

Sami Kariaho

ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN SUODATTIMIEN VERTAILU  
MITTAUSTEN PERUSTEELLA

Rakentamisen ja talotekniikan koulutusohjelma

Ylempi AMK

2018

# ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN SUODATTIMIEN VERTAILU MITTAUSTEN PERUSTEELLA

Kariaho, Sami  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Rakentamisen ja talotekniikan koulutusohjelma  
Huhtikuu 2018  
Ohjaaja: Heinonen, Jarkko ja Sandberg, Esa  
Sivumäärä: 64  
Liitteitä: 19

Asiasanat: Sairaala, Ilmanvaihto, Suodatin

---

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin eri valmistajien ilmanvaihtojärjestelmiin tarkoitettuja suodattimia ja tavoitteena oli löytää laadulliset perusteet Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin (VSSHP) hankintaosastolle suodattimien kilpailutusta varten.

Työssä etsittiin kirjallisuudesta tietoa suodatuksen alkuajoista jotta saatiin perspektiiviä siihen mistä on lähdetty ja miksi ja mihin ollaan tultu. Lisäksi työssä käsiteltiin erilaiset suodatusmekanismit jotka vaikuttavat erilaisten suodattimien kykyyn erottaa ulkoilmasta erilaisia hiukkasia. Työssä käsiteltiin myös uusimpia innovaatioita suodatinmateriaalien osalta.

Tutkimusta varten tehtiin sekä laboratoriomittauksia että kenttämittauksia käytössä olleista ilmanvaihtokoneista vuoden mittausjaksolla. Mitattuja asioita olivat ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä ilman hiukkaspitoisuus kolmesta erimittauspisteestä. Mitatut hiukkaskoot olivat 0,3 µm 0,5 µm ja 1,0 µm. Lisäksi mitattiin paine-erot suodattimien yli sekä ilmanvaihtokoneiden sähköverkosta ottama sähköenergia. Laboratoriossa testattiin laajapintasuodattimien erotus- ja läpäisyasteet testipölyn avulla ja lisäksi suodattimet punnittiin. Punnitus uusittiin mittauksen loputtua.

Mittauksista saatiin paljon dataa ja niiden perusteella laskettiin suodattimien läpäisy- ja erotusasteet joilla on suurin merkitys sisään puhallettavan ilman laatuun. Paras erotusaste mittauksen perusteella oli 97 % (0,3 µm), 98 % (0,5 µm) ja 99 % (1,0 µm) kun heikoin erotusaste oli 78 % (0,3 µm), 83 % (0,5 µm) ja 86 % (1,0 µm).

Mittauksista saatiin myös suodattimien painehäviöt joiden perusteella laskettiin suodattimien aiheuttama energiankulutus ja sitä peilattiin myös sairaanhoitopiirin vuositaiseen suodattimien volyymiin. Painehäviöt muunnettiin vastaamaan pienimmän ja suurimman koneen ilmamääriä (200 l/s ja 270 l/s) ja niiden perusteella pienin painehäviö oli 7,8 Pa ja 10,9 Pa kun suurin painehäviö oli 18,7 Pa ja 26,3 Pa.

Suodattimien punnitus osoitti että pääosin suodattimiin jäi mittausjakson aikana 4 - 6 g pölyä mutta parhaaseen suodattimeen jäi peräti 14 g.

Työssä päästiin niihin tavoitteisiin joihin pyrittiin. Tulosten perusteella voidaan valita ne suodattimet jotka sopivat sairaaloiden hygieniavaatimuksiin parhaiten ja joista hankintaosasto voi kilpailuttaa koko piirille samat suodattimet.

# COMPARING FILTERS IN AIR-CONDITIONING SYSTEMS BY USING MEASUREMENTS

Kariaho, Sami

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Rakentaminen ja Talotekniikka

April 2018

Supervisor: Heinonen, Jarkko and Sandberg, Esa

Number of pages: 64

Appendices: 19

Keywords: Hospital, Air-conditioning, Air-filter

---

The purpose of this thesis was to study different air-filters from the several manufacturers and the goal was to find qualitative bases to tendering out the air-filters in VSSHP.

The knowledge from the beginning of the filtration was looked from a literature to get perspective to where all has started and why and where we are now. Additionally this thesis was handled different mechanisms of the filtration which affects to different filters ability of separating particles from the air. Also the newest innovations of the materials of the filters was handled.

There were measurements made in the laboratory and the field because of this thesis in the ventilation systems which were in the use at the period of one year. Issues that were measured was temperature and relative humidity of outside air and the amount of particles from three different measuring points. Measured particle sizes was 0,3  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$  and 1,0  $\mu\text{m}$ . Additionally the difference of pressure of the filters was measured and also the electric energy taken from the electric grid. Separation- and penetration degrees of the filters was tested in laboratory and filters was also weighted at the beginning and after measuring period.

Measurements gave a lot of data and based of that separation- and penetration degrees was calculated which has the biggest meaning of quality of indoor air. The best separation degree was 97 % (0,3  $\mu\text{m}$ ), 98 % (0,5  $\mu\text{m}$ ) and 99 % (1,0  $\mu\text{m}$ ) when the worst was 78 % (0,3  $\mu\text{m}$ ), 83 % (0,5  $\mu\text{m}$ ) and 86 % (1,0  $\mu\text{m}$ ).

Measurements gave also the pressure loss of the filters and based on those the energy consumption of the filters was calculated. It was compared to the annual volume of the VSSHP. Pressure losses was changed to equal the amount of the air-flow of the smallest and the biggest ventilation machine (200 l/s and 270 l/s) and based of that the smallest pressure loss was 7,8 Pa and 10,9 Pa when the biggest was 18,8 Pa and 26,3 Pa.

Weighting of the filters shows that the dust amount attached on the filters was 4 – 6 g but the biggest amount was 14 g.

The goals of the thesis was achieved. Based on the results the suitable filters that fits the hygiene requirements of the hospitals can be choose and the procurement can tender out the same filters to all hospitals in VSSHP.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Tausta .....	7
1.2	Työn tavoitteet .....	8
1.3	Rajaukset .....	9
1.4	Toimenpiteet .....	9
2	ILMANSUODATUKSEN KEHITYS JA EROTUSMEKANISMIT.....	10
2.1	Ilmanvaihdon historiaa .....	10
2.2	Ilmansuodatus .....	12
2.3	Suodatusmekanismi.....	13
2.4	Suodatinmateriaalit ja innovaatiot.....	16
2.5	Ilmansuodattimien standardit.....	21
2.5.1	EN779:2012 .....	22
2.5.2	ASHRAE 52.2 .....	22
2.5.3	EN-ISO 16890:2016.....	23
3	ULKOILMA JA SAIRAALAYMPÄRISTÖ .....	24
3.1	Ulkoilman hiukkasjakaumat .....	24
3.2	Ulkoilmaluokitus.....	27
3.3	Ulkoilman kosteuden vaikutus suodattimien toimintaan .....	28
3.4	Sairaalaympäristö.....	28
4	SUODATTIMIEN TOIMINTA.....	30
4.1	Suodattimien erotus- ja läpäisyaste .....	30
4.2	Suodattimien painehäviö .....	31
4.3	IV-järjestelmän komponenttien painehäviöt.....	32
4.4	Suodattimen energiankulutus.....	34
5	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN ENERGIANKULUTUS .....	34
5.1	Puhaltimen SFP- luku.....	35
5.2	Puhallin- ja laitoskäyrä .....	36
6	MITTAUSJÄRJESTELYT.....	39
7	MITTAUSDATAN ANALYSOINTI .....	43
7.1	Ulkoilma .....	43
7.1.1	Lämpötila .....	43
7.1.2	Suhteellinen kosteus.....	44
7.1.3	Ulkoilman hiukkasjakauma .....	44
7.2	Laajapintasuodattimien läpäisy- ja erotusasteet.....	47
7.2.1	Suodattimien painot .....	54

7.2.2 Laajapintasuodattimien painehäviöt.....	55
7.3 IV-koneiden mitatut energiankulutukset .....	59
8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET .....	60
LÄHTEET .....	63
LIITTEET	

## SANASTOA

VSSH	= Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri
REHVA	= Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations
FINVAC ry	= The Finnish Association of HVAC Societies
ach	= air change per hour
HVAC	= Heating Ventilation and Air Conditioning
ASHRAE	= American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
IAQ	= Indoor Air Quality
PHS	= The Public Health Service
AIA	= American Institute of Architects
VAV-Control	= Variable Air Volume Control
MERV	= a minimum efficiency reporting value
ODA	= Outdoor air
SFP-luku	= Specific Fan Power

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Muutaman viime vuosikymmenen aikana ilmansuodatuksen ensisijainen tarkoitus on liittynyt terveystarkoituksiin. Vietämme ajastamme 80...90 % sisätiloissa. Kuitenkin n. 50 % ulkoilman sisältämistä epäpuhtauksista kulkeutuu rakennuksiin ilmastointijärjestelmän ja sen suodatuksen kautta ja tällä on suuri vaikutus sisäilman laatuun. (Sandberg, Ilmastointilaitoksen mitoitus, 2016, s. 197).

Rakennuksen sisäilman laatuun vaikuttavat ilmanvaihtoratkaisut, rakennuksen sijainti, rakennustapa, rakennusmateriaalit, käyttö ja sääolot. Lisäksi mm. rakennuksen sijainti ilman epäpuhtauslähteiden läheisyydessä (liikenne, teollisuus tms.) tai radon-alueilla voi vaikuttaa sisäilman laatuun. Suunnittelulla vaikutetaan mm. rakenteiden kosteusrasituksen sietokykyyn (rakennesuunnittelu, materiaalivalinnat ja ns. riskirakenteet). Kosteusvaurio lisää ja muuttaa rakennuksen sisäilman mikrobistoa (homeet ja bakteerit) sekä kemiallista koostumusta (mm. VOC) tavanomaisesta. Rakennuksen käyttötarkoitus (koulu, sairaala, toimisto tms.) sekä vuodenaikoihin liittyvä sään vaihtelu (mm. lämpötila, kosteus ja tuuli) vaikuttavat sisäilman laatuun. Ilmanvaihtojärjestelmissä on käytössä laaja valikoima erilaisia suodattimia joiden erotusasteet vaihtelevat karkeasta erittäin korkeaan suodatustasoon. Suodattimien malleja on erilaisia ja niissä käytettävät materiaalit ovat kehittyneet. Suunnittelijoilla on nykyään käytössään hyvä valikoiman erilaisia ratkaisuja erilaisten rakennusten suodatusvaihtoehtoiksi. Myös uusi suodattimien testausstandardi on muuttanut suodattimien valinnan siihen että rakennusten todellinen käyttö ja sisä- ja ulkoilman olosuhteet huomioidaan paremmin.

Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirissä sairaaloiden hyvään sisäilmaan kiinnitetään yhä enemmän huomiota ja sen vuoksi ilmanvaihtojärjestelmien suodattimien toiminnan tarkastelu todellisessa käyttöympäristössä tuli esiin tämän opinnäytetyön myötä.

Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin kuntayhtymällä on vuonna 2018 erilaisia kiinteistöjä yhteensä 335 000 m<sup>2</sup> joissa työskentelee n. 8 000 henkilöä. Sairaanhoitopiirin kantasairaala-alueeseen kuuluu Turun yliopistollinen keskussairaala, Turun kirurginen sairaala ja Turunmaan sairaala. Sen lisäksi piiriin kuuluu 5 aluesairaalaa eli Raision sairaala, Vakka-Suomen sairaala Uudessakaupungissa, Loimaan aluesairaala, Salon aluesairaala ja Paimion sairaala, jossa ei ole tällä hetkellä sairaanhoidollista toimintaa. Vuoden 2017 lopussa sairaanhoitopiirin vaativimmat leikkaustoiminnot keskitettiin Turun yliopistolliseen keskussairaalaan jolloin aluesairaaloiden leikkauksalit jäivät muuhun käyttöön. Vaikka aluesairaaloiden leikkaustoiminnot loppuivat, niissä on merkittäviä toimintoja edelleen kuten ensiapu, poliklinikka-, syöpä- ja dialyysiosastoja, laboratoriot, välinehuoltoa sekä vuodeosastoja ja toimistotiloja.

Pelkästään Turun yliopistollisen keskussairaalan alueella olevissa päärakennuksissa eli A-, U- ja T-sairaaloissa on käytössä F9- luokan suodattimia n. 800 kpl. Tämän lisäksi tulee karkeammat M- ja F- luokan suodattimet sekä tulo- että poistokoneissa sekä näiden lisäksi erityistilojen HEPA- suodattimet jolloin pelkästään Turussa vaihdetaan vuositason n. 2000 suodatinta. Aluesairaaloiden suodattimien lukumäärä on pienempi kuin kanta-sairaalan alueella mutta se on silti merkittävä.

## 1.2 Työn tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on löytää Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirille (myöhemmin VSSHP) sellaiset ilmanvaihtojärjestelmien suodattimet jotka ovat ominaisuuksiltaan parhaat sekä erotusasteen osalta että myös elinkaarikustannuksiltaan. Tässä työssä ei suoraan oteta kantaa eri toimittajien suodattimien paremmuuteen vaan esitetään kenttämittauksissa saadut tulokset ja niiden analyysit joiden perusteella VSSHP:n hankintaosasto voi tehdä hankintapäätökset koskien sairaanhoitopiirin kaikkien sairaaloiden suodatinhankintoja. Työ jakaantuu kirjallisuudesta haettuun osuuteen sekä kenttämittauksiin. Pääpaino on mittauksissa. Mittaukset sisältävät vuoden mittausjakson jonka aikana tehdään kuukausittain samat mittaukset joiden tulokset analysoidaan mittausten päätyttyä.



### 1.3 Rajaukset

Työssä tutkittiin tuloilmakoneiden suodattimia todellisessa käytössä. Koneissa käytetään 2- portaista suodatusta jossa portaan 1 suodattimet ovat F7- luokan suodattimia ja portaan 2 suodattimet F9- luokan suodattimia. Pääasiassa työssä tarkasteltiin F9- suodattimien ominaisuuksia. F7- suodattimista esitetään mittaustulokset liite-osiossa. Koska työssä haluttiin saada mahdollisimman vertailukelpoiset tulokset, suodattimien materiaaliksi valittiin synteettinen ja kaikki F7- suodattimet olivat pussisuodattimia ja kaikki F9- suodattimet laajapintasuodattimia. Poistokoneiden suodattimia ei tässä työssä tutkittu. Mittauksissa mukana olleet tuloilmakoneet palvelevat eristyshuoneita ja huoneiden tuloilmapäätelaitteissa on HEPA- suodattimet jotka on tässä työssä rajattu mittausten ulkopuolelle.

### 1.4 Toimenpiteet

Mittaukset toteutettiin tuloilmakoneissa, jotka sijaitsevat samassa ilmastointikonehuoneessa ja joiden raittiin ilman sisäänotto on rakennuksen samalta seinältä. Mittauksessa oli mukana 7 tuloilmakonetta. Tuloilmakoneet palvelevat kukin omaa eristyshuonettaan ja niiden käyttö on sitä kautta identtinen. Suodattimien toimintaa mitattiin asentamalla tuloilmakoneisiin mittasondeja hiukkaspitoisuuksien mittaamista varten ja koneiden sähkösyöttöihin asennettiin energiamittarit mittaamaan koneiden sähköverkosta ottamaa sähköenergiaa. Lisäksi suodattimien painehäviöt mitattiin koneiden paine-eromittareiden mittaletkuista. Laajapintasuodattimien hiukkasten erotuskyvystä kertoo myös mittausjakson aikana suodattimiin jääneen hiukkasten määrä ja se todettiin punnitsemalla suodattimet sekä mittausjakson alussa että mittausjakson päätyttyä.

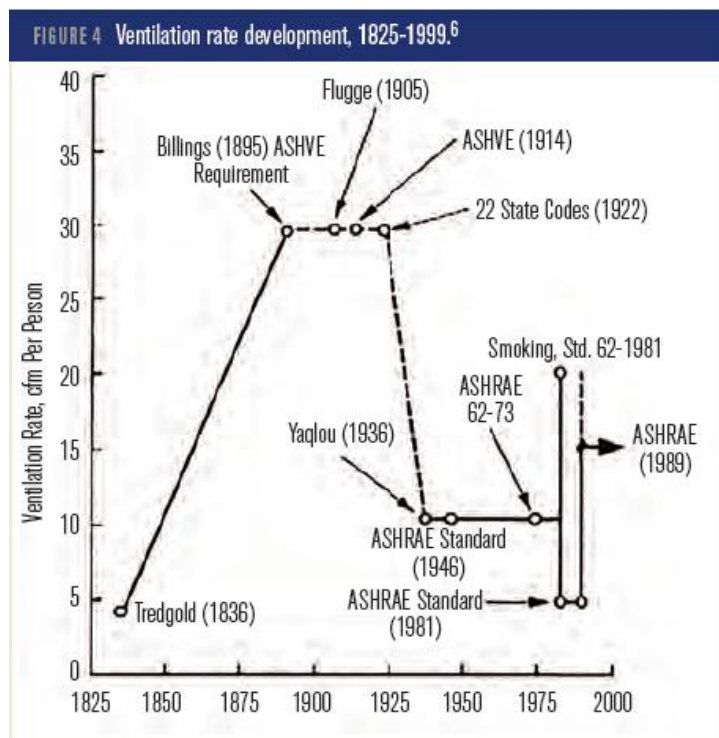
## 2 ILMANSUODATUKSEN KEHITYS JA EROTUSMEKANISMIT

### 2.1 Ilmanvaihdon historiaa

1800-luvulla ei tiedetty vielä ilmanvaihdon merkityksestä rakennusten sisäilman laatuun ja silloin jopa luultiin että saastunut ilma levittää tauteja. 1850-luvulla Florence Nightingale vieraili sotilassairaaloissa ja totesi niiden sisäilman olevan niin huonolaatuista ja pahan hajuista, että hän totesikin sotilaiden kuolevan enemmän sairaaloissa kuin taistelukentillä. Hän oli vaikuttamassa sairaaloiden potilasmäärien ja hygienian merkitykseen sairauden hoidossa ja hygieniaan kuului myös ilmanvaihto. Hän oli myös vaikuttamassa sairaaloiden arkkitehtuuriin jossa rakennuksen päässä oli kahdesta suunnasta toimiva luonnollinen ilmanvaihtojärjestelmä. Tälle ajanjaksolle voidaan myös jäljittää ensimmäinen ilmanvaihtuvuuden mitoitusarvo joka oli 2 ach. Arkkitehtuurinen kirjallisuus antoi tuolloin mitoitusarvon jossa määritettiin yhden sängyn vaatima tila, joka oli joko  $100 \text{ ft}^2 / \text{bed}$  ( $9 \text{ m}^2 / \text{bed}$ ) tai  $1000 - 1500 \text{ ft}^3 / \text{bed}$  ( $28 - 43 \text{ m}^3 / \text{bed}$ ) ja  $2000 - 3000 \text{ ft}^3 / \text{h per bed}$  ( $57 - 85 \text{ m}^3 / \text{h per bed}$ ) joka on n. 2 ach. Nämä mitoitusarvot olivat voimassa 1900-luvun alkupuolelle saakka. (English, 2016, ss. 2-3)

ASHRAE:n artikkeleista löytyy 3 uraa uurtavaa artikkelia, jotka käsittelevät modernin ilmanvaihdon historiaa. Ensimmäisen kirjoitti Klaus, (Klaus, 1970) toisen Janssen (Janssen, 1999) ja kolmannen Stanke (Stanke, 2006). Pääperiaatteet, joita artikkelit käsittelevät, olivat mukavuus, lämpötila ja ilman tuoksu ja ne antavat meille perusteet nykyiseen ajatteluamme hyvästä IAQ:sta eli sisäilman laadusta. (English, 2016, s. 3)

Kuvassa 1 on esitetty ilmanvaihdon mitoituksen kehitys 1800-luvun alkupuolelta 1990-luvulle Janssenin artikkelin mukaan.



