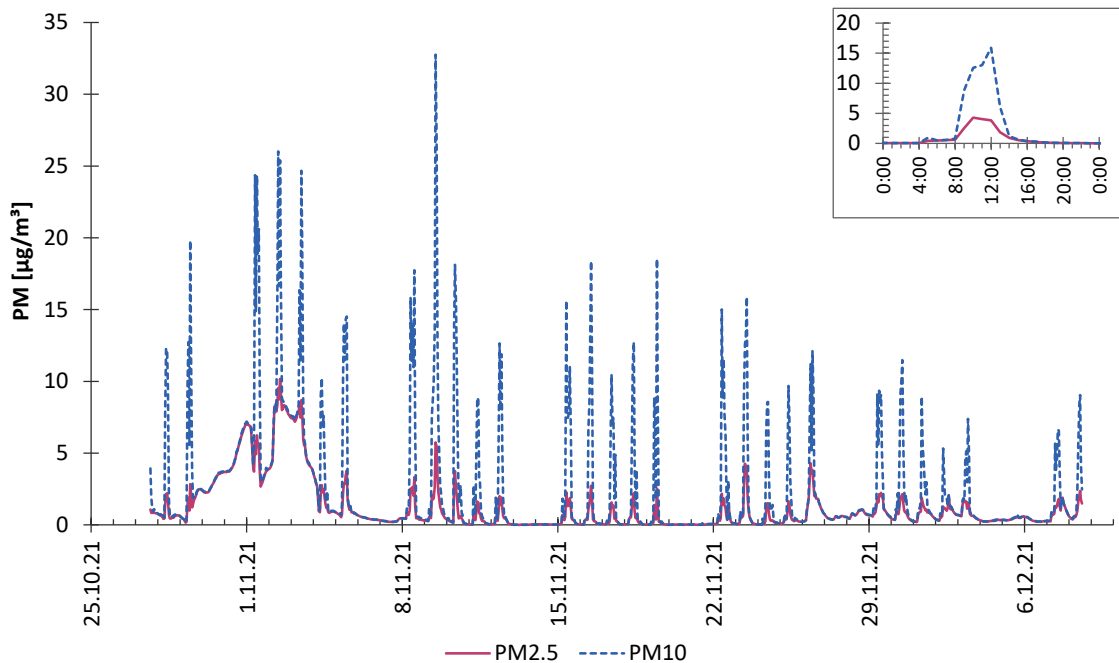
Hiukkaspitoisuuden ajallinen vaihtelu sisätiloissa

Gravimetrisen analyysin lisäksi kouluissa A–D mitattiin yhdessä luokkahuoneessa jatkuvatoimisesti PM_{2.5}- ja PM₁₀-pitoisuuksia. Kuvissa 7–10 on esitetty hiukkaspitoisuuksien tuntikeskiarvon vaihtelu koko mittausjakson ajalta. Kuvista havaitaan, että etenkin PM₁₀-pitoisuus on koulupäivien aikana huomattavasti suurempi kuin muina aikoina. PM_{2.5}-pitoisuuden vaihtelussa erottuu selvästi ulkoilmasta aiheutuva taustapitoisuus, mutta myös koulupäivien aiheuttama pitoisuuslisäys. Kuvissa on esitetty myös tuntikeskiarvojen vaihtelu yhden esimerkkivuorokauden ajalta. PM₁₀-pitoisuus alkaa suurentua nopeasti kello 7 tai 8 jälkeen ja palaa lähelle PM_{2.5}-pitoisuutta iltapäivällä, koulusta riippuen kello 13–16. Iltaisin, öisin ja viikonloppuisin PM_{10-2.5}-pitoisuus on lähes nolla. Kouluista E ja F ei valitettavasti ole jatkuvaa hiukkasdataa laiterikon takia.

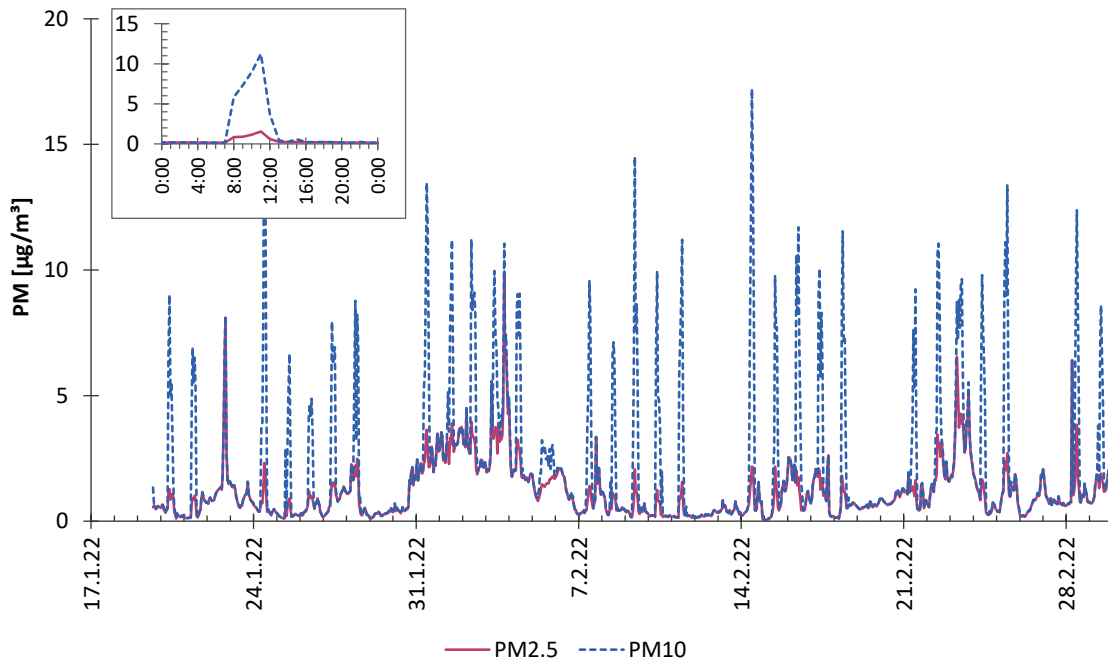
PM_{2.5} ja PM₁₀ (µg/m³) pitoisuuksien vaihtelu esitettynä viivakaaviona kuuden viikon mittausjakson ajalta. Lisäksi esitetty tarkemmin pitoisuudet yhden vuorokauden ajalta, jolloin kaaviossa on esitetty vaihtelu tunneittain.



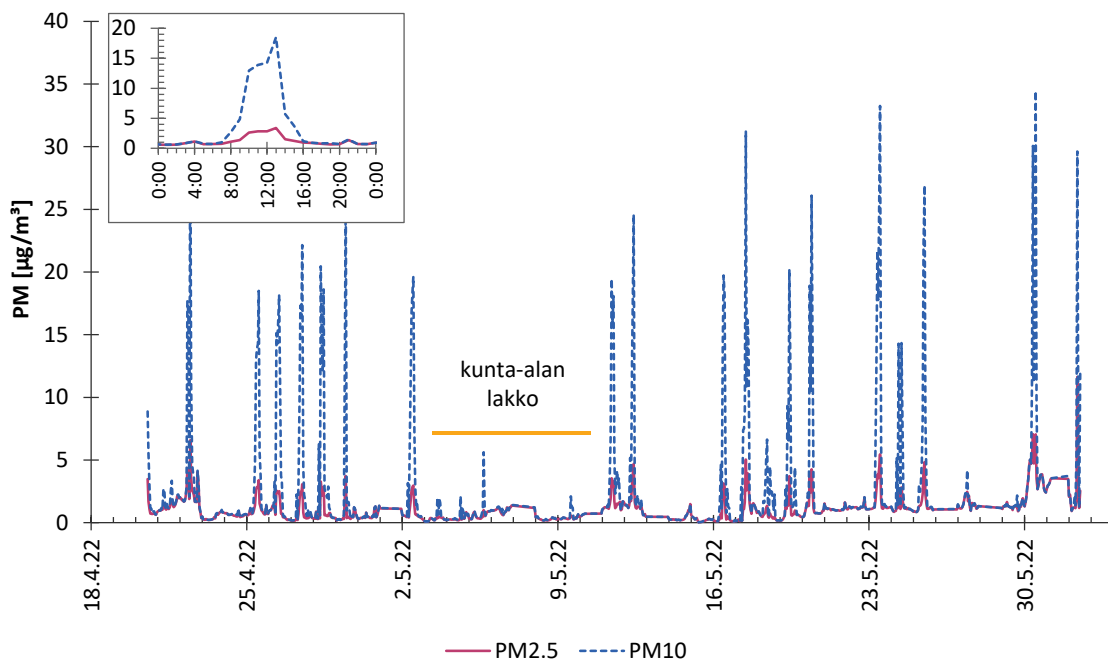
Kuva 7. Pienhiukkasten (PM_{2.5}) ja hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) pitoisuuden vaihtelu koulun A luokkahuoneessa 14 koko mittausjakson ajan sekä esimerkkinä yhden vuorokauden ajan (27.9.2021).



Kuva 8. Pienhiukkasten (PM_{2.5}) ja hengitettävien (PM₁₀) hiukkasten pitoisuuden vaihtelu koulun B luokkahuoneessa 18 koko mittausjakson ajan sekä esimerkkinä yhden vuorokauden ajan (23.11.2021).



Kuva 9. Pienhiukkasten ($PM_{2.5}$) ja hengitettävien (PM_{10}) hiukkasten pitoisuuden vaihtelu koulun C luokkahuoneessa 21 koko mittausjakson ajan sekä esimerkkinä yhden vuorokauden ajan (11.2.2022).

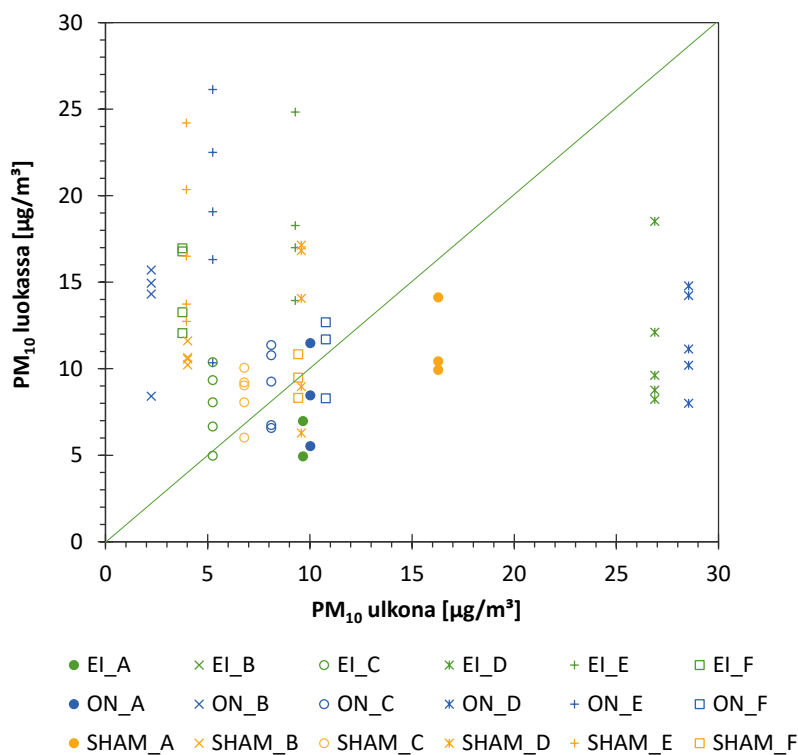


Kuva 10. Pienhiukkasten ($PM_{2.5}$) ja hengitettävien (PM_{10}) hiukkasten pitoisuuden vaihtelu koulun D luokkahuoneessa 29 koko mittausjakson ajan sekä esimerkkinä yhden vuorokauden ajan (25.4.2022).

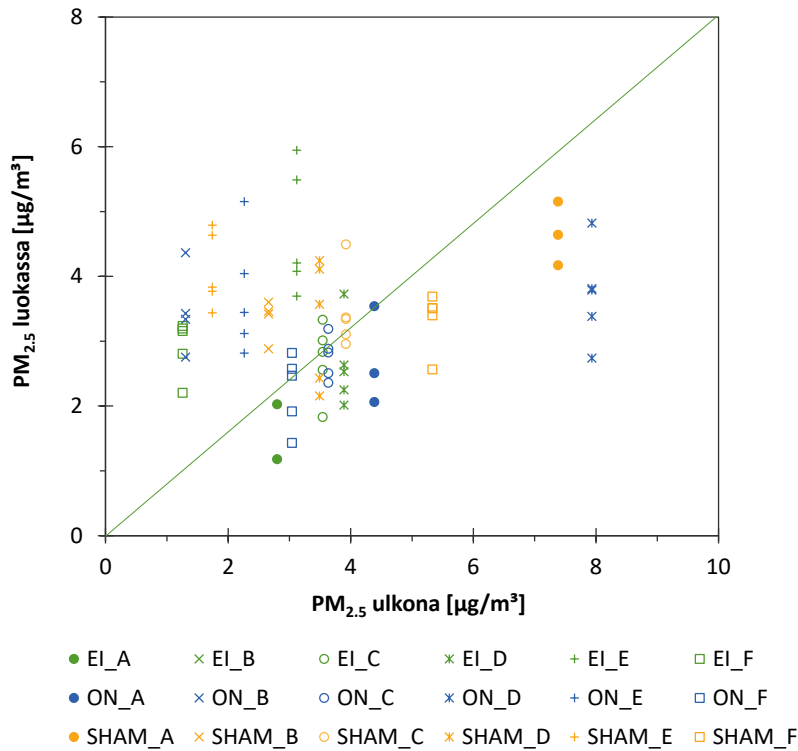
Sisäpitoisuuden ja ulkopitoisuuden suhde luokkahuoneittain

Kuvissa 11–14 on esitetty y-akselilla luokkahuoneiden hiukaspitoisuus ja x-akselilla samaan aikaan mitattu hiukaspitoisuus ulkoilmassa. Luokkakohtainen tarkastelu osoittaa, että koulun sisälläkin oli luokkahuoneiden välillä suuria eroja etenkin PM₁₀- ja PM_{10-2.5}-pitoisuuksissa. EI-jaksolla suurimman ja pienimmän pitoisuuden eron suhde sisäpitoisuuksien keskiarvoon oli kouluissa keskimäärin 62 % PM₁₀, 75 % PM_{10-2.5}, 44 % PM_{2.5} ja 22 % ABS. Koulun E teknisen käsityön luokka ei ole mukana ABS-tuloksessa, koska siellä ABS oli EI- ja SHAM-jaksojen aikana selvästi suurempi kuin ulkoilmassa, joten luokkahuoneessa oli todennäköisesti joku palamisprosessi, josta pääsi sisäilmaan mustaa hiiltä.

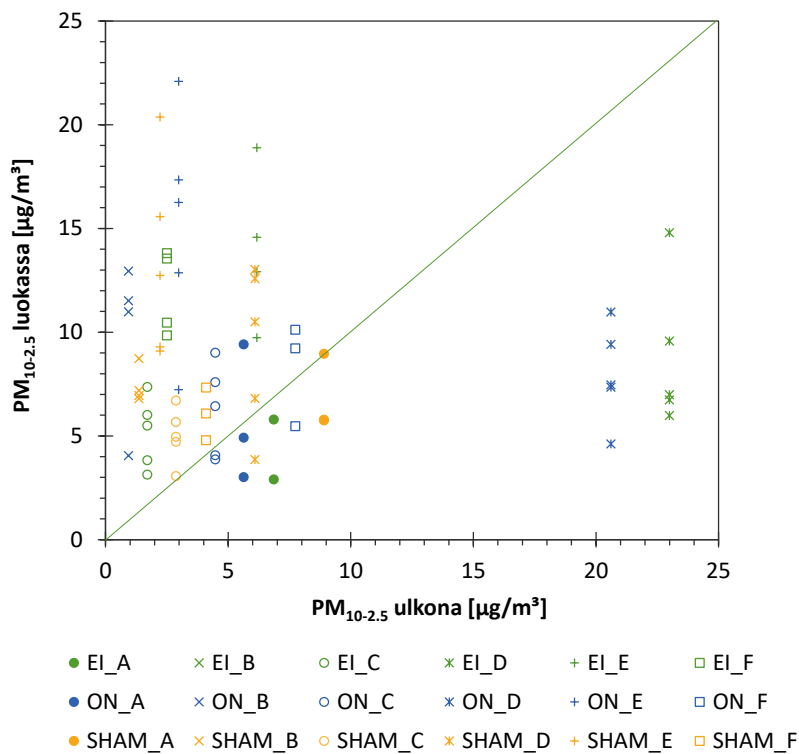
PM₁₀- ja etenkin PM_{10-2.5}-pitoisuus oli suurimmassa osassa luokkia kaikkien jaksojen aikana suurempi luokkahuoneessa kuin ulkona. ABS taas oli yhtä teknisen käsityön luokkaa (luokka 35) lukuun ottamatta pienempi luokkahuoneissa kuin ulkoilmassa: muissa kuin luokkahuoneessa 35 sisäilman ABS oli keskimäärin 43 % ulkoilman absorptiokertoimesta EI-jakson aikana, 41 % ON-jakson aikana ja 51 % SHAM-jakson aikana. PM_{2.5}-pitoisuus oli joissain luokkahuoneissa pienempi ja toisissa suurempi kuin ulkoilmassa.



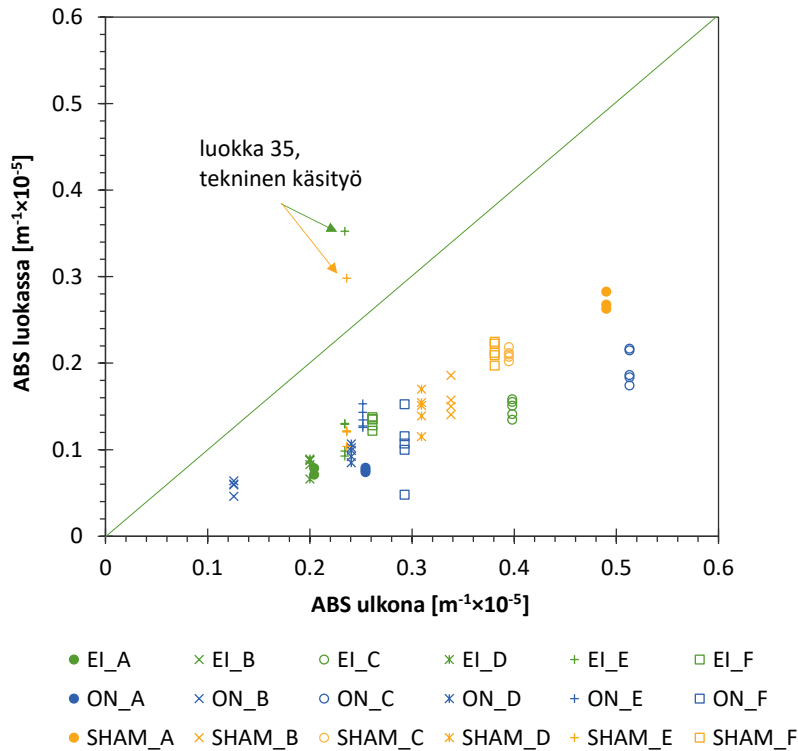
Kuva 11. Hengitettävien hiukkasten pitoisuus luokkahuoneessa versus koulun ulkopuolella eri tutkimusjaksojen aikana. Jokainen piste kuvaa yhtä luokkahuonetta.



Kuva 12. Pienhiukkasten pitoisuus luokkahuoneessa versus koulun ulkopuolella eri tutkimusjaksojen aikana. Jokainen piste kuvaa yhtä luokkahuonetta.



Kuva 13. Karkeiden hengitettävien hiukkasten pitoisuus luokkahuoneessa versus koulun ulkopuolella eri tutkimusjaksojen aikana. Jokainen piste kuvaa yhtä luokkahuonetta.



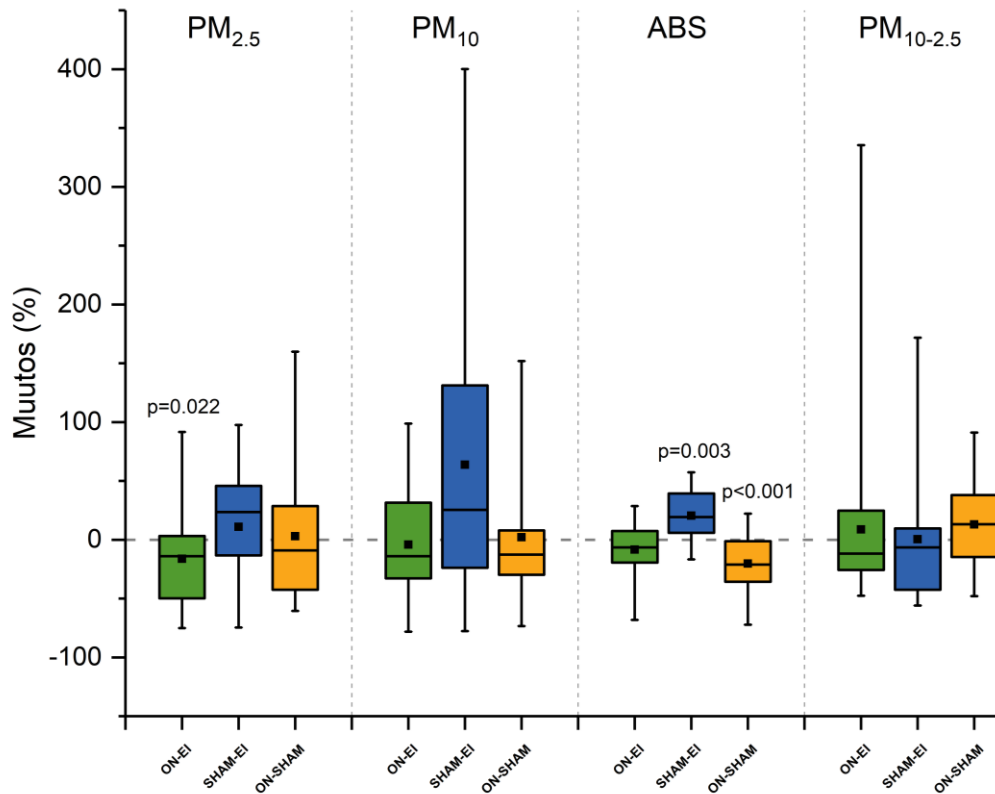
Kuva 14. Hiukkasten mustuutta kuvaava absorptiokerroin luokkahuoneessa versus koulun ulkopuolella eri tutkimusjaksojen aikana. Jokainen piste kuvaa yhtä luokkahuonetta.