Kuva 1. Merkittäviä ajankohtia ilmanvaihdon mitoituksen kehityksessä (Janssen, 1999)

Ihmisasumusten ilmanvaihtomääräksi määriteltiin kokemusten perusteella 5 – 7.5 l/s/hlö. Tämä arvo pysyi 1980-luvulle saakka mitoitusarvona. Energiakriisin seurauksena ASHRAE pudotti arvon 2.5 – 5 l/s/hlöön. Tämän seurauksena rakennusten kunto huononi kunnes ASHRAE nosti mitoitusarvon 7.5 – 10 l/s/hlöön. Vuonna 2001 ASHRAE otti käyttöön huone alaan ja ihmismäärään perustuvan ilmamäärämitoituksen jotka yhdessä ovat perustana IAQ:n minimi-ilmamäärämitoituksessa. 1960-luvulla monissa USA:n sairaaloissa ilmanvaihto perustui vielä ikkunatuuletukseen ja luonnolliseen ilmanvaihtoon. Kun sisälle tulevan ilman puhdistukseen alettiin kiinnittää enemmän huomiota, LVI-insinöörit alkoivat käyttää erilaisia ilmansuodatustapoja sairaaloiden tuloilmajärjestelmissä. Energiakriisin jälkeen 1970, ASHRAE julkaisi ensimmäisen rakennusten energiastandardin 90-1975 joka oli nykyisen standardin 90.1 edeltäjä. Koska kiertoilmanlämmitys oli merkittävä energiankuluttaja, standardi 90-1975 kielsi sen käytön jos ilmanvaihtojärjestelmässä ei ollut ilmamääränsäätöä (VAV-control). Ilmamääränsäätö on nykyään jo yleinen ilmanvaihtojärjestelmän ohjausjärjestelmä ja sen avulla energiankulutusta on saatu pudotettua huomattavasti. (English, 2016, s. 5). Tänä päivänä sairaalarakennusten energiankulutus on 2-3

kertaa suurempi kuin muiden julkisten rakennusten ja LVI-energian osuus kokonaiskulutuksesta on 60 -70 %. Uudelleenlämmitys (kiertoilman lämmitys) on suurin yksittäinen energiankuluttaja USA:n sairaaloissa. Iso syy tähän on ilmanvaihdon ja nimenomaan ilmanvaihtuvuuden vaatimukset joiden takia ilman uudelleenlämmitys (kiertoilman lämmitys) syö energiaa niin paljon. (English, 2016, s. 1)

## 2.2 Ilmansuodatus

Ilmansuodattimien kehitykseen on vaikuttanut tarve suojella ihmistä, ympäristöä tai herkkiä tuotantoprosesseja. Suodatus on prosessina tunnettu yhtä kauan kuin sen erotusmekanismit. Nenän ja suun suojaaminen pölyltä on kirjattu jo tuhansia vuosia sitten. Kiinalaiset käyttivät jo varhain kasvien kuituja henkilökohtaiseen suojautumiseen pölyisiltä prosesseilta. Roomalaiset ja muinaiset kreikkalaiset käyttivät ”suodattimia” pölysuojaukseen käsitellessään lyijy-yhdisteitä kosmetiikan ja värien valmistukseen. Jo varhain huomattiin myös, että hajuja voidaan eliminoida käyttämällä puun epätäydellisestä palamisesta syntyvää hiiltä. Testaamalla erilaisia materiaaleja huomattiin, että ohuet asbestikuidut toimivat hyvin pienten hiukkasten suodattamiseen. Toisen maailmansodan jälkeen havaittiin, että nimenomaan ohuilla kuiduilla oli hyvät ominaisuudet pienten hiukkasten suodattamiseen ja tämän jälkeen keskityttiin etsimään sopivia materiaaleja asbestin tilalle. Lasi oli lupaavin vaihtoehto ohuiden kuitujen tuottamiseen ja lasikuitu onkin tänään selkeästi hallitsevin materiaali pienten hiukkasten suodattamiseen.

Ilmansuodattimien kehitys alkoi mahdollisimman ylhäältä, kun valmistettiin hyvän erotusasteen suodattimia kriittisiin sovelluksiin. Näitä kokemuksia on myöhemmin sovellettu alempiin vaatimuksiin, esim. ilmanvaihtosuodattimiin suojeltaessa ilmastointikoneiden komponentteja ja toiminto-osia. Vaatimukset ilman puhtaudelle ovat kasvaneet yhdessä ilmastointilaitteiden kehityksen kanssa ja lisänneet tietoisuutta sisäilman laadusta. Laatuvaatimukset uusimmille ilmastointilaitteille ovat viimeisten 50 vuoden aikana muuttuneet karkeasuodattimista (rullasuodattimien 50 % erotusaste 2,5 µm:n hiukkasille) hienosuodattimiin (99 % erotusaste 2,5 µm:n hiukkasille). Lasikuitumateriaali on hallinnut markkinoita, mutta ohuempien polymeerikuitujen val-

mistusprosessit ovat kehittyneet paljon ja korvanneet osan suodattimissa käytettävää lasikuitumateriaalista. (REHVA, 2011, ss. 11-12)

Ilman suodatuksella voidaan merkittävästi vähentää altistumista ympäristön sisältämille epäpuhtauksille – erityisesti hiukkasille, siitepölylle, homeitiöille ja otsonille. Helsingissä epäpuhtauksille ( $PM_{2,5}$ ) altistuneiden asukkaiden määrä on vähentynyt niin paljon, että se vastaisi kaiken liikenteen poistamista pääkaupunkiseudulta, kun verrataan ennen ja jälkeen vuotta 1990 rakennettujen kiinteistöjen ilmasuodatusta.

Ilman suodattaminen vähentää myös ikäviä sisäpintojen likaantumisia sekä orgaanisen aineen kerääntymistä ilmastointikoneisiin, -kanavistoihin ja -laitteisiin, joissa ne voivat toimia alustoina mikro-organismeille ja synnyttää myös hajuhaittoja. (REHVA, 2011, s. 12)

### 2.3 Suodatusmekanismi

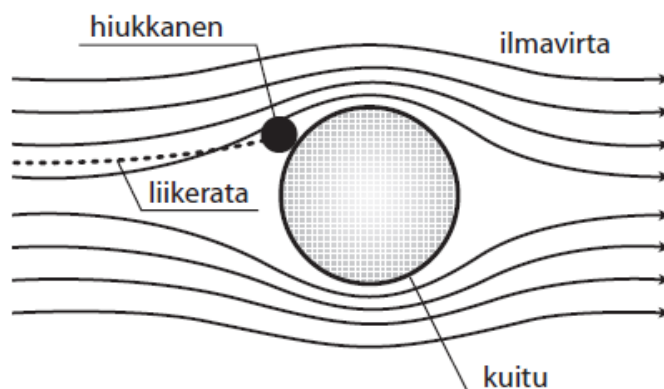
Suodattimen kyky kerätä hiukkasia perustuu sekä mekaanisiin että sähköisiin ilmiöihin. Koska kuitutekniikkaan perustuva suodatus on hyvin monimutkainen prosessi, on yleisesti käytännöllisintä analysoida sitä mahdollisimman alkeellisella tasolla, eli pallomaisen hiukkasen ja yksittäisen kuidun avulla. Kuitusuodattimen mekaaniset suodatusvaikutukset ovat seulavaikutus, hitausvaikutus (nopeus), sieppausvaikutus (kosketus) ja diffuusio (Brownin liike). Sähköstaattinen vaikutus voi myös olla merkittävä, varsinkin jos kuitujen sähköiset varaukset on luotu tarkoituksenmukaisesti sekä hiukkasen ja kuidun varaukset ovat erimerkkiset. Nämä mekaaniset ja sähköiset vaikutusmekanismi ovat mukana useimmissa suodatinmateriaaleissa. Ideaalisessa suodatusprosessissa jokainen hiukkanen pidättyy pysyvästi törmättyään ensimmäistä kertaa suodatinkuituun. Jos hiukkaset ovat pienempiä kuin  $3\ \mu m$  ja ilman tehollinen virtausnopeus suodatinmateriaalin läpi on pienempi kuin  $0,15\ m/s$ , on adheesioenergia (Van der Waals'n voima) huomattavasti suurempi kuin ilmapirrassa kulkevan hiukkasen kineettinen energia. Tämän vuoksi on epätodennäköistä, että jo kerran kuituun kiinnittyneet hiukkaset voisivat irrota myöhemmin suodatinkuidusta. Hiukkaskoon ja ilman virtausnopeuden kasvaessa suurimmat hiukkaset voivat ”repeytyä irti” suodatinkuidusta (erityisesti silloin, kun kuituhalkaisija on suurempi kuin  $10\ \mu m$ ).

Todellisuudessa myös jotkut aiemmin suodatinkuituun kiinnittyneet hiukkaset voivat irrota takaisin vastavirtaan. (REHVA, 2011, s. 27)

Seuraavassa on esitetty eri suodatusmekanismit.

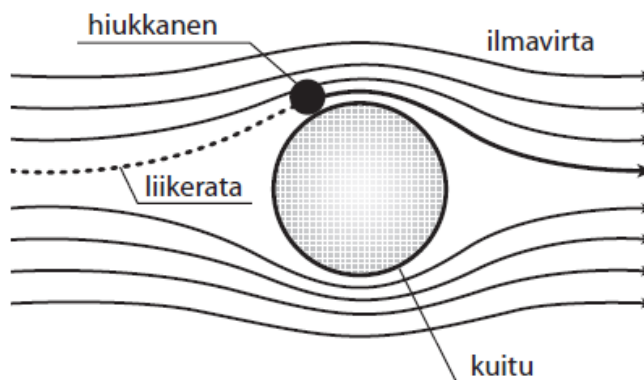
**Seulavaikutus.** Hiukkaset, joiden halkaisija on suurempi kuin kahden kuidun välinen etäisyys, jäävät kiinni kuitujen väliin. Tämän vaikutuksen teho on varsin olematon ulkoilman hiukkasille, koska ne ovat lähes kaikki pienempiä kuin 1 µm.

**Hitaus- / törmäysvaikutus (kuva 2).** Hiukkasella on massa ja nopeus, joten se pyrkii jatkamaan alkuperäistä liikerataansa ja suuntaansa (massan hitaus), törmää kuituun ja jää siihen kiinni. Hitausvoima kasvaa, kun ilman nopeus kasvaa ja kun hiukkasen koko ja/tai massa kasvavat. Jos suodattimen kuitumateriaali on paksua, hiukkasella on suurempi mahdollisuus osua kuituun ja jäädä siihen kiinni.



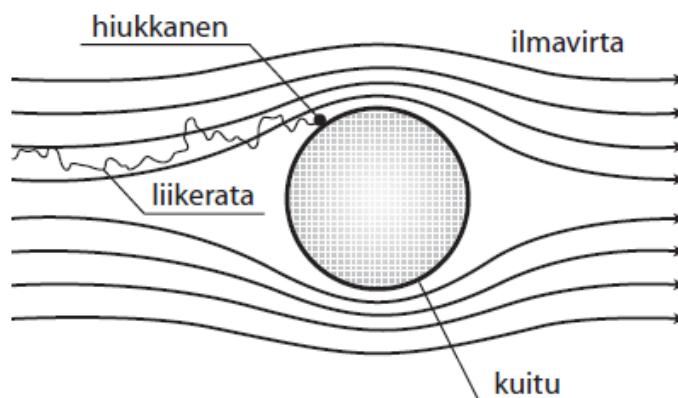
Kuva 2. Hiukkasen hitaus- / törmäysvaikutus (RTS, 2012, s. 4)

**Kosketusvaikutus (kuva 3).** Pienet ja kevyet hiukkaset seuraavat ilmavirran virtauslinjoja kuidun ympäri. Jos hiukkasen pinta koskettaa kuidun pintaa, voi se kiinnittyä kuituun. Tämä mekanismi ei oleellisesti riipu ilman virtausnopeudesta. Kosketusvaikutus kasvaa hiukkaskoon ja kuitumateriaalin tiheyden kasvaessa tai kuidun halkaisijan pienentyessä.



Kuva 3. Hiukkasen kosketusvaikutus (RTS, 2012, s. 4)

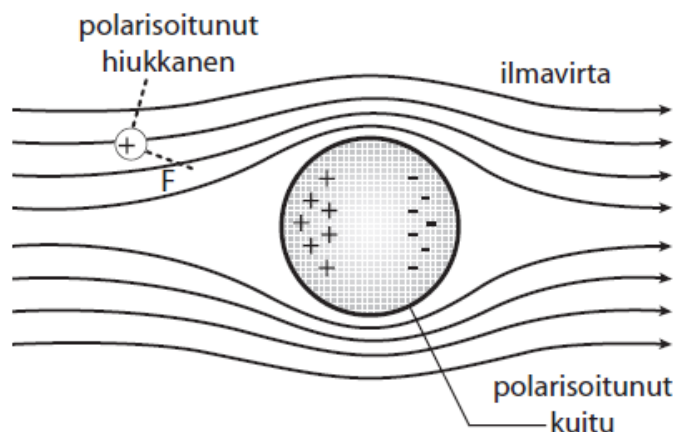
Diffuusiovaikutus (kuva 4). Pienten hiukkasten ( $<1 \mu\text{m}$ ) kiinnittymiseen vaikuttavat eniten ilmamolekyylien Brownin liikkeet, jolloin hiukkaset poikkeavat täysin satunnaisesti kuitujen ympäri kulkevista ilman virtauslinjoista. Jos poikkeama on riittävän suuri, hiukkanen osuu kuituun ja kiinnittyy siihen. Diffuusion vaikutus lisääntyy merkittävästi hiukkaskoon pienentyessä ja on hallitseva suodatettaessa pien- ja nano-hiukkasia. Tämän mekanismin vaikutus kasvaa myös, kun ilman virtausnopeus suodatinmateriaalin läpi pienenee, kuidut ovat ohuempia ja kun kuitumäärä ja kuitutiheys kasvavat.



Kuva 4. Hiukkasen diffuusiovaikutus (RTS, 2012, s. 4)

Sähköstaattinen vuorovaikutus (kuva 5). Sähköstaattisen varauksen vaikutus voi olla tärkeää, mutta sitä on vaikea arvioida tarkasti, koska se riippuu sekä kuitujen että myös hiukkasten varaustiloista ja -tasoista. Sähköstaattinen vuorovaikutus kasvaa, kun ilman virtausnopeus pienenee, suodatinmateriaalin kuituhalkaisija pienenee ja hiukkaskoko pienenee. Sen vaikutus on myös parempi, kun suodatinmateriaalin kui-

tujen määrä ja kuitutiheys kasvavat. Sähköstaattinen vuorovaikutus vaikuttaa suodattimen kokonaissuorituskykyyn ja muodostaa monimutkaisen kombinaation yhdessä mekaanisten suodatusmekanismien kanssa.



Kuva 5. Hiukkasen sähköstaattinen vuorovaikutus (RTS, 2012, s. 4)

Yhteisvaikutus. Suodattimen erotusaste on eri suodatusmekanismien yhteisvaikutus. Sekä sieppausvaikutus että hitausvaikutus kasvavat hiukkaskoon kasvaessa, kun taas diffuusio- ja sähköstaattiset vaikutukset kasvavat hiukkaskoon pienentyessä. Kullakin suodattimella on tietty hiukkaskoko (-alue), joka on kaikkein vaikeinta suodattaa tai kääntäen, läpäisee suodattimen helpoiten (MPPS, Most Penetrating Particle Size, Läpäisevin hiukkaskoko).

Suodattimen minimierotusaste ja ominaiserotusastekäyrän muoto riippuvat suodattinmateriaalista (kuitujen koko ja kuitutiheys), ilman virtausnopeudesta sekä suodattavista hiukkasista. Suodatinmateriaalin ja hiukkasten ominaisuuksien mukaan erotusaste voi parantua tai heikentyä pölykuormituksen aikana. (REHVA, 2011, ss. 27-28)

#### 2.4 Suodatinmateriaalit ja innovaatiot

Suodattimien materiaaleista on ohjeet *Sisäilmastoluokitus 2008:ssa (LVI 05-10440)*. Lasikuitua käytetään hienosuodattimissa ja erityisesti korkean erotusasteen suodattimissa. Pyrittäessä suodattamaan pieniä hiukkasia on suodatinmateriaalissa käytettävä



runsaasti ohuita kuituja. Muovikuituja käytetään karkea-, keskitason ja hienosuodattimissa. Synteettiset suodattimet voivat olla sähköisesti varattuja pienten hiukkasten erotuskyvyn parantamiseksi. Sähköinen suodatusvaikutus voi käytön aikana alentua. Suodatinta kuormittavan pölyn laadulla on oleellinen vaikutus sähköisen suodatusvaikutuksen pysyvyyteen. Kuitusuodattimen kuormittuessa mekaaniset erotusmekanismi paranevat mutta sähköiset erotusmekanismi saattavat huonontua. Kokonaiserotusaste riippuu erotusmekanismien yhteisvaikutuksesta, johon vaikuttaa mm. perusmateriaalin rakenne ja laatu sekä sähköisten varausten määrä. Varatuille kuitusuodattimille tulisi ilmoittaa sekä varatun että varaamattoman suodattimen erotusaste.

Kompaktisuodattimissa käytetty paperimainen suodatinmateriaali voi olla valmistettu lasikuidusta, synteettisestä materiaalista tai luonnon selluloosasta. Kuitukoot ja yhdistelmät vaihtelevat halutun erotusasteen ja painehäviön mukaan. Materiaalit saattavat olla kyllästetyt kestämään kosteutta. Vekatuissa ohuissa paneelisuodattimissa käytetään myös esimerkiksi puuvilla / polyesterisekoitteita ja suodatinmateriaalin tukena metalliverkkoa.

Tasosuodattimet eli nk. suodatinmatot ovat pääosin karkeasuodattimia, jotka asennetaan erilliseen kehykseen tai jotka ovat valmiiksi varustettu kehyksellä. Suodatinmateriaalina käytetään sekä lasikuitua että muovikuituja. Suodatinmateriaali on usein käsitelty rasvamaaisella tartunta-aineella. Tasosuodattimien syvyys on tyypillisesti 20...100 mm. Etuna on edullinen hankintahinta, mutta haittoina alhainen erotusaste, likainen vaihtotyö ja lyhyt käyttöikä.

Pussisuodattimia (kuva 6) valmistetaan sekä lasi- että muovikuiduista. Suodattimen toiminnalle on tärkeää muodon säilyvyys painehäviön lisääntyessä. Painehäviön tulisi nousta suodatinmateriaalin tukkeutumisen johdosta eikä suodatintaskujen välisten vapaiden ilmäteiden kuristumisen johdosta. Mitä useampia taskuja suodattimessa on, sen tärkeämpää on muodon säilyminen. Ilman jäykisteitä olevat suodattimet pysyvät ryhdissä ilmavirran vaikutuksesta. Ilmavirran ollessa liian pieni suodatintaskut saattavat roikkua tai nojata toisiaan vastaan. Sama ilmiö saattaa ilmetä, kun suodattimiin on kerääntynyt runsaasti pölyä ja taskujen massa on kasvanut. Ryhdin säilyttämiseksi on eräissä ratkaisuissa suodattimeen liitetty mekaaninen ripustin. Muovikuituisista

suodatinmateriaaleista saumaamalla valmistetut suodattimet ovat jäykkärakenteisia ja muodossa pysyviä ja soveltuvat hyvin vaikeisiin (turbulenssi, värinä) virtausolosuhteisiin. Jäykkä rakenne lisää kuitenkin kuljetus- ja säilytystilan tarvetta. Pussisuodattimet ovat yleissuodattimia, joita valmistetaan sekä perus- että erikoiskokoina. Pussisuodattimien syvyys on 100...900 mm. Suodatintaskuja on 1...12 kpl. Lyhyimmät suodattimet ovat yleensä karkeasuodattimia.

Pussisuodattimet ovat yleisimmin käytettyjä suodattimia.



Kuva 6. Esimerkki pussisuodattimesta (RTS, 2012, s. 7)

Laajapintasuodattimella (kuva 7) tarkoitetaan suodatinta, jossa on joko V-muotoiset kenno-osat (ns. minipleat- tekniikka, vekkipaketin paksuus tyypillisesti 20...35 mm) tai koko suodatinrungon syvyisellä kenno-osalla varustettua suodatinta (ns. deep pleat -tekniikka, vekkipaketin paksuus  $\leq 280$  mm). Suodatinmateriaali on yleensä paperimainen ja valmistettu lasi-, muovi- tai selluloosakuiduista tai näiden yhdistelmistä. Suodattimien syvyys on 100...300 mm. Laajapintasuodattimen etuja ovat tukeva rakenne, hyvä mekaaninen kestävyys, soveltuvuus hankaliin virtausolosuhteisiin ja pieni tilantarve. Haittana on esisuodattimen tarve käyttöön lisäämiseksi. Laajapintasuodattimia valmistetaan vain peruskokoja. Uusimmissa laajapintasuodatinmalleissa suodattimien vaihto tehdään siten, että kehyksestä irrotetaan vain suodatin-kasetit ja vaihdetaan uuteen. Itse kehys jää käyttöön.



Kuva 7. Esimerkki laajapintasuodattimesta (RTS, 2012, s. 7)

Kasettsuodattimella (kuva 8) tarkoitetaan noin 20...100 mm syvää kehystettyä suodatinta. Kasettsuodattimissa on minipleat- tekniikalla toteutettu paperimainen vekattu suodatinmateriaali. Suodatinmateriaalina voi olla lasikuitu, muovikuitu tai selluloosa. Nämä suodattimet asennetaan tavanomaisen asennuskehysten tulopuolelle. Tasosuodattimiin verrattuna kasettsuodattimien pinta-ala on suurempi, erotusaste parempi ja ne on helpompi vaihtaa. Pahvikehysiset kasettsuodattimet ovat kosteus- arkoja. Kasettsuodattimia käytetään usein korvaamaan tasosuodattimet (suodatinmatot) hiukkassuodatuksen parannustöissä.