Ilmanpuhdistimen vaikutus

Tutkittaessa ilmanpuhdistimen vaikutusta hiukkaspitoisuuksiin on otettava huomioon, että etenkin $\text{PM}_{2.5}$ -pitoisuuteen ja absorptiokertoimeen luokkahuoneissa vaikuttaa myös niiden pitoisuudet ulkoilmassa. Olettaen, ettei hiukkasten sisälähteissä tapahdu suuria muutoksia tutkimusjaksojen välillä, voidaan ilmanpuhdistimen vaikutusta tarkastella sisä- ja ulkopitoisuuden suhteen (I/O-suhde) muutosten avulla. $\text{PM}_{10-2.5}$ -pitoisuus sisäilmassa ei riipu pitoisuudesta ulkoilmassa (kuva 13), joten ilmanpuhdistimen vaikutusta voidaan tarkastella suoraan sisäpitoisuudessa tapahtuneina muutoksina.

Kuvassa 15 on esitetty prosentuaalisen muutoksen jakaumat $\text{PM}_{2.5}$:n, PM_{10} :n ja ABS:n I/O-suhteissa sekä $\text{PM}_{10-2.5}$ -pitoisuudessa eri tutkimusjaksojen välillä. Luokkahuoneiden väliset erot olivat suuria – osassa luokkia $\text{PM}_{2.5}$:n, PM_{10} :n ja ABS:n I/O-suhde ja $\text{PM}_{10-2.5}$ -pitoisuus pieneni ja osassa suureni ilmanpuhdistimen suodattaessa ilmaa verrattuna tilanteeseen, jolloin puhdistin ei ollut käynnissä. ON- ja EI-jaksojen välillä oli GEE-mallissa tilastollisesti merkitsevä ero vain $\text{PM}_{2.5}$:n I/O-suhteessa. Onkin huomattava, että pitoisuudet olivat jo lähtötilanteessa pieniä, joten keskimääräiset muutokset pitoisuuksissa ja niiden I/O-suhteissa olivat hyvin pieniä. Mittausepävarmuus ja pienetkin vaihtelut esimerkiksi sisälähteiden voimakkuuksissa tai ikkunatuuletuksessa eri jaksojen välillä voivat aiheuttaa samaa suuruusluokkaa tai suurempiakin vaihteluita pitoisuuksissa.

Ilmanpuhdistimen aiheuttama ilmavirtaus silloin, kun suodattimet eivät ole paikoillaan, näyttää suurentavan $\text{PM}_{2.5}$:n, PM_{10} :n ja ABS:n keskimääräistä I/O-suhdetta verrattuna kahteen muuhun tutkimusjaksoon (SHAM-EI ja ON-SHAM) (kuva 15), mutta vain absorptiokertoimelle erot olivat tilastollisesti merkitseviä. Normaalkäytössä ilmanpuhdistimissa on aina suodattimet paikoillaan, joten SHAM-jakson tuloksilla on vaikutusta ainoastaan tulkittaessa pelkän ilman kierrättämisen ja/tai plasebovaikutuksen yhteyttä pitoisuuksiin ja ihmisten kokemuksiin oireisiin.



Kuva 15. Prosentuaalisen muutoksen jakaumat pienhiukkasten (PM_{2.5}), hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) ja absorptiokertoimen (ABS) sisä- ja ulkopitoisuuden suhteissa sekä karkeiden hengitettävien hiukkasten (PM_{10-2.5}) pitoisuudessa eri tutkimusjaksojen välillä.

Ilmanvaihdon määrän vaikutus hiukkaspitoisuuksiin

PM₁₀:n, PM_{2.5}:n ja ABS:n I/O-suhteet sekä PM_{10-2.5}-pitoisuudet eri tutkimusjaksojen aikana jaoteltuina kahden ilmamääräluokkaan on esitetty taulukossa 2. PM₁₀:n ja PM_{2.5}:n I/O-suhteiden mediaanitasot olivat suuremmat alhaisemmassa ilmamääräluokassa (alle 8,1 l/s/hlö). Erot PM_{2.5}:n ja PM₁₀:n I/O-suhteessa kahden eri ilmamääräluokan välillä olivat tilastollisesti merkitseviä ON- ja SHAM-jaksoilla, mutta eivät EI-jaksolla. Myös PM_{10-2.5}-pitoisuuksien mediaanitasot olivat suuremmat alhaisemmassa ilmamääräluokassa, mutta ero oli tilastollisesti merkitsevä vain ON-jakson aikana. ABS:n I/O-suhteessa ei ollut eroa ilmamääräluokkien välillä.

Taulukko 2. Hengitettävien hiukkasten (PM₁₀), pienhiukkasten (PM_{2,5}) ja absorptiokertoimen sisä- ja ulkopitoisuuden (I/O) suhteet ja karkeiden hengitettävien hiukkasten (PM_{10-2,5}) pitoisuudet kahdessa eri ilmamääräluokassa.

Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	Luokkahuoneita	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
I/O-suhde PM₁₀						
< 8,1	EI	8	2,2	1,3	1,9	4,5
	ON	12	3,5	0,8	3,4	7
	SHAM	12	2,8	1	2,6	6,1
≥ 8,1	EI	11	1,4	0,3	0,7	4,5
	ON	11	0,7	0,3	0,6	1,2
	SHAM	11	1,1	0,6	0,9	1,8
I/O-suhde PM_{2,5}						
< 8,1	EI	10	1,5	0,7	1,2	2,5
	ON	13	1,4	0,6	1,2	2,6
	SHAM	13	1,4	0,6	1,1	2,8
≥ 8,1	EI	11	1,1	0,4	0,7	2,6
	ON	12	0,6	0,3	0,5	0,9
	SHAM	12	0,8	0,5	0,7	1,2
I/O-suhde ABS						
< 8,1	EI	10	0,4	0,4	0,4	0,6
	ON	13	0,4	0,2	0,5	0,6
	SHAM	13	0,5	0,4	0,5	0,6
≥ 8,1	EI	11	0,4	0,3	0,4	0,5
	ON	12	0,4	0,3	0,4	0,5
	SHAM	12	0,5	0,4	0,5	0,6
PM_{10-2,5}-pitoisuus [µg/m³]						
< 8,1	EI	11	10,4	2,6	12,9	18,9
	ON	12	11,7	3,9	11,2	22,1
	SHAM	12	9,1	4,7	7,1	20,4
≥ 8,1	EI	11	8,2	2,9	7	14,8
	ON	11	7	3	7,4	11
	SHAM	11	7,5	3,1	6,8	13

Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus hiukkaspitoisuuksiin

Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus PM₁₀:n, PM_{2,5}:n sekä ABS:n I/O-suhteisiin on esitetty taulukossa 3. Esitetyt tulokset ovat kahdesta koulusta, joissa oli molemmissa viidessä luokkahuoneessa yksi ilmanpuhdistin ja yhdessä luokkahuoneessa kaksi ilmanpuhdistinta.

PM₁₀-hiukkasten pitoisuus ja I/O-suhde olivat keskimääräisesti suurempia luokkahuoneissa, joissa oli kaksi puhdistinta ON- ja SHAM-jaksojen aikana. PM₁₀-tulokset olivat kuitenkin näissä luokkahuoneissa suurempia myös silloin, kun ilmanpuhdistimet eivät olleet käynnissä, joten kahden puhdistimen luokkahuoneissa on saattanut olla voimakkaampia sisälähteitä myös puhdistimien ollessa käynnissä. Myös PM_{2,5}-hiukkasten pitoisuus ja I/O-suhde olivat keskimääräisesti suurempia luokkahuoneissa, joissa oli kaksi puhdistinta ON-jakson aikana, mutta SHAM-jakson aikana I/O-suhde oli sama yhden ja kahden puhdistimen luokkahuoneissa. ON- ja SHAM-jaksoilla ABS ja sen I/O-suhde olivat hieman pienempiä kahden puhdistimen luokkahuoneissa, mutta samansuuruiset erot huomattiin myös EI-jaksojen välillä. Toisen puhdistimen lisäämisestä ei siis ollut hyötyä hiukkasaltistumisen kannalta ainakaan nyt tutkituissa kouluissa, joissa pitoisuudet olivat jo valmiiksi pieniä.

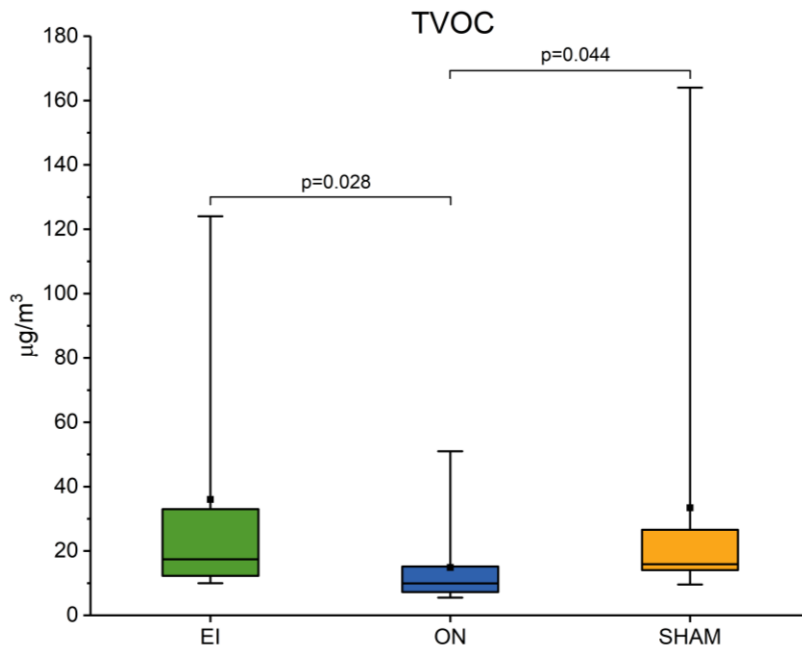
Taulukko 3. Hengitettävien hiukkasten (PM₁₀) ja pienhiukkasten (PM_{2.5}) pitoisuudet ja absorptio-kertoimen (ABS) arvot sekä näiden sisä- ja ulkopitoisuuden (I/O) suhteet eri ilmanpuhdistimien määrällä.

Ilmanpuhdistimien määrä	Tutkimusvaihe	N	Pitoisuus			I/O-suhde		
			PM ₁₀ µg/m ³	PM _{2.5} µg/m ³	ABS m ⁻¹ ×10 ⁻⁵	PM ₁₀	PM _{2.5}	ABS
Yksi puhdistin	Ilmanpuhdistin ei käynnissä	10	17	4	0,15	3,0	1,9	0,6
	Ilmanpuhdistin käynnissä	10	12	3	0,12	2,2	1,2	0,5
	Sham-jakso	10	12	4	0,18	2,0	1,5	0,6
Kaksi puhdistinta	Ilmanpuhdistin ei käynnissä	2	21	3	0,12	3,8	1,7	0,5
	Ilmanpuhdistin käynnissä	2	16	4	0,10	2,5	1,4	0,4
	Sham-jakso	2	14	3	0,15	2,8	1,5	0,5

Kaasumaiset epäpuhtaudet

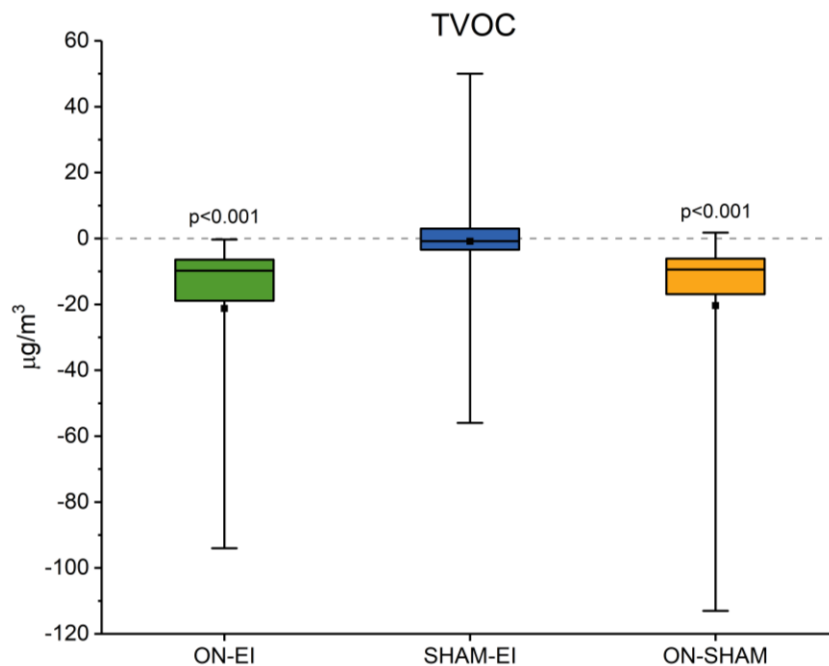
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus (Total Organic Volatile Compounds, TVOC) tutkimusluokissa alitti selvästi sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen (545/2015) mukaisen toimenpideraja-arvon (400 µg/m³) ja saksalaisen hygieenisen ohjearvon (300 µg/m³) (Umwelt Bundesamt, 2023). Asumisterveysasetuksen toimenpideraja on laskettu toluenivasteella, eikä se siten ole suoraan vertailukelpoinen luokkahuoneista mitattuihin pitoisuuksiin. Tästä syystä tähän raporttiin valittiin vertailuarvoiksi myös saksalaiset hygieeniset ohjearvot, jotka on määritetty toluenivasteen sijaan yhdisteiden omilla vasteilla ja ovat siten paremmin vertailtavissa luokkahuoneista määritettyihin pitoisuuksiin. TVOC-pitoisuudet vaihtelivat eri tutkimusjaksojen aikana ja ero oli tilastollisesti merkitsevä ON vs. EI ja ON vs. SHAM-jaksojen välillä (kuva 16).



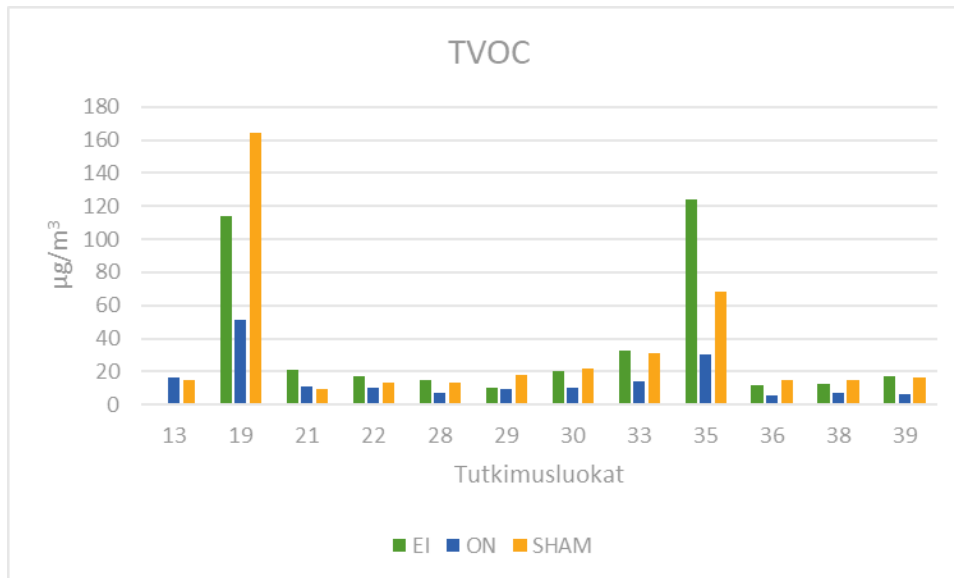
Kuva 16. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudet (TVOC) eri tutkimusjaksojen aikana (n = 11).

Kuvassa 17 on esitetty TVOC-pitoisuuksien erot eri tutkimusjaksojen välillä. TVOC-pitoisuus väheni 53 % (95 % luottamusväli (lv): -64 % – -38 %) ON-jaksolla verrattuna EI-jaksoon, ja ero oli tilastollisesti merkitsevä. ON-jakso vähensi TVOC-pitoisuutta 47 % (lv: -58 % – -34 %) myös SHAM-jaksoon verrattuna. Vaikutus oli tilastollisesti merkitsevä. SHAM-jakson aikana TVOC-pitoisuus ei laskenut juurikaan (11 %, lv: -32 % – +16 %) verrattuna EI-jaksoon.



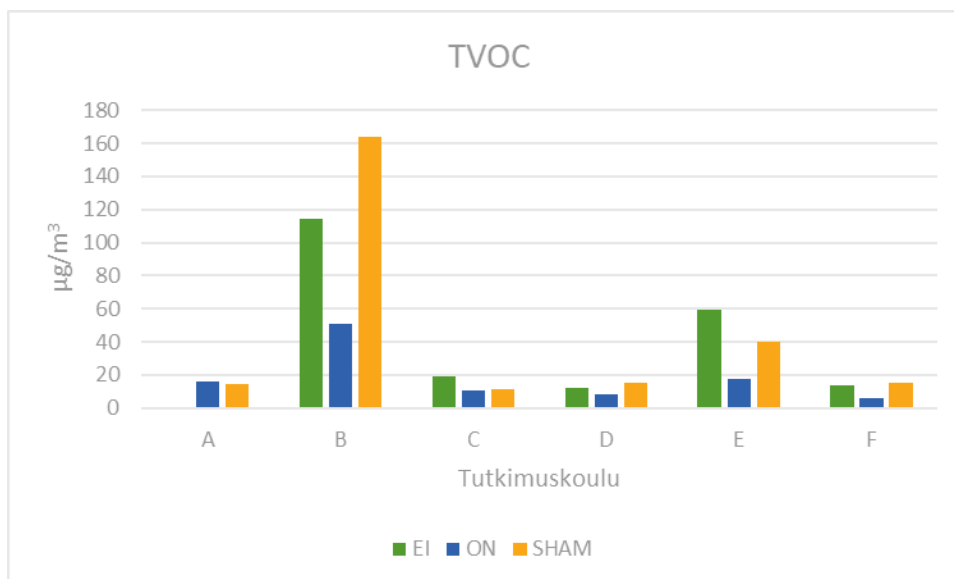
Kuva 17. Erot haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuksissa (TVOC) eri tutkimusjaksojen välillä (n = 11).

Kuvassa 18 on esitetty TVOC-pitoisuudet luokittain ja tutkimusjaksoittain. TVOC-pitoisuudet olivat matalia kaikissa tutkituissa luokkahuoneissa. Suurimmat pitoisuudet havaittiin kahdessa teknisen käsityön luokkahuoneessa (luokat 19 ja 35), joissa niissäkin TVOC-pitoisuudet alittivat selvästi kansallisen toimenpiderajan ja hygieenisen ohjearvon. Teknisen käsityön luokkahuoneissa käsitellään tyypillisesti esimerkiksi puumateriaaleja, maaleja ja lakkoja, jotka ovat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden lähteitä. Erot eri tutkimusjaksojen välisissä TVOC-pitoisuuksissa analysoitiin myös jättämällä pois kyseiset kaksi käsityöluokkaa, joissa havaittiin selvästi suuremmat pitoisuudet, mutta tällä ei ollut vaikutusta tuloksiin.



Kuva 18. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudet (TVOC) tutkimusluokissa eri tutkimusjaksojen aikana. Luokat 19 ja 35 ovat teknisen käsityön luokkia. Muut luokat ovat tavallisia luokkahuoneita.

TVOC-pitoisuudet vaihtelivat eri tutkimuskoulujen välillä (kuva 19). Kouluissa B ja E havaittiin suuremmat pitoisuudet, mikä johtunee siitä, että näissä kouluissa mittauksissa oli mukana tekninen käsityöluokka.



Kuva 19. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuksien (TVOC) keskiarvopitoisuudet tutkimuskouluissa eri tutkimusjaksojen aikana.

Teknisen käsityön luokissa (luokat 19 ja 35) α -pineenin osalta pitoisuudet (70 ja 77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ylittivät hieman asumisterveysasetuksessa yksittäisille yhdisteille asetetun toimenpiderajan (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Kyseinen toimenpideraja ylittyi vain silloin, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä, ja silloinkaan α -pineenin pitoisuus ei ylittänyt terveystasuja RW I ja II ohjearvoja (200 ja 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Terpeeneihin kuuluvan α -pineenin lähteitä ovat esimerkiksi puupohjaiset materiaalit, joten on tavallista, että sen pitoisuudet puukäsityöluokissa ovat korkeammat kuin luokkahuoneissa. Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa (Valvira 2016) yksittäisen VOC-yhdisteen toimenpiderajan ylityksestä todetaan seuraavaa: ”Mikäli toimenpideraja ylittyy, on yhdisteen haitallisuus ja merkitys sisäilman laatuun selvitetävä ja tarvittaessa ryhdyttävä toimenpiteisiin haitan poistamiseksi tai rajoittamiseksi. Mikäli toimenpiderajan ylittymisen jälkeen todetaan, että 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ylittyminen johtui yhdisteestä, joka ei ole kyseisessä pitoisuudessa terveydelle haitallinen, toimenpiderajan ylittyminen ei johda muihin toimenpiteisiin. Tällaisia yhdisteitä voivat olla esimerkiksi terpeenit tai siloksaanit.”