Kuva 8. Esimerkki kasettsuodattimesta (RTS, 2012, s. 8)

Sähkösuodattimia käytetään hyvin yleisesti voimalaitosten savukaasujen puhdistuksessa. Sähköistä suodatusta käytetään myös erilaisissa huoneilmapuhdistimissa sekä ravintola- ja kahvilatilojen ilmanpuhdistimissa. Sähkösuodattimia käytetään myös rakennusten ilmanvaihtojärjestelmissä lähinnä kierrätys- ja palautusilman puhdistukseen. Sähkösuodattimen merkittävimmät edut ovat hyvin pieni virtausvastus ja suodatinosan puhdistettavuus. Markkinoilla on myös sähkösuodattimia, jotka on varustettu automaattisella pesujärjestelmällä. Heikkouksina on korkea hankintahinta ja eräissä tapauksissa suodatuksen epäluotettavuus. Kokonaistaloudellisesti sähkösuodattimen käyttö on yleensä perusteltua ainoastaan korkeissa hiukkaspitoisuuksissa. Sähkösuodatin edellyttää säännöllistä huoltoa. Huollon laiminlyönnit ovat yleinen syy suodatuksen epäluotettavuuteen. (RTS, 2012, ss. 7-8)

Uuden sukupolven hybridisuodattimissa voidaan yhdistää eri suodatinluokkien suodattimia käyttökohteen ja –tarkoituksen mukaan. Hybridisuodattimet on valmistettu Ratis®-materiaalista. Hybridisuodattimien kehikko on rakennettu niin, että sitä ei tarvitse vaihtaa vaan kehikkoon voidaan vaihtaa suodatinkasetit ja tarvittaessa vaikka aktiivihilikasetit. Näin säästetään varastointi ja kuljetuskustannuksia kun pelkät suodatinkasetit vievät vähemmän tilaa kuin kehikot. Lisäksi hybridiratkaisusta ei kerry kaatopaikkajätettä vaan likaantuneet kasetit ovat energiajätettä. (Filtech, 2018)

Bennetin artikkelissa (Bennett, 2010) ”Air filtration: Innovations in industrial air filtration”, käsitellään lainsäädännön muutoksen fokusta jolla USA ja Eurooppa yrittävät torjua ilmaston muutosta ja miten tämä on ajanut ilmansuodatuksen innovaatiot kohtaamaan energiatehokkuusvaatimukset yhdessä parempien erotusastevaatimusten kanssa. Artikkelissa esitellään kahden johtavan valmistajan teknologioiden vaihtelut sekä mukana on myös teollisen suodatuksen case Hollannista. Painehäviö suodattimen yli edustaa kaikissa ilmansuodatusjärjestelmissä energiahäviötä, joka aiheuttaa energiakustannuksia. Mitä korkeampi painehäviö sitä korkeampi vaatimus suodatus- ja erotusjärjestelmällä. Teollisuudessa energiahäviön taloudellisuuden vähentämisen rinnalla on myös voimakkaita lainsäädännöllisiä paineita globaalisti. Tavoitteena on saada energiankulutus niin alhaiseksi kuin mahdollista.

Maailman johtava suodatinvalmistaja Donaldson, on kehittänyt SynteqXP- suodatin materiaalin joka parantaa tehokkuutta ja samalla vähentää energiankulutusta pienemmällä painehäviöllä saavuttaen jopa 40 %:n energiansäästön. Toinen johtava suodatinmateriaalien valmistaja, Hollingsworth & Vose, on kehittänyt NanoWave<sup>TM</sup> – materiaalin jolla pyritään korvaamaan perinteinen lasikuitu materiaalina ja joka tarjoaa paremmat suodatusominaisuudet vähemmillä energiakustannuksilla. NanoWave<sup>TM</sup> on ympäristöystävällisellä koko-synteettisellä laajennetulla pinnalla oleva materiaali.

## 2.5 Ilmansuodattimien standardit

LVI-järjestelmien ilmansuodattimet ovat useimmiten päämekanismi ilmassa olevien partikkelien poistamisessa rakennuksista. Kuitenkaan me emme tiedä kovinkaan paljon suodattimien toiminnasta oikeissa ympäristöissä, kuten asuinrakennuksissa ja julkisissa rakennuksissa joissa partikkelipitoisuudet ja koostumukset voivat olla hyvinkin erilaisia kuin laboratorio-olosuhteissa (Stephens & Siegel, 2012, s. 2).

Hanley (1994) raportoi ensimmäisenä laboratoriossa tehdyistä suodatintesteistä. Se on ollut myöhemmin perusta ASHRAE –standardille. ASHRAE 52.2 standardi määrittelee testimenetelmän jossa määritellään kaksi suodattimen ominaisuutta: partikkelien kokoon perustuva erotusaste ja ilmavirran vastus. Mitattavat partikkelikoot ovat väliltä 0,3 – 10  $\mu\text{m}$  (yhteensä 12 eri kokoa) mitattuna ennen ja jälkeen suodattimen. Partikkelien erotuskyky lasketaan vähentämällä ennen ja jälkeen keskimääräinen suhde partikkelien koostumuksessa kokonaisilmavirrasta mitattuna. Testi aloitetaan uudella suodattimella ja toistetaan useasti lisäämällä pölyn määrää. Pölyn erotuskyky on riippuvainen, ei pelkästään partikkelien koosta vaan myös ilmamäärän suuruudesta ja pölyn määrästä ilmassa. Minimierotuskäyrä saadaan mittaamalla 12 partikkelikokoa puhtaalla suodattimella, suodattimella johon on lisätty pölyä ja suodattimella testin lopputilanteessa. Lopuksi saadaan minimitohokkuusarvo (MERV) keskiarvona neljästä partikkelikoosta kolmella eri kokoalueella jotka ovat, 0,3 – 1,0  $\mu\text{m}$  , 1,0 – 3,0  $\mu\text{m}$  ja 3,0 – 10  $\mu\text{m}$ . Tämän mittausmenetelmän perusteella on tehty neljä eri mittaus- ta joissa mitattiin ja arvioitiin ilmansuodattimien partikkelinerotusastetta. Mittauksista kaksi tehtiin laboratoriossa ja kaksi kenttätestinä oikeissa rakennuksissa. Mittauk-

sisä kehittiin ns. full-house testimetodi jolloin mittauksessa käytettiin kolmea eri suodatintyyppiä ja testitalo oli tyhjillään. Mittauksissa testattiin partikkelien erotusaste monella eri partikkelikoolla. Mittaustulokset noudattivat yllättävän hyvin laboratorio-olosuhteissa tehtyjä mittauksia. Tätä full-house mittaustestimetodia pitäisi käyttää kun selvitetään kanavavuotoja, suodattimen ohi menevää ilmavirtaa sekä järjestelmän toiminnallista aikaa. (Stephens & Siegel, 2012, s. 10)

Ilmanvaihtokoneiden suodattimien luokitus on testattu aiemmin eurooppalaisen SFS-EN 779:2012 standardin mukaan. Luokituksessa on ollut käytössä myös amerikkalainen ASHRAE 52.2 standardi. Vuonna 2016 hyväksyttiin uusi standardi EN-ISO 16890:2016 joka on korvannut EN779:2012 ja ASHRAE52.2 –standardit ja yhtenäistänyt suodattimien testaus ja luokitusmenetelmät. Alla on esitetty lyhyesti näiden eri standardien pääkohdat ja eroavaisuudet.

### 2.5.1 EN779:2012

EN779:2012 on Eurooppalainen standardi joka on ollut voimassa vuodesta 2012. Standardi luokittelee ilmansuodattimet niiden alimman erotusasteen ja suodatustehon mukaan. Standardi jaottelee suodattimet kolmeen eri luokkaan jotka ovat: G1-G4, M5-M6 ja F7-F9. Erotusasteen mittauksessa käytetään partikkelikokoa 0.4 µm jonka perusteella lasketaan erotusaste kaikille suodattimille. Suodattimien varauksenpoistokäsittely suoritetaan upottamalla suodatinmateriaalia (ei siis kokonaista suodatinta) isopropanoli -liuokseen jonka jälkeen se ripustetaan kuivumaan. Tämä menetelmä on tehokas mutta se saattaa vahingoittaa suodatinmateriaalin rakennetta joka taas voi vaikuttaa heikentävästi suodattimen muihin ominaisuuksiin. (Sundvik, 2017)

Standardi on kumottu vuonna 2017.

### 2.5.2 ASHRAE 52.2

ASHRAE 52.2 on Amerikkalainen standardi joka on ollut voimassa vuodesta 1999. Standardi luokittelee ilmansuodattimet minimierotusasteen mukaan ja suodatinluokkia on 16 kpl. Testattavien partikkeleiden kokoluokat ovat väliltä 0.3 µm – 10 µm.

Varauksenpoistokäsittelyssä käytetään testiaerosolia (KCl) jolla varaus poistetaan. Tämä menetelmä ei ole yhtä tehokas kuin EN779:2012:ssa ja jopa pitkän ajan kuluessa voi olla vaikeaa saada suodattimen varaus kokonaan poistettua. Tämän menetelmän etuna on se, että se ei vahingoita suodatinmateriaalia eikä näin ollen heikennä materiaalin muita ominaisuuksia. (Sundvik, 2017)

### 2.5.3 EN-ISO 16890:2016

EN-ISO 16890:2016 on uusi standardi, joka on korvannut EN779:2012 –standardin vuoden 2018 alussa ja tulevaisuudessa se tulee korvaamaan myös ASHRAE 52.2 –standardin.

EN-ISO 16890:2016 –standardi sisältää neljä osiota:

1. Tekniset määritelmät, vaatimukset ja hiukkasmaisen aineksen erotusasteeseen perustuva luokitusjärjestelmä (ePM)
2. Erotusasteen ja virtausvastuksen mittaaminen
3. Massaerotusasteen sekä testipölykuormituksesta aiheutuvan painehäviön määrittäminen
4. Käsittelymenetelmä minimierotusasteen määrittämiseen

Käytännössä suurimmat muutokset verrattuna EN779:2012 ja ASHRAE52.2 ovat:

- Erotusastetta mitattaessa, testattavien partikkelien koko alue laajenee 0.3 µm:stä 10 µm:iin kun se EN779:2012:sta oli välillä 0.3 µm – 3 µm:ä. Eli käytännössä testissä käytettävä aerosoli on muuttunut siten, että partikkelien kokoluokissa 0.3 µm – 1 µm käytetään DEHS –aerosolia ja kokoluokissa 1 µm – 10 µm käytetään KCl –aerosolia. Lisäksi kaikkia partikkelien kokoluokkia käytetään luokituksessa kun EN779:2012 –standardissa käytetään vain kokoluokkaa 0,4 µm.
- Varauksenpoistokäsittelyssä on valittu isopropanoli –menetelmä sen hyvän varauksenpoisto –ominaisuuden vuoksi. Kuitenkin menetelmää on kehitetty EN779:2012:sta siten, että se perustuu kyllästetyn kaasun varauksenpoistoon. Vaikka tämä menetelmä on hitaampi ja hankalampi toteuttaa kuin märkämenetelmä, se poistaa varauksen 100 % :sesti eikä vahingoita suodatinmateriaalin rakennetta.

- Testipöly vaihtuu EN-ISO 15957:n mukaisesti L2 (suomessa ISO A2 standardin ISO 12103-1 mukaan). Tämä pöly on hienompaa kuin aiempi ja sen testausaika on pidempi mutta se simuloi paremmin ilman todellista tilannetta kuin aiempi pöly.
- suodattimien luokitus muuttuu täysin. (Sundvik, 2017)

### 3 ULKOILMA JA SAIRAALAYMPÄRISTÖ

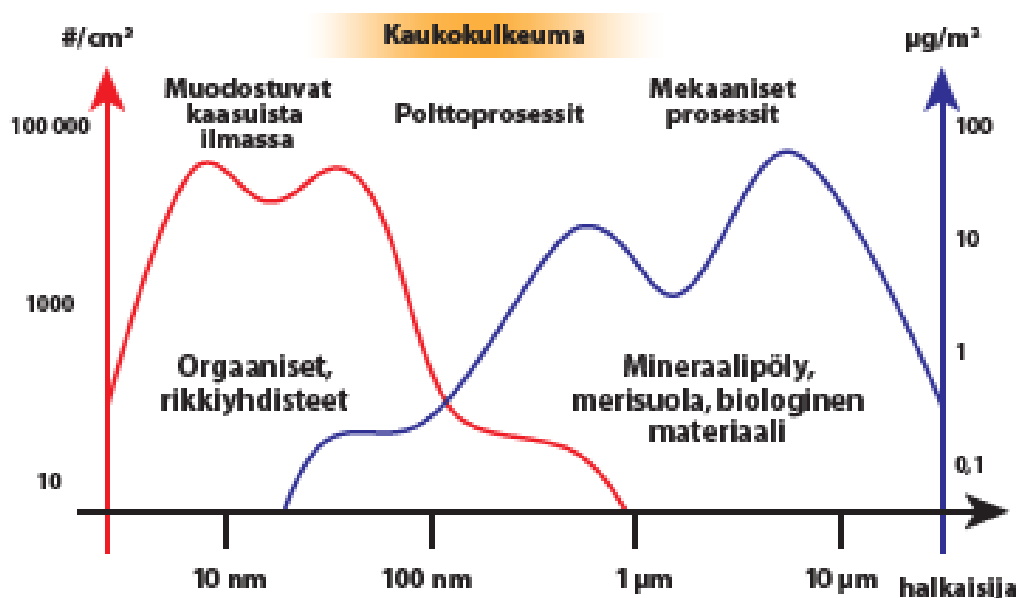
#### 3.1 Ulkoilman hiukkasjakaumat

Ulkoilmassa on hiukkasia luonnostaan ja ihmisten toiminnan seurauksena. Hiukkasia on eri kokoisia niiden lähteistä riippuen (kuva 9). Kaikilla hiukkaskoilla on haitallisia terveysvaikutuksia: eri kokoluokkien vaikutukset poikkeavat kuitenkin toisistaan, eikä tarkkoja määriä turvallisille pitoisuuksille voida määrittää. Hiukkasten terveysvaikutuksiin vaikuttaa koon ja määrän lisäksi myös hiukkasten koostumus. Ulkoilman hiukkasten määrää mitataan yleensä massa- tai lukumääräkokojakaumana. Lukumääräisesti suurin osa hiukkasista on hyvin pieniä, halkaisijaltaan alle sadan nanometrin kokoisia. Massa taas painottuu suurempiin hiukkasiin. Kaupunkiympäristöissä, vilkkaan liikenteen läheisyydessä tehdyissä mittauksissa vain noin 1 % hiukkasmassasta on alle 0,1  $\mu\text{m}$  hiukkasia. Näiden hiukkasten osuus hiukkasten kokonaismassasta on kuitenkin jopa 70...90 %.

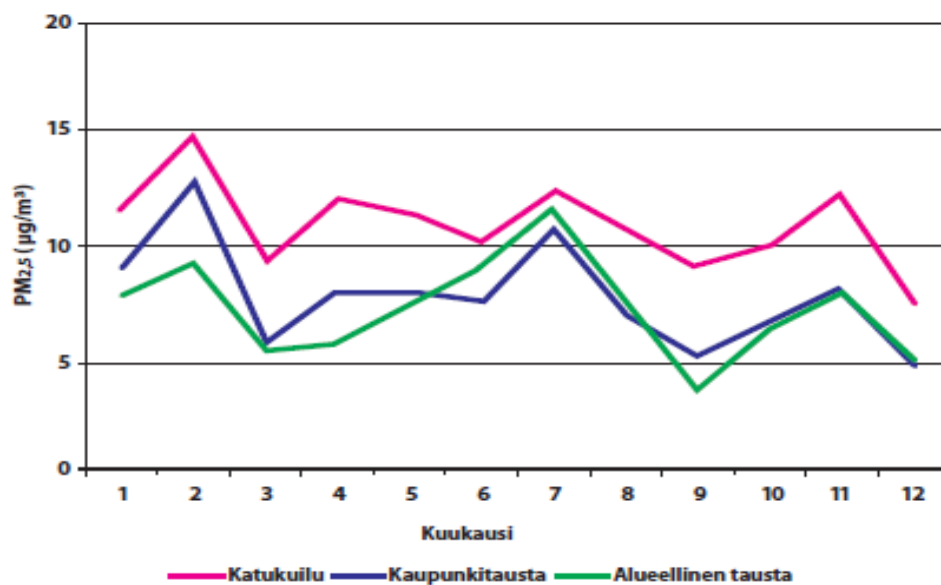
Hiukkasten koko vaikuttaa niiden elinikään ulkoilmassa: suuret hiukkaset laskeutuvat pinnoille jo parissa tunnissa, kun taas muutaman sadan nanometrin hiukkaset lentävät ilman mukana jopa viikkoja. Meteorologisten tekijöiden vaikutus hiukkaspitoisuuksiin on merkittävä. Esimerkiksi voimakas tuuli nostattaa kaduille kertynyttä karkeaa pölyä uudestaan ilmaan ja toisaalta laimentaa pienten hiukkasten pitoisuuksia, kun puhtaampaa ilmaa sekoittuu saastuneempaan. Ulkoilman pienimmät hiukkaset syntyvät pääasiassa polttoprosesseissa. Nämä pienimmät hiukkaset, joita usein kutsutaan myös ultrapieniksi hiukkasiksi, ovat samaa kokoluokkaa kuin teollisissa prosesseissa käytetyt nanohiukkaset. Ilmakehässä hiukkaset kasvavat mm. höyryjen tiivistyessä niihin. Voidaankin karkeasti jaotella että alle mikrometrin hiukkasista tuoreet hiukkaset ovat hyvin pieniä ja suuremmat ovat olleet ilmakehässä jo jonkin aikaa.



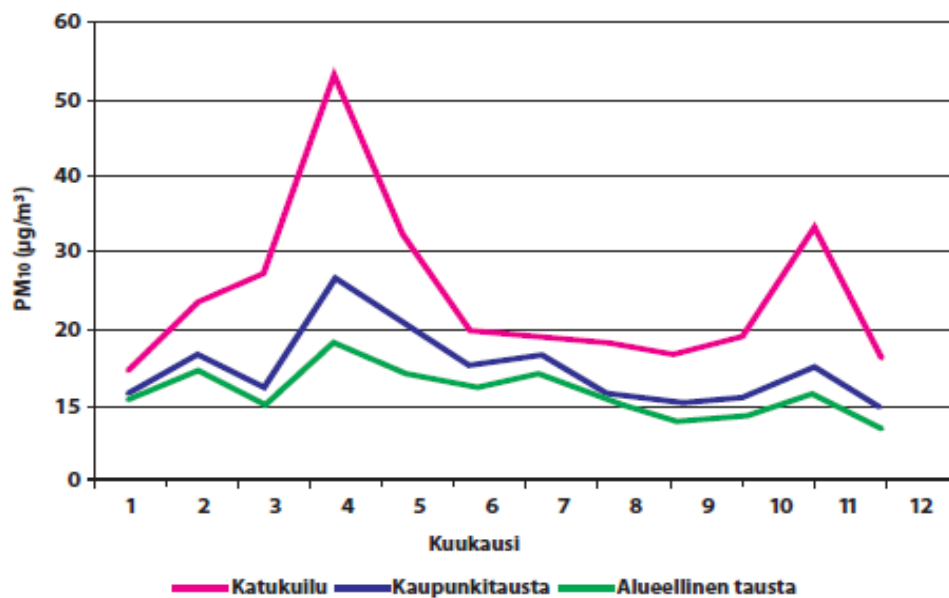
Ulkoilman suuremmat hiukkaset ovat peräisin mekaanisista prosesseista, kuten autojen renkaiden jauhama katupöly, tai ovat eloperäisiä, kuten siitepöly ja itiöt. Liikenne on yksi merkittävimmistä ulkoilman hiukkasten lähteistä. Hiukkaspitoisuuksien vaihtelussa nähdäänkin selkeästi ruuhka-ajan merkitys. Kuvissa 10 ja 11 on HSY:n mitaamia massapitoisuuksia pääkaupunkiseudulta. Kuukausipitoisuuksissa näkyy selkeästi kevätpölyn aiheuttama huippu. Suomessa ulkoilman hiukkaspopulaatiosta merkittävä osa on kaukokulkeumaa ympäröivistä maista ja Keski-Euroopasta. Pääkaupunkiseudulla kaukokulkeuman osuus  $PM_{2.5}$ :stä voi olla jopa 90 %. Mitattuja massapitoisuuksia ei voi suoraan muuntaa lukumääräpitoisuuksiksi, mutta keskimääräisesti lukumääräpitoisuus voidaan olettaa kuvassa 5 esitetyn kaltaiseksi. (RTS, 2012, ss. 2-3)



Kuva 9. Ulkoilman hiukkasten lukumäärä- ja massakokojakauma. Kuvaan on merkitty myös kaukokulkeuman hiukkasten kokoluokka. Kuva Hanna Vehkamäki ja Veli-Matti Kerminen. (RTS, 2012, s. 3)



Kuva 10. PM<sub>2,5</sub> kuukausikeskiarvoja pääkaupunkiseudulla. Kuva HSY. (RTS, 2012, s. 3)



Kuva 11. PM<sub>10</sub> kuukausikeskiarvoja pääkaupunkiseudulla. Kuva HSY. (RTS, 2012, s. 3)

### 3.2 Ulkoilmaluokitus

Standardi SFS-EN 13779:2007 jaottelee ulkoilman kolmeen eri luokkaan, ODA 1 – ODA 3 epäpuhtauksien mukaan. Luokat on kuvattu taulukossa 1. Luokat jaetaan seuraavan kuvauksen mukaan:

ODA1 –luokkaa sovelletaan silloin, kun WHO:n ohjearvo (1999) ja mikä tahansa kansallinen ilmanlaatustandardi tai –määräys ulkoilmalle täyttyy. ODA 1 luokkaan kuuluu esim. maaseutualueet joissa ei ole isoja hiukkaspäästöjä.

ODA 2 –luokkaa sovelletaan silloin, kun WHO:n ohjearvo tai mikä tahansa kansallinen ilmanlaatustandardi tai –määräys ylittyy enintään kertoimella 1,5. Tähän luokkaan kuuluu lähinnä kaupunkialueita joissa ei ole suuria teollisuuspäästöjä

ODA 3- luokkaa sovelletaan silloin, kun WHO:n ohjearvo tai mikä tahansa kansallinen ilmanlaatustandardi tai –määräys ylittyy enemmän kuin 1,5 –kertaisesti. Tässä luokassa ovat teollisuusalueet ja kaupunkien keskustat joissa on suuret liikennetiheydet.

Taulukko 1. Ulkoilmaluokitus standardin SFS-EN 13779:2007 mukaisesti (Sandberg, Ilmastointilaitoksen mitoitus, 2016, s. 203)

Luokka	Kuvaus
ODA 1	Ulkoilma, jossa saattaa esiintyä pölyä tilapäisesti (esim. siitepölyä kesäisin)
ODA 2	Ulkoilma, joka sisältää suuria hiukkaspitoisuuksia ja/tai kaasumaisia epäpuhtauksia
ODA 3	Ulkoilma, joka sisältää erittäin suuria kaasumaisia epäpuhtauspitoisuuksia ja/tai hiukkasepäpuhtauksia

### 3.3 Ulkoilman kosteuden vaikutus suodattimien toimintaan

Ulkoilman kosteuden pääsy ilmanvaihtokoneeseen ja –järjestelmään sadeveden ja lumen muodossa tulee estää mahdollisimman hyvin. Jos näin pääsee tapahtumaan, virtaussuunnassa ensimmäiset suodattimet kastuvat ja niiden erotusaste putoaa selvästi. Mahdollisesti seurauksena voi olla myös mikrobikasvustoa suodattimeen. Sadeveden ja lumen sisääntulo tuloilmakoneeseen estetään yleensä käyttämällä

- ulkosäleikössä pientä vapaan otsapinnan nopeutta  $< 1,5$  m/s
- riittävän suurta viemäröityä ulkoilmakammiota, jossa nopeus on alle 1 m/s
- standardin SFS 13030:n mukaan testattuja ulkosäleikköjä (Sandberg, Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, 2016, s. 207)

### 3.4 Sairaalaympäristö

Sairaalatilojen hygieenisyydestä ja ilman laadusta on annettu viranomaisohjeita vain sairaala-apteekkien osalta. Ohjearvoissa asetetaan tavoitearvoja mm. ilman hiukkas- ja mikrobipitoisuudelle, laskeutuvien mikrobien määrälle, pintojen mikrobipitoisuudelle sekä tilojen välisille painesuhteille. USA:ssa käytettävissä ohjeissa [9],[10] tilojen hiukkaspitoisuusluokitus noudattaa standardia EN ISO 14661-1. EU:n GMP -ohjeissa (EU –GMP –ohje, Annex 1) tuotantotilat on jaettu, ilmeisesti historiallisista syistä, hiukkaspitoisuuden ja –koon mukaan luokkiin A, B, C ja D.

Lääketuotannon hiukkaspitoisuuden ohjearvot EU- maiden osalta on esitetty taulukossa 2 ja biologisten hiukkasten osalta taulukossa 3. (VTT, 2012, s. 16)

Taulukko 2. Lääkevalmistustilojen tilaluokkien hiukkaspitoisuusrajat EU-alueella. (VTT, 2012, s. 16)

Puhtausluokka	Maksimi sallittu hiukkaspitoisuus, kpl/m <sup>3</sup>			
	Levossa		Toiminnassa	
	$\geq 0.5 \mu\text{m}$	$\geq 5.0 \mu\text{m}$	$\geq 0.5 \mu\text{m}$	$\geq 5.0 \mu\text{m}$
A	3 520	20	3 520	20
B	3 520	29	352 000	2 900
C	352 000	2 900	3 520 000	29 000
D	3 520 000	29 000	Ei määritelty	Ei määritelty

Taulukko 3. Lääkevalmistustilojen tilaluokkien mikrobiologisten kontaminaatioiden raja-arvot EU-alueella. (VTT, 2012, s. 16)

Puhtausluokka	Ilmanäyte, cfu/m <sup>3</sup>	Laskeumamalja (90 mm), cfu/4 tunnin näyte	Pintanäyte (d = 55 mm), cfu/alusta	Kosketusnäyte (5 sormeaa) cfu/käsine
A	< 1	< 1	< 1	< 1
B	10	5	5	5
C	100	50	25	-
D	200	100	50	-

Uusimmassa ympäristöministeriön asetuksessa 1010/2017 ei anneta suoraan ohjearvoja sairaalatilojen ilmanvaihdon suunnitteluun mutta FINVAC ry on tehnyt asetuksen tueksi ohjeen, Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet, jossa annetaan erilaisille sairaalailloille mitoitusohjeet. Sairaaloiden, terveyskeskusten ja lääkäriasemien tavanomaisten potilas- ja toimenpidetilojen ilmanvaihdon mitoituksessa käytetään ensisijaisesti henkilöperustetta, ottaen myös huomioon haju- ja epäpuhtauskuorma, joka mitoituksessa katsotaan olevan verrannollinen henkilömäärään. Mitoituksen perusilmanvaihtona käytetään 10 dm<sup>3</sup>/s, hlö. Leikkaussalit ja tukitilat (muutamien poikkeuksien) ovat erityistiloja, jossa mitoittavana tekijänä on muu kuin henkilöperuste ja jotka suunnitellaan tapauskohtaisesti (Suomen sairaalateknisen yhdistyksen, SSTY, ohjeistuksen mukaan). Taulukossa 4 on esitetty ilmanvaihdon ohjearvoja vain tiloille, joita on lähes jokaisessa terveyskeskuksessa ja jokaisella lääkäriasemalla.

Potilashuoneen ilmanvaihto mitoitetaan vuodepaikkojen ja märkätilojen poistoilmavirtojen mukaan siten, että tulo- ja poistoilmavirrat (mukaan lukien WC ja kylpyhuone) ovat yhtä suuret. Taulukkoarvoja suurempaa ulkoilmavirtaa voidaan käyttää myös potilashuoneiden lämpötilojen alentamiseen. Ilmanvaihdon mitoitus voi perustua myös suureen sairaalalaitteiden aiheuttamaan lämpökuormaan. (Finvac, 2017, s. 10)

Taulukko 4. Sairaaloiden ja lääkärikeskusten eri tilojen ilmanvaihdon mitoitusarvot (Finvac, 2017, s. 10)

Tila / käyttötarkoitus	Ulkoilmavirta dm <sup>3</sup> /s	Ulkoilmavirta dm <sup>3</sup> /s,m <sup>2</sup>	Poistoilmavirta dm <sup>3</sup> /s,m <sup>2</sup>	Muita ohjeita
Potilashuone	10 dm <sup>3</sup> /s, hoitopaikka	2,5	yhtä suuri kuin ulkoilmavirta	
Potilashuone jossa WC	yhtä suuri kuin poistoilmavirta, kuitenkin vähintään 10 dm <sup>3</sup> /s, hoitopaikka	yhtä suuri kuin poistoilmavirta, kuitenkin vähintään 2,5	vähintään 30 dm <sup>3</sup> /s,huone	
Vastaanottohuone	20 dm <sup>3</sup> /s, huone	2	yhtä suuri kuin ulkoilmavirta	30 dm <sup>3</sup> /s, jos mitoitus kolmelle hengelle
Tutkimushuone, toimenpidehuone	25 dm <sup>3</sup> /s, huone	2	yhtä suuri kuin ulkoilmavirta	40 dm <sup>3</sup> /s, jos mitoitus neljälle hengelle, otettava huomioon myös laitteiden aiheuttama kuormitus
Laboratorio, näytteenottotila		4	4	
Osastonkanslia		3		
Odotustila	6 / paikka	3		Koskee myös käytävää jota käytetään odotustilana, mitoitus suuremman ilmavirtaan johtavan kriteerin mukaan
Käytävä		1		Ei odotustilana, kuitenkin ilmanvaihdon tarve suurempi kuin esim. toimistorakennusten käytävissä
Ruokailutilat		3		
Varasto			0,5	Suurempi ilmavirta varastoitavan tavarankuormituksen, esim. likaiset vaatteet

## 4 SUODATTIMIEN TOIMINTA

### 4.1 Suodattimien erotus- ja läpäisyaste

Erotusaste on suodattimen erottamien hiukkasten lukumäärä suhteessa suodattimeen tulevaan hiukkasten lukumäärään.

Läpäisyaste on suodattimen läpäisevien hiukkasten lukumäärä suhteessa suodattimeen tulevaan hiukkasten lukumäärään.

Suodattimen erotusaste ja läpäisyaste lasketaan kaavoista 4.1.1 ja 4.1.2

$$E = (1 - C_2 / C_1) * 100 \quad (4.1.1)$$

$$p = 100 - E = C_2 / C_1 * 100 \quad (4.1.2)$$

$C_1$  = pölypitoisuus tai testiainepitoisuus ennen suodatinta

$C_2$  = pölypitoisuus tai testiainepitoisuus suodattimen jälkeen

$E$  = erotusaste, [ % ]

$p$  = läpäisyaste, [ % ]

## 4.2 Suodattimien painehäviö

Ilmansuodattimen painehäviö ilmavirran funktiona noudattaa kaavaa 4.2.1 (SFS-EN 779:2012)

$$\Delta p = k * \mu^{2-n} * \rho^{n-1} * (q_v)^n \quad (4.2.1)$$

$\Delta p$  = painehäviö, [Pa]

$k$  = vakio

$q_v$  = ilmavirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\mu$  = ilman dynaaminen viskositeetti [Pa s]

$n$  = eksponentti

$\rho$  = ilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Yleisilmanvaihdon suodattimilla eksponentti  $n$  on yleensä alueella 1.1 – 1.5. Kompaktisuodattimilla eksponentti  $n$  on vaihtelualan alarajoilla ja muilla suodattimilla suurempi. Eksponentti  $n$  määritetään puhtaalle suodattimelle ja ilmoitetaan SFS-EN 779:2010 testausselesteessa. (Sandberg, Ilmastointilaitoksen mitoitus, 2016, s. 223)

#### 4.3 IV-järjestelmän komponenttien painehäviöt

Suodattimet ovat ainoat komponentit ilmanvaihtojärjestelmässä joiden painehäviöt muuttuvat käytön aikana. IV-järjestelmän muiden komponenttien vaikutus järjestelmän kokonaispainehäviöön ja puhaltimen toimintapisteen määrittämiseen riippuu pääasiassa ilmavirrasta. Taulukossa 5 on esitetty erilaisten kanavien ja komponenttien painehäviöt kun ilmavirta on 200 l/s. Taulukon osien painehäviöt on saatu mallintamalla mittauksissa mukana olleen tuloilmakoneen kanavisto ja päätelaitteet Magic-Cadillä joten ne vastaavat todellista tilannetta.

Taulukko 5. IV-järjestelmän komponenttien painehäviöitä ilmavirralla 200 l/s

Kanavat	Koko	$\Delta P$ , Pa
Kanava, pyöreä	315	0,28 / m
Kanava, pyöreä	250	0,42 / m
Kanava, pyöreä	160	0,38 / m
Kanava, pyöreä	125	0,64 / m

Komponentti	Koko	$\Delta P$ , Pa
Käyrä 90	315	2
Käyrä 45	315	1
Palopelti	315	2
Supistusosa	315/200	2
HEPA-suodatinyksikkö	200	105
T-haara	315/160	4
Käyrä 45	250	1
Säätöpelti	250	20
Äänenvaimennin	250	1
Päätelaite	200 (L)	145
Päätelaite	250 (L)	150
Käyrä 90	160	1
T-haara	160/125	3
Päätelaite	125 (L)	170
Äänenvaimennin	125	1
Äänenvaimennin	125	1
T-haara	125/125	3
Käyrä 45	125	1

Taulukosta voidaan nähdä, että kanavien ja kanavaosien, kuten käyrien ja haarojen aiheuttamat painehäviöt ovat suhteellisen pieniä kun taas päätelaitteiden ja tässä ta-



pauksessa HEPA -suodattimen aiheuttamat painehäviöt ovat merkittäviä. Puhaltimen toimintapisteen mitoituksessa puhallintoimittajat käyttävät suodattimien keskimääräistä painehäviötä joka voi olla suodattimesta riippuen 50...150 Pa. Kuvassa 12 on esimerkki Fläkt Woodsin koneajon yhteenvedosta jossa näkyy koneeseen valittujen suodattimien mitoittavat painehäviöt sekä koneen muut painehäviöt.



#### ILMANKÄSITTELYKONE EU 2000

Projekti	5802 (JLG361) (31.5.07)	2.0.090515.2
AOC	ACON-00040774	
Kone	125 (A) / TKPK146	2009/05/26
Konekoko	20	Sivu 3
Asiakas		
Asiakkaan viite		
Oma viite		
Tuloilmavirta	0,40 m³/s Poistoilmavirta	0,40 m³/s
Ulkoinen painehäviö	400 Pa Ulkoinen painehäviö	450 Pa
Jännite	3 x 400, 50 Hz Paino	1226 kg
SFP <sub>v</sub>	2,27 kW/m³/s	
Ilman tiheys	1,19 kg/m³ Korkeus merenpinnan yläp., m	0 m

#### YHTEENVETO

Toiminto-osat ilmavirran suunnassa	v0 (m/s)	Et (%)	tw (°C)	ts (°C)	dP (Pa)
<b>Tuloilma:</b>					
Peltiosa/liitäntäosa	1,6				1
Suodatin	1,1				79
Lämmönsiirrin	1,0		-26,0 / 21,4	26,0 / 16,4	72
Rakenneseosa					0
Kammio puhallin		65,3	21,4 / 22,7	16,4 / 17,6	760
Äänenvaimennin	0,8				4
Suodatin	1,1				80
Suodatin	1,1				115
Peltiosa/liitäntäosa	1,6				1
<b>Poistoilma:</b>					
Peltiosa/liitäntäosa	1,6				1
Äänenvaimennin	0,9				4
Suodatin	1,1				72
Lämmönsiirrin	1,1		25,0 / -0,8		58
Rakenneseosa					0
Kammio puhallin		68,5			593

Kuva 12. Esimerkkilaskelma Fläkt Woodsin koneajosta jossa esitetty koneeseen valittujen suodattimien mitoittavat painehäviöt. (FläktWoods, 2009)

#### 4.4 Suodattimen energiankulutus

Suodattimen energiankulutus voidaan laskea kaavasta (4.3.1) vakioilmavirran ja keskimääräisen painehäviön avulla.

$$E = ( q_v p_{avg} t / \eta ) / 1000 \quad (4.3.1)$$

E = energiankulutus, kWh

$q_v$  = ilmavirta, m<sup>3</sup>/s

t = käyttöaika, h

$\eta$  = puhaltimen kokonaishyötysuhde.

Vuoden aikana (8760 käyttötuntia) suodatin, jonka keskimääräinen painehäviö on 100 Pa ilmavirralla 1 m<sup>3</sup>/s kuluttaa 1 750 kWh energiaa, kun puhaltimen hyötysuhde on 0,5 (50 %). Monet puhaltimet nykyisissä järjestelmissä eivät kuitenkaan saavuta 50 % hyötysuhdetta. Energiakustannus on yleensä aina suurempi kuin suodatinkustannus ja painehäviön alentaminen tulee yhä tärkeämmäksi energiankulutuksen vähentämisessä. Loppupainehäviö on tärkeä parametri ilmastointijärjestelmän oikeassa mitoituksessa. Optimaalisin ja samalla taloudellisin loppupainehäviö on olemassa jokaiselle käyttötapaukselle, jolloin myös suodatinkustannukset ovat mahdollisimman pienet. Optimaalinen painehäviö on yleensä alueella 100...200 Pa. Taloudellinen loppupainehäviö on käytännössä paljon pienempi kuin mitä nykyisissä suodattimien testausstandardeissa sekä todellisissa käyttötilanteissa on nykyisin käytössä. (Sandberg, Ilmastointilaitoksen mitoitus, 2016, s. 239)

## 5 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMÄN ENERGIANKULUTUS

Ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen vaikuttaa moni asia. Järjestelmän kokonaisilmavirta, kanaviston ja päätelaitteiden painehäviö, puhallinyksikön painehäviö, lämmönsiirtimien ja ilmansuodattimien aiheuttama painehäviö yms. Uudet ympäristöministeriön asetukset, jotka astuivat voimaan vuoden 2018 alussa, antavat oh-

jeet rakennusten suunnitteluun ja rakentamiseen. Asetus 1010/2017 korvasi vanhan määräyksen D3 ja se koskee uuden rakennuksen energiatehokkuutta. Ympäristöministeriö on julkaissut asetuksen avuksi ohjeen Energiatehokkuus, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Asetus 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta korvasi vanhan määräyksen D2. Talotekniikkateollisuus ry. on julkaissut ympäristöministeriön toimeksiannosta opasmateriaalia sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa koskevan asetuksen tueksi. Käytössä on myös Sisäilmaluokitus 2008 jossa on ohjeita ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluun. Sisäilmaluokituksesta julkaistaan uusi versio toukokuussa 2018.

## 5.1 Puhaltimen SFP- luku

Ilmanvaihtokojeen puhaltimille voidaan määritellä SFP -luku (Specific Fan Power) joka kertoo puhaltimen kuluttaman sähkön ottoenergian määrän suhteessa puhaltimen mitoitusjäteilmavirtaan tai mitoitusulkoilmavirtaan (valitaan suurempi).

Sähkön ottoteho määritellään (Sandberg, 2016, s. 180)

- puhtailla suodattimilla
- kuivilla lämmönsiirtimillä
- mitoittavalla ilmavirralla

Ympäristöministeriön asetus 1010/2017 määrää että ilmanvaihtojärjestelmän SFP-luku saa olla korkeintaan 1,8 kW/m<sup>3</sup>/s. (Ympäristöministeriö, Asetus 1010/2017, 2017, s. 15).

Puhaltimen sähkötehontarpeen laskemiseksi on kaava 5.5.1 ja puhaltimen SFP- luku lasketaan kaavalla 5.5.2

$$P_E = q_v \Delta p / \eta_{FAN} \quad (5.5.1)$$

$$SFP_{FAN} = P_E / q_v = q_v \Delta p / \eta_{FAN} q_v = \Delta p / \eta_{FAN} \quad (5.5.2)$$

$P_E$  = puhaltimen tehontarve [kW]

$q_v$  = puhaltimen ilmavirta [m<sup>3</sup>/s]

$\Delta p$  = puhaltimen kokonaispaineen korotus [kPa]

$\eta_{\text{FAN}}$  = puhaltimen hyötysuhde moottoreineen ja taajuusmuuttajineen [-]

(Sandberg, Ilmastointilaitoksen mitoitus, 2016, s. 106)

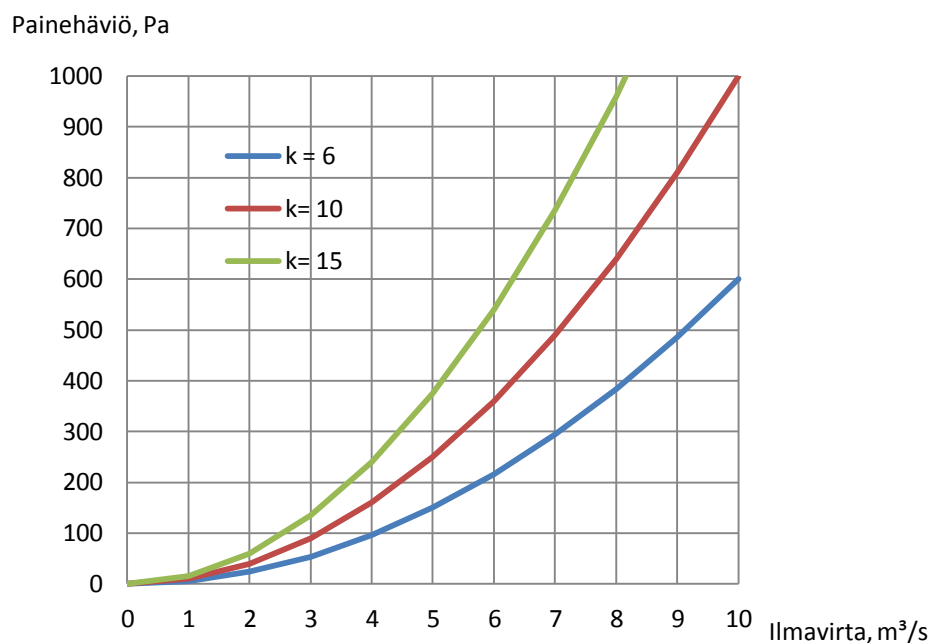
## 5.2 Puhallin- ja laitoskäyrä

Erilaisilla puhaltimilla on erilaiset tuottokäyrät, joilla tarkoitetaan puhaltimen paineen tuottoa ilmavirran funktiona. Puhaltimen tuottokäyrästä käytetään myös nimitystä puhallinkäyrä tai puhaltimen ominaiskäyrä. (Sandberg, 2016, s. 153)

Ilmanvaihtojärjestelmän kanaviston ilmavirtoja tarkastellessa, voidaan käyttää yksinkertaistusta jossa kitkapainehäviö merkitään ilman virtausnopeuden neliöön verrannolliseksi. Tällöin kanaviston painehäviö voidaan merkitä verrannolliseksi myös ilmavirran neliöön kaavan 5.6.1 mukaisesti.

$$\Delta p_{\text{laitos}} = k q_v^2 \quad (5.6.1)$$

Tätä paraabelin muotoista käyrää kutsutaan laitoskäyräksi. Puhallinta mitoittaessa se on koko järjestelmän laitoskäyrä (kuva 13).