Yksittäisten VOC-yhdisteiden pitoisuuksissa esiintyy muutoksia esimerkiksi sen mukaan, mitä toimintaa tilassa milloinkin on. Tämän takia ilmanpuhdistimien vaikutuksia yksittäisiin yhdisteisiin on hankala arvioida. Tavallisissa luokkahuoneissa mikään 17 analysoiduista VOC-yhdisteestä ei ylittänyt terveystasuja ohjearvoja tai asumisterveysasetuksen toimenpiderajoja.

Koulujen A–D VOC-näytteet analysoitiin optimaalisen säilyvyysajan jälkeen, joten teoriassa on mahdollista, että pitoisuudet olisivat todellisuudessa hieman suuremmat. Arvion mukaan säilyvyysajan ylitys ei kuitenkaan aiheuttanut merkittävää vaikutusta tuloksiin, koska VOC-pitoisuudet olivat tutkituissa kouluissa pieniä ja nollanäytteissä ei havaittu poikkeamaa.

Ilmanvaihdon määrän vaikutus TVOC-pitoisuuksiin

Tutkimusluokkien perusilmanvaihdon vaikutusta mitattuihin epäpuhtauspitoisuuksiin tarkasteltiin jakamalla ilmamäärän mittaustulokset mediaanitason (8,1 l/s/hlö) mukaan kahteen ilmamääräluokkaan. TVOC-pitoisuudet eri tutkimusjaksojen aikana jaoteltuina kahteen eri ilmamääräluokkaan on esitetty taulukossa 4. EI-jaksolla kahden eri ilmamääräluokan välisten TVOC-mediaanipitoisuuksien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. Suurimmat TVOC-mediaanipitoisuudet havaittiin, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä ja ilmamäärä oli alle 8,1 l/s/hlö. Vastaavasti pienimmät TVOC-mediaanipitoisuudet havaittiin ON-jaksolla ja kun ilmamäärä oli yli tai yhtä suuri kuin 8,1 l/s/hlö. Tarkasteltaessa kahden eri ilmamääräluokan TVOC-mediaanipitoisuuksien välistä eroa ilmanpuhdistimen ON-jaksolla, ei niissä ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. On huomioitava, että näytteiden määrä oli pieni, jolloin tilastollisissa testeissä on haastavaa saada esille tilastollista merkitsevyyttä. Ilmamäärän ollessa suurempaa luokkaa ja kun SHAM-jakso (pelkkä ilman kieräytys) oli käytössä, olivat TVOC-mediaanipitoisuudet suurempia kuin vastaavassa ilmamääräluokassa havaitut pitoisuudet, erityisesti ON-jaksolla.

Taulukko 4. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudet (TVOC) kahdessa eri ilmamääräluokassa.

Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	TVOC-pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
		N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	5	21	12	20	33
	ON	5	11	7	10	14
	SHAM	5	18	10	15	31
≥ 8,1	EI	5	14	10	13	17
	ON	5	9	6	7	16
	SHAM	5	15	14	15	18

Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus TVOC-pitoisuuteen

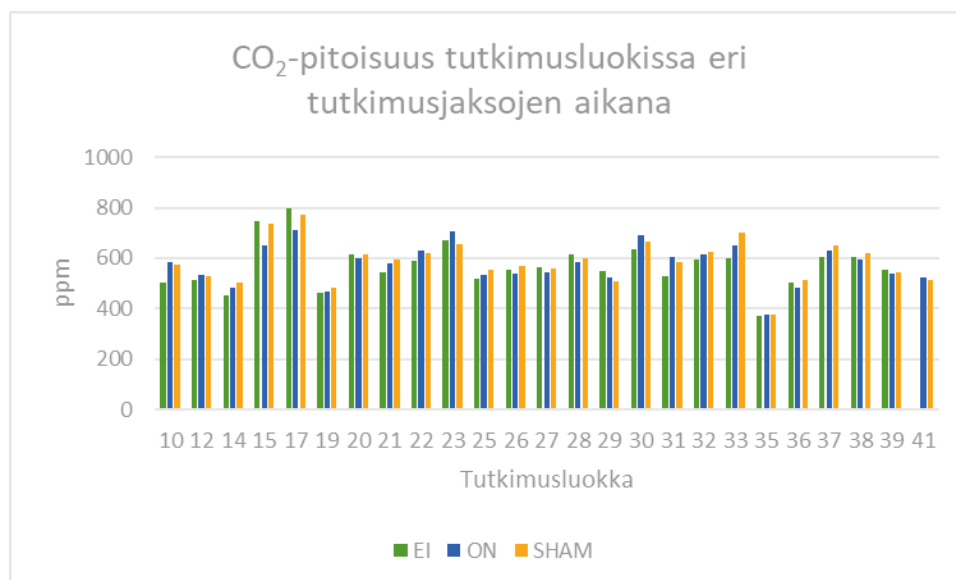
Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus TVOC-pitoisuuteen on esitetty taulukossa 5, jossa on tulokset kahdesta koulusta, joissa oli molemmissa viidessä luokkahuoneessa yksi ilmanpuhdistin ja yhdessä luokkahuoneessa kaksi ilmanpuhdistinta. TVOC-mediaanipitoisuus oli alhaisimmillaan ON-jakson aikana sekä yhden että kahden ilmanpuhdistimen ollessa käynnissä tutkimusluokissa. Toisaalta pitoisuus oli suurimmillaan SHAM-jakson aikana, kun käytössä oli kaksi ilmanpuhdistinta. Lähes vastaava tulos saatiin, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä.

Taulukko 5. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudet (TVOC) eri ilmanpuhdistimien määrällä.

Ilmanpuhdistimien määrä	Tutkimusvaihe	TVOC-pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
		N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
Yksi puhdistin	EI	6	37	12	19	124
	ON	6	12	6	9	30
	SHAM	6	28	15	19	68
Kaksi puhdistinta	EI	2	35	8	35	62
	ON	2	9	6	9	13
	SHAM	2	36	19	36	53

Hiilidioksidi

Hiilidioksidipitoisuus vaihteli tutkimusluokkien välillä, mutta pitoisuus alitti kaikissa tutkimusluokissa asu- ja toimintatilan mukaisen toimenpideraja-arvon ja kansainvälisen terveystieteiden ohjeiston (kuva 20). CO_2 -pitoisuudet kasvoivat ON-jaksolla 1 % (Iv: -2 % – 4 %) ja SHAM-jaksolla 3 % (Iv: 1 % – 5 %) verrattuna EI-jaksoon, kun kaikkia tutkimusluokkia tarkasteltiin yhdessä. Ero oli tilastollisesti merkitsevä SHAM- ja EI-jaksojen välillä ($p = 0,010$).

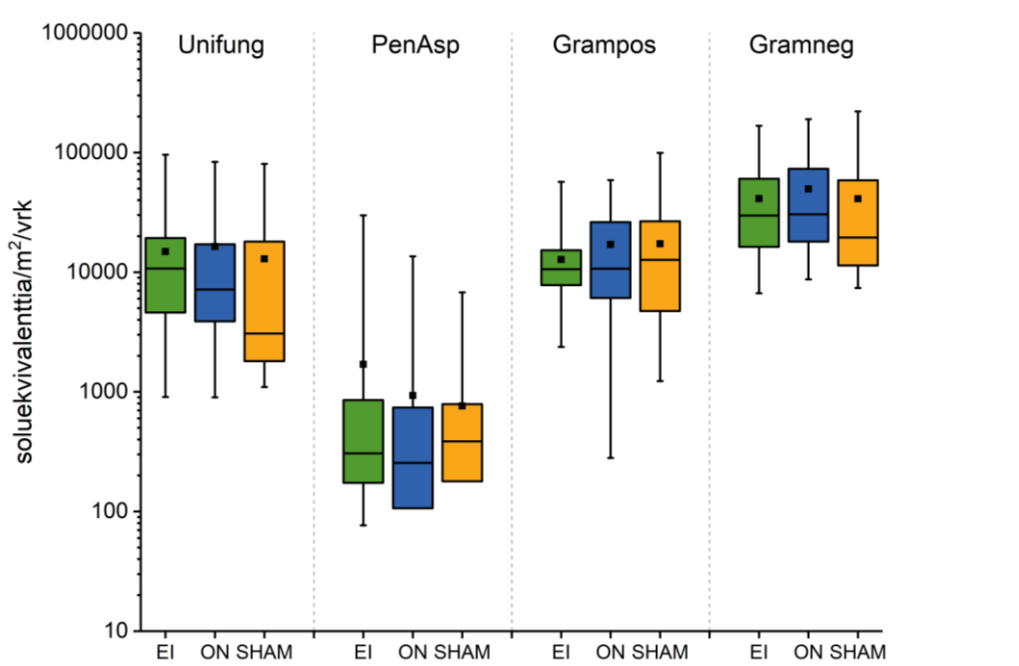


Kuva 20. Hiilidioksidin (CO_2) keskiarvopitoisuudet luokkahuoneissa klo 8–16 eri tutkimusjaksojen aikana. Koulu A: luokat 10–14; koulu B: luokat 15–19; koulu C: luokat 20–23; koulu D: luokat 25–29; koulu E: luokat 30–35; koulu F: luokat 36–41.

Mikrobiologiset epäpuhtaudet

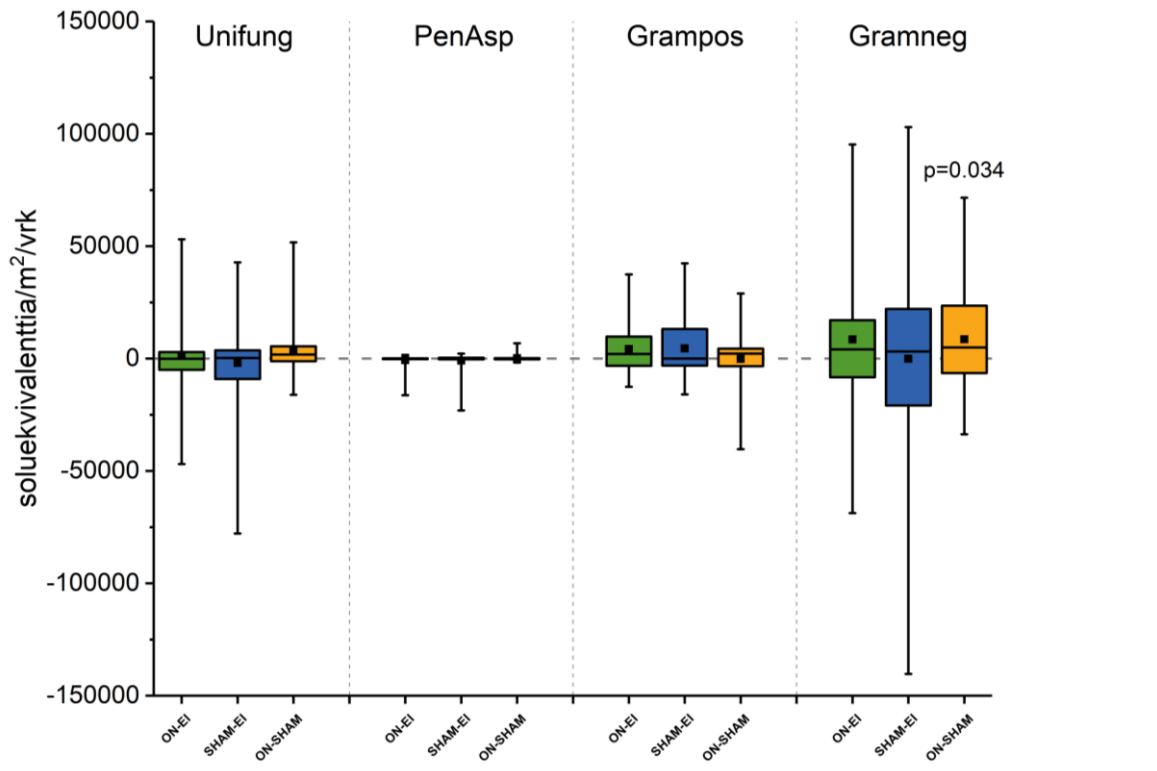
Laskeutuneen pölyn mikrobitulokset

Laskeutuneen pölyn näytteiden mikrobipitoisuudet qPCR-menetelmällä määritettynä vaihtelivat eri mikrobiryhmien välillä kaikilla tutkimusjaksoilla. Mikrobiryhmittäin tarkasteltuna, eri tutkimusjaksoilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa laskeutuneen pölyn mikrobipitoisuuksissa (kuva 21).



Kuva 21. Laskeutuneen pölyn mikrobipitoisuudet qPCR-menetelmällä määritettynä eri tutkimusjaksojen aikana.

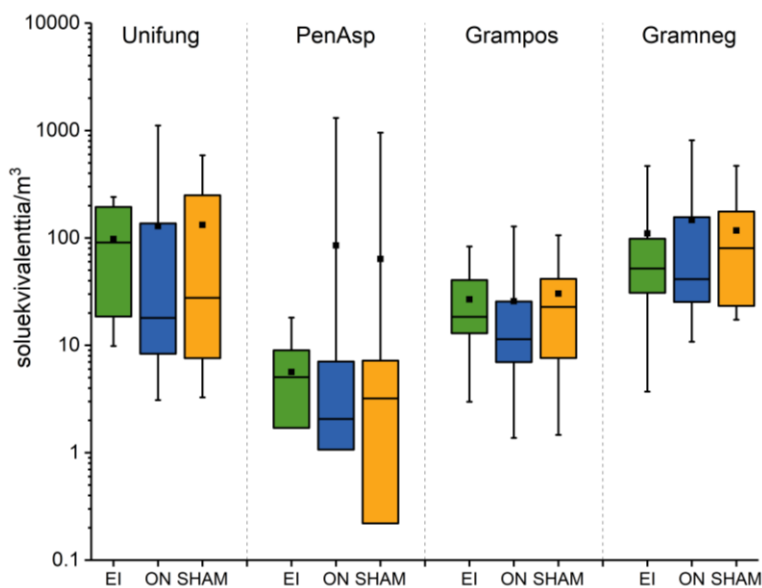
ON-jakson vaikutus mikrobipitoisuuteen verrattuna EI-jaksoon, vaihteli mikrobiryhmittäin laajalla luottamusvälillä: sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) väheni 11 % (lv: -37 % – +27 %), *Penicillium/Aspergillus* spp. väheni 25 % (lv: -54 % – +22 %), Gram-positiivisten bakteerien pitoisuus kasvoi 10 % (lv: -18 % – +47 %) ja Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuus kasvoi 7 % (lv: -18 % – +39 %) (kuva 22). SHAM-jakson vaikutus mikrobipitoisuuksiin oli: sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) aleni 27 % (lv: -54 % – +16 %), *Penicillium/Aspergillus* spp. aleni 19 % (lv: -54 % – +44 %), Gram-positiivisten bakteerien pitoisuus kasvoi 9 % (lv: -22 % – +52 %) ja Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuus väheni 14 % (lv: -41 % – +27 %). Sekä ON- että SHAM-jaksoilla mikrobipitoisuudet sekä nousivat että laskivat ja nämä erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Mikrobipitoisuudet tutkimuskouluittain ja -luokittain on esitetty liitteessä 3. Suurimmat pitoisuudet eri mikrobiryhmille havaittiin kouluissa B ja E (liitteen 3 kuvat L1–L8).



Kuva 22. Erot laskeutuneen pölyn mikrobipitoisuuksissa qPCR-menetelmällä määritettynä eri tutkimusjaksojen välillä.

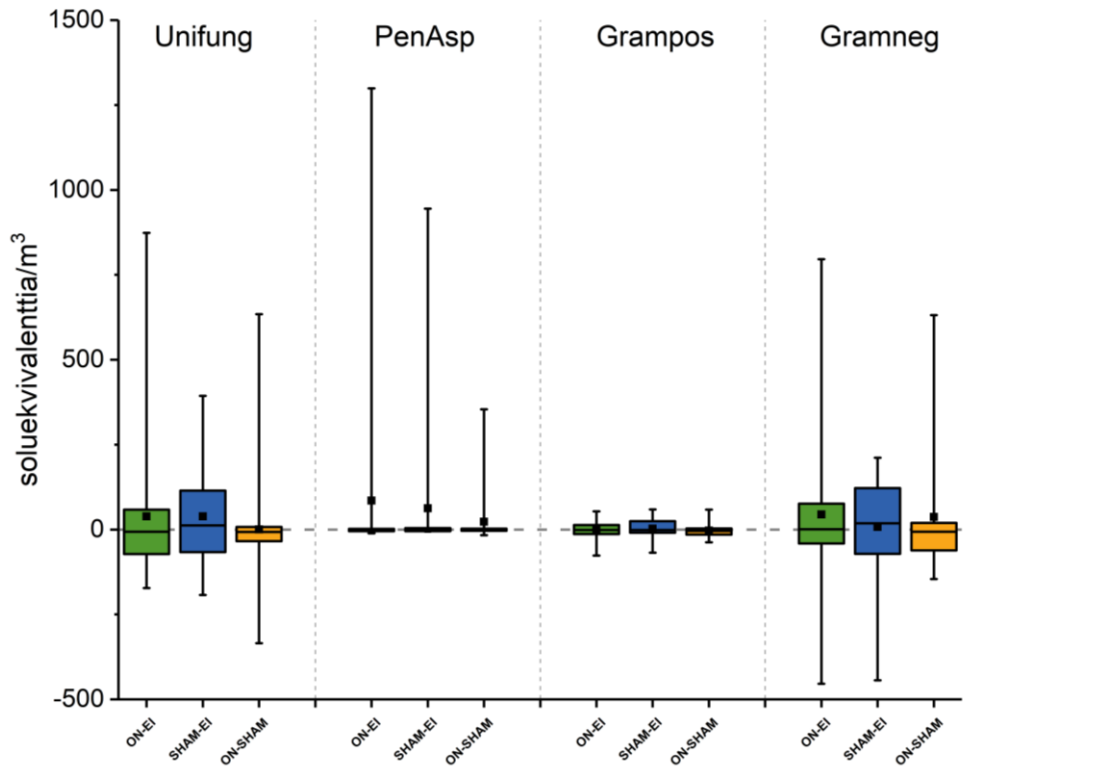
Aktiivisten ilmanäytteiden mikrobitulokset

Aktiivisista ilmanäytteistä qPCR-menetelmällä määritetyt mikrobipitoisuudet vaihtelivat eri mikrobiryhmien välillä kaikilla tutkimusjaksoilla. Mikrobiryhmittäin tarkasteltuna eri tutkimusvaiheilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä mikrobipitoisuuksiin (kuva 23).



Kuva 23. Aktiivisten ilmanäytteiden mikrobipitoisuudet qPCR-menetelmällä määritettynä eri tutkimusjaksoina.

ON-jakso vaikutti mikrobipitoisuuksiin vaihtelevan suuruisesti, laajalla luottamusvälillä: sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) väheni 48 % (Iv: -74 % – +4 %), *Penicillium/Aspergillus* spp. väheni 15 % (Iv: -52 % – +50 %), Gram-positiivisten bakteerien pitoisuus väheni 28 % (Iv: -57 % – +20 %) ja Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuus aleni 3 % (Iv: -56 % – +111 %) (kuva 24). SHAM-jakson vaikutus mikrobipitoisuuksiin oli: sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) väheni 9 % (Iv: -52 % – +73 %), *Penicillium/Aspergillus* spp. kasvoi 40 % (Iv: -31 % – +181 %), Gram-positiivisten bakteerien pitoisuus kasvoi 3 % (Iv: -38 % – +73 %) ja Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuus kasvoi 4 % (Iv: -48 % – +108 %). ON-jaksolla mikrobipitoisuudet vähenivät enemmän kuin SHAM-jaksolla ja nämä erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Mikrobipitoisuudet tutkimuskouluittain ja -luokittain on esitetty liitteessä 3. Suurimmat pitoisuudet eri mikrobiryhmille havaittiin kouluissa B ja E (liitteen 3 kuvat 9–16).



Kuva 24. Erot aktiivisten ilmanäytteiden mikrobipitoisuuksissa qPCR-menetelmällä määritettynä eri tutkimusjaksojen välillä.

SARS-CoV-2 virusten esiintyminen laskeutuneen pölyn näytteissä

Laskeutuneen pölyn näytteissä havaittiin SARS-CoV-2 virusta 7,4 %:ssa näytteistä. Kyseiset näytteet oli otettu kolmesta koulusta, yhteensä kuudesta eri luokasta. Näytteistä yksi oli otettu EI-jaksolla, kolme näytettä ON-jaksolla ja kaksi näytettä SHAM-jaksolla.

Ilmanvaihdon määrän vaikutus mikrobipitoisuuksiin laskeutuneen pölyn näytteissä

Tutkimusluokkien perusilmanvaihdon vaikutusta mitattuihin epäpuhtauspitoisuuksiin tarkasteltiin jakamalla ilmamäärän mittaustulokset mediaanitason (8,1 l/s/hlö) mukaan kahteen ilmamääräluokkaan. Taulukossa 9 on esitetty laskeutuneissa pölynäytteissä esiintyvien eri mikrobiryhmien pitoisuudet kahteen ilmamääräluokkaan jaoteltuina eri tutkimusjaksojen aikana. EI-jaksoilla mikrobiryhmien mediaanipitoisuudet, pois lukien Gram-positiiviset bakteerit, olivat pienemmät luokan perusilmanvaihdon suuremmalla ilmamäärällä, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. ON-jakson aikana mikrobipitoisuudet olivat alhaisemmat suuremmassa kuin pienemmässä ilmamääräluokassa lukuun ottamatta *Penicillium/Aspergillus* spp. ON-jaksoilla ilmamääräluokkien välisissä mikrobiryhmien mediaanipitoisuuksissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. SHAM-

jakson aikana havaittiin suuremmat mediaanipitoisuudet verrattuna EI-jaksoon pienemmässä ilmamääräluokassa Gram-positiivisilla bakteereilla ja suuremmassa ilmamääräluokassa *Penicillium Aspergillus* spp. ja Gram-positiivisilla bakteereilla.

Taulukko 9. Mikrobipitoisuudet laskeutuneen pölyn näytteissä kahdessa eri ilmamääräluokassa.

Sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	13	15 000	900	14 000	38 000
	ON	13	21 000	1 200	6 600	84 000
	SHAM	13	16 000	1 100	2 700	80 000
≥ 8,1	EI	12	7 900	1 000	6 500	18 000
	ON	12	8 700	900	6 400	19 000
	SHAM	12	8 700	1 300	3 800	31 000
Penicillium/Aspergillus spp. (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	13	530	77	370	1 900
	ON	13	540	87	210	2 300
	SHAM	13	650	0	350	3 300
≥ 8,1	EI	12	330	88	200	1 000
	ON	12	350	0	250	1 300
	SHAM	12	420	72	390	1 100
Gram-positiiviset bakteerit (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	13	16 000	6 700	10 000	57 000
	ON	13	22 000	5 600	15 000	59 000
	SHAM	13	22 000	3 300	14 000	99 000
≥ 8,1	EI	12	11 000	5 600	11 000	21 000
	ON	12	13 000	280	9 700	42 000
	SHAM	12	15 000	2 900	13 000	38 000
Gram-negatiiviset bakteerit (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	13	43 000	8 100	43 000	117 000
	ON	13	61 000	8 700	32 000	190 000
	SHAM	13	47 000	7 400	13 000	220 000
≥ 8,1	EI	12	31 000	6 700	26 000	69 000
	ON	12	36 000	13 000	24 000	86 000
	SHAM	12	37 000	8 200	20 000	120 000

Ilmanvaihdon määrän vaikutus mikrobipitoisuuksiin aktiivisissa ilmanäytteissä

Taulukossa 10 on esitetty aktiivisissa ilmanäytteissä esiintyvien eri mikrobiryhmien pitoisuudet kahteen ilmamääräluokkaan jaoteltuina eri tutkimusjaksojen aikana. EI-jaksolla mikrobiryhmien mediaanipitoisuudet olivat pienemmät luokan perusilmanvaihdon suuremmalla ilmamääräluokalla, lukuun ottamatta *Penicillium/Aspergillus* spp., mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Gram-positiivisten ja Gram-negatiivisten bakteerien mediaanipitoisuudet olivat alimmillaan ON-jaksoilla kummassakin ilmamääräluokassa. Sen sijaan sienten kokonaispitoisuuden (Unifungi) ja *Penicillium/Aspergillus* spp. mediaanipitoisuuksissa ei ollut

selvää trendiä eri tutkimusjaksoilla. ON-jaksolla ilmamääräluokkien välisissä mikrobiryhmien mediaanipitoisuuksissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. On huomioitava, että aktiivisten ilmanäytteiden määrä oli pieni, jolloin tilastollisissa testeissä on haastavaa saavuttaa tilastollista merkitsevyyttä. SHAM-jakson aikana havaittiin suuremmat mediaanipitoisuudet verrattuna EI-jaksoon, pienemmässä ilmamääräluokassa *Penicillium/Aspergillus* spp.:lla ja suuremmassa ilmamääräluokassa Gram-positiivisilla ja Gram-negatiivisilla bakteereilla.

Taulukko 10. Mikrobipitoisuudet aktiivisissa ilmanäytteissä kahdessa eri ilmamääräluokassa.

Sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) (soluekvivalenttia/m ³)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	7	100	10	91	196
	ON	7	83	3	18	271
	SHAM	7	130	3	13	588
≥ 8,1	EI	6	66	13	48	140
	ON	7	20	7	13	40
	SHAM	7	66	4	30	235
Penicillium/Aspergillus spp. (soluekvivalenttia/m ³)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	7	6	1	2	18
	ON	7	3	0	2	7
	SHAM	7	5	0	6	12
≥ 8,1	EI	6	4	0	5	6
	ON	7	2	0	2	8
	SHAM	7	4	0	1	19
Gram-positiiviset bakteerit (soluekvivalenttia/m ³)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	7	42	12	40	83
	ON	7	41	5	11	128
	SHAM	7	37	5	35	106
≥ 8,1	EI	6	16	11	16	19
	ON	7	16	6	12	39
	SHAM	7	32	10	27	77
Gram-negatiiviset bakteerit (soluekvivalenttia/m ³)						
Ilmamäärä (l/s/hlö)	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
< 8,1	EI	7	132	24	91	407
	ON	7	149	11	41	473
	SHAM	7	111	17	43	470
≥ 8,1	EI	6	110	4	48	467
	ON	7	45	13	41	137
	SHAM	7	107	21	79	272

Ilmanpuhdistimien määrän vaikutus mikrobipitoisuuksiin laskeutuneen pölyn näytteissä

Ilmanpuhdistimien määrän vaikutusta mikrobipitoisuuksiin laskeutuneen pölyn näytteissä on esitetty taulukossa 11, jossa on tulokset kahdesta koulusta, joissa oli molemmissa viidessä luokkahuoneessa yksi ilmanpuhdistin ja yhdessä luokkahuoneessa kaksi ilmanpuhdistinta. Kaikkien mikrobiryhmien mediaanipitoisuudet olivat suuremmat kahden ilmanpuhdistimien ollessa ON-jaksolla ja SHAM-jaksolla verrattuna tilanteeseen, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Kun käytössä oli yksi puhdistin ON- ja SHAM-jaksoilla, kaikkien mikrobiryhmien mediaanipitoisuudet olivat alhaisempia verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä.

Taulukko 11. Mikrobiryhmien pitoisuudet eri ilmanpuhdistimien määrällä.

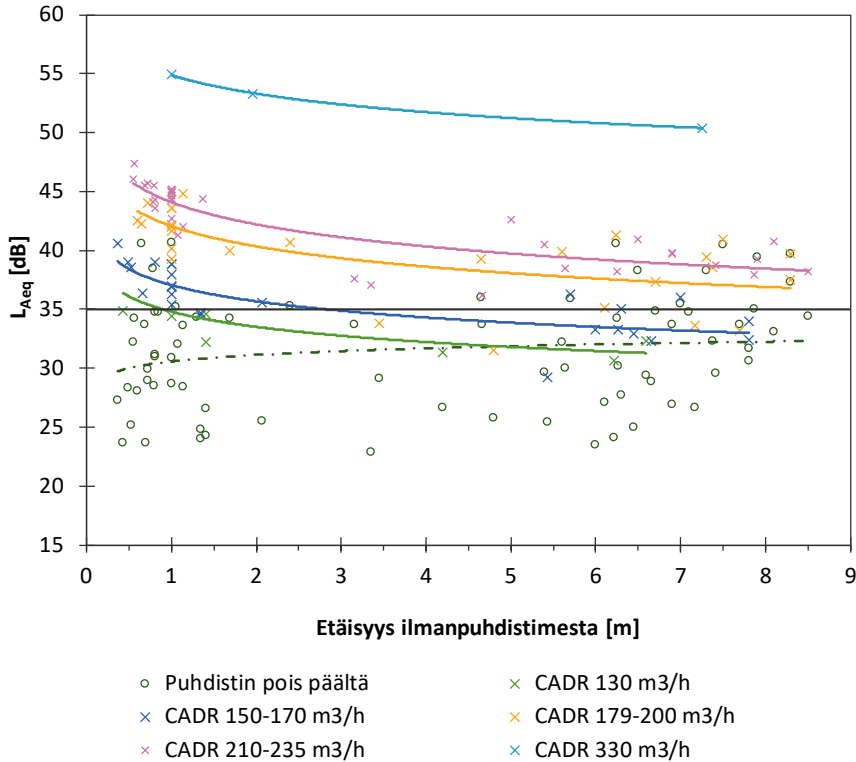
Sienten kokonaispitoisuus (Unifungi) (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilman- puhdistimien määrä	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
Yksi puhdistin	EI	10	19 000	5 900	19 000	38 000
	ON	10	27 000	2 200	10 000	84 000
	SHAM	10	22 000	1 100	9 000	80 000
Kaksi puhdistinta	EI	2	11 000	7 100	11 000	15 000
	ON	1	50 000	50 000	50 000	50 000
	SHAM	2	20 000	1 400	20 000	39 000
Penicillium/Aspergillus spp. (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilman- puhdistimien määrä	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
Yksi puhdistin	EI	10	1 200	170	740	5 100
	ON	10	670	0	330	2 300
	SHAM	10	750	0	320	3 300
Kaksi puhdistinta	EI	2	250	160	250	330
	ON	1	1 000	1 000	1 000	1 000
	SHAM	2	500	66	500	930
Gram-positiiviset bakteerit (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilman- puhdistimien määrä	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
Yksi puhdistin	EI	10	16 000	2 400	14 000	57 000
	ON	10	21 000	3 500	10 000	59 000
	SHAM	10	20 000	1 200	8 900	99 000
Kaksi puhdistinta	EI	2	8 200	7 300	8 200	9 000
	ON	1	15 000	15 000	15 000	15 000
	SHAM	2	17 000	6 100	17 000	29 000
Gram-negatiiviset bakteerit (soluekvivalenttia/m ² /vrk)						
Ilman- puhdistimien määrä	Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
Yksi puhdistin	EI	10	47 000	18 000	38 000	120 000
	ON	10	67 000	13 000	21 000	190 000
	SHAM	10	59 000	8 200	25 000	220 000
Kaksi puhdistinta	EI	2	27 000	24 000	27 000	30 000
	ON	1	53 000	53 000	53 000	53 000
	SHAM	2	59 000	18 000	59 000	100 000

Melu

Ilmanpuhdistimen aiheuttama melutaso riippuu muun muassa puhdistimen tehoasetuksesta (CADR maksimitiho * käytetty tehoasetus) sekä mittauspisteen ja puhdistimen välisestä etäisyydestä. Kuvassa 25 on esitetty kummankin puhdistinmallin tulokset yhdistettyinä tehoasetuksen mukaan jaettuihin ryhmiin. Mukana ovat ne luokkahuoneet, joissa oli vain yksi ilmanpuhdistin. Kuvaajasta huomataan, että keskiäänitaso ylitti

kaikilla etäisyyksillä asumisterveysasetuksen (545/2015) mukaisen toimenpiderajan ($L_{Aeq, k10\ 7-22}$ 35 dB) luokkatileille, kun tehoasetus oli vähintään 179 m³/h. Jo tutkimuksessa käytetyillä hyvin maltillisilla mitoituksilla voidaan siis päätyä tilanteeseen, missä melu aiheuttaa ongelmia luokkahuoneessa. Tästä saatiin myös joitakin käytännön esimerkkejä tutkimuksen aikana meluvalitusten muodossa. Kun ilmanpuhdistimet olivat pois päältä, luokkahuoneiden mitatut keskiäänitasot pysyivät pääosin asumisterveysohjeen ohjearvon alapuolella.

Jos luokkaan tuodaan toinen ilmanpuhdistin samalla tehoasetuksella, keskimääräinen äänitaso suurenee 3 desibeliä. Tällöin kaksi 130 m³/h teholla toimivaa ilmanpuhdistinta aiheuttaisivat asumisterveysasetuksen toimenpiderajan ylityksen alle 4 metrin etäisyydellä puhdistimista.



Kuva 25. Keskiäänitasot ($L_{Aeq,1\ min}$, ei oppilaita) yhden ilmanpuhdistimen luokkahuoneissa eri etäisyyksillä ilmanpuhdistimesta ja eri tehoilla (puhtaan ilman tuotto CADR) verrattuna asumisterveysasetuksen mukaiseen toimenpiderajaan ($L_{Aeq, k10\ 7-22}$). CADR 330 m³/h luokka on mitattu puutyöluokassa, jossa ilmanvaihdosta johtuva taustamelutaso oli keskimääräisiä luokkia korkeampi.

Ilmanvaihto, suhteellinen kosteus, paine-ero

Luokkahuoneiden ilmanvaihtokertoimet vaihtelivat välillä 2–5 1/h, paine-erot välillä -11,1–7,7 Pa ja suhteelliset kosteudet välillä 11,5–43,0 %. Ilmanvaihtokertoimet ja paine-erot luokittain ja tutkimusjaksoittain on esitetty liitteessä 1 taulukossa L1. Luokkahuoneiden suhteelliset kosteudet on esitetty luokittain ja tutkimusjaksoittain liitteessä 2 taulukossa L1.

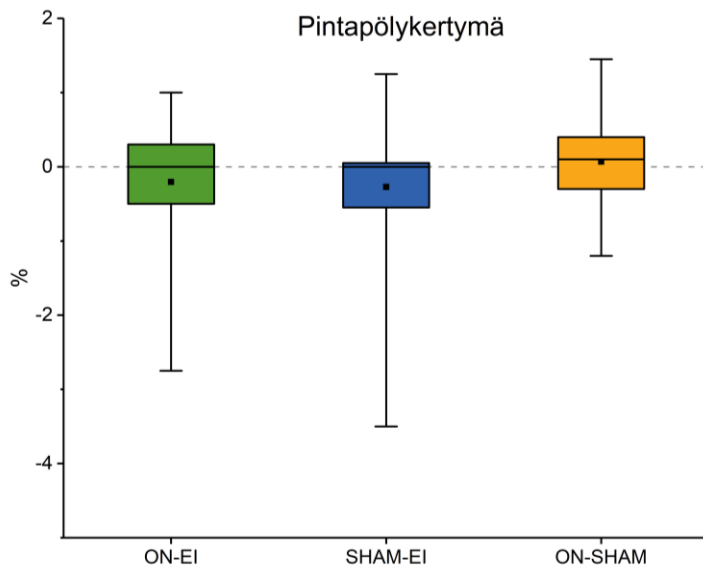
Siivouskysely

Siivouskyselyjen perusteella koulujen normaaleissa viikkosiivouksissa ei tapahtunut muutoksia mittausjaksojen aikana.

Pintapölykertymä

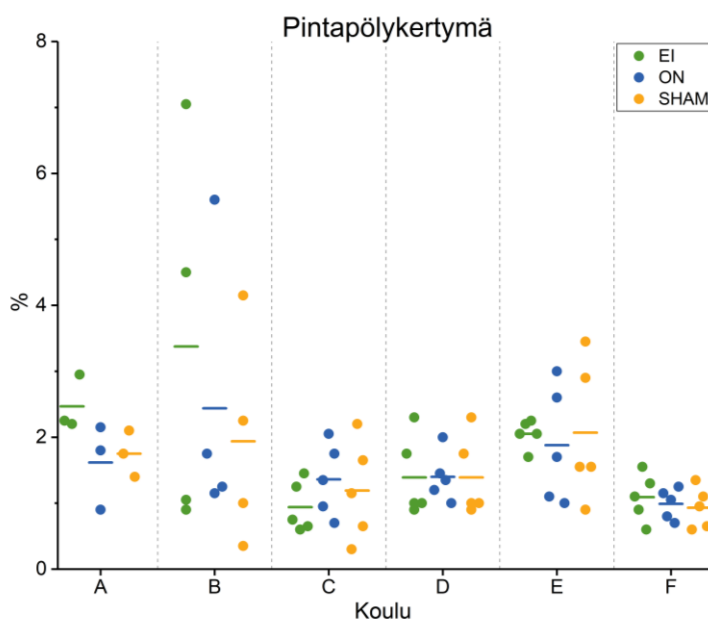
Pintapölykertymä määritettiin kahdelta rinnakkaiselta maljalta. Menetelmän toistettavuutta määritettiin käyttämällä Spearmanin korrelaatiota, koska aineisto ei ollut normaalisti jakautunut. Spearmanin korrelaatiokerroin rinnakkaisten maljojen välillä koko mittausaineistosta määritettynä oli 0,40 ($p < 0,001$) ($n = 81$ paria maljoja).

Tarkasteltaessa pintapölyn määrää kouluittain eri interventiojaksoilla, ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja tuloksissa, vaikka sekä ON- että SHAM-jaksoilla pölyn määrä oli vähäisempi EI-jaksoon verrattuna (kuva 26).



Kuva 26. Erot pintapölykertymässä tutkimusjaksojen välillä.

Pintapölyn määrä vaihteli eri koulujen kesken lähtökohtaisesti, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Koulussa B havaittiin suurimmat pintapölykertymät, kun pienimmät pintapölykertymät havaittiin koulussa F (kuva 27).



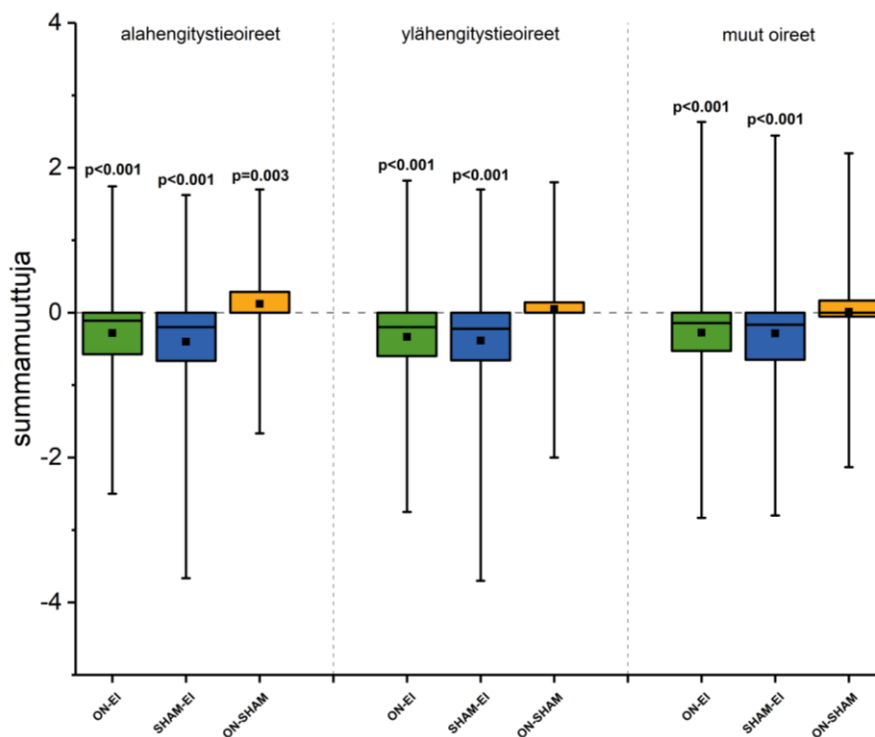
Kuva 27. Pintapölykertymä kouluittain eri tutkimusjaksoilla.

Oireiden raportointi

Oppilaiden ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet

Oppilaiden kokemien ylähengitystie-, alahengitystie- ja muiden oireiden esiintymisen erot eri tutkimusvaiheiden välillä on esitetty kuvassa 28. Kaiken kaikkiaan 131 oppilasta 209:sta oppilaasta vastasi kyselyyn vähintään kolmena päivänä jokaisessa tutkimusvaiheessa, jolloin vastauksia tuli yhteensä 1032 vastattua päivää tutkimusvaiheessa, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä, 1078 vastattua päivää ilmanpuhdistimen käytön aikana (suodatus) ja 863 vastattua päivää ilmanpuhdistimen pelkästään kierrättäessä ilmaa (SHAM-jakso).

Tilastollisesti merkitsevä väheneminen alempien hengitysteiden (-5 % (lv: -6 % – -3 %)), ylempien hengitysteiden (-7 % (lv: -10 % – -5 %)) ja muiden oireiden (-6 % (lv: -8 % – -4 %)) raportoinnissa havaittiin ON-jaksolla verrattuna EI-jaksoon. SHAM-jaksolla ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet vähenivät enemmän kuin ON-jaksolla, ja ero 2 % (lv: 1 % – 4 %) oli tilastollisesti merkitsevä alahengitystieoireiden osalta.



Kuva 28. Oppilaiden kokemien ylähengitystie-, alahengitystie- ja muiden oireiden esiintymisen erot eri tutkimusvaiheiden välillä.

Opettajien ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet

Opettajien kokemat ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet eri tutkimusjaksoilla on esitetty taulukossa 12. Muuttujia muodostettaessa, oireet pisteytettiin ja niistä muodostettiin summamuuttuja, jolloin oireipistemuuttujat saivat siten arvot välillä 5–20, 4–16 ja 4–16 alempien hengitysteiden, ylähengitysteiden ja muiden oireiden osalta. SHAM-jaksolla opettajien kokeman oireilun keskiarvo kasvoi hieman, kun taas ON-jaksolla ylähengitystie- ja muut oireet vähenivät hieman verrattuna EI-jaksoon. Vastaavasti ON-jaksolla koetut alahengitystieoireet lisääntyivät hieman verrattuna EI-jaksoon. On huomioitava, että raportoitujen oireiden keskiarvoissa erot olivat erittäin pieniä ja mediaanitasoissa ei havaittu juurikaan eroa eri tutkimusvaiheiden välillä.

Taulukko 12. Opettajien kokemat ylähengitystie-, alahengitystie- ja muut oireet eri tutkimusjaksoilla.

Alahengitystieoireet					
Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
EI	168	5,6	5	5	13
ON	171	5,7	5	5	15
SHAM	138	5,9	5	5	12
Ylähengitystieoireet					
Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
EI	169	5,3	4	5	14
ON	172	5,2	4	4	14
SHAM	139	5,6	4	5	14
Muut oireet					
Tutkimusvaihe	N	Keskiarvo	Minimi	Mediaani	Maksimi
EI	171	4,8	4	4	10
ON	172	4,6	4	4	8
SHAM	139	5,0	4	4	9

Olosuhteiden raportointi

Oppilaiden kokemat olosuhdehaitat on esitetty taulukossa 13. Oppilaat raportoivat pääosin, että eivät kokee tai kokivat vain vähän olosuhdehaittoja tutkimuskouluissa. Eniten koettua haittaa raportoitiin luokan melun ja rauhottomuuden osalta. ON-jakso alensi hieman suurinta osaa raportoiduista olosuhdehaitoista. SHAM-jaksolla vedon tunne ja kylmyyden kokeminen lisääntyivät, mutta muutoin suurin osa raportoiduista olosuhdehaitoista väheni hieman.