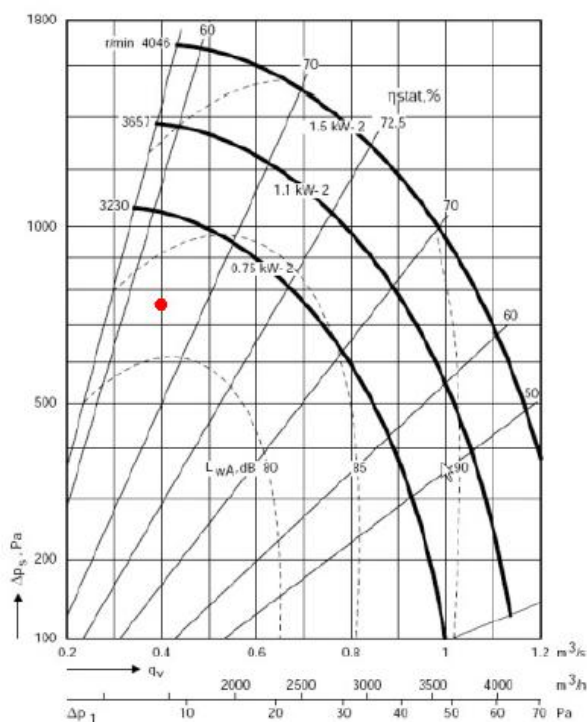


Kuva 13. Origion kautta kulkeva laitoskäyrä eri k-kertoimilla [ $\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^2$ ]. (Sandberg, 2016, s. 105)

Puhallinkäyrän jyrkkyys toimintapisteessä vaikuttaa ilmavirran muuttumiseen käytön aikana. Mitä jyrkempi painekäyrä on toimintapisteen kohdalla sitä pienempi vaikutus tilavuusvirtaan on isollakin kanaviston vastuksen muuttumisella. Tällainen puhallinkäyrä on hyvä kohteissa joissa esim. suodattimen likaantuminen vähitellen ei saisi vaikuttaa huomattavan paljon ilmavirtaan vaan sen pitäisi pysyä vakiona. Jos puhaltimen painekäyrä on loiva aiheuttaa suurikin tilavuusvirran muutos vain pienen paineen muutoksen. Tällainen tapaus voisi olla esim. silloin kun halutaan pitää kammi-on paine mahdollisimman vakaana tilavuusvirran vaihteluista huolimatta.

Puhallin toimii aina pisteessä, jossa puhallinkäyrä ja kanaviston laitoskäyrä leikkaavat toisensa. Puhallinta valittaessa tavoitteena on saada toimintapiste osumaan mahdollisimman lähelle puhaltimen parasta hyötysuhdetta. Parhaan hyötysuhteen alueella myös puhaltimen melutaso on yleensä alhaisin. (Sandberg, Ilmastointilaitoksen mitoitus, 2016, s. 158)

Kuvassa 14 on esitetty esimerkkinä TK146:n puhallinkäyrä puhallinvalmistajan mitoitusohjelmasta. Puhaltimen toimintapisteessä ilmavirta on 400 l/s ja paineenkorotus 760 Pa.



Kuva 14. Puhallinkäyrä TK146:n koneajosta puhaltimen toimintapisteessä 400 l/s ja 760 Pa. (FläktWoods, 2009)

Kuvassa 15 on esitetty puhallinvalmistajan puhaltimen ja taajuusmuuttajan koneajo samasta TK146:sta. Koneajossa näkyy tuloilmapuhaltimen ja moottorin sekä taajuusmuuttajan mitoitus tiedot sekä laskettu puhaltimen SFP -luku.

### Kammiopuhallin

**EULK-20-2-3-1-2-2-1-2-3**

Konekoko:	20	
Puhallinkoko:	koko 2	
Rakenne:	Centriflow Plus	
Varustelu:	vakio + ilmavirran mittausanturi	
Materiaali:	ruostumaton teräs (puhallinpyörä ja jalusta epoksimaalattu)	
Ulospuhallussuunta:	eteenpäin, toiseen koneosaan	
Tärinänvaimentimet:	kumi	
huoltopuoli:	vasen	
Pyörimisnopeus		2787 rpm
Puhallinpyörän hyötysuhde		66,6 %
Puhaltimen hyötysuhde		65,3 %
Puhallinkäytön kokonaishyötysuhde		48,8 %
Paineenkorotus		760 Pa
Puhaltimen akseliteho		0,46 kW
Sähkön ottoteho		0,61 kW
Lämpötilan nousu puhaltimessa		1,3 °C

### SFP-laskenta

SFP	1,21	kW/m³/s
Sähkön ottoteho SFP-laskennan mukaan	0,48	kW
Paineenkorotus	611	Pa
Pyörimisnopeus	2554	rpm

### Moottori (integraali)

**APAT-2-00075-1-X**

Jännite:	220-240 VD /380-420 VY, 220 VD/380 VY	
Merkki/malli:	DANFOSS FCM300 X-0, mutta 1B EMC-filteri	
Hyötysuhde	79,5	%
Pyörimisnopeus	2790	rpm
Moottorin nimellisteho	0,75	kW
Nimellisvirta	1,6	A
Napaluku	2	
Tehoreservi vähintään	30	%

### Taajuusmuuttaja

Teho:		
Jännite:		
Tulojännite:	3-vaihe	
Rakenne:	integroituu	
Koteloitiluokka:	IP54	
Käyttötaajuus, suuri nopeus:	50	
Rakenne:		
Hyötysuhde	93,9	%
Toimintapiste taajuus	50,0	Hz
Maksimi taajuus	58,4	Hz
Maksimi pyörimisnopeus	3230	rpm

Kuva 15. TK146:n puhaltimen ja taajuusmuuttajan koneajo. (FläktWoods, 2009)

Puhallinkäyrästä nähdään että puhaltimen toimintapiste on selkeästi pienitehoisimman puhallinmoottorin alapuolella. Puhaltimen valintaan liittyy aina epävarmuus-

tekijöitä. Suunnittelussa painehäviölaskelmissa voi olla epätarkkuuksia tai asennusvaiheessa tulleet muutokset aiheuttavat muutoksia painehäviölaskelmissa. Painehäviöiden ollessa todellisuudessa suuremmat kuin lasketut, puhaltimen toimintapiste leikkaa laitos- ja puhallinkäyrän eri kohdasta jolloin puhaltimen paineenkorotus on suurempi kuin laskettu. Kun uusi toimintapiste sijoitetaan puhaltimen käyrästöön pitää tarkistaa riittääkö valitun puhaltimen moottorin ja taajuusmuuttajan teho uudella toimintapisteellä. Vastaavasti jos painehäviöt ovatkin pienemmät kuin lasketut, uusi toimintapiste sijoittuu puhallinkäyrällä alueelle jossa ilmavirta on suurempi mutta paineenkorotus pienempi. Tällöin pitää puhaltimen kierrosluku säätää uudelleen mutta samalla puhaltimen hyötysuhde laskee.

Suodattimien painehäviöillä on merkittävä vaikutus ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen. Suodattimien painehäviö on yksi parametri jota käytetään laskettaessa ilmanvaihtokertoimia, elinkaarikustannuksia tai ympäristövaikutuksia.

Jotta tulevaisuudessa on mahdollista noudattaa energiatehokkuusdirektiivien ja ilmastointikoneiden matalampia SFP- lukuja, suodattimien painehäviöitä on saatava alennettua optimoimalla niiden muotoilua, hakemalla parempia materiaaleja sekä tarkasteltava käytäntöjä vaihtovälien suhteen.

## 6 MITTAUSJÄRJESTELYT

Kenttämittaukset tehtiin IV-konehuoneessa, josta valittiin 7 kpl samanlaisia tulo-/poistokonepareja. Koneet palvelevat alemmassa kerroksessa sijaitsevia eristyshuoneita. Mittausta varten tilattiin 7 eri suodatintoimittajalta F7 -luokan pussisuodatin ja F9 -luokan laajapintasuo-datin. Suodattimet asennettiin tuloilmakoneisiin. Suodattimet olivat materiaaaliltaan synteettisiä. Suodattimien koko oli 592 mm \* 592 mm ja pussisuodattimien taskujen lukumäärä oli 10.

Ennen kenttämittausten aloitusta, laajapintasuo-dattimille tehtiin laboratoriossa aerosolitestit jossa mitattiin suodattimien alkupainehäviöt ja erotusasteet. Lisäksi suodattimet punnittiin kehikkoineen ennen mittauksia ja mittausten loputtua.

Koneista mitattiin seuraavat arvot:

- Hiukkaspitoisuus raitisilmasta
- Hiukkaspitoisuus pussisuodattimen jälkeen
- Hiukkaspitoisuus laajapintasuodattimen jälkeen

⇒ mitatut hiukkaskoot 0,3  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$  ja 1,0  $\mu\text{m}$

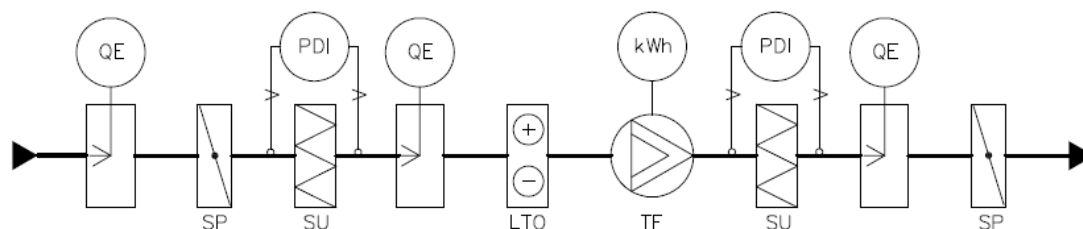
- Paine-ero pussisuodattimen yli
- Paine-ero laajapintasuodattimen yli
- Tuloilmakoneen sähköverkosta ottama sähköenergia

Lisäksi jokaisella mittaukerralla mitattiin ulkoilman lämpötila ja kosteus.

Koska kyseessä oli eristys huoneet, jokaisen koneen pysäyttäminen suodattimien asentamista ja energiamittareiden kytkemistä varten riippui huoneiden potilastilanteesta. Mittaukset aloitettiin 22.2.2017 jolloin asennettiin ensimmäisten 4 koneiden suodattimet ja energiamittarit. Loppuihin 3 koneeseen saatiin suodattimet ja mittarit asennettua 24.3.2017. Viimeinen mittaus oli 19.1.2018. Mittauksia tehtiin kerran kuukaudessa. Mittauksissa käytettiin mittareina Swema-Air 3000 monikäyttölaitetta sekä Met One HHPC 3+ hiukkaslaskuria. Molemmat mittarit oli kalibroitu tammi-kuussa 2017

Tuloilmakoneiden ilmavirrat mitataan koneeseen asennetulla kiinteällä Fläkt Woodsin Centrimeter paine-erolähettimellä. Centrimeter mittaa luotettavasti paine-eron ilmavirta-antureilta, antaa ilmavirtaan ja paineeseen suhteutetun, lineaarisen jänniteviestin ja näyttää hetkellisen ilmavirran tai paine-eron numeronäytöllään.

Kuvassa 16 on esitetty eri mittauspisteiden sijainti tuloilmakoneessa.



QE = Hiukkaspitoisuuden mittaus

SP = Sulkupelti

PDI = Paine-eromittaus

kwh = Kilowattituntimittaus

SU = Suodatin

LTO = Lämmöntalteenottoyksikkö

TF = Tuloilmapuhallin

Kuva 16. Mittauspisteet tuloilmakoneessa



Huoneet olivat osittain eri kokoiset ja sitä kautta myös huoneisiin puhallettavat ilmavirrat olivat erilaiset. Taulukossa 6 on esitetty eristysuoneiden koot ( $\text{m}^2$ ) ja ilmavirrat ( $\text{l/s}$ ). Ilmavirrat luettiin koneiden omista ilmamäärälähettimistä mittausjakson alussa, puolivälissä sekä mittausjakson lopussa. Ilmavirroissa ei havaittu muutoksia mittausjakson aikana.

Taulukko 6. Eristysuoneiden koot ja ilmavirrat

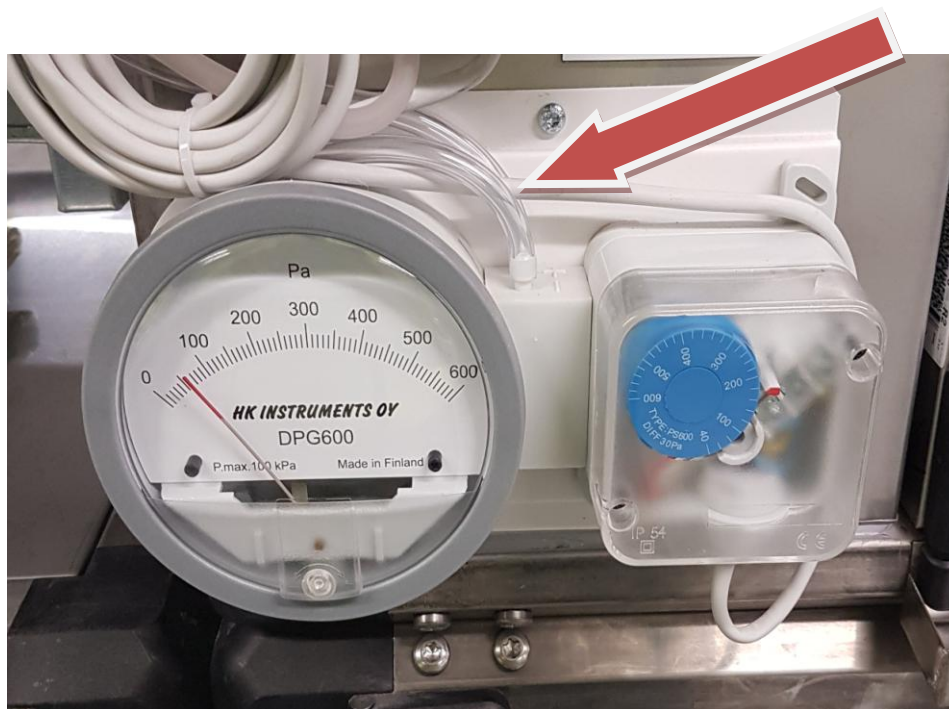
	TK146	TK148	TK149	TK151	TK152	TK153	TK154
Huoneen koko, $\text{m}^2$	16,3	17,8	17,8	16,6	16,6	16,6	16,6
$Q_v$ , $\text{l/s}$	220	290	290	270	270	270	270

Koneisiin asennettiin sondit hiukkaspitoisuusmittausta varten (kuvat 17 ja 18).



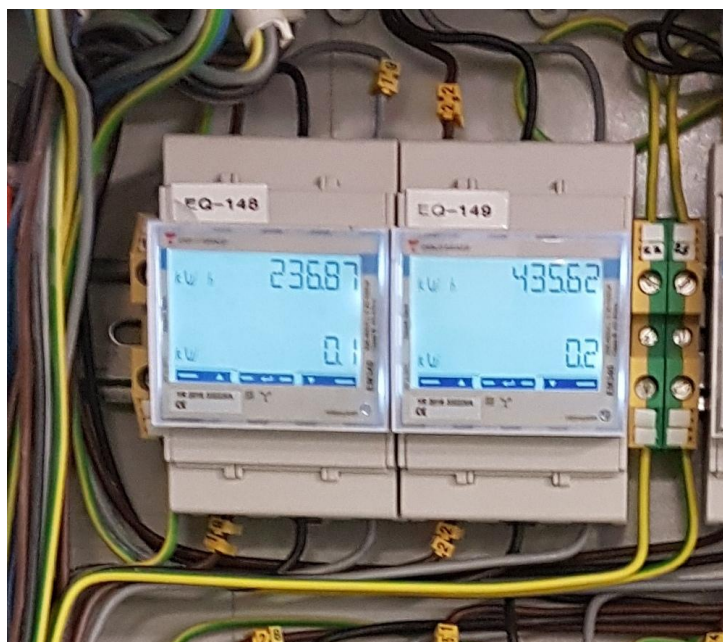
Kuvat 17 ja 18. Hiukkasmittauksissa käytetty sondi koneen sisällä ja raitisilmakanavassa

Paine-erot suodattimien yli mitattiin koneiden paine-eromittareiden letkuista (kuva 19 punainen nuoli). Koneikkojen omat osoittavat paine-eromittarit ovat mitta-alueeltaan sopimattomat tähän mittaukseen.



Kuva 19. Suodattimen paine-eromittaukseen käytettävät letkut

Koneiden puhaltimien energiankulutuksen mittausta varten tuloilmakoneiden sähkösyöttöön asennettiin sähköenergiankulutusmittarit (kuva 20). Mittareista voi lukea suoraan koneen käyttämän sähköenergian, kWh sekä myös käytettävän sähkötehon, kW.



Kuva 20. Tuloilmakoneiden sähkösyöttöön kytketyt energiamittarit

## 7 MITTAUSDATAN ANALYSOINTI

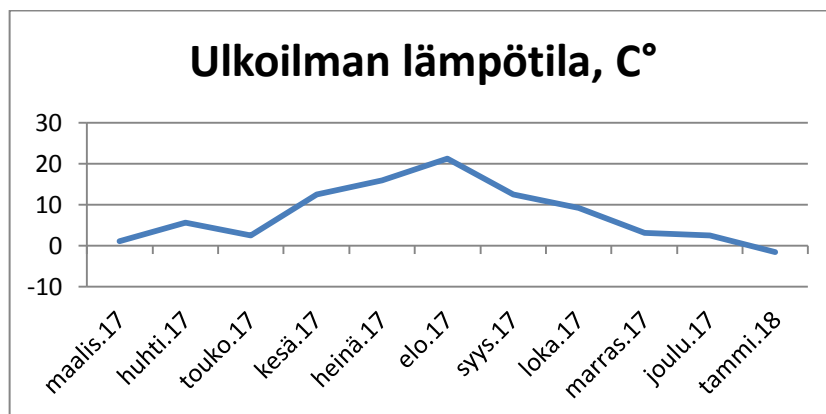
### 7.1 Ulkoilma

Ulkoilmasta mitattiin jokaisella mittauskerralla lämpötila ja suhteellinen kosteus. Mittaukset olivat kertamittauksia eivätkä pitkän ajan keskiarvoja. Mittaukset suoritettiin sairaalan katolta, IV-konehuoneen raitisilman sisäänottoaukkojen edestä. Paikka valittiin sen perusteella että kaikki mittauksessa mukana olleet IV- koneet ottivat raittiin ilman samasta paikasta mistä ulkoilman mittaukset tehtiin.

#### 7.1.1 Lämpötila

Koska mittausjakso kesti vuoden, ulkolämpötiloihin saatiin sopivasti vaihtelua. Lämpötilat pysyivät nollan paikkeilla joten kovia pakkaslukemia ei saatu jolloin ulkoilman kosteus olisi ollut alhainen mutta joka tapauksessa lämpötiloissa oli selviä eroja. Ulkoilman lämpötiloilla ei ollut suoraan vaikutusta ilmansuodattimien toimintaan mutta ne mitattiin samanaikaisesti ulkoilman kosteuden kanssa. Ulkoilman lämpötilalla ja hiukkaspitoisuudella ei myöskään ollut mittauksen mukaan mitään merkittävää yhteyttä.

Kuvassa 21 on esitetty ulkoilman lämpötilat mittauskerroilla.

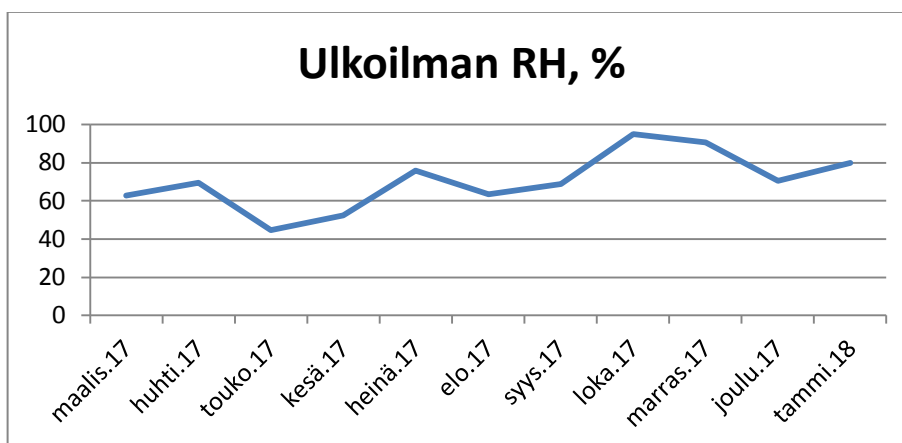


Kuva 21. Ulkoilman lämpötilat mittauksen aikana

### 7.1.2 Suhteellinen kosteus

Jokaisella mittauskerralla mitattiin myös ulkoilman suhteellinen kosteus. Tarkoituksena oli seurata ulkoilman hiukkaspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden yhteyttä. Mittausten perusteella ulkoilman hiukkaspitoisuudella ei ollut mainittavaa yhteyttä ulkoilman suhteelliseen kosteuteen.

Kuvassa 22 on esitetty ulkoilman suhteelliset kosteudet mittauskerroilla.



Kuva 22. Ulkoilman suhteelliset kosteudet mittauksen aikana

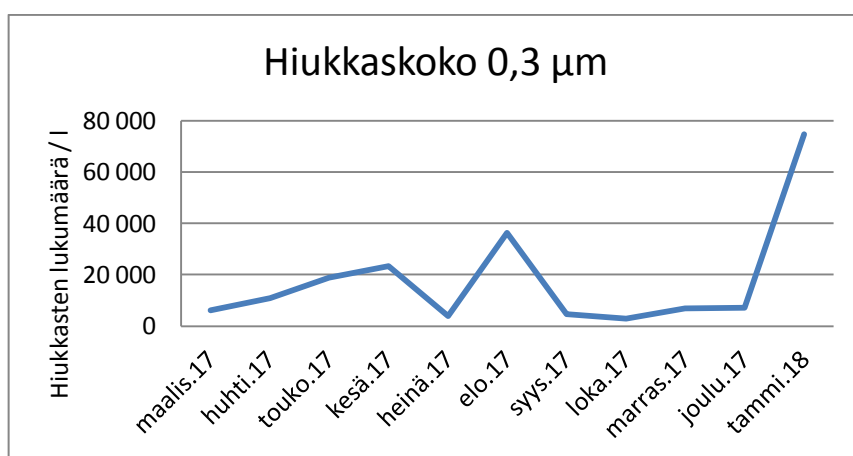
Mittausjakson alin kosteusprosentti mitattiin toukokuussa 2017 (44,5 %) ja korkein lokakuussa 2017 (94,9 %) ja näiden mittausten perusteella suodattimien erotusasteissa ei näy poikkeavaa eroa muihin mittauksiin nähden.