Taulukko 13. Oppilaiden raportoimat sisäympäristön olosuhdehaitat eri tutkimusjaksojen aikana.

Liian Kuuma		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	96,9	3,1
ON	97,3	2,7
SHAM	97,8	2,2
Vaihteleva lämpötila		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	98,9	1,1
ON	98,9	1,1
SHAM	99,2	0,8
Liian kylmä		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	98,5	1,5
ON	99,1	0,9
SHAM	97,2	2,8
Vedon tunne		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	99,8	0,2
ON	100	0
SHAM	99,2	0,8

Kuiva ilma		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	98,6	1,4
ON	99,6	0,4
SHAM	99,8	0,2
Tunkkainen ilma		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	98,1	1,9
ON	99,0	1,0
SHAM	99,1	0,9
Homeen tai maakellarin haju		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	99,8	0,2
ON	99,9	0,1
SHAM	100	0
Muu epämiellyttävä haju		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	98,5	1,5
ON	99,0	1,0
SHAM	99,0	1,0
Pöyisyys tai likaisuus		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	96,4	3,6
ON	97,0	3,0
SHAM	98,0	2,0
Riittämätön ilmanvaihto		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	98,9	1,1
ON	99,3	0,7
SHAM	98,7	1,3
Melu		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	89,3	10,7
ON	90,9	9,1
SHAM	91,7	8,3
Luokan rauhattomuus		
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)
EI	87,3	12,7
ON	86,6	13,4
SHAM	89,0	11,0

Koettu ilmanpuhdistimien vaikutus

Oppilaiden kokemat ilmanpuhdistimien vaikutukset sisäympäristön olosuhteisiin ja laatuun on esitetty taulukossa 14. Oppilaat raportoivat eniten, että eivät kiinnittäneet huomiota ilmanpuhdistimen ääneen tai sen aiheuttamaan puhallukseen. Ääni havaittiin 24 %:ssa ja puhallus 20 %:ssa ON-jaksolla raportoiduista vastauksista. Ääni häiritsi ON-jaksolla 7 %:ssa ja puhallus 4 %:ssa vastauksista. ON-jaksolla

ilmanpuhdistimen koettiin parantavan sisäilman laatua 23 %:ssa vastauksista. Lähes vastaava vaikutus havaittiin EI-jaksolla ja suurin vaikutus havaittiin SHAM-jakson aikana (25 %).

Taulukko 14. Oppilaiden raportoima koettu ilmanpuhdistimien vaikutus sisäympäristön olosuhteisiin ja laatuun tutkimusluokissa eri tutkimusjaksojen aikana.

Ilmanpuhdistimen ääni			
Tutkimusvaihe	Ei kiinnitä huomiota (%)	Huomaa sen (%)	Ääni häiritsee (%)
EI	58,4	35,4	6,2
ON	68,6	24,3	7,1
SHAM	65,1	27,6	7,3
Ilmanpuhdistimen puhallus			
Tutkimusvaihe	Ei kiinnitä huomiota (%)	Huomaa sen (%)	Puhallus häiritsee (%)
EI	74,2	23,9	1,9
ON	75,7	20,4	3,9
SHAM	73,5	22,9	3,6
Onko ilmanpuhdistin parantanut sisäilman laatua?			
Tutkimusvaihe	Ei/vähän (%)	Melko paljon/paljon (%)	
EI	79,3	20,7	
ON	76,7	23,3	
SHAM	75,3	24,7	

Tulosten tarkastelua

Tutkimuksessa selvitettiin ilmanpuhdistimien käytön vaikutusta alakoulujen sisäilman laatuun sekä koettuihin oireisiin ja olosuhteisiin. Tutkimuksessa mukana olleissa ilmanpuhdistimissa (HEPA- ja aktiivihiilisuodatin) ilmamäärän mitoituksena käytettiin Kuopion kaupungin kohteissa yleisesti käytettyä mitoittua kyseisillä laitteilla. Ilmanpuhdistimien tuottama puhtaan ilman määrä oli maltillinen (20–50 %) verrattuna tutkittujen luokahuoneiden perusilmanvaihtoon. Lähtökohtaisesti epäpuhtauspitoisuudet olivat pieniä tutkimuskouluissa, jonka vuoksi mittausepävarmuuden vaikutus tulee huomioida tuloksia tarkasteltaessa.

Yksi ilmanpuhdistimien lukumäärää ja tehoasetusta rajoittava tekijä on puhdistimien aiheuttama melu. Tutkituissa luokahuoneissa keskiäänitaso ylitti asumisterveysasetuksen (545/2015) mukaisen toimenpiderajan luokkatiloille vielä 8 m etäisyydelläkin ilmanpuhdistimesta, kun puhdistin oli päällä ja sen tehoasetus oli vähintään 179 m³/h. Ilmanpuhdistimien melusta tuli myös joitain valituksia, vaikka ilmamäärän mitoitus oli maltillinen.

HiMiKKo-hankkeessa mukana olleiden luokahuoneiden hiukkaspitoisuudet olivat pieniä jo lähtötilanteessa. Mediaanit (min-max) olivat PM₁₀ 12 µg/m³ (5–25 µg/m³), PM_{2.5} 3 µg/m³ (1–6 µg/m³) ja ABS 0,13 m⁻¹x10⁻⁵ (0,07–0,35 m⁻¹x10⁻⁵). Kaikissa tutkimuskouluissa oli koneellinen ilmanvaihto ja tuloilmakanavassa hiukkassuodatin, mikä selittää pienet hiukkaspitoisuudet ja pääsääntöisesti ulkoilmasta peräisin olevan mustan hiilen (ABS) sisä- ja ulkopitoisuuksien suhteen pienuuden (keskimäärin 0,43) jo lähtötilanteessa.

Keskimääräiset sisäilman hiukkaspitoisuudet alittivat selvästi asumisterveysasetuksen toimenpiderajat, vaikka mittaukset tehtiin ainoastaan koulupäivien aikana, jolloin pitoisuudet olivat suuremmat kuin ilta- ja yöaikaan. Mitatut pitoisuudet alittivat myös Maailman terveysjärjestö WHO:n ohjearvot. Tässä tutkimuksessa kukin hiukkasnäyte kerättiin yhdelle suodattimelle kymmenen arkipäivän aikana klo 8–16, jolloin yksittäisten päivien mahdollisia raja- ja ohjearvojen ylityksiä ei pysty erottamaan tuloksista. Suomessa aiemmin tehdyissä mittauksissa koulujen ja päiväkotien sisäilman PM₁₀-pitoisuuden mediaani on ollut 5–28 µg/m³ ja PM_{2.5}-pitoisuuden mediaani 2–14 µg/m³. Suomalaisissa kodeissa tehdyissä mittauksissa PM_{2.5}-pitoisuuden mediaani on vaihdellut 3–10 µg/m³ ja ABS mediaani 0,2–1,4 m⁻¹x10⁻⁵ (Yli-Tuomi ja Siponen 2023).

PM₁₀-hiukkasten ja etenkin PM_{10-2.5}-hiukkasten pitoisuus oli muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta sisäilmassa suurempi kuin ulkoilmassa. Pitoisuudet alkoivat kohota nopeasti koulupäivän alkaessa ja PM_{10-2.5}-pitoisuudet pienenevät lähes nolnaan iltapäivällä koulupäivän loputtua. Pitoisuus ulkoilmassa ei vaikuttanut PM_{10-2.5}-pitoisuuteen sisäilmassa. Luokahuoneissa pitoisuutta nosti todennäköisesti kengissä ulkoa sisään ja sukissa käytäviltä luokkiin kulkeutuneiden hiukkasten resuspendoituminen oppilaiden liikkeessä. Luokahuoneisiin kulkeutuvien hiukkasten määrä riippuu muun muassa koulun pihasta (hiekkapihoilta kulkeutuu enemmän hiukkasia kuin asfaltoidulta pihalta), vuodenajasta ja säästä (lumi, vesisade) sekä siitä, mihin kengät ja ulkovaatteet jätetään (ulko-oven lähelle jätettäessä luokkiin kulkeutuu vähemmän hiekkaa). Koulussa E keskimääräinen PM_{10-2.5}-pitoisuus sisäilmassa oli selvästi suurempi (14 µg/m³) kuin muissa kouluissa (8 µg/m³). Suurempi pitoisuus voi johtua koulua ympäröivästä suuresta hiekkapihasta ja mittauksen ajoittumisesta syksyyn sulan maan aikaan. Koulun D ulkopuolella EI-jakson suuri pitoisuus selittyy katupölykaudella, mutta ON-jakson suurelle ulkopitoisuudelle voi olla monta syytä, esimerkiksi kunta-alan lakon takia viivästynyt koulun pihan puhdistus tai koulun julkisivukorjaukset mittausten aikana.

Suuressa osassa luokkia PM_{2.5}-pitoisuus oli sisäilmassa suurempi kuin ulkoilmassa, joten myös pienhiukkasilla oli sisätiloissa lähteitä. Ajallisen vaihtelun perusteella luokahuoneiden PM_{2.5}-pitoisuuteen vaikuttaa myös pitoisuus ulkoilmassa. Ulkoilmassa pitoisuusvaihteluun vaikuttaa paljon maan rajojen ulkopuolelta tuleva kaukokulkeuma. Paikallisesti etenkin liikenne ja puun pienpoltto voivat nostaa pitoisuuksia. PM_{2.5}-hiukkasilla on vielä tärkeämpää kuin PM₁₀-hiukkasilla se, että ulkoilman hiukkaspitoisuus otetaan huomioon, kun tarkastellaan huonekohtaisten ilmanpuhdistimien vaikutusta luokahuoneiden sisäilman hiukkaspitoisuuteen.

Luokahuoneissa ei yleensä, teknistä käsityöluokkaa lukuun ottamatta, ole lähteitä epätäydellisessä palamisessa syntyvälle noelle eli mustalle hiellelle. Täten ABS kuvaa paremmin ulkoilman hiukkasten vaikutusta sisäilman hiukkaspitoisuuksiin kuin PM₁₀-, PM_{2.5}- tai PM_{10-2.5}-pitoisuus. Syytä sille, miksi ABS:n I/O-suhde

oli suurempi SHAM-jaksojen aikana kuin muulloin, ei tiedetä. Luokkahuoneessa E30 tehtyjen testimittausten perusteella ilmanpuhdistimesta ei tullut mustaa hiiltä ilmaan ON- tai SHAM-jaksojen aikana. Normaalisti ilmanpuhdistimissa on aina suodattimet paikoillaan puhdistinta käytettäessä, joten mahdollinen mustan hiilen päästö SHAM-jakson aikana on oleellinen vain tulkittaessa pelkän ilman kierrättämisen ja/tai plasebovaikutuksen yhteyttä pitoisuuksiin ja oppilaiden ja opettajien kokemuksiin oireisiin.

HiMiKKo-hankkeessa ilmanpuhdistimen vaikutusta hiukkaspitoisuuksiin tarkasteltiin sisä- ja ulkopitoisuuksien suhteen muutosten avulla. Tuloksia tarkasteltaessa on syytä huomata, että pienillä pitoisuustasoilla mittausepävarmuus ja pienetkin muutokset esimerkiksi sisälähteiden voimakkuuksissa tai ikkunatuuleutuksessa voivat vaikuttaa luokkahuoneen hiukkaspitoisuustuloksiin enemmän kuin ilmanpuhdistin. Vain pienihiukkasilla havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero (keskimäärin -25 %) ilmanpuhdistimen käytön (suodatus) ja lähtötason (ilmanpuhdistin oli luokassa, mutta ei käynnissä) välillä. Tuloksissa oli kuitenkin suurta vaihtelua eri luokkatilojen välillä.

Ilmanpuhdistimien käytöllä havaittiin tilastollisesti merkitsevä (-53 %) ero TVOC-pitoisuuteen verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin oli luokassa, mutta ei käynnissä. Ilmanpuhdistimen pelkästään kierrättäessä ilmaa (sham-jakso) havaittiin pienempi, ei tilastollisesti merkitsevä (-11 %) ero, TVOC-pitoisuuksiin verrattuna tutkimusjaksoon, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. On huomioitava, että lähtökohtaisesti TVOC-pitoisuudet olivat matalia kyseisissä tutkimuskouluissa ja alittivat selvästi sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen (545/2015) mukaisen toimenpideraja-arvon ja saksalaisen hygieenisen ohjeiston (Umwelt Bundesamt, 2023). Tutkimuksen perusteella ilmanpuhdistimista voi olla väliaikaisesti hyötyä tiloissa, joissa on merkittävä VOC-lähde.

Laskeutuneen pölyn näytteissä qPCR-menetelmällä määritettyjen mikrobiryhmien pitoisuuksissa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa eri tutkimusjaksoilla. Ilmanpuhdistimien käyttö vaikutti eri mikrobiryhmien pitoisuuksiin eri tavoin: suodatustoiminto nosti hieman bakteerien ja laski sienten pitoisuuksia verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Tämä selittynee sillä, että sienten pääasiallinen lähde koululuokissa on ulkoilma ja ne ovat siten ilman kautta kulkeutuvia ja näin ollen myös suodattuvat paremmin. Myös pelkän ilman kierrätyksen vaikutus vaihteli mikrobiryhmittäin. Aktiivisten ilmanäytteiden osalta, ilmanpuhdistimien käyttö vähensi mikrobipitoisuuksia verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Pelkkä ilman kierrätys vähensi pitoisuuksia yleensä vähemmän kuin ilmanpuhdistimen käyttö. Tutkimusjaksoilla ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevää yhteyttä aktiivisissa ilmanäytteissä esiintyvien eri mikrobiryhmien pitoisuuksiin. Tutkimuksen perusteella ilmanpuhdistimien käytöllä, tutkimuksessa käytetyllä mitoituksella, ei saada merkittävää hyötyä mikrobipitoisuuden vähentämiseen tiloissa, joissa epäpuhtauspitoisuuksien taso on jo lähtökohtaisesti pieni. On myös huomioitava, että ilmanpuhdistimen käytön aikana joidenkin mikrobien pitoisuus lisääntyi laskeutuneen pölyn näytteissä, mikä voi selittyä pölyn resuspendoitumisella ilmaan tehostuneen ilmavirran mukana ja laskeutumisella pinnoille. Tämä tutkimuslöydös nostaa esille tarpeen lisätutkimuksesta ilmanpuhdistimien vaikutuksesta mikrobeihin muun muassa ilmavirtausten, mikrobien resuspendion ja pinnoille laskeutumisen suhteen.

SARS-CoV-2-virusta havaittiin ainoastaan 7,4 %:ssa laskeutuneen pölyn näytteistä ja sitä havaittiin kaikilla tutkimusjaksoilla (ilmanpuhdistin ei käynnissä, ilmanpuhdistimen käyttö (suodatus) ja pelkkä ilman kierrätys (sham-jakso). Kyseisissä tutkimuskouluissa ja -luokissa on siis ollut SARS-CoV-2 tartuntoja ajallisesti lähellä tutkimuksen ajankohtaa. Tutkimus on ensimmäinen kouluissa tehty tutkimus, jossa pystyttiin havaitsemaan SARS-CoV-2-virusta laskeutuneen pölyn näytteistä. Viruksia havaittiin myös ilmanpuhdistimen käytön aikana, mikä kertoo siitä, että osa viruksista jää pinnoille, eivätkä näin ollen suodatu.

Ilmanpuhdistimen käytöllä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää yhteyttä pintapölyn määrään luokkahuoneissa, vaikka sekä ilmanpuhdistimen käyttö että pelkkä ilman kierrätys vähensivät pintapölyn määrää. Ilmanpuhdistimen käyttö lisää ilmavirtausta luokkahuoneissa ja näin ollen osa laskeutuneesta pölystä voi resuspendoitua ilmaan.

Ilmanvaihdon määrän vaikutusta epäpuhtauspitoisuuksiin tarkasteltiin jakamalla tutkimusluokkien ilmamäärät mediaanin mukaan kahteen ilmanvaihtoluokkaan. PM₁₀- ja PM_{2.5}-hiukkasten I/O-suhteiden mediaanit sekä karkeiden hiukkasten mediaanipitoisuudet olivat kaikkien tutkimusjaksojen aikana pienemmät tehokkaamman ilmanvaihdon luokkahuoneissa. Ero ilmamääräluokkien välillä oli tilastollisesti merkitsevä PM₁₀:n ja PM_{2.5}:n I/O-suhteiden sekä PM_{10-2.5}-pitoisuuden mediaaneille ON-jaksolla ja PM₁₀:n ja PM_{2.5}:n I/O-

suhteille SHAM-jaksolla. TVOC-mediaanipitoisuus oli pienempi suuremmassa ilmamääräluokassa verrattuna pienempään ilmamääräluokkaan tilanteessa, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Kuitenkin ilmamäärän ollessa suurempaa luokkaa, pelkän ilman kierrätyksen aikana havaittiin hieman suurempi TVOC-pitoisuus, kuin tilanteessa, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. On mahdollista, että ilman kierrätys, kun tilan ilmanvaihto on tehokas, voi nostaa sisäilman TVOC-pitoisuuksia, varsinkin, jos tilassa on merkittävä TVOC-lähde. Ilmanpuhdistimen käytön aikana TVOC-mediaanipitoisuuksissa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa kahden perusilmanvaihdon ilmamääräluokan välillä.

Laskeutuneen pölyn näytteissä mikrobiryhmien, pois lukien Gram-positiiviset bakteerit, mediaanipitoisuudet olivat pienempiä suuremmassa perusilmanvaihdon ilmamääräluokassa verrattuna pienempään ilmamääräluokkaan, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Suuremmassa ilmamääräluokassa pelkän ilman kierrätyksen aikaiset mediaanipitoisuudet olivat usean mikrobiryhmän kohdalla suurempia kuin vastaavat, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Tämä ilmiö selittynee tehokkaamman ilmapuhdauksen aiheuttamalla resuspendoitumisella. Aktiivisissa ilmanäytteissä havaittiin alhaisemmat mikrobiryhmien mediaanipitoisuudet suuremmassa ilmamääräluokassa, kun ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Poikkeuksena tästä oli *Penicillium/Aspergillus* spp., jonka mediaanipitoisuus oli alhaisempi pienemmässä ilmamääräluokassa. Gram-positiivisten ja Gram-negatiivisten bakteerien mediaanipitoisuus oli alhaisimmillaan ilmanpuhdistimen käytön aikana kummassakin ilmamääräluokassa. Sienten kohdalla ei havaittu selvää trendiä eri tutkimusvaiheiden välillä. Ero mikrobiryhmien mediaanipitoisuuksissa kahdessa eri ilmamääräluokassa ilmanpuhdistimen käytön aikana, ei ollut tilastollisesti merkitsevä kummarkaan näytetyypin osalta.

Tutkimuksessa tehtiin pieni osatutkimus, jossa selvitettiin ilmanpuhdistimien määrän vaikutusta sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Mukana oli kaksi koulua, joissa oli molemmassa viidessä luokahuoneessa yksi ilmanpuhdistin ja yhdessä luokahuoneessa kaksi ilmanpuhdistinta. Tulokset ovat ainoastaan suuntaa antavia, sillä näin pienellä otoksella ei pystytä tekemään luotettavaa tilastollista analyysia. Osatutkimuksen tulosten perusteella kaksi ilmanpuhdistinta vähentää tilan TVOC-lähtötason mediaanipitoisuutta tehokkaammin kuin yksi ilmanpuhdistin. Sen sijaan laskeutuneen pölyn näytteissä, mikrobiryhmien mediaanipitoisuudet olivat suurempia, kun käytössä oli kaksi ilmanpuhdistinta sekä puhdistimien käytön että pelkän ilman kierrätyksen aikana verrattuna siihen, että käytössä oli ainoastaan yksi ilmanpuhdistin. Tämä tutkimustulos tukee sitä, että ilmanpuhdistimista vaikuttaisi olevan hyötyä TVOC-pitoisuuksien vähentämisessä ja tällöin yhden tai jopa kahden ilmanpuhdistimen oikeanlaisella sijoittamisella tilaan ja mahdolliseen lähteeseen nähdessä voidaan saada hyötyä. Sen sijaan mikrobien kohdalla kahden ilmanpuhdistimen käyttö voi jopa nostaa pitoisuuksia, ainakin tässä tutkimuksessa, jossa lähtöpitoisuudet olivat pieniä. Kahden ilmanpuhdistimen käyttäminen ei näyttänyt tuottavan hyötyä hiukkasaltistumisen kannalta tutkituissa kahdessa luokahuoneessa, joissa pitoisuudet olivat jo valmiiksi pieniä. Kahden ilmanpuhdistimen käyttö luokkatilassa johti tutkimuksessa käytetyllä teholla (kumpikin puhdistin noin 200 m³/h) asumisterveysasetuksen mukaisen melulle asetetun toimenpiderajan (35 dB) ylitykseen alle 4 m etäisyydellä puhdistimista.

Ilmanpuhdistimen pelkkä ilman kierrätys lisäsi hieman opettajien kokeman oireilun keskiarvoa, kun taas ilmanpuhdistimen käyttö vähensi hieman ylähengitystie- ja muiden oireiden keskiarvoa verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Vastaavasti ilmanpuhdistimen käyttö lisäsi hieman koettujen alahengitystieoireiden keskiarvoa verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. On huomioitava, että erot koettujen oireiden keskiarvojen välillä olivat erittäin pieniä ja tutkimuksessa mukana olleiden opettajien määrä oli pieni, joten tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä ilmanpuhdistimen käytön vaikutuksesta opettajien kokemiin oireisiin. Oppilaiden osalta, ilmanpuhdistimien käyttö vähensi koettuja alahengitystie-, ylähengitystie- ja muita oireita tilastollisesti merkitsevästi. Myös pelkkä ilman kierrätys vähensi koettuja oireita, jopa enemmän kuin ilmanpuhdistimen käyttö, mutta ero raportoinnissa suodatuksen ja pelkän ilman kierrätyksen välillä oli tilastollisesti merkitsevä ainoastaan alahengitystieoireiden osalta. Havaitsimme tutkimuksessa joidenkin epäpuhtauden osalta, että myös pelkkä ilman kierrätys vähensi pitoisuutta sisäilmassa. Tämä johtunee sisäilman tehokkaammasta kierrätyksestä, joka laimentaa epäpuhtauspitoisuutta. Lisätutkimusta tarvitaan, onko vähentyneissä oppilaiden raportoimissa oireissa kyseessä mahdollinen plasebovaikutus, koska tilan käyttäjät eivät tiedäneet, milloin ilmanpuhdistin suodatti ilmaa ja milloin pelkästään kierrätti sitä tai onko kyseessä esimerkiksi epäpuhtauspitoisuuden aleneman aiheuttama vaikutus.

Ilmanpuhdistimien käyttö vähensi myös useita oppilaiden itse raportoimia sisäympäristön olosuhdehaittoja tutkimusluokissa, kuten myös pelkkä ilman kierrätys. Pelkkä ilman kierrätys lisäsi vedon ja kylmyyden raportointia, mikä johtunee tehostuneesta sisäilman sekoittumisesta. Ilmanpuhdistimista aiheutuvaa ääntä ja puhallusta raportoitiin melko vähän. Näin siitäkin huolimatta, että puhdistimien aiheuttamasta äänestä tuli joitakin meluvalituksia ja tutkimuksessa käytettyjen ilmanpuhdistimien keskiäänitaso vähintään 179 m³/h tehoasetuksella ylitti asumisterveysasetuksen toimenpiderajan (35 dB) vielä ilmanpuhdistimesta kauimmaisena olleen oppilaan istumapaikalta mitattuna. Ilmanpuhdistimien käytön raportoitiin parantaneen koettua sisäilman laatua, joskin lähes vastaava vaikutus koettiin, kun ilmanpuhdistin oli viety luokkaan, mutta se ei ollut käynnissä, mikä selittyy plasebovaikutuksella. Pelkän ilman kierrätyksen aikana ilmanpuhdistimen vaikutus sisäilman laatuun koettiin parhaimpana. Kuten raportoitujen oireiden kohdalla, tämä ilmiö voi selittyä esimerkiksi plasebovaikutuksella tai tehokkaammalla sisäilman sekoittumisella, joka pienensi joidenkin epäpuhtauksien pitoisuutta luokkahuoneiden sisäilmassa.

Tutkimuksen tulokset tukevat aiemmin tekemämme ”Ilmanpuhdistimien toimivuuden testaaminen ilmanlaadun parantamisessa kosteus – ja homevauriokohteissa” (PUHHO) -tutkimuksen (Leppänen ym. käsikirjoitus) tuloksia. Kummassakaan tutkimuksessa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää vaikutusta hengittävien hiukkasten ja mikrobien pitoisuuksiin, mutta ilmanpuhdistimet pienensivät TVOC-pitoisuuksia tuloksen ollessa tilastollisesti merkitsevä HiMiKKO-tutkimuksessa. Oppilaiden kokemien oireiden osalta molemmissa tutkimuksissa havaittiin pieni, tilastollisesti merkitsevä alenema ylä-, alahengitystie- ja muissa oireissa sekä ilmanpuhdistimen käytöllä että pelkällä ilman kierrätyksellä.

Johtopäätökset

Tutkimuskoulujen hiukkas-, mikrobi- ja TVOC-pitoisuudet olivat lähtökohtaisesti pieniä ja ilmanpuhdistimissa käytetty ilmamäärän mitoitus, jota myös Kuopion kaupunki käyttää, oli maltillinen verrattuna tilan perusilmanvaihtoon. Maltillisesta ilmanpuhdistimien ilmamäärän mitoituksesta huolimatta päädyttiin tilanteeseen, jossa keskiäänitaso luokissa ylitti asumisterveysasetuksen mukaisen toimenpiderajan (35 dB). Ilmanpuhdistimien hankinnassa myös laitteista aiheutuva melu tulisi huomioida. Laitteiden valmistajien tulisi kiinnittää huomiota ilmanpuhdistimien tuottamaan äänitasoon myös puhdistimia kehitettäessä. Ilmanpuhdistimien käyttö pienensi pienhiukkaspitoisuutta verrattuna lähtötasoon tilastollisesti merkitsevästi, mutta tuloksissa oli suurta vaihtelua eri luokkatilojen välillä. Sen sijaan karkeiden ja hengitettävien hiukkasten sekä mustan hiilen pitoisuuksiin ilmanpuhdistimen käytöllä ei ollut merkittävää vaikutusta tutkimuksessa käytetyllä ilmanpuhdistimien mitoituksella. Ilmanpuhdistimien käytöllä havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero TVOC-pitoisuuteen verrattuna tilanteeseen, jossa ilmanpuhdistin ei ollut käynnissä. Ilmanpuhdistimien käytöllä tutkimuksessa käytetyllä mitoituksella ei sen sijaan saatu merkittävää hyötyä mikrobipitoisuuksien vähentämiseen ja ilmanpuhdistimen käyttö jopa lisäsi joidenkin mikrobien pitoisuutta, kun pitoisuus luokissa oli lähtökohtaisesti pieni. Myös pelkkä ilman kierrätys vähensi TVOC- ja mikrobipitoisuuksia, yleensä kuitenkin vähemmän kuin ilmanpuhdistimen käyttö (suodatus). Pelkkä ilman kierrätys vähensi oppilaiden raportointien ylä- ja alahengitystie- sekä muiden oireiden määrää jopa enemmän kuin ilmanpuhdistimien käyttö, joka sekin vähensi hieman, mutta tilastollisesti merkitsevästi kyseisten oireiden raportointia. Vastaava vaikutus havaittiin oppilaiden kokemien sisäympäristön olosuhdehaittojen osalta. Lisätutkimusta tarvitaan, mistä tekijöistä vaikutus johtuu. Koettujen olosuhdehaittojen osalta plasebovaikutus havaittiin, kun oppilaat kokivat ilmanpuhdistimen käytön parantaneen luokan sisäilman laatua selvästi jo silloin, kun ilmanpuhdistin ei ollut vielä käynnissä. Pelkän ilman kierrätyksen aikana ilmanpuhdistimen vaikutus sisäilman laatuun koettiin puolestaan parhaimpana, mikä voi selittyä esimerkiksi tehostuneella ilman sekoittumisella.

Tutkimuksen perusteella tilan perusilmanvaihdon määrällä on merkitystä sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin ja pitoisuudet olivat matalampia luokkahuoneissa, joissa oli tehokkaampi perusilmanvaihto. Käytetyllä ilmanpuhdistimien mitoituksella ei saatu merkittävää lisähyötyä hiukkasten tai mikrobien poistossa tutkimusluokissa, joiden pitoisuudet olivat jo lähtökohtaisesti pieniä. Vaikka pitoisuudet olivat lähtökohtaisesti pieniä, havaittiin TVOC-pitoisuuksien pienenevän, mikä viittaa siihen, että ilmanpuhdistimesta voi olla hyötyä väliaikaisratkaisuna tilanteessa, jossa TVOC-pitoisuus on kohonnut. Lisätutkimusta tarvitaan erityisesti ilmanpuhdistimien vaikutuksesta tilan käyttäjien terveyteen ja heidän kokemaansa sisäilman laatuun, ilmanpuhdistimien mitoituksesta sekä tilanteista, joissa tilan epäpuhtauspitoisuudet ovat suuria.

Ilmanpuhdistimien hankintaa harkittaessa, kiinteistönomistajan tai siitä vastaavan tulee huomioida epäpuhtauspitoisuuksien lähtötaso. Ilmanpuhdistimen käytöstä ei tämän tutkimuksen perusteella ole hyötyä tilanteissa, joissa pitoisuudet ovat jo lähtökohtaisesti pieniä. On tärkeää, että laitteen valmistaja opastaa käyttäjälle ilmanpuhdistimen mitoituksen ja asettelun tilaan. Ilmanpuhdistimia voidaan käyttää tilapäisenä ratkaisuna tilanteissa, jolloin tiloissa on merkittävä epäpuhtauslähde. Ensisijaisesti huomiota tulee kiinnittää rakennuksen kunnossapitoon ja oikein mitoitettuun ja energiatehokkaaseen ilmanvaihtoon, jossa on huomioitu myös tuloilman suodatus.

Lähteet

- Bernstein, JA, Alexis, N, Bacchus, H, Bernstein, IL, Fritz, P, Horner, E, Li, N, Mason, S, Nel, A, Oullette, J, Reijula, K, Reponen, T, Seltzer, J, Smith A, Tarlo, SM (2008) The health effects of non-industrial indoor air pollution. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 121(3):585–91.
- Casas, L, Tischer, C, Wouters, I.M, Valkonen, M, Gehring, U, Doekes, G, Torrent, M, Pekkanen, J, Garcia-Esteban, R, Hyvärinen, A, Heinrich, J, Sunyer, J (2013a) Endotoxin, extracellular polysaccharides, and beta(1-3)-glucan concentrations in dust and their determinants in four European birth cohorts: results from the HITEA project. *Indoor Air*. 23, 208–218.
- Chen, W, Zhang, J.S, Zhang, Z (2005) Performance of Air Cleaners for Removing Multiple Volatile Organic Compounds in Indoor Air. *ASHRAE Transactions*. 111(1):1101–1114.
- Cheng, H, Hsieh, C, Tsai, C (2012) Antibacterial and regenerated characteristics of ag-zeolite for removing bioaerosols in indoor environment. *Aerosol and Air Quality Research*. 12(3):409–419.
- Cheong, C, Neumeister-Kemp, H, Dingle, P, Hardy, G (2004) Intervention study of airborne fungal spora in homes with portable HEPA filtration units. *Journal of Environmental Monitoring*. 6(11):866–873.
- EPA. United States Environmental Protection Agency (2009) Residential Air Cleaners (Second Edition): A Summary of Available Information. EPA 402-F-09-002.
- Ferguson, N, Cummings, D, Fraser, C, Cajka, J, Cooley, P, Burke, D (2006) Strategies for mitigating an influenza pandemic. *Nature*. 442(27).
- Godwin & Batterman (2007) Indoor air quality in Michigan schools. *Indoor Air*. 17(2):109–21.
- Haugland, R. & Vesper, S (2002) Method of identifying and quantifying specific fungi and bacteria. US patent 6387652 B1.
- Hulin, M, Simoni, M, Viegi, G, Annesi-Maesano, I (2012) Respiratory health and indoor air pollutants based on quantitative exposure assessments. *European Respiratory Journal*. 40(4):1033–45.
- Hyvärinen, A, Marttila, T, Kero, P, Pekkanen, J, Ung-Lanki, S, Lampi, J, Leppänen, H, Jalakanen, K, Turunen, M, Haverinen-Shaughnessy, U, Annala, P, Suonketo, J, Niemi, J (2017) Avaimet terveelliseen ja turvalliseen rakennukseen (AVATER) – Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja. 44/2017.
- Institute of Medicine (IOM) (2000) Clearing the Air: Asthma and Indoor Air Exposures. Committee on the Assessment of Asthma and Indoor Air, Division of Health Promotion and Disease Prevention.
- Juntunen, M, Salmela, A, Jalakanen, K, Hovi, H, Wallenius, K, Hyvärinen, A (2022) Haihtuvat orgaaniset yhdisteet asunnoissa: Pitoisuustasot, yleisimmät yhdisteet ja terveysvaikutukset. THL Työpäpaperi 5/2022.
- Kettunen, J, Lanki, T, Tiittanen, P, Aalto, P, Koskentalo, T, Kulmala, M, Salomaa, V, Pekkanen, J (2007) Associations of fine and ultrafine particulate air pollution with stroke mortality in an area of low air pollution levels. *Stroke*. 38:918–922.
- Kosteus- ja homevaurioista oireileva potilas. Käypä hoito -suositus. Suomalaisen Lääkäriseuran Duodecimin asettama työryhmä. Helsinki: Suomalainen Lääkäriseura Duodecim, 2016 (viitattu 16.01.2024). Saatavilla internetissä: www.kaypa-hoito.fi.
- Kärkkäinen, P, Valkonen, M, Hyvärinen, A, Rintala, H (2010) Determination of bacterial load in house dust using qPCR, chemical markers and culture. *Journal of Environmental Monitoring*. 12(3), 759–768.
- Lanki, T, Pekkanen, J, Aalto, P, Elosua, R, Berglind, N, D’Ipolti, D, Kulmala, M, Nyberg, F, Peters, A, Picciotto, S, Salomaa, V, Sunyer, J, Tiittanen, P, Von Klot, S, Forastiere, F, for the HEAPPS study group (2006) Associations of traffic related air pollutants with hospitalisation for first acute myocardial infarction: the HEAPPS study. *Occupational & Environmental Medicine*. 63:844–851.
- Leppänen, H, Viljamaa, A, Pulkkinen, A-M, Pennanen, A, Yli-Tuomi, T, Hyvärinen, A, Salonen, R.O, Lanki, T, Siponen, T, Täubel, M (käsikirjoitus) The impact of air cleaner operation on levels of indoor air impurities in classrooms and on pupils’ symptoms.
- Lorimier, C, Le Coq, L, Subrenat, A, Le Cloirec, P (2008) Indoor air particulate filtration onto activated carbon fiber media. *Journal of Environmental Engineering*. 134(2) :126–137.
- Lu, X, Wang, L, Sakthivel, SK, Whitaker, B, Murray, J, Kamili, S, Lynch, B, Malapati, L, Burke, SA, Harcourt, J, Tamin, A, Thornburg, NJ, Villanueva, JM, Lindstrom, S (2020) US CDC Real-Time Reverse Transcription PCR Panel for Detection of Severe Acute Respiratory Syndrome Corona-virus 2. *Emerging Infectious Diseases*. 26(8):1654–65.
- Mendel, MJ (2007) Indoor residential chemical emissions as risk factors for respiratory and allergic effects in children: a review. *Indoor Air*. 17(4), 259–277.
- Meadow, JF, Altrichter, AE, Kembel, SW, Kline, J, Mhuireach, G, Moriyama, M, Northcutt, D, O’Connor, TK, Womack, AM, Brown, GZ, Green, JL, Bohannon, BJM (2014) Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source. *Indoor Air*. 24, 41–48.
- SCHER Scientific Committee on Health and Environmental Risks. Opinion on risk assessment on indoor air quality. 29 May 2007.
- Sordillo, JE., Alwis, UK., Hoffman, E, Gold, DR, Milton, DK (2011) Home characteristics as predictors of bacterial and fungal microbial biomarkers in house dust. *Environ Health Perspect*. 119, 189–195.
- Lampi, J, Pekkanen, J (2018) Terve ihminen terveissä tiloissa: Kansallinen sisäilma ja terveys -ohjelma 2018–2028. THL Raportti 8/2018.
- Umwelt Bundesamt, 2023, German Committee on Indoor Guide Values [verkkoaineisto], <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-air-guide-values> [viitattu 19.12.2023].
- Sidheswaran, MA, Destailats, H, Sullivan, DP, Cohn, S, Fisk, WJ (2012) Energy efficient indoor VOC air cleaning with

- activated carbon fiber (ACF) filters. *Building and Environment*. 47:357–367.
- Smedje, G, Norback, D, Edling, C (1997) Subjective indoor air quality in schools in relation to exposure. *Indoor air*. 7(2):143–150.
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. 545/2015. (Asumisterveysasetus).
- Täubel, M, Rintala, H, Pitkäranta, M, Paulin, L, Laitinen, S, Pekkanen, J, Hyvärinen, A, Nevalainen, A (2009) The occupant as a source of house dust bacteria. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 124(4):834–40.
- Valvira (2016) Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Osa III, Asumisterveysasetus § 14–19. Ohje 8/2016.
- Villanueva, F, Tapia, A, Lara, S, Amo-Salas, M (2018) Indoor and outdoor air concentrations of volatile organic compounds and NO₂ in schools of urban, industrial and rural areas in Central-Southern Spain. *Science of the Total Environment*. 2018 May 1;622–623:222–235.
- Wen, Z, Yang, W, Li, N, Wang, J, Hu, L, Li, J, Yin, X, Zhang, K, Dong, X (2014) Assessment of the risk of infectious aerosols leaking to the environment from BSL-3 laboratory HEPA air filtration systems using model bacterial aerosols. *Particuology*. 13:82–87.
- World Health Organization (2021) WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. Geneva. s. 273.
- World Health Organization (2010) In: World Health Organization Regional office for Europe (Ed.), WHO Guidelines for indoor Air Quality: Selected pollutants. Copenhagen.
- World Health Organization (2009) WHO Guidelines for indoor air quality: dampness and mould.
- Wallenius, K, Hovi, H, Mahiout, S, Remes, J, Rautiala, S, Jokela, P, Leino, K, Liukkonen, T (2021) Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypissä työympäristöissä - Päästölähteet, mittausmenetelmät, pitoisuustasot ja terveysvaikutukset. Työterveyslaitos.
- Wu, FF., Wu, M, Pierse, N, Crane, J, Siebers, R (2012) Daily Vacuuming of mattresses significantly reduces house dust mite allergens, bacterial endotoxin, and fungal beta-glucan. *Journal of Asthma*. 49(2):139–143.
- Yamamoto, N, Hospodsky, D, Dannemiller, KC, Nazaroff, WW, Peccia, J (2015) Indoor emissions as a primary source of airborne allergenic fungal particles in classrooms. *Environmental Science & Technology*. 49(8):5098–5106.
- Yu, BF, Hu, ZB, Liu, M, Yang, HL, Kong, QX, Liu, YH (2009) Review of research on airconditioning systems and indoor air quality control for human health. *International Journal of Refrigeration*. 32(1):3–20.
- Yli-Tuomi, T, Siponen, T (2023) Katsaus sisätilojen PM_{2.5}- ja PM₁₀-hiukkasista Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). Työpäpaperi 22/2023. 45 sivua. Helsinki 2023. ISBN 978-952-408-117-7 (verkkojulkaisu).
- Zhang, Y, Mo, J, Li, Y, Sundell, J, Wargoocki, P, Zhang, J, Little, JC, Corsi, R, Deng, Q, Leung, MHK, Fang, L, Chen, W, Li, J, Sun, Y (2011) Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmospheric environment* (1994). 2011 Aug;45(26):4329–4343.
- Zhang G, Spickett J, Rumchev K, Lee AH, Stick S (2006) Indoor environmental quality in a 'low allergen' school and three standard primary schools in Western Australia. *Indoor Air*. 16(1):74–80.
- Zhong, L, Su, FC, Batterman, S (2017) Volatile Organic Compounds (VOCs) in Conventional and High Performance School Buildings in the US. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14(1):100.
- Gojovic, MZ, Sander, B, Fisman, D, Krahn, MD, Bauch, CT (2009) Modelling mitigation strategies for pandemic (H1N1). *Canadian Medical Association Journal*. 181(10):673–80.