### 7.1.3 Ulkoilman hiukkasjakauma

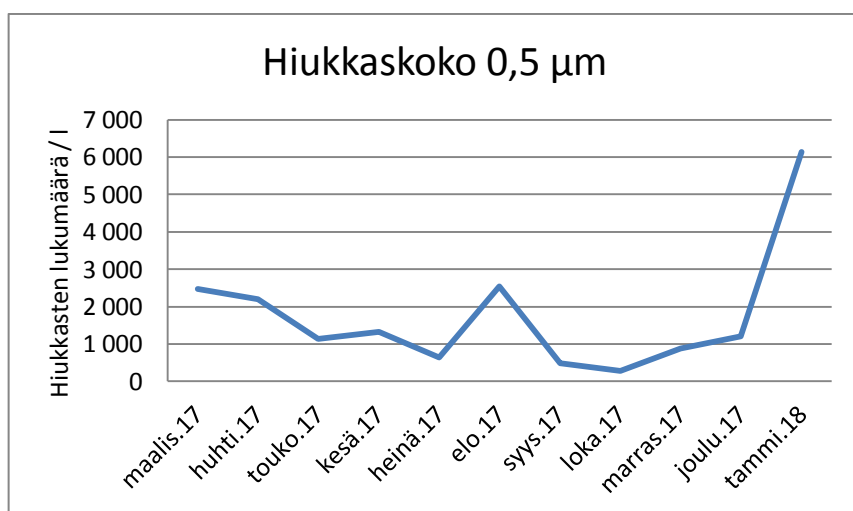
Jokaisella mittauskerralla mitattiin ulkoilman hiukkasmäärä raitisilmakanavaan sijoitetusta mittauspisteestä. Kaikkien mittauksessa mukana olleiden tuloilmakoneiden raitisilman sisäänotto oli ilmanvaihtokonehuoneen samalla seinällä. Ulkoilmasta mitattiin hiukkaspitoisuudet (hiukkasten lukumäärä ilmalitrassa) 0,3 µm:n, 0,5 µm:n ja 1,0 µm:n hiukkasista. Mittauksia tehtiin 3 kpl/mittauspiste ja mittausten kesto oli 1 minuutti / kerta.

Ulkoilman hiukkaspitoisuudet mitattiin siis jokaisen mittauksessa mukana olleen tuuloilmakoneen raitisilmakanavasta koneen läheisyydestä. Mittaustuloksia tuli siten  $3 \times 7 = 21$  kpl / hiukkaskoko. Koska mittauspisteitä oli useita ja ne sijaitsivat eri paikoissa, jokaisesta mittauspisteestä saatiin erilainen tulos. Mittauspisteen tuloksista laskettiin keskiarvo jota käytettiin vertailuarvoina. Jokaisen hiukkaskoon keskiarvon tuloksista tehtiin viivadiagrammi josta voidaan nähdä eri hiukkaskokojen lukumäärät ilmalitrassa mittausjaksolla.

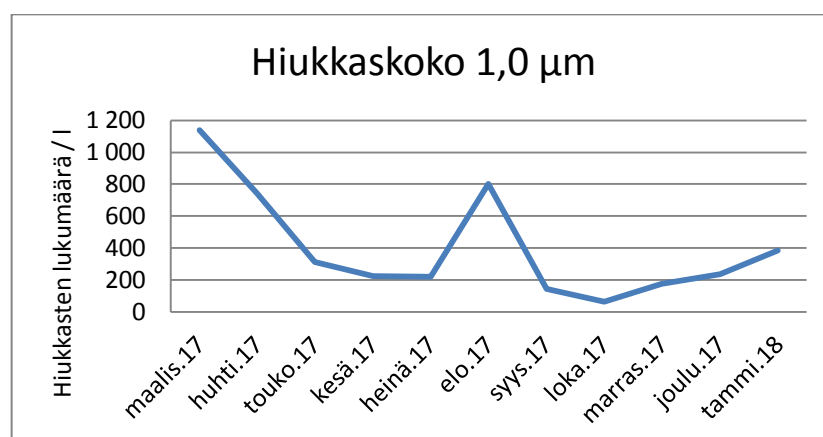
Kuvassa 23, 24 ja 25 on esitetty ulkoilman hiukkasjakaumat mittauskerroilla



Kuva 23. 0,3 µm:n partikkelien määrä ulkoilmassa

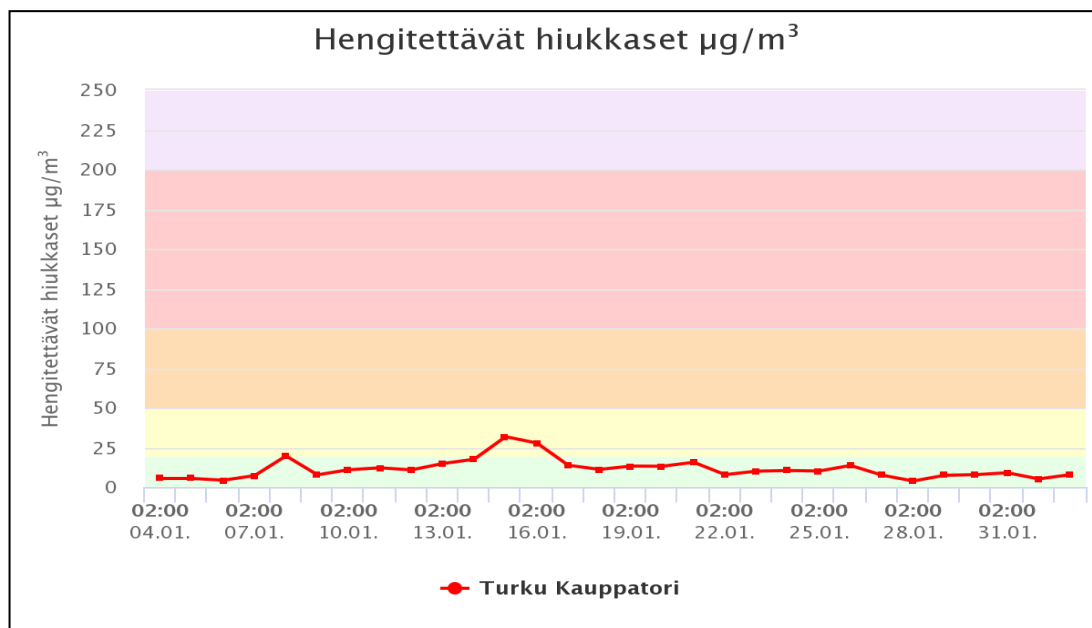


Kuva 24. 0,5 µm:n partikkelien määrä ulkoilmassa



Kuva 25. 1,0 µm:n partikkelien määrä ulkoilmassa

Mikrohiukkasten eli 0,3 µm:n ja 0,5 µm:n hiukkasilla jakauma vaihtelee aika selvästi n. 5 000 ja 23 000 yksikön välillä. Elokuussa 2017 oli pieni piikki jolloin pitoisuus nousi 35 000:een jonka jälkeen pitoisuus taas laski lähelle alkutilannetta. Tammikuussa 2018 oli iso piikki jolloin pitoisuus nousi 75 000:een. Ilmatieteenlaitoksen mittausdatan mukaan hengitettävien hiukkasten määrä Turun kauppatorin mittauspisteellä tammikuussa 2018 oli suhteellisen tasainen, ainoastaan kuun puolivälissä näkyy pieni nousu hiukkasten määrässä (kuva 26). Mittauksissa näkyvä piikki saattaa johtua sairaalan ympärillä olevasta rakennustyömaista ja niillä olevista työkoneista. 1,0 µm:n hiukkasten pitoisuuskäyrä poikkesi pienempien hiukkasten pitoisuudesta. Mittausten alussa pitoisuudet olivat korkeimmillaan jonka jälkeen ne lähtivät selkeään laskuun. Elokuussa pitoisuudessa oli piikki, kuten myös pienemmissä hiukkasisissa, mutta tammikuussa pitoisuudet eivät tehneet samanlaista piikkiä kuin pienemmissä hiukkasissa.



Kuva 26. Hengitettävien hiukkasten määrä tammikuussa 2018 Turun kauppatorin mittauspisteessä. (Ilmatieteenlaitos, 2018)

## 7.2 Laajapintasuodattimien läpäisy- ja erotusasteet

Suodattimien erotus- ja läpäisyaste mitattiin sekä pussisuodattimista että laajapintasuodattimista mutta tuloksissa keskitytään vain laajapintasuodattimiin koska niistä tehtiin koemittaukset myös testilaboratoriossa. Laboratoriossa tehdyssä erotusastetestissä tuotettiin aerosoligeneraattorilla haluttu partikkelipitoisuus, joka ajettiin suodattimen läpi. Partikkelipitoisuus mitattiin suodattimen molemmilta puolilta aerosolifotometrillä, jolloin saatiin laskettua suodattimen erotusaste. Testiaerosolina käytettiin Durasyn 164 testiöljyä, jonka hiukkaspitoisuudet ja -koot on esitetty liitteessä 1. Testiöljyn hiukkaskoko vaihteli välillä 0,24 µm – 1,0 µm. Nämä testit tehtiin suodattimille ennen kuin ne asennettiin koneisiin. Suodattimet myös punnittiin. Uudelleenpunnitus tehtiin vuoden päästä mittausten päätyttyä. Testit ja punnitukset suoritti sertifioitu testiyritys nimeltä ResiCal Oy. Liitteessä 2 on esitetty testausraportti hienosuodattimien laboratoriotestauksesta.

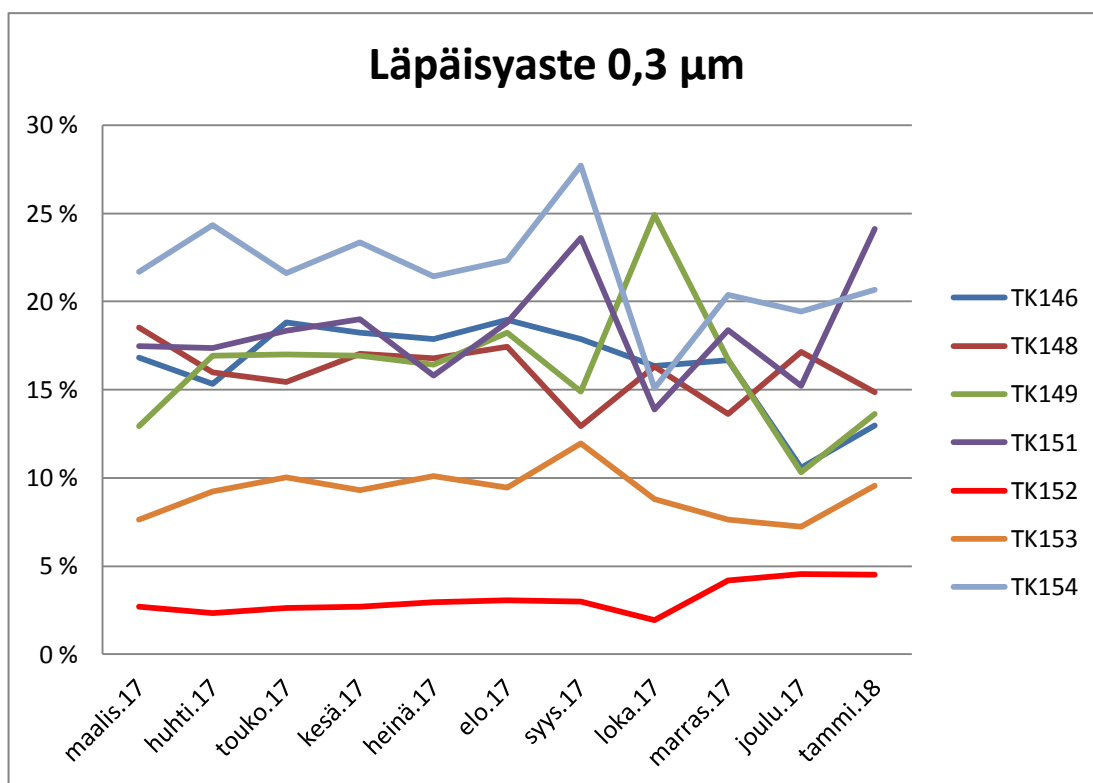
Hiukkasmittauksissa mitattiin 3 eri hiukkaskokoa. Hiukkaskoot olivat 0,3  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$  ja 1,0  $\mu\text{m}$ . Hiukkaspitoisuudet mitattiin hiukkasmittarilla koneiden sisälle asen-

netuista mittasondeista. Jokaisesta hiukkasmittauksen mittauspisteestä tehtiin 3 mitausta ja tuloksiin laskettiin näiden mittausten keskiarvo. Yhdellä mittauksella kertyi siis dataa  $3 \times 3 = 9$  kpl / suodatin. Yhden mittauksen kesto oli 1 minuutti / mittauspiste / mitattava hiukkaskoko. Mittaustuloksen suurena oli hiukkasten lukumäärä ilmalitrassa.

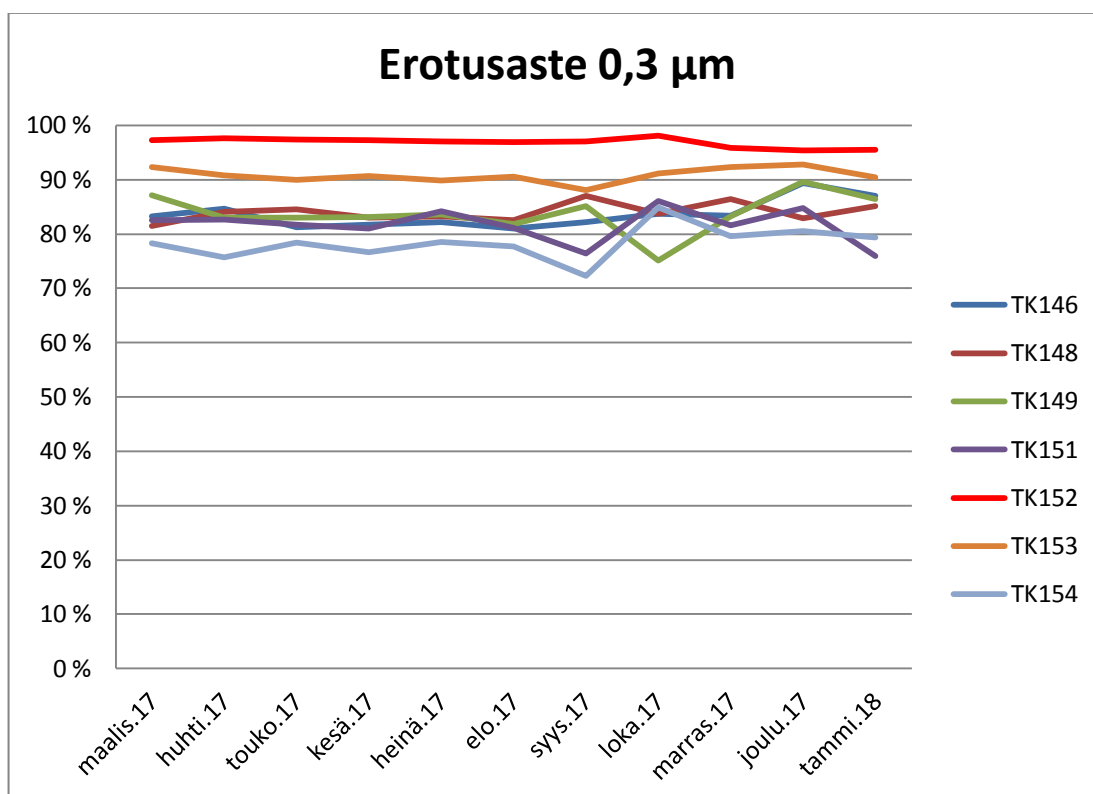
Mittausten perusteella laskettiin läpäisy- ja erotusasteet jokaisella mittauksella jokaiselle suodattimelle ja jokaiselle hiukkaskoolle. Tuloksista nähdään läpäisy- ja erotusasteiden muutokset mittausjaksolla. Vaikka kaikki laajapintasuodattimet olivat materiaaleiltaan synteettisiä, niin mittausjakson aikana läpäisy- ja erotusasteet vaihtelivat joillakin suodattimilla selvästi enemmän kuin toisilla. Lisäksi läpäisy- ja erotusasteissa oli prosentuaalisesti suuria eroja. Tämä kertoo suodatinmateriaalin ominaisuuksista ja sitä kautta eri suodatusmekanismien toiminnasta kyseisellä materiaalilla. Parhaimmat läpäisyasteet olivat alle 5 % ja korkeimmat erotusasteet 97-99 % jolloin voidaan todeta, että kyseinen suodatinmateriaali toimii erinomaisesti tämän mittausjärjestelyn olosuhteissa.

Läpäisy- ja erotusasteiden tulokset yhdistettiin viivadiagrammeihin hiukkaskokojen mukaan. Diagrammit on esitetty kuvissa 27 – 32. Mittauksissa käytettyjen suodattimien toimittajien nimien sijaan tulosten esittelyssä käytetään tuloilmakoneen positionumeroa. Jokaisen laajapintasuodattimen omat läpäisy- ja erotusasteet on esitetty liitteissä 3 – 9. Pussisuodattimien läpäisy- ja erotusasteiden keskiarvot on esitetty liitteissä 10 ja 11.

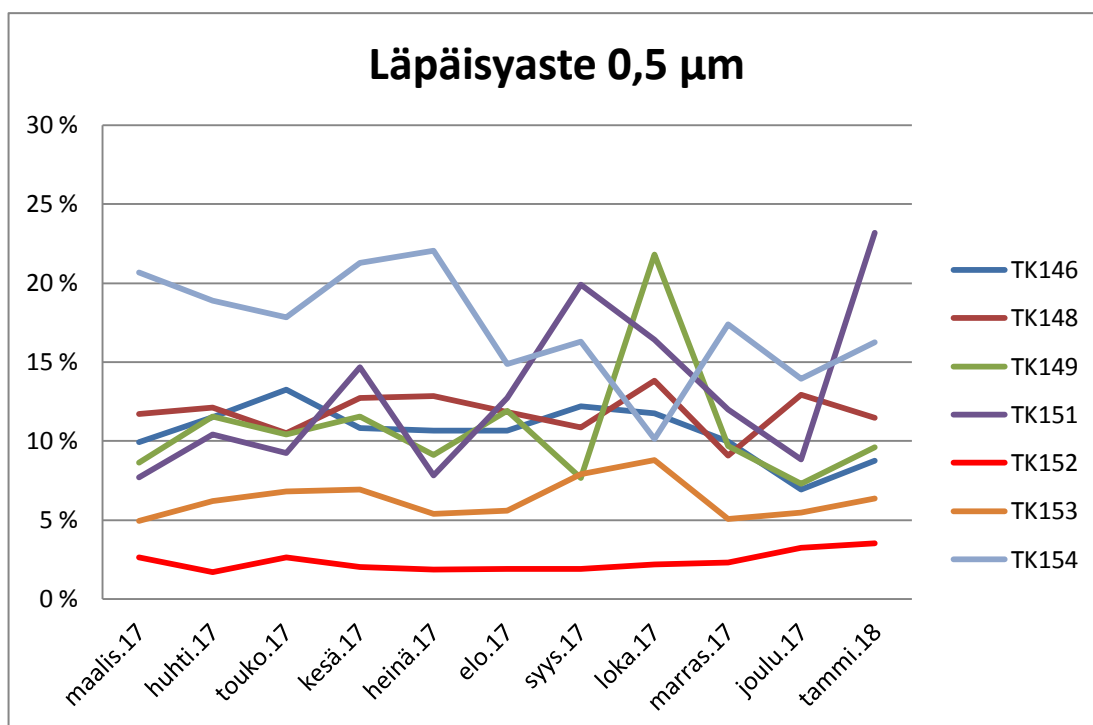




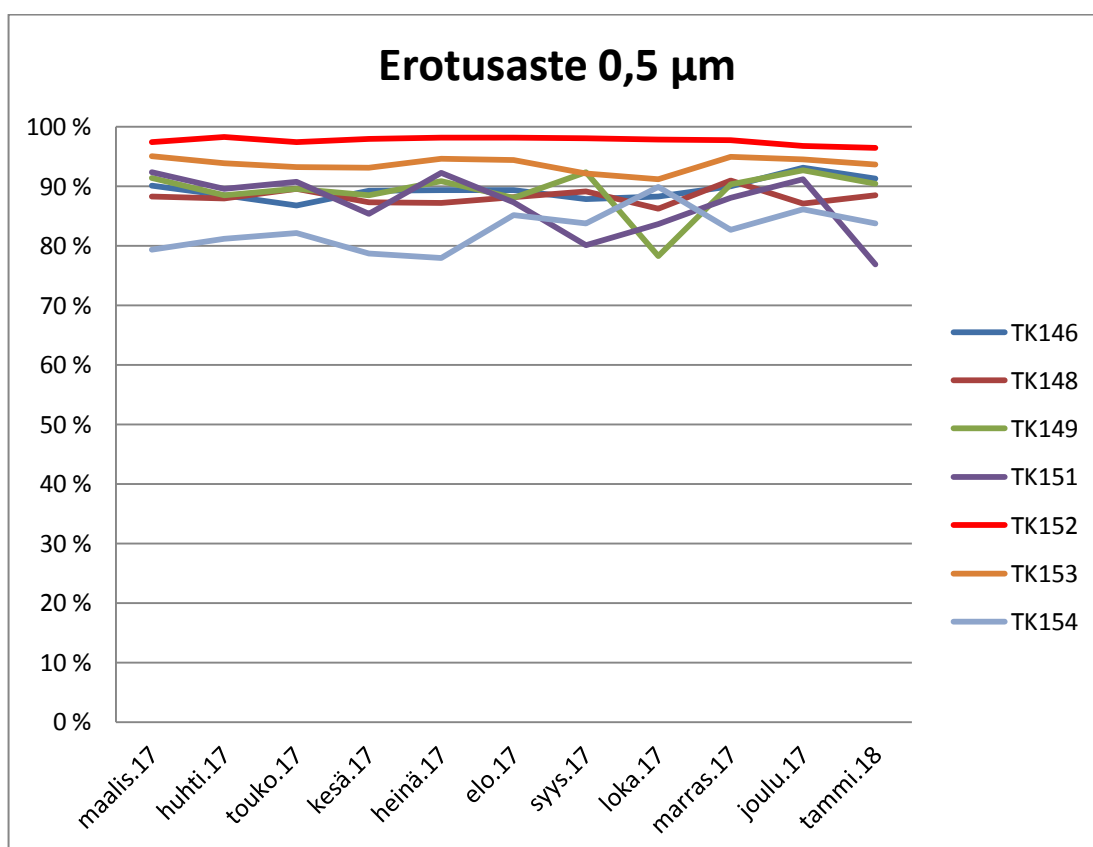
Kuva 27. Laajapintasuodattimien läpäisyasteet mittausjaksolla. Hiukkaskoko 0,3 µm.