Liitteet

Liite 1

Taulukko L1. Luokkahuoneiden tietoja. Arvot esitetty keskiarvoina tutkimusjaksoja kohti (EI/ON/SHAM)

Koulu	Luokkanro (tilan tyyppi, jos muu kuin luokkahuone)	Oppilasmäärä luokkahuoneessa	Luokassa opetusta (h/pv)	Ikkunatuuletus (min/pv)	CO ₂ (ppm)	Ilmanvaihtokerroin (1/h)	Ilmanpuhdistin (1/h)* (ON/SHAM)	Ilmanpuhdistimen virtaus (m ³ /h) (ON/SHAM**)	Paine-ero (Pa)	Ilmanpuhdistimien lukumäärä
A	10	17 / 19 / 18	5 / 4 / 5	164 / 276 / 280	504 / 583 / 573	5,0	1,0 / 1,1	211 / 230	1,1 / 6,2 / 4,2	1
	12	15 / 16 / 15	5 / 5 / 5	0 / 0 / 0	515 / 531 / 527	5,1	1,4 /	239 / 351	-0,5 / 0,1 / -0,1	1
	13	24 / 26 / 27	4 / 4 / 5	4 / 4 / 5	192 / 87 / 114	e.a.	4,3	1,1 /	239 / 277	e.a.
B	15	15 / 18 / 18	3 / 4 / 3	0 / 0 / 0	746 / 651 / 738	2,7	1,0 / 1,1	150 / 164	-3,4 / -1,3 / e.a.	1
	16	20 / 19 / 19	3 / 3 / 3	0 / 0 / 0	e.a.	2,7	1,0 /	162 / 237	e.a.	1
	17	23 / 24 / 24	4 / 3 / 3	3 / 0 / 0	798 / 712 / 773	2,8	1,0 / 1,1	153 / 168	-0,7 / -1,5 / -2,4	1
	19 (tekninen käsi-työ)	11 / 11 / 11	3 / 3 / 2	0 / 0 / 0	463 / 466 / 481	-	1,0 /	227 / 333	1,2 / -3,3 / e.a.	1
C	20	21 / 21 / 21	4 / 4 / 4	0 / 0 / 0	616 / 598 / 614	3,0	1,0 /	156 / 319	-3,3 / -5,4 / e.a.	1
	21	22 / 24 / 24	4 / 4 / 4	5 / 0 / 0	544 / 580 / 592	3,5	1,1 /	191 / 280	-2,5 / -4,3 / -1,1	1
	22	16 / 17 / 18	4 / 4 / 4	1 / 2 / 3	591 / 629 / 620	3,7	1,0 / 1,1	180 / 197	-8,1 / -11,1 / -7,9	1
	23	17 / 18 / 16	4 / 4 / 4	2 / 0 / 0	668 / 707 / 755	2,8	1,0 / 1,1	180 / 197	-2,3 / -4,9 / e.a.	1
	24	-	-	-	e.a.	3,7	1,0 /	186 / 272	e.a.	1
D	25	16 / 18 / 17	3 / 4 / 4	0 / 17 / 0	516 / 536 / 552	4,4	1,0 / 1,1	160 / 175	e.a. / -8,8 / -10,8	1
	26	17 / 17 / 18	3 / 4 / 4	0 / 0 / 0	554 / 540 / 568	4,2	1,0 / 1,1	170 / 186	-13,3 / -8,7 / -11,0	1
	27	20 / 21 / 22	3 / 4 / 4	133 / 23 / 72	564 / 546 / 560	4,7	1,0 / 2,2	186 / 399	e.a.	1
	28	18 / 17 / 17	2 / 3 / 3	23 / 11 / 23	614 / 584 / 598	5,0	1,1 / 2,3	197 / 424	-5,8 / -3,8 / e.a.	1
	29	22 / 22 / 23	3 / 2 / 4	3 / 25 / 0	547 / 524 / 509	5,1	1,0 / 1,1	180 / 197	3,8 / 7,7 / 5,5	1

Koulu	Luokkanro (tilan tyyppi, jos muu kuin luokkahuone)	Oppilasmäärä luokkahuoneessa	Luokassa opetusta (h/pv)	Ikkunatuuletus (min/pv)	CO ₂ (ppm)	Ilmanvaihtokerroin (1/h)	Ilmanpuhdistin (1/h)* (ON/SHAM)	Ilmanpuhdistimen virtaus (m ³ /h) (ON/SHAM**)	Paine-ero (Pa)	Ilmanpuhdistimien lukumäärä
E	30	27 / 26 / 23	4 / 4 / 4	8 / 0 / 0	634 / 692 / 665	3,6	1,0 /	197 / 316	0,2 / -0,1 / 0,2	1
	31	20 / 19 / 19	4 / 5 / 4	3 / 1 / 0	531 / 605 / 585	3,0	1,0 / 1,1	130 / 142	-1,2 / -1,0 / -0,9	1
	32 (myös tekstiilikäsityötä)	17 / 17 / 18	5 / 5 / 5	2 / 2 / 2	593 / 614 / 627	2,2	1,0 /	197 / 250	0,7 / -0,6 / e.a.	1
	33	18 / 18 / 14	4 / 4 / 4	12 / 13 / 0	598 / 648 / 700	2,1	1,0 / 1,1	130 / 142	-1,2 / -0,8 / e.a.	1
	34	22 / 25 / 26	5 / 5 / 4	17 / 15 / 17	e.a.	4,2	2,2 /	395 / 620	e.a.	2
	35 (tekninen käsityö)	12 / 11 / 14	2 / 2 / 2	0 / 0 / 0	369 / 377 / 374	4,0	1,2 / 1,4	331 / 361	e.a.	1
F	36	22 / 22 / 21	4 / 4 / 4	0 / 0 / 0	502 / 481 / 516	4,0	1,0 /	239 / 419	e.a.	1
	37	21 / 22 / 20	4 / 4 / 4	0 / 0 / 0	604 / 631 / 650	3,9	1,0 / 1,1	231 / 251	-7,2 / -7,1 / -7,0	1
	38	28 / - / -	6 / - / -	0 / - / -	606 / 597 / 619	4,0	1,0 /	239 / 438	e.a.	1
	39	24 / 23 / 23	5 / 5 / 5	0 / 0 / 0	552 / 540 / 546	3,8	1,0 / 1,1	237 / 258	-4,4 / -3,9 / -3,6	1
	40	24 / 24 / 27	4 / 4 / 3	0 / 0 / 0	e.a. / 522 / 512	3,8	2,0 / 2,2	461 / 503	-4,1 / -5,5 / -5,0	2
	41	23 / 23 / 23	4 / 4 / 4	1 / 0 / 0	e.a.	3,7	1,0 /	239 / 415	e.a.	1

e.a.= Ei analysoitu laitevian vuoksi.

* Tunnin kuluessa ilmanpuhdistimen läpi virrannut ilmamäärä huonetilan ilmatilavuutta kohti.

** Toisen ilmanpuhdistinmallin SHAM-jakson testimittaukset on mitattu laboratoriossa ilman suodattimia, kun tutkimuksessa SHAM-jakson aikana esisuodatin on ollut käytössä tällä puhdistinmallilla.

Liite 2

Taulukko L1. Luokkahuoneiden tietoja sekä säätietoja Ilmatieteen laitoksen Savilahden mittausasemalta. Arvot esitetty mediaaneina tutkimusjaksoja kohti (EI/ON/SHAM) lukuun ottamatta sademäärää, joka on sademäärien summa tutkimusjaksolla ja lumensyvyyttä, joka on tutkimusjakson keskiarvo.

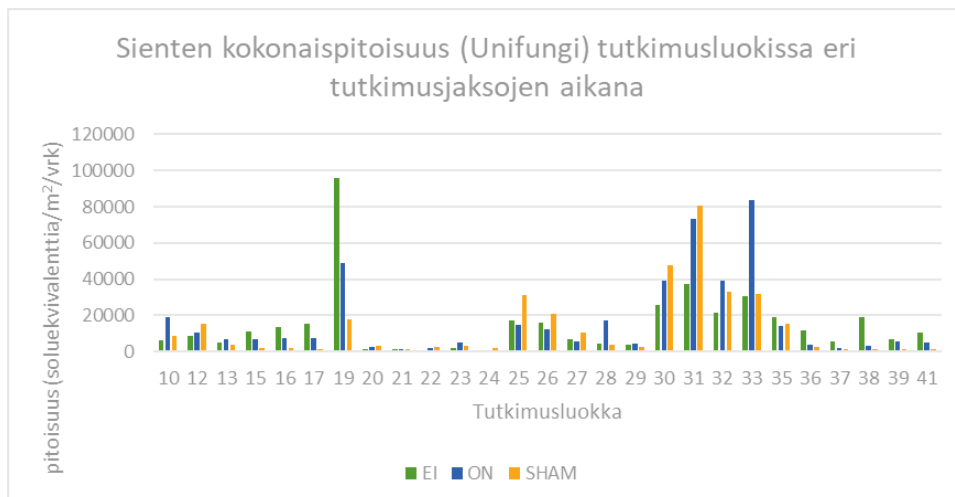
Koulu	Luokka	Paine-ero (Pa)	Sisä-lämpötila (°C)	Suhteellinen ilmankosteus sisällä (%)	Ulko-lämpötila (°C)	Suhteellinen ilmankosteus ulkona (%)	Sadesumma (mm)	Tuulen nopeus (m/s)	Lumensyvyys (cm)
A	10	2,3 / 6,9 / 5,0	20,5 / 20,1 / 20,1	36,0 / 33,0 / 40,1	9,7 / 7,0 / 9,4	82,0 / 84,0 / 86,0	37,2 / 6,2 / 21,1	2,8 / 2,0 / 2,8	0 / 0 / 0
	12	0,2 / 0,1 / 0,1	20,9 / 21,9 / 21,7	35,9 / 29,6 / 36,1	9,7 / 6,9 / 9,6	82,0 / 83,5 / 85,0	37,3 / 6,2 / 21,1	2,8 / 2,0 / 2,9	0 / 0 / 0
	13	e.a.	20,5 / e.a. / 20,5	37,0 / e.a. / 39,8	9,6 / 7,0 / 9,4	82,0 / 83,5 / 86,0	36,9 / 6,2 / 21,1	2,8 / 2,0 / 2,8	0 / 0 / 0
B	15	-3,4 / -1,4 / e.a.	19,1 / 19,0 / 18,5	35,4 / 30,6 / 17,1	5,5 / 1,1 / -9,8	89,0 / 88,0 / 86,0	27,7 / 21,3 / 25,0	2,7 / 3,2 / 2,4	0 / 0 / 21
	16	e.a.	23,0 / 19,5 / 15,7	30,4 / 28,0 / 20,3	5,5 / 1,1 / -9,8	89,0 / 88,0 / 86,0	27,7 / 21,4 / 25,0	2,7 / 3,1 / 2,4	0 / 0 / 21
	17	-0,8 / -1,6 / -2,7	20,9 / 18,8 / 20,0	31,5 / 29,6 / 15,0	5,5 / 1,1 / -9,9	89,0 / 88,0 / 86,0	27,7 / 21,3 / 25,0	2,7 / 3,2 / 2,4	0 / 0 / 21
	19 (tekninen käsi-työ)	1,1 / -3,5 / e.a.	21,1 / 21,0 / 19,7	33,1 / 24,6 / 11,5	5,5 / 1,2 / -9,8	89,0 / 88,0 / 86,0	27,6 / 21,4 / 25,0	2,7 / 3,1 / 2,4	0 / 0 / 21
C	20	-2,5 / -3,9 / -	18,4 / 18,5 / 19,1	16,1 / 19,9 / 16,6	-4,9 / -2,4 / -3,6	89,0 / 89,0 / 87,0	27,9 / 42,7 / 28,3	2,9 / 2,8 / 2,9	43 / 57 / 65
	21	-1,6 / -2,6 / -1,2	19,2 / 19,2 / 19,6	15,1 / 16,9 / 15,6	-4,9 / -2,5 / -3,6	89,0 / 89,0 / 87,0	27,9 / 41,9 / 29,2	2,9 / 2,8 / 2,9	43 / 57 / 65
	22	-8,1 / -9,8 / -8,2	19,8 / 18,8 / 19,5	15,6 / 19,8 / 17,2	-4,9 / -2,5 / -3,6	89,0 / 89,0 / 87,0	27,9 / 41,9 / 29,2	2,9 / 2,8 / 2,9	43 / 57 / 65
	23	-1,8 / -3,0 / e.a.	19,0 / 19,1 / 19,2	15,6 / 19,2 / 16,7	-4,9 / -2,4 / -3,6	89,0 / 89,0 / 87,0	27,9 / 41,9 / 28,4	2,9 / 2,8 / 2,9	43 / 57 / 65
	24	e.a.	e.a.	e.a.	-4,9 / -2,5 / -3,6	89,0 / 89,0 / 87,0	27,9 / 41,9 / 29,2	2,9 / 2,8 / 2,9	43 / 57 / 65
D	25	e.a. / -9,0 / -10,6	21,7 / 21,6 / 21,1	17,4 / 27,6 / 29,0	2,6 / 12,2 / 7,5	63,0 / 59,0 / 78,0	2,9 / 5,2 / 11,9	2,5 / 2,0 / 2,8	8 / 0 / 0
	26	-13,5 / -8,8 / -11,0	20,3 / 21,8 / 20,8	17,5 / 26,0 / 28,1	2,6 / 12,2 / 7,5	63,0 / 59,0 / 78,0	2,9 / 5,2 / 11,9	2,4 / 2,0 / 2,8	8 / 0 / 0
	27	e.a.	19,6 / 20,9 / 20,7	19,9 / 28,0 / 29,2	2,6 / 12,2 / 7,5	63,0 / 59,0 / 78,0	2,9 / 5,2 / 11,9	2,4 / 2,0 / 2,8	8 / 0 / 0
	28	-4,9 / -4,0 / e.a.	21,1 / 21,3 / 20,5	17,8 / 26,6 / 28,4	2,6 / 12,2 / 7,9	63,0 / 59,0 / 76,0	2,9 / 5,2 / 13,9	2,4 / 2,0 / 3,0	8 / 0 / 0
	29	5,1 / 8,5 / 5,9	23,2 / 22,4 / 22,8	15,4 / 25,1 / 26,5	2,6 / 12,2 / 7,5	63,0 / 59,0 / 78,0	2,9 / 5,2 / 11,9	2,5 / 2,0 / 2,8	8 / 0 / 0

Koulu	Luokka	Paine-ero (Pa)	Sisä- lämpötila (°C)	Suhteellinen ilmankosteus sisällä (%)	Ulko- lämpötila (°C)	Suhteellinen ilmankosteus ulkona (%)	Sadesumma (mm)	Tuulen nopeus (m/s)	Lumen- syvyys (cm)
E	30	-0,1 / -0,5 / 0,0	22,7 / 22,6 / 22,8	35,0 / 37,0 / 34,1	9,7 / 9,1 / 7,5	77,0 / 89,0 / 87,0	2,1 / 19,1 / 31,6	2,7 / 1,9 / 2,7	0 / 0 / 0
	31	-1,3 / -1,1 / -0,9	21,8 / 21,6 / 21,8	38,4 / 39,7 / 37,0	9,7 / 9,1 / 7,5	77,0 / 89,0 / 87,0	2,1 / 19,1 / 31,6	2,8 / 1,9 / 2,7	0 / 0 / 0
	32 (myös tekstiili- käsityötä)	1,1 / -0,6 / e.a.	22,0 / 21,6 / 21,7	38,8 / 39,8 / 37,6	9,7 / 9,1 / 7,5	77,0 / 89,0 / 87,0	2,1 / 19,0 / 31,6	2,8 / 1,9 / 2,7	0 / 0 / 0
	33	-1,5 / -0,9 / e.a.	21,9 / 22,5 / 22,1	38,8 / 39,1 / 37,5	9,8 / 9,1 / 7,5	77,0 / 89,0 / 87,0	2,1 / 19,0 / 31,6	2,8 / 1,9 / 2,7	0 / 0 / 0
	34	e.a.	20,3 / 20,6 / 20,5	38,0 / 41,2 / 38,6	9,7 / 9,1 / 7,5	77,0 / 89,0 / 87,0	2,0 / 19,1 / 31,6	2,7 / 1,9 / 2,7	0 / 0 / 0
	35 (tekninen käsi- työ)	e.a.	e.a. / 19,5 / 19,4	e.a. / 43,0 / 42,3	9,7 / 9,1 / 7,5	77,0 / 89,0 / 87,0	2,0 / 19,0 / 31,6	2,8 / 1,9 / 2,7	0 / 0 / 0
F	36	e.a.	20,5 / 20,3 / 20,2	31,4 / 23,6 / 20,7	3,9 / -1,5 / -3,6	93,9 / 89,6 / 91,1	6,0 / 4,8 / 1,6	2,5 / 2,6 / 2,1	0 / 0 / 3
	37	-6,5 / -7,2 / -7,1	16,6 / 14,9 / 15,5	39,7 / 33,8 / 27,7	3,9 / -1,5 / -3,6	93,9 / 89,6 / 91,1	6,0 / 4,8 / 1,6	2,5 / 2,6 / 2,1	0 / 0 / 3
	38	e.a.	22,4 / 24,8 / 25,9	28,5 / 18,7 / 13,6	3,9 / -1,5 / -3,6	93,9 / 89,6 / 91,1	6,0 / 4,8 / 1,6	2,5 / 2,6 / 2,1	0 / 0 / 3
	39	-4,5 / -3,8 / -3,7	18,8 / 22,3 / 24,1	35,5 / 22,1 / 17,2	3,9 / -1,5 / -3,6	93,9 / 89,6 / 91,1	6,0 / 4,8 / 1,6	2,5 / 2,6 / 2,1	0 / 0 / 3
	40	-4,4 / -6,0 / -5,4	18,6 / 18,9 / 19,6	35,7 / 25,8 / 21,1	3,9 / -1,5 / -3,6	93,9 / 89,6 / 91,1	6,0 / 4,8 / 1,6	2,5 / 2,6 / 2,1	0 / 0 / 3
	41	e.a. / -4,1 / -4,4	e.a. / 16,8 / 16,0	e.a. / 28,6 / 25,6	3,9 / -1,4 / -3,6	93,9 / 89,6 / 91,1	6,0 / 4,8 / 1,6	2,5 / 2,6 / 2,2	0 / 0 / 3

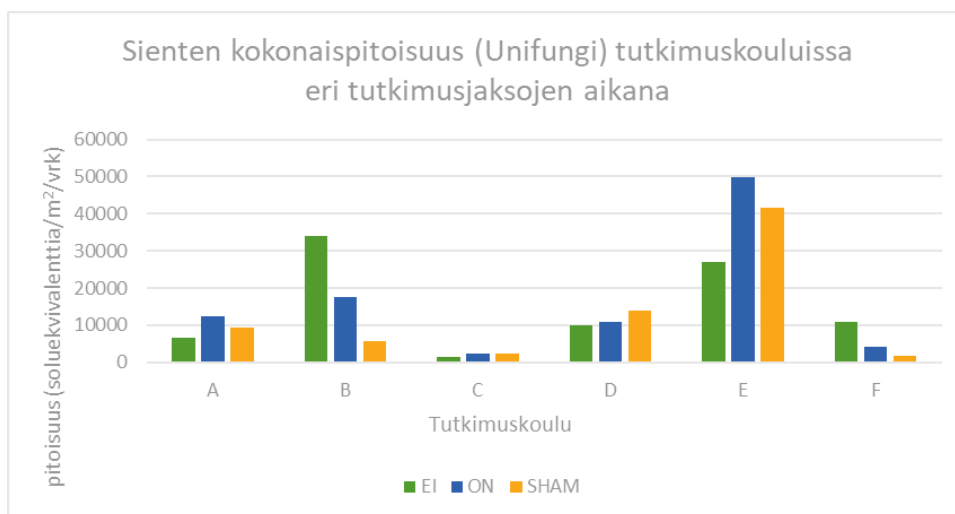
e.a.= Ei analysoitu laitevian vuoksi.

Liite 3

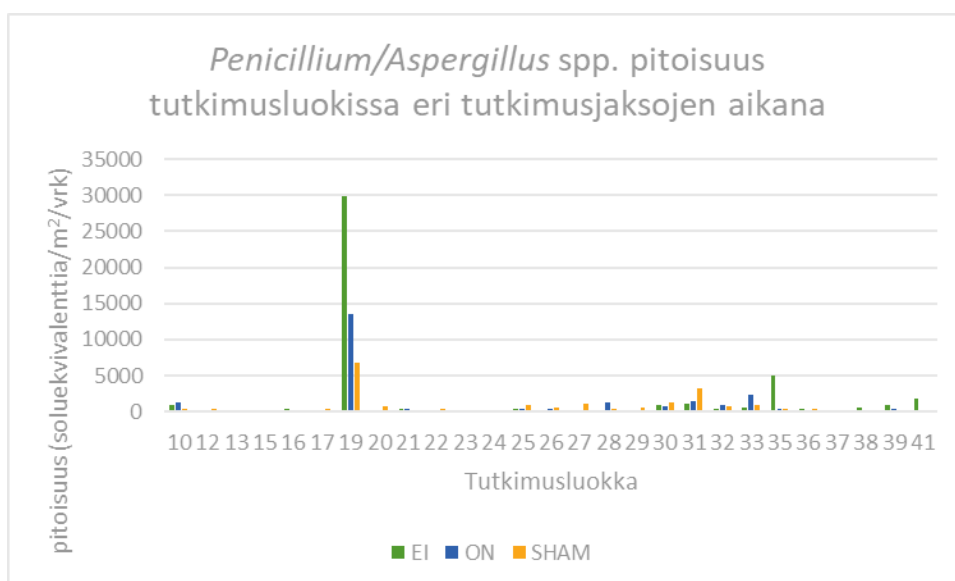
Laskeutuneen pölyn näytteiden mikrobipitoisuudet



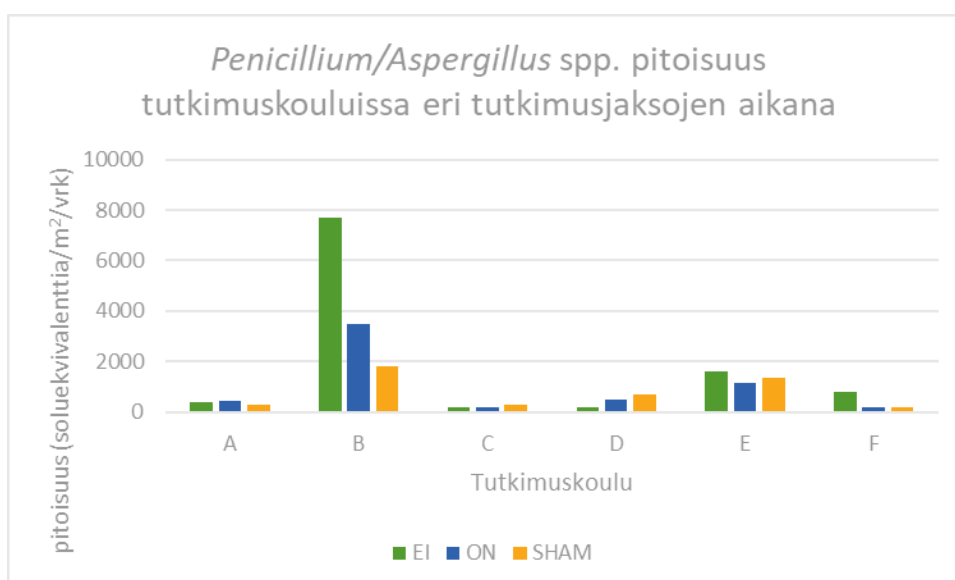
Kuva L1. Sienten kokonaispitoisuudet tutkimusluokissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.



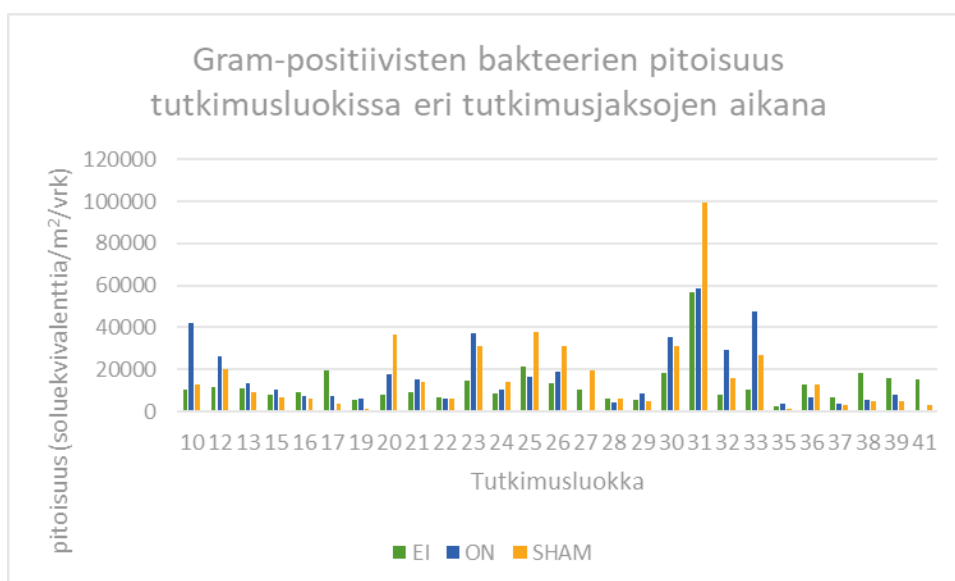
Kuva L2. Sienten kokonaispitoisuudet tutkimuskouluissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.