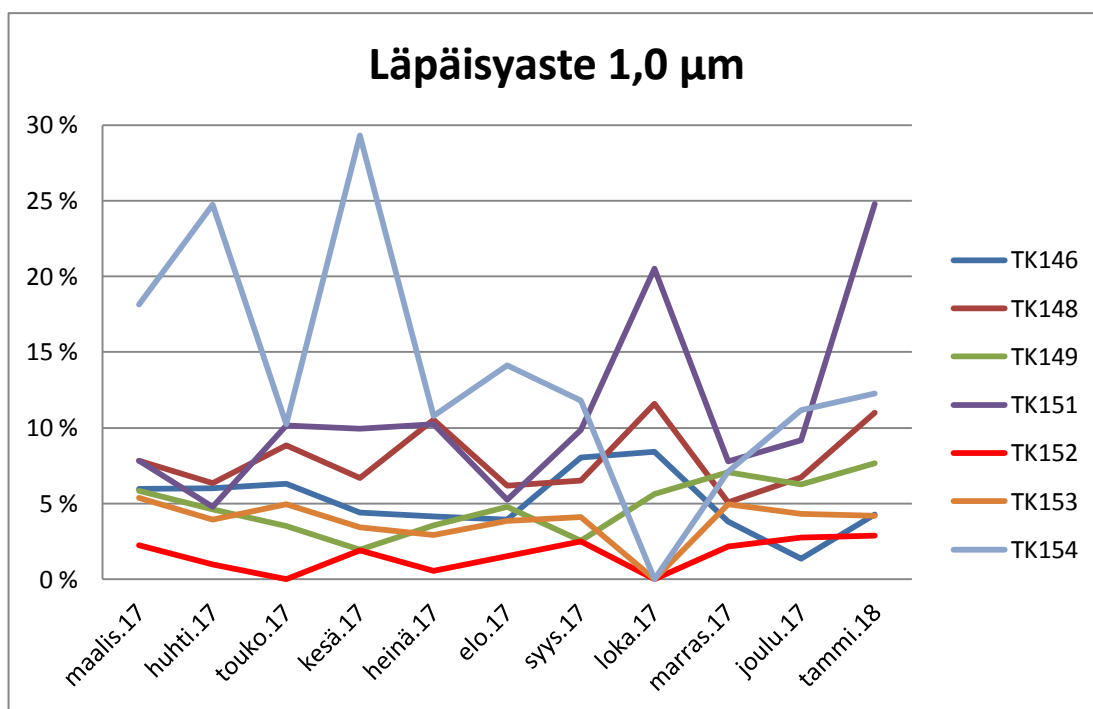
Kuva 28. Laajapintasuodattimien erotusasteet mittausjaksolla. Hiukkaskoko 0,3 µm.



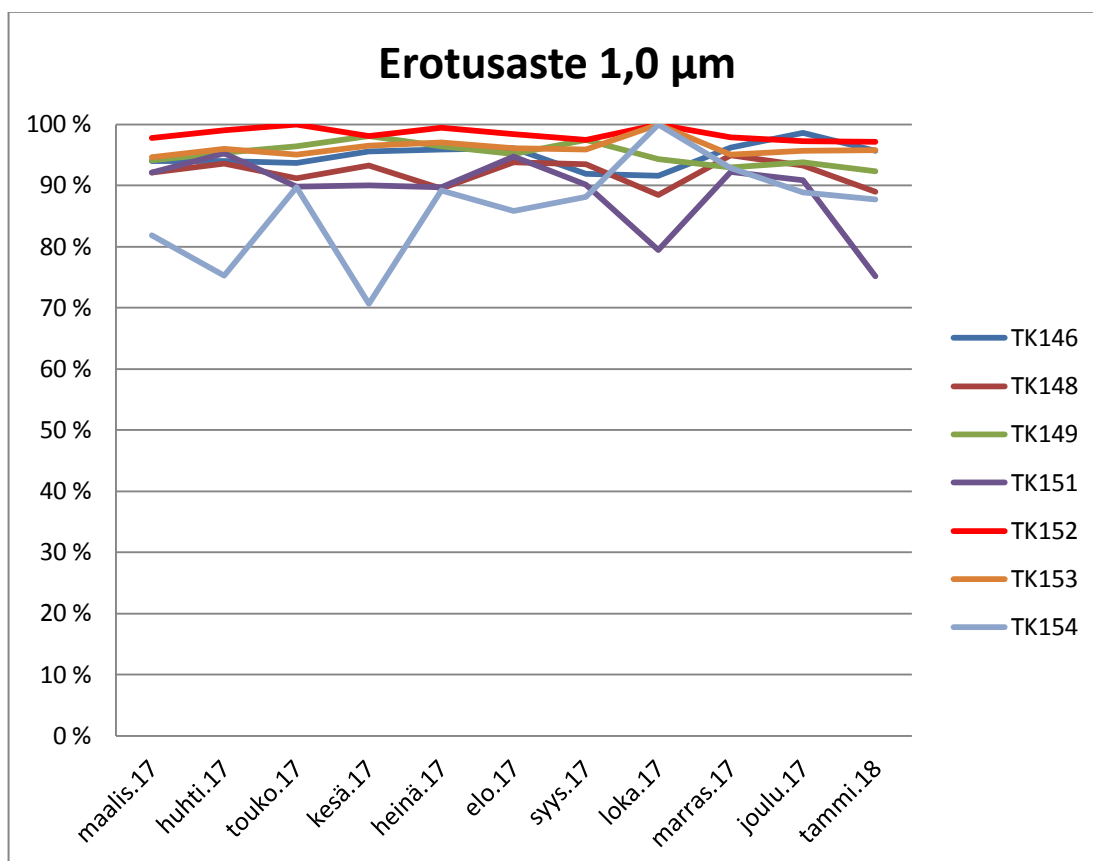
Kuva 29. Laajapintasuodattimien läpäisyasteet mittausjaksolla. Hiukkaskoko 0,5 µm.



Kuva 30. Laajapintasuodattimien erotusasteet mittausjaksolla. Hiukkaskoko 0,5 µm.



Kuva 31. Laajapintasuodattimien läpäisyasteet mittausjaksolla. Hiukkaskoko 1,0  $\mu\text{m}$ .

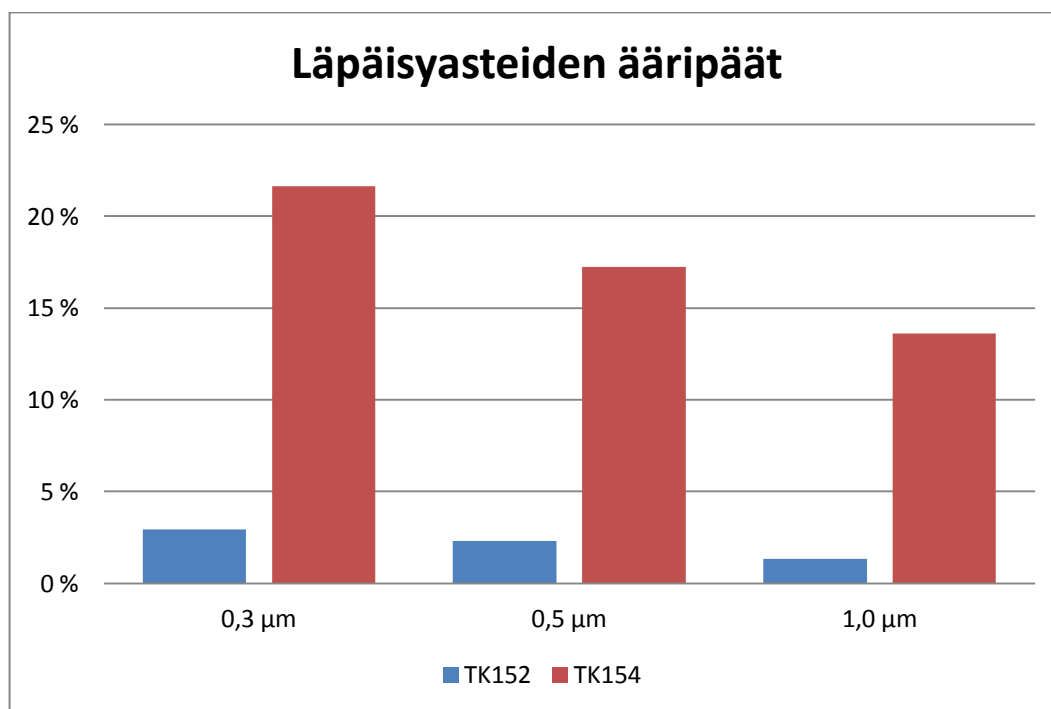


Kuva 32. Laajapintasuodattimien erotusasteet mittausjaksolla. Hiukkaskoko 1,0  $\mu\text{m}$ .

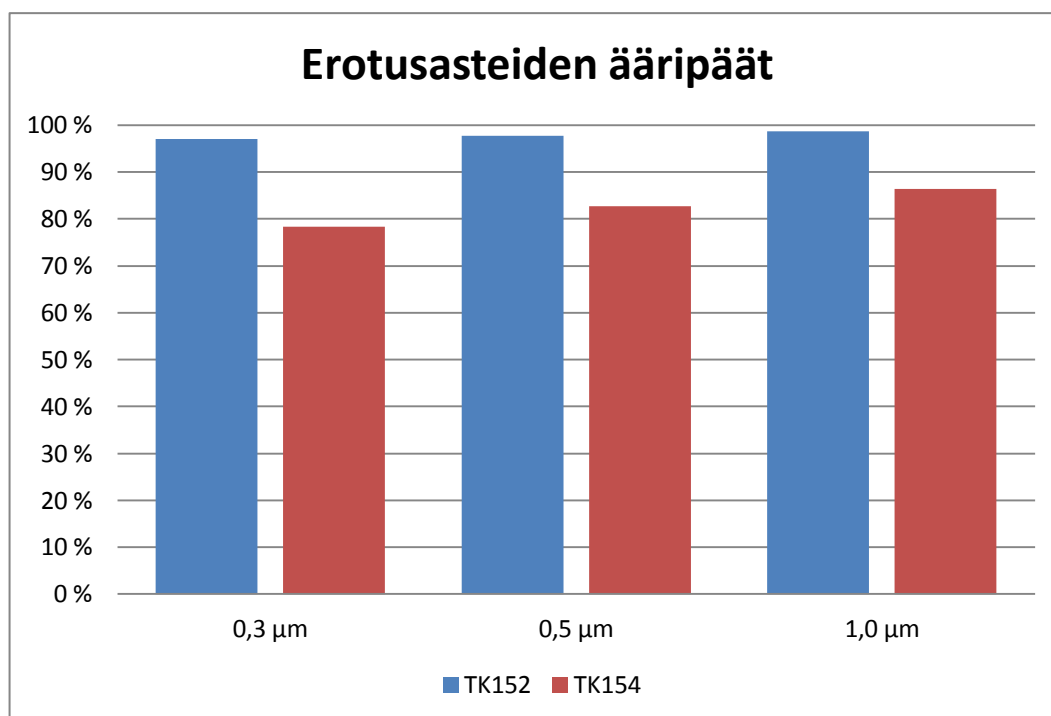
Pienillä hiukkasilla, 0,3  $\mu\text{m}$  ja 0,5  $\mu\text{m}$ , tulokset noudattivat suhteessa samanlaista trendiä. Vaihteluvälit eri suodattimilla olivat isoja riippuen ulkoilman hiukkaspitoisuudesta. Mittauksissa nousi selkeästi esiin 2 suodatinta jotka edustivat mittaustulosten ääripäitä. Tulosten keskiarvoista laskettuna ääripäiden erotusasteiden ero oli mittausten alkupäässä 0,3  $\mu\text{m}$ :n hiukkasilla n.28 % ja 0,5  $\mu\text{m}$ :n hiukkasilla n.15 %. Mittausjakson edetessä erot alkoivat pienenemään ja mittausjakson lopussa erot olivat enää 5 %:n luokkaa.

1,0  $\mu\text{m}$ :n hiukkasilla erot suodattimien välillä olivat alussa 6 – 8 % ja mittausten lopussa ero oli enää 1 – 2 %. Suodattimien erotusasteen vertailu vaikeutuu mitä suurempiin hiukkaskokoihin mennään koska erot ovat pieniä ja hiukkasten lukumäärät suodattimien jälkeen ovat marginaalisia.

Kuvissa 33 ja 34 on esitetty läpäisy- ja erotusasteiden erot kuvina ääripäiden osalta jotta voidaan paremmin havaita millaiset erot eri suodattimien välillä on.



Kuva 33. Erot läpäisyasteissa



Kuva 34. Erot erotusasteissa

Laboratoriossa mitattiin jokaisen laajapintasuodattimen läpäisy- ja erotusaste käyttäen testipölyä. Testipölyn hiukkaskoot ja -pitoisuudet (liite 1) poikkesivat kenttämittausten mitatuista hiukkaskoista joten niitä ei voi suoraan vertailla. Taulukkoon 7 ja 8 on koottu jokaisesta laajapintasuodattimesta ensimmäisestä kenttämittauksesta mitatut läpäisy- ja erotusasteet. Niiden lisäksi on esitetty laboratoriomittauksissa saadut läpäisy- ja erotusasteet jotta voidaan todeta miten kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset eroavat toisistaan.

Taulukko 7. Kenttämittausten ensimmäiset mitatut läpäisyasteet jokaiselle laajapintasuodattimelle ja hiukkaskoolle.

	Läpäisyaste		
	0,3 µm	0,5 µm	1,0 µm
TK146	17 %	10 %	6 %
TK148	19 %	12 %	8 %
TK149	16 %	12 %	5 %
TK151	20 %	12 %	6 %
TK152	2 %	3 %	0 %
TK153	9 %	5 %	1 %
TK154	22 %	21 %	18 %

ResiCal
Lab.mittaus
21 %
18 %
18 %
18 %
3 %
15 %
22 %

Taulukko 8. Kenttämittausten ensimmäiset mitatut erotusasteet jokaiselle laajapintasuodattimelle ja hiukkaskoolle.

	Erotusaste			ResiCal Lab.mittaus
	0,3 µm	0,5 µm	1,0 µm	
TK146	83 %	90 %	94 %	79 %
TK148	81 %	88 %	92 %	82 %
TK149	84 %	88 %	95 %	82 %
TK151	80 %	88 %	94 %	82 %
TK152	98 %	97 %	100 %	97 %
TK153	91 %	95 %	99 %	85 %
TK154	78 %	79 %	82 %	78 %

### 7.2.1 Suodattimien painot

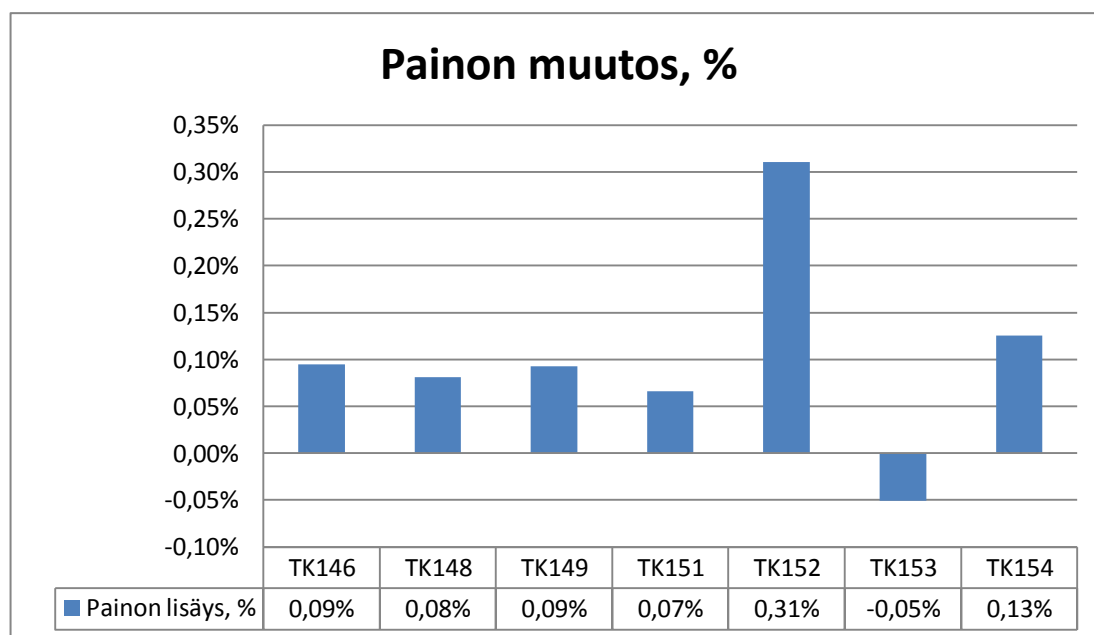
Laajapintasuodattimet punnittiin mittausten alkaessa ennen asentamista IV-koneeseen. Punnitus tehtiin suodattimen kehikon kanssa. Mittausten päätyttyä suodattimet punnittiin uudelleen. Suodattimen painon nousu kertoo suodatin materiaaliin sitoutuneen partikkelimassan määrän ja sitä kautta suodatinmateriaalin erotusvaikutuksen.

Taulukossa 9 on esitetty suodattimien alku- ja loppupainot sekä painojen muutokset mittausjakson aikana.

Taulukko 9. Suodattimien painojen muutokset

	TK146	TK148	TK149	TK151	TK152	TK153	TK154
Alkupaino, g	<b>6 352</b>	<b>4 940</b>	<b>4 308</b>	<b>6 034</b>	<b>4 506</b>	<b>3 930</b>	<b>4 770</b>
Loppupaino, g	<b>6 358</b>	<b>4 944</b>	<b>4 312</b>	<b>6 038</b>	<b>4 520</b>	<b>3 928</b>	<b>4 776</b>
Muutos, g	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>14</b>	<b>-2</b>	<b>6</b>
Muutos, %	<b>0,09 %</b>	<b>0,08 %</b>	<b>0,09 %</b>	<b>0,07 %</b>	<b>0,31 %</b>	<b>-0,05 %</b>	<b>0,13 %</b>

Kuvasta 35 nähdään suodattimien painon muutos prosenttiyksikkönä mittausjakson aikana.



Kuva 35. Suodattimien painon nousu prosentteina mittausjakson aikana

Suodattimien painojen muutos oli pääasiassa 4 g tai 6 g. TK153 suodattimen paino laski 2 g mittausjakson aikana. Suodatinta tarkasteltaessa silmämääräisesti, syytä painon putoamiseen ei näkynyt. Myöskään mittautavoissa ei ollut eroja joten syytä painon putoamiseen ei tiedetä. TK152 suodattimen paino nousi 14 g mittausjakson aikana joka selittyy kyseisen suodattimen selvästi parhaimmasta erotusasteesta. Vaikka suodattimen TK152 erotusaste oli selvästi muita korkeampi, niin sen painehäviö mittausjaksolla ei noussut kuin 6 Pa (11,1 Pa -> 17,1 Pa) eli vaikka suodattimeen kertyi muita enemmän epäpuhtauksia, se ei näkynyt suodattimen painehäviön nousuna muita suodattimia enempää.