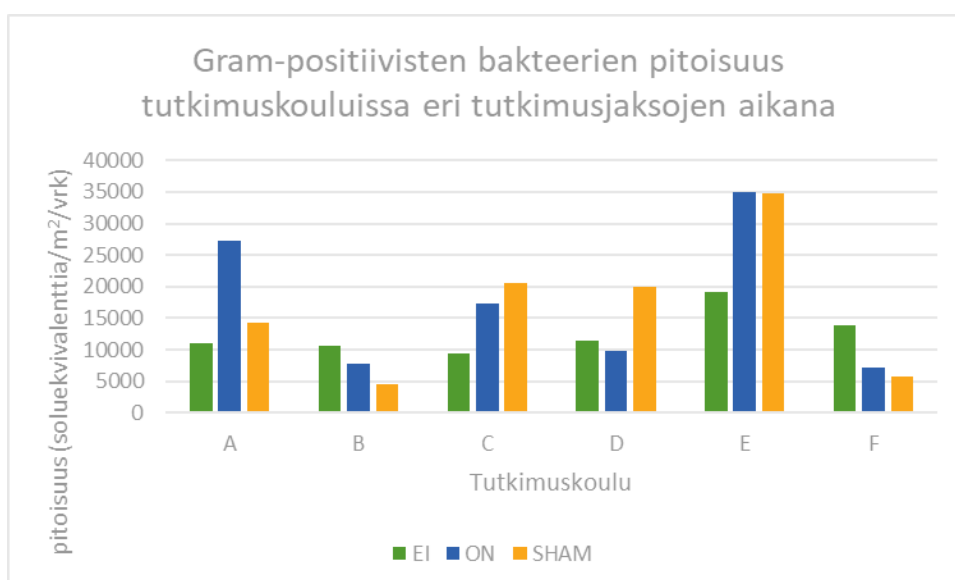
Kuva L3. *Penicillium/Aspergillus* spp. pitoisuudet tutkimusluokissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.



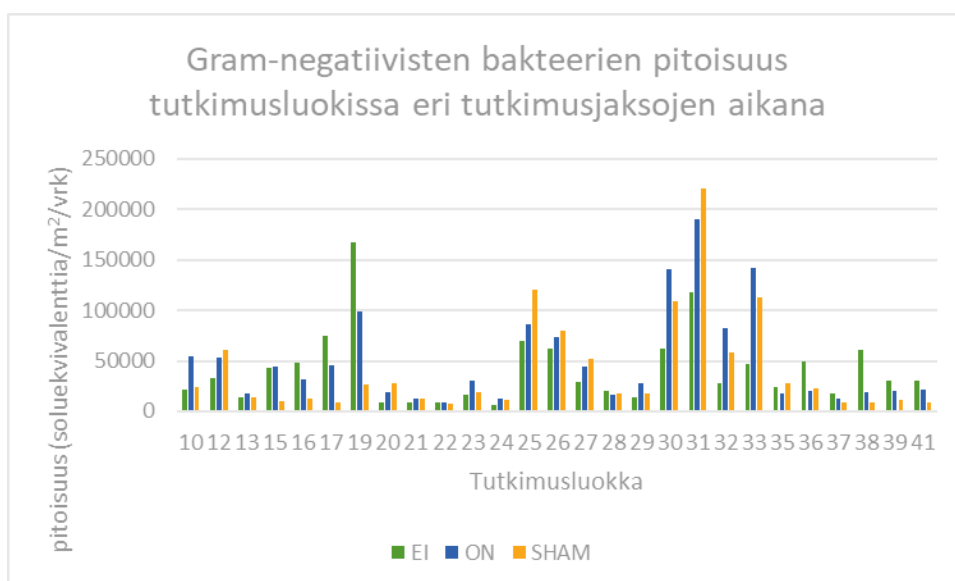
Kuva L4. *Penicillium/Aspergillus* spp. pitoisuudet tutkimuskouluissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.



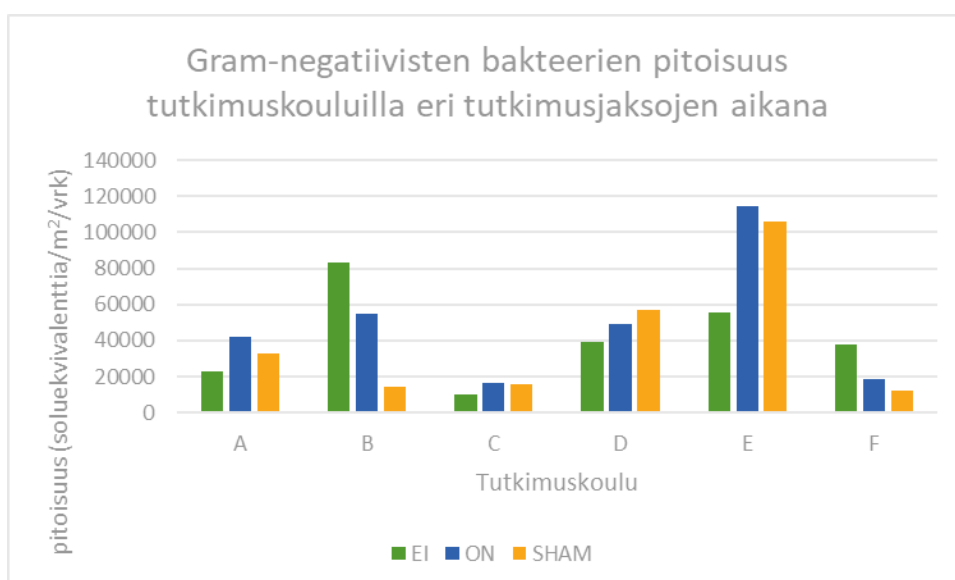
Kuva L5. Gram-positiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimusluokissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.



Kuva L6. Gram-positiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimuskouluissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.

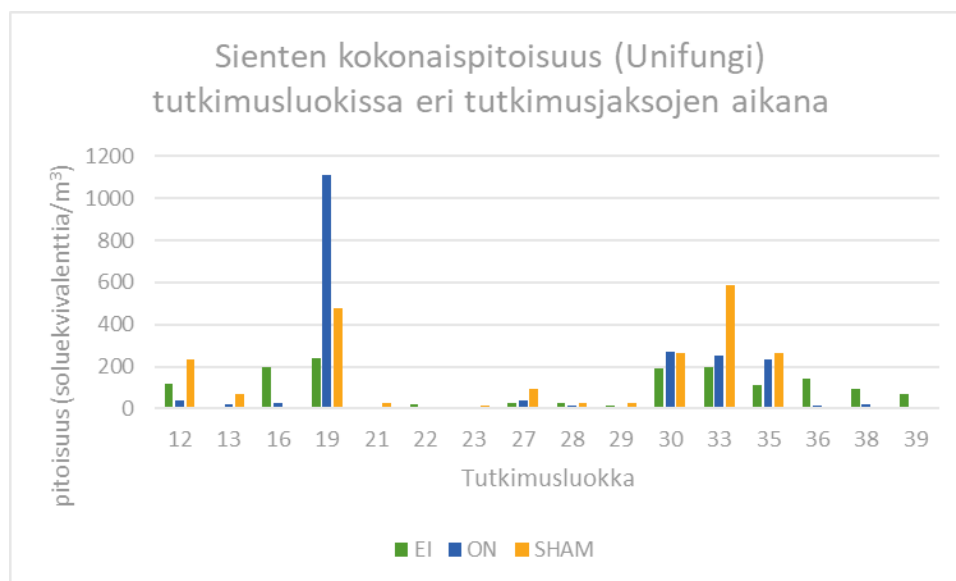


Kuva L7. Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimusluokissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.

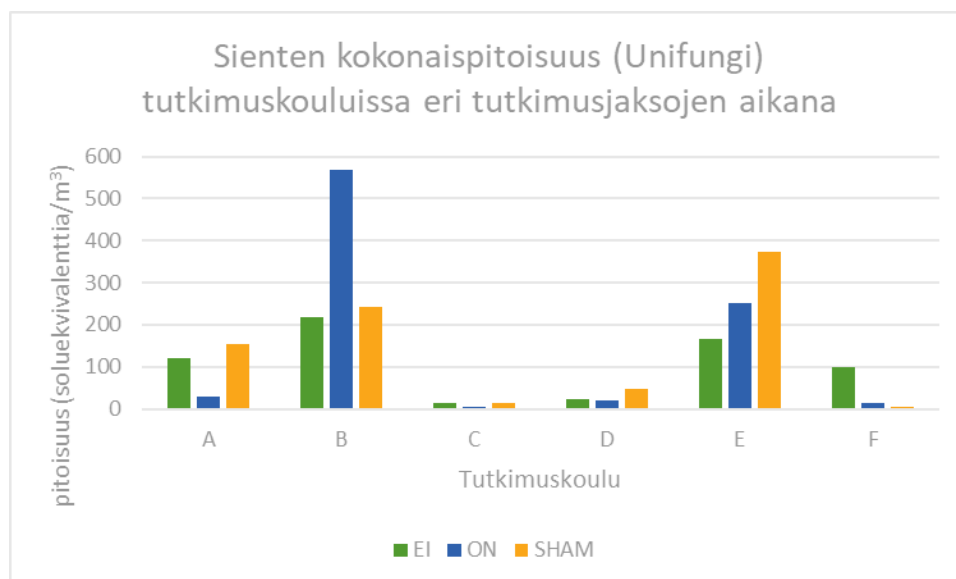


Kuva L8. Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimuskouluissa laskeutuneen pölyn näytteissä eri tutkimusjaksoina.

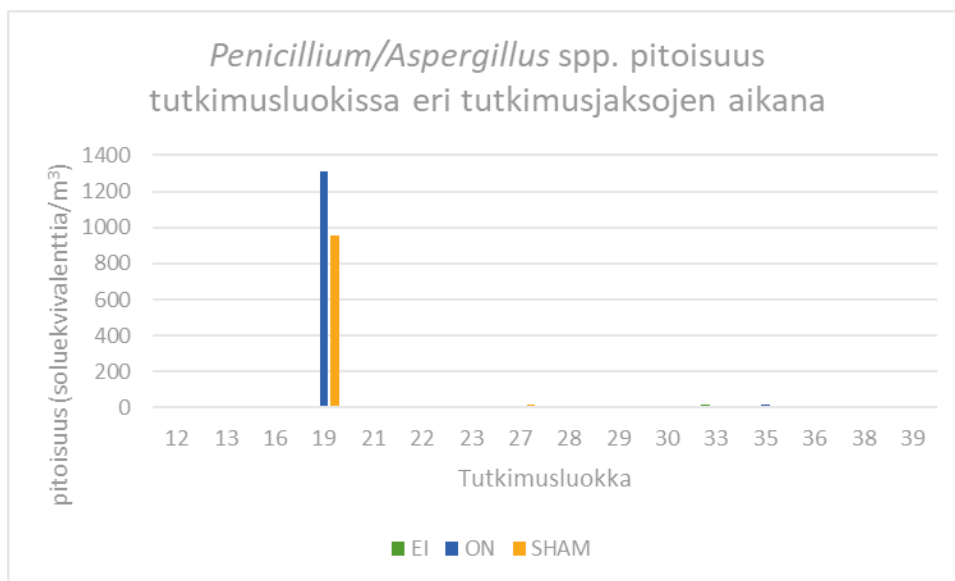
Aktiivisten ilmanäytteiden mikrobipitoisuudet



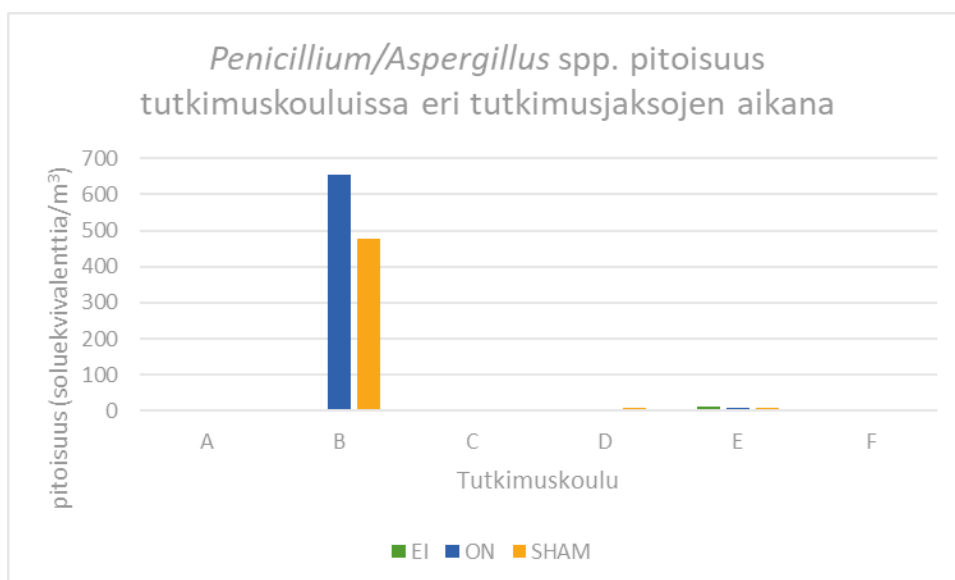
Kuva L9. Sienten kokonaispitoisuudet tutkimusluokissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



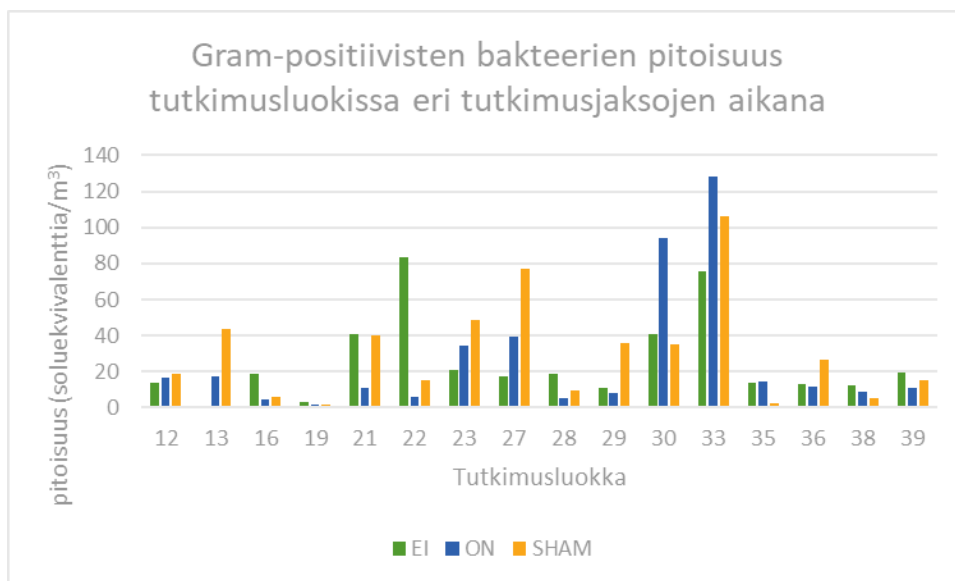
Kuva L10. Sienten kokonaispitoisuudet tutkimuskouluissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



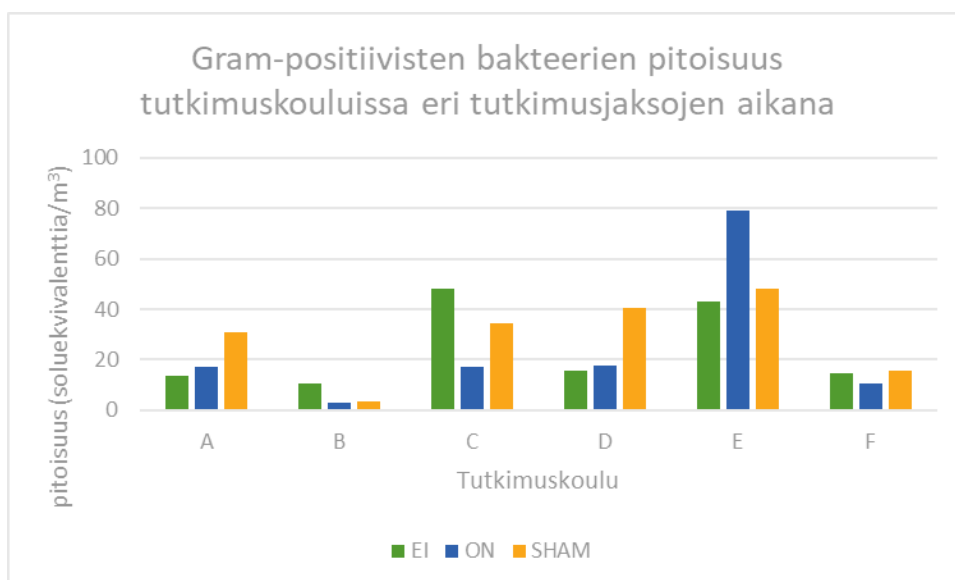
Kuva L11. *Penicillium/Aspergillus* spp. pitoisuudet tutkimusluokissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



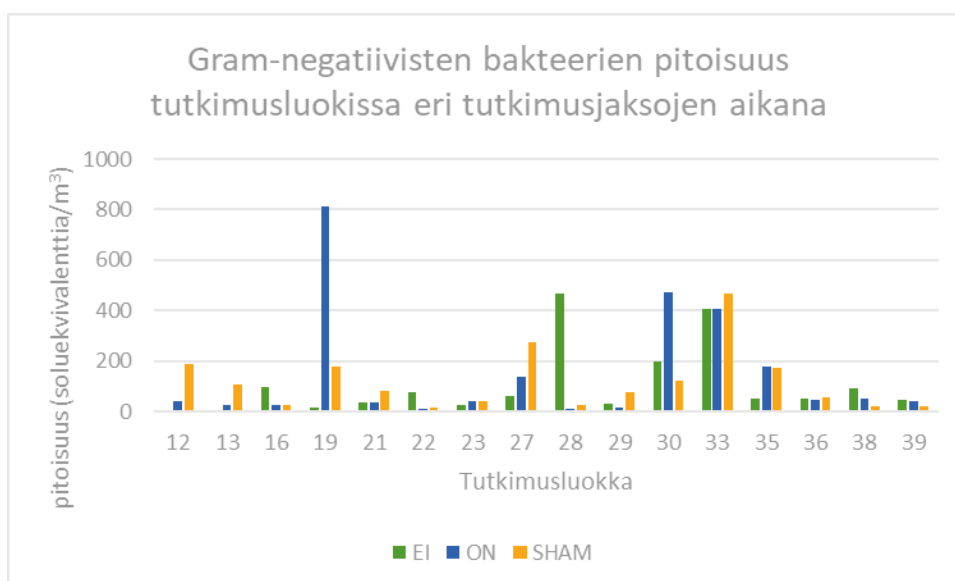
Kuva L12. *Penicillium/Aspergillus* spp. pitoisuudet tutkimuskouluissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



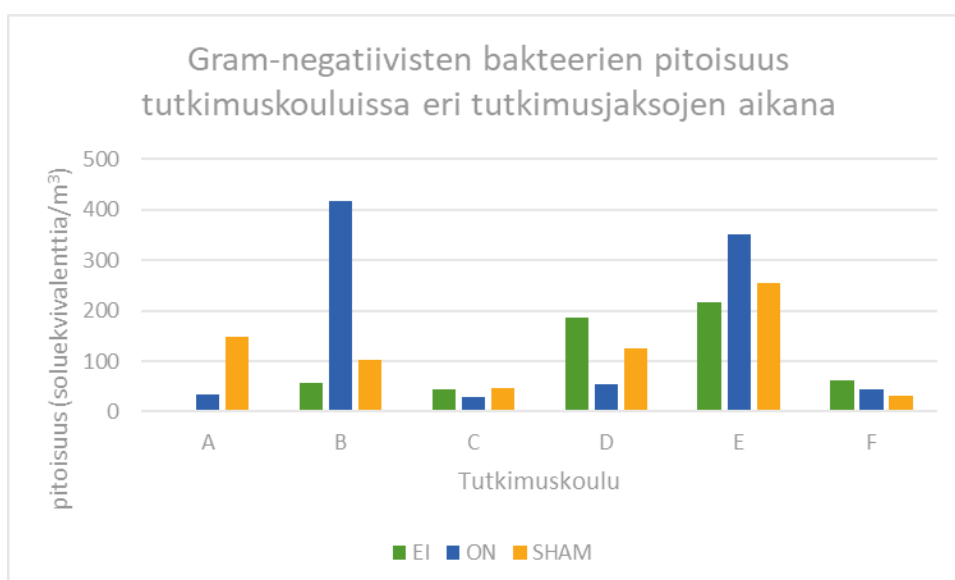
Kuva L13. Gram-positiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimusluokissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



Kuva L14. Gram-positiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimuskouluissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



Kuva L15. Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimusluokissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.



Kuva L16. Gram-negatiivisten bakteerien pitoisuudet tutkimuskouluissa aktiivisissa ilmanäytteissä eri tutkimusjaksoina.