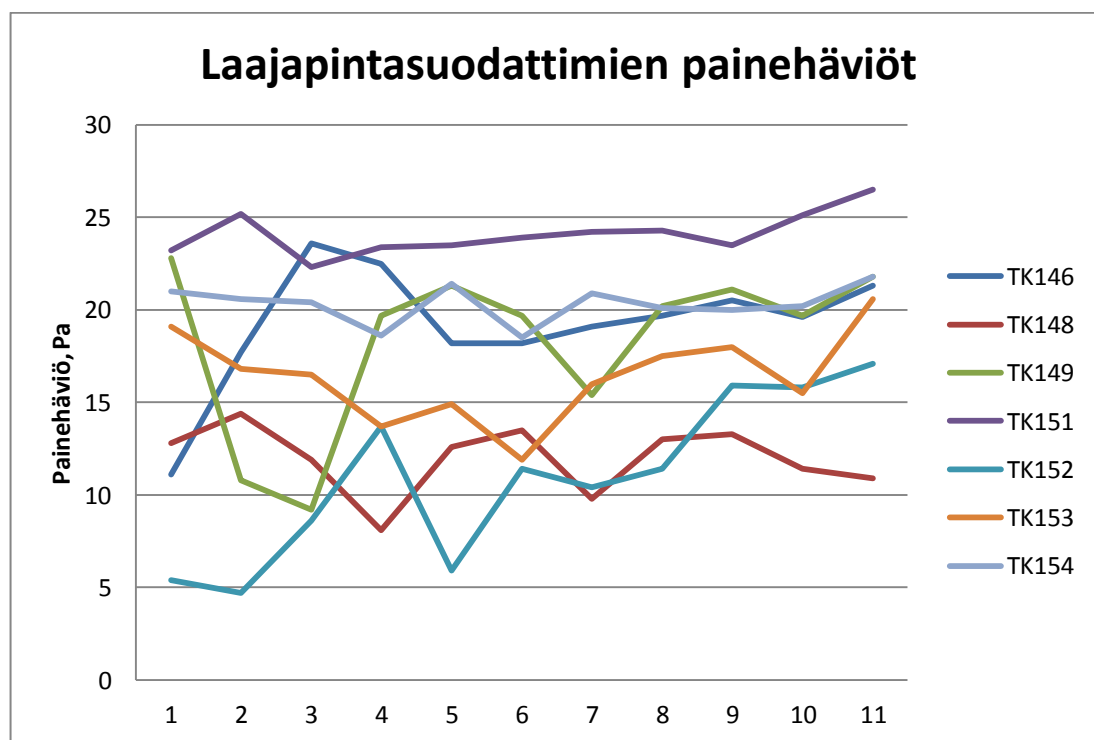
### 7.2.2 Laajapintasuodattimien painehäviöt

Laajapintasuodattimien painehäviö mitattiin jokaisesta tuloilmakoneesta koneiden omista paine-eroletkuista.

Taulukossa 10 on esitetty suodattimien yli mitatut painehäviöt jokaisella mittauskerralla ja kuvassa 36 on samat tulokset viivadiagrammina.

Taulukko 10. Laajapintasuodattimien yli mitatut painehäviöt mittausjaksolla.

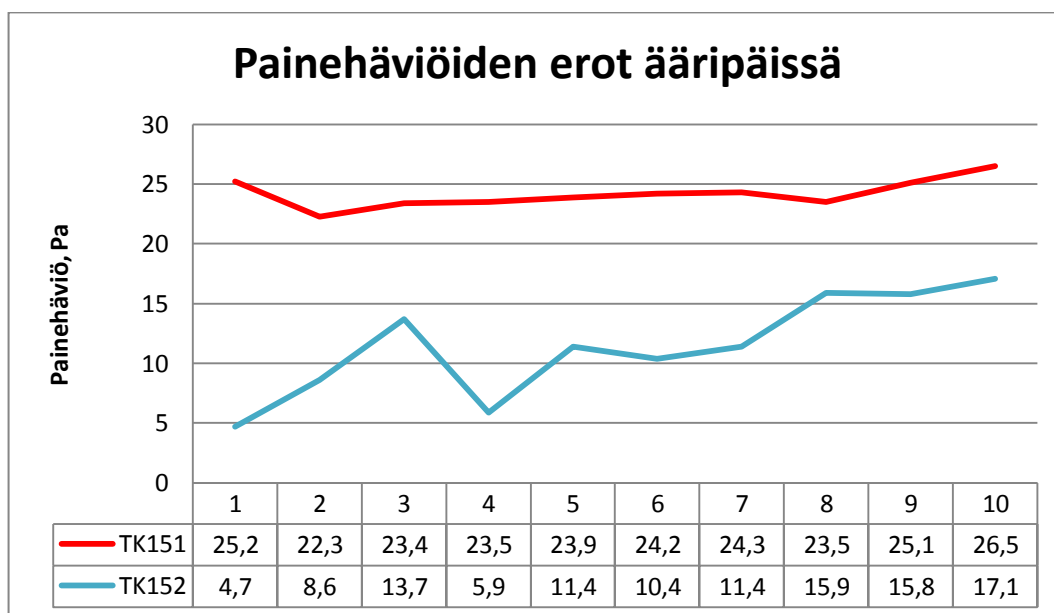
Laajapintasuodattimien painehäviöt, Pa						
TK146	TK148	TK149	TK151	TK152	TK153	TK154
11,1	12,8	22,8	23,2	5,4	19,1	21
17,7	14,4	10,8	25,2	4,7	16,8	20,6
23,6	11,9	9,2	22,3	8,6	16,5	20,4
22,5	8,1	19,7	23,4	13,7	13,7	18,6
18,2	12,6	21,3	23,5	5,9	14,9	21,4
18,2	13,5	19,7	23,9	11,4	11,9	18,5
19,1	9,8	15,4	24,2	10,4	16	20,9
19,7	13	20,2	24,3	11,4	17,5	20,1
20,5	13,3	21,1	23,5	15,9	18	20
19,6	11,4	19,7	25,1	15,8	15,5	20,2
21,3	10,9	21,8	26,5	17,1	20,6	21,8



Kuva 36. Painehäviöt kaikkien laajapintasuodattimien yli mittausjaksolla



Koska erot suodattimien yli mitatuissa painehäviöissä olivat isot, kuvassa 37 on esitetty selvyyden vuoksi ääripäiden tulokset.



Kuva 37. Painehäviöiden erot ääripäissä

Painehäviöiden erot eivät ole suoraan vertailukelpoisia, koska ilmanvaihtokoneiden ilmavirrat olivat erilaiset. Testauksessa mukana olleiden IV-koneiden ilmavirrat on esitetty taulukossa 6 (s. 41). Tuloilmakoneiden ilmavirtojen ollessa erilaiset, muunnetaan suodattimien painehäviöt vastaamaan koneiden ääripäiden ilmavirtoja 200 l/s ja 270 l/s ja lasketaan suodattimien keskimääräinen painehäviö  $p_{avg}$  jokaiselle suodattimelle (taulukko 11).

Taulukko 11. Laajapintasuodattimien keskimääräinen painehäviö muunnettuna ilmavirroille 200 l/s ja 270 l/s

$p_{avg}$	200 l/s	270 l/s
TK146	16,4	23,1
TK148	12,0	16,9
TK149	14,2	20,0
TK151	18,7	26,3
TK152	7,8	10,9
TK153	12,7	17,9
TK154	15,8	22,2

Taulukon 11 suodattimien keskimääräisen painehäviön perusteella voidaan laskea suodattimien energiankulutus mittausjakson ilmavirroilla. Puhaltimien hyötysuhteeksi on ilmoitettu 0,653 valmistajan koneajossa toimintapisteessä 400 l/s ja 760 Pa (s.33). Taulukoissa 12 ja 13 on esitetty suodattimien laskennallinen energiankulutus ilmavirroilla 200 l/s ja 270 l/s.

Taulukko 12. Suodattimien laskennallinen energiankulutus mittausjaksolla, ilmavirralla 200 l/s:

TK146	TK148	TK149	TK151	TK152	TK153	TK154
44 kWh	32 kWh	38 kWh	50 kWh	21 kWh	34 kWh	42 kWh

Taulukko 13. Suodattimien laskennallinen energiankulutus mittausjaksolla, ilmavirralla 270 l/s:

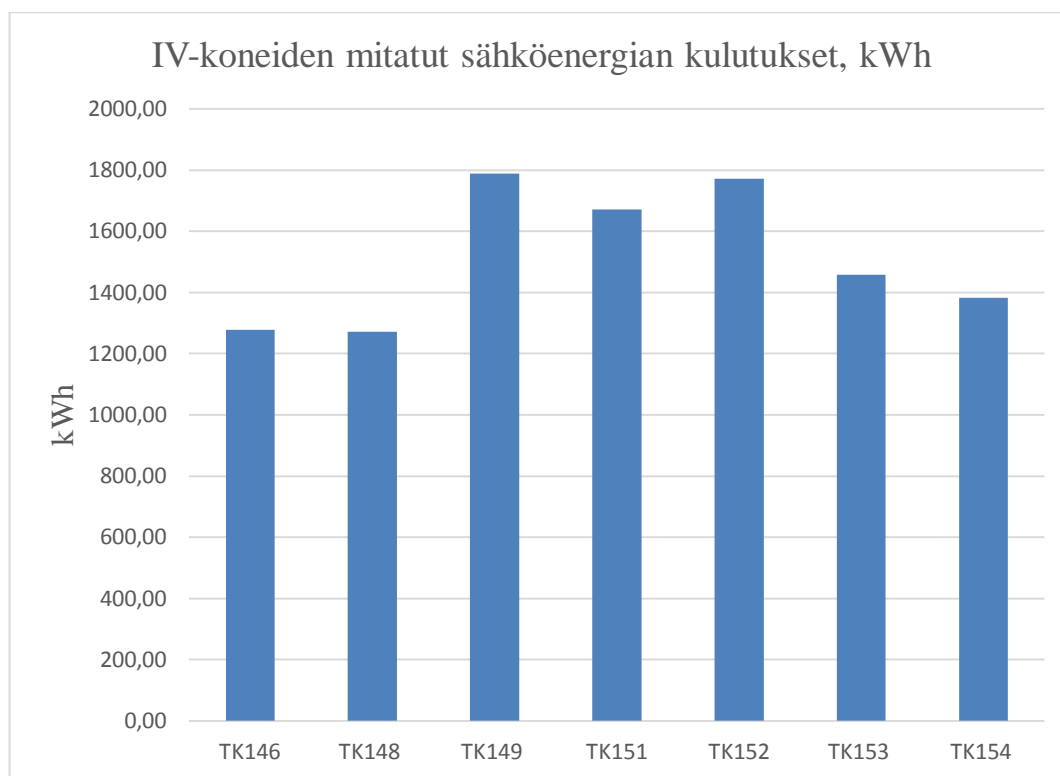
TK146	TK148	TK149	TK151	TK152	TK153	TK154
84 kWh	61 kWh	73 kWh	95 kWh	40 kWh	65 kWh	80 kWh

VSSHP:n kantasairaalan alueella Turussa on n. 800 kpl tuloilmakoneita joissa käytetään F9- luokan suodattimia. Koneiden ilmamäärät vaihtelevat riippuen palvelualueiden koosta ja käyttötarkoituksesta mutta ilmanvaihdon suunnittelussa on pyritty pitämään ilmanvaihdon palvelualueiden koot suhteellisen pieninä jolloin keskimääräisen tuloilmakoneen ilmamäärä on n. 1000 l/s. Tämän olettamuksen perusteella mittauksissa käytettyjen suodattimien aiheuttamat energiankulutukset olisivat välillä 190 000 kWh – 330 000 kWh vuodessa.

Koska testilaboratoriossa mitattiin paine-ero vain laajapintasuodattimista, pussisuodattimien paine-eroa ei käsitellä tässä kohtaa. Liitteissä 12 – 18 on esitetty kaikkien laajapintasuodattimien painehäviöt mittausjaksolla. Liitteessä 19 on esitetty yhdistettynä kaikkien pussisuodattimien paine-ero mittausjaksolla.

### 7.3 IV-koneiden mitatut energiankulutukset

Mittauksessa käytettyjen ilmanvaihtokoneiden sähkösyöttöön asennettiin energiankulutusta seuraava mittari joka mittasi suoraan koneen verkosta ottaman sähköenergian. Tämän perusteella on saatu seuraava kuva 38 josta näkee suoraan eri koneiden kuluttamat sähköenergiankulutukset.



Kuva 38. IV-koneiden mitatut sähköenergian kulutukset sähkönsyöttöön kytketyistä energiamittareista luettuna

IV-koneiden energian kulutuksessa näkyvistä eroista ei voida vetää suoria yhteneväisyyksiä laajapintasuodattimiin ja niiden likaantumisesta johtuvien painehäviöiden aiheuttamiin energiankulutuksiin. Laajapintasuodattimien mitatut erotusasteet ja painehäviöt eivät ole suoraan verrannollisia mitattuihin energian kulutusarvoihin koska mittaustuloksissa on mukana myös pussisuodattimien aiheuttama painehäviö ja energiankulutus. Puhaltimien ilmavirrat olivat välillä 200 l/s – 270 l/s joten niiden suhteellisen suuret erot saattavat selittää parhaiten erot energiankulutuksissa.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Ilmanvaihdon on suuri merkitys sairaaloiden sisäilman puhtaudessa. Ulkona olevat epäpuhtaudet kulkeutuvat koneellisen ilmanvaihdon avulla sisätiloihin jolloin järjestelmä pitää rakentaa siten, että suurin osa epäpuhtauksista saadaan poistettua. Sairaaloiden sijainnilla on suuri merkitys siihen millaisella tasolla ympäristön hiukkaspitoisuudet ovat. Jos rakennukset sijaitsevat kaupunkien keskustoissa tai vilkkaiden liikennenyhteyksien varrella, ulkoilman epäpuhtauspitoisuudet ovat huomattavasti korkeammat kuin keskustojen ulkopuolella.

Ulkoilman lämpötilalla ei ole merkittävää vaikutusta ilman hiukkaspitoisuuteen. Mittattujen hiukkaskokojen määrissä ei havaittu mittausjakson aikana sellaisia muutoksia jotka olisi voitu yhdistää ilman lämpötilaan.

Ulkoilman suhteellisella kosteudella ei ole yhteyttä ulkoilman hiukkasmääriin. Sen sijaan kosteudella voi olla vaikutusta suodattimien toimintaan. Kosteuden noustessa suodattimien erotuskyky heikkenee ja toisaalta kosteus saattaa antaa epäpuhtauksille hyvän kasvualustan suodattimissa ja ilmanvaihtojärjestelmän eri osissa. Siksi kosteuden pääsy ilmanvaihtojärjestelmään on estettävä.

Ulkoilman hiukkasmittauksissa mitattiin  $0,3\ \mu\text{m}$ ,  $0,5\ \mu\text{m}$  ja  $1,0\ \mu\text{m}$  hiukkasten lukumääriä ( kpl / ilmalitra ). Mittausjaksolla hiukkasten määrissä ei näkynyt merkittäviä heilahduksia lukuun ottamatta elokuu 2017 ja tammikuu 2018 mittauksia. Näillä mittauskerroilla näkyi selvä piikki hiukkasten määrissä. Mitään selkeää selitystä näille piikeille ei ole. Ilmatieteenlaitoksen hiukkasmittauspisteen tulokset Turun kauppatorin mittauspisteessä näyttävät että ilman laatu Turun keskustassa on tasaisen alhainen eikä mitään poikkeavaa ole havaittavissa.

Suodattimien läpäisy- ja erotusaste on merkittävä tekijä verrattaessa eri suodattimien toimintaa. Standardin SFS-EN 770:2012 mukainen vähimmäiserotusaste F9-luokan suodattimille on  $>70\ %$ . Tässä työssä mitattiin ilmanvaihtokoneiden läpi kulkevasta ilmasta hiukkaspitoisuudet raitisilmakanavasta ennen ilmanvaihtokonetta, 1. portaan pussisuodattimen jälkeen sekä 2. portaan laajapintasuodattimen jälkeen. Laajapin-

tasuodattimille tehtiin aerosolitestaus laboratoriossa ennen mittausten alkua ja samalla suodattimet punnittiin kehyksineen. Punnitus uusittiin mittausjakson päätyttyä. Mittaukset osoittivat että eri valmistajien suodattimilla on selvästi eroja hiukkasmaisan läpäisy- ja erotuskyvyssä vaikkakin kaikkien suodattimien osalta standardin vaatimukset täyttyivät. Paras mitattu erotusaste oli suodattimella TK152. Erotusasteet eri hiukkaskoolla olivat 97 %, 98 % ja 99 %. Erotusaste oli poikkeuksellisen hyvä verrattuna muihin suodattimiin. Alhaisin erotusaste mitattiin suodattimella TK154 jonka erotusasteet eri hiukkaskoolla olivat 78 %, 83 % ja 86 %.

Suodattimien alku- ja loppupainoissa oli aika tasaiset erot. Suurimmalla osalla erot olivat 4 g – 6 g. Yhden suodattimen paino putosi 2 g mittausjakson aikana ja siihen ei löytynyt selkeää syytä mutta ero selittynee mittaustarkkuudella. Suodattimen TK152 paino nousi selvästi eniten eli 14 g. Kyseisen suodattimen erotusaste sopii erinomaisesti sairaalailmanvaihtoon jossa sisäilman laadulla on huomattava merkitys potilasturvallisuuteen ja ilmanvaihdon suodatuksella ja suodattimien erotusasteella on siihen suuri vaikutus.

Suodattimien painehäviöillä on suuri merkitys ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen ja jotta tulevaisuudessa pystytään täyttämään tiukentuvat energiavaatimukset ja ilmastointikoneiden SFP- lukujen vaatimukset on suodattimien muotoiluun, materiaaleihin sekä niiden vaihtovälien käytäntöihin kiinnitettävä huomiota.

Tässä työssä mitattiin jokaisella mittauskerralla sekä pussi- että laajapintasuodattimien painehäviöt. Mittaukset todennettiin koneiden omilla paine-eroletkuilla. Koska mittausten alussa tehtiin laboratoriotestit vain laajapintasuodattimille, lopullisissa tuloksissa jätettiin pussisuodattimien tulokset huomioimatta. Painehäviömittauksissa nousi selkeästi esiin 2 suodatinmallia joiden erot olivat selvät. Suodattimen TK152 painehäviö nousi mittausten aikana 6 Pa loppupainehäviön ollessa 17,1 Pa. Vastaa- vasti suodattimen TK151 painehäviö nousi 3,3 Pa loppupainehäviön ollessa 26,5 Pa. Tuloksista voidaan nähdä että pienen alkupainehäviön omaavalla suodattimella painehäviön nousu vuoden aikana on suurempaa kuin suuremman alkupainehäviön omaavalla suodattimella. Siitä huolimatta suodattimen TK152 loppupainehäviö jäi suodattimen TK151 alkupainehäviöstä 6,1 Pa.

Tuloilmakoneiden ilmavirrat olivat erilaiset, välillä 200 l/s – 270 l/s jolloin suodattimien vuotuista energiankulutusta laskettaessa painehäviöt muunnettiin vastaamaan ääripäiden ilmavirtoja. Sen jälkeen laskettiin jokaiselle suodattimelle keskimääräinen painehäviö jonka avulla voitiin laskea suodattimille vuotuinen energiankulutus molemmilla ilmavirroilla. Parhaan ja heikoimman suodattimen vuotuiset energiankulutukset olivat 30 kWh ja 55 kWh. Kun tuloksissa huomioitiin vuotuinen suodattimien volyymi TYKSin Turun alueella n. 800 kpl ja arvioitiin keskimääräiseksi tuloilmakoneen ilmavirraksi n.1000 l/s, erot olivat vuositasolla 190 000 kWh – 330 000 kWh. Tässä on nyt huomioitu vain Turun kantasairaalan suurimmat sairaalarakennukset mutta jos huomioidaan koko sairaanhoitopiirin kaikki rakennukset ja kaikki suodatinluokat, suodattimien kokonaismäärä vuositasolla on n. 2000 kpl. Tällöin suodattimen energiankulutuksella alkaa olemaan jo huomattava merkitys. Varsinkin kun tässä mittauksessa käytettyjen IV-koneiden ilmamäärät olivat suhteellisen pienet ja sitä kautta painehäviöt vielä suhteellisen pieniä. Ilmamäärien kasvaessa kasvavat myös painehäviöt ja energiankulutus jolloin myös erot eri suodattimien energiankulutuksessa kasvavat.

Ilmanvaihdon suodattimet testataan yleensä ilmamäärällä 1 m<sup>3</sup>/s. Jos suodattimia testattaisiin suuremman kokoluokan ilmanvaihтокoneissa, tulokset olisivat varmasti erilaisia. Esimerkiksi suodattimien painehäviöt ja erotusasteet olisi hyvä mitata myös isommissa tuloilmakoneissa jotta voitaisiin verrata mikä vaikutus suuremmalla tilavuusilmavirralla on näihin suureisiin.

Tämän mittausjakson pituus oli n. vuosi. Laajapintasuodattimien vaihtoväliksi suositellaan yleensä loppupainehäviötä tai 2 vuotta joten niiden osalta mittausjaksoa voisi pidentää. Nyt tehdyssä mittauksessa nähtiin että joidenkin suodattimien painehäviö oli alussa selkeästi alhaisempi muihin verrattuna mutta alkoi selvästi nousta mittausjakson loppuvaiheessa joten olisi mielenkiintoista nähdä painehäviön kehitys jos mittausjakso olisi jatkunut vielä toisen vuoden. Lisäksi joidenkin suodattimien alkupainehäviö oli niin alhainen, että niiden vaihtaminen tietyn loppupainehäviön perusteella voisi teoriassa antaa hyvinkin pitkän vaihtovälin. Tosin silloin saattaisi tulla vastaan jo hygieniasyyt joiden takia suodattimet pitäisi vaihtaa.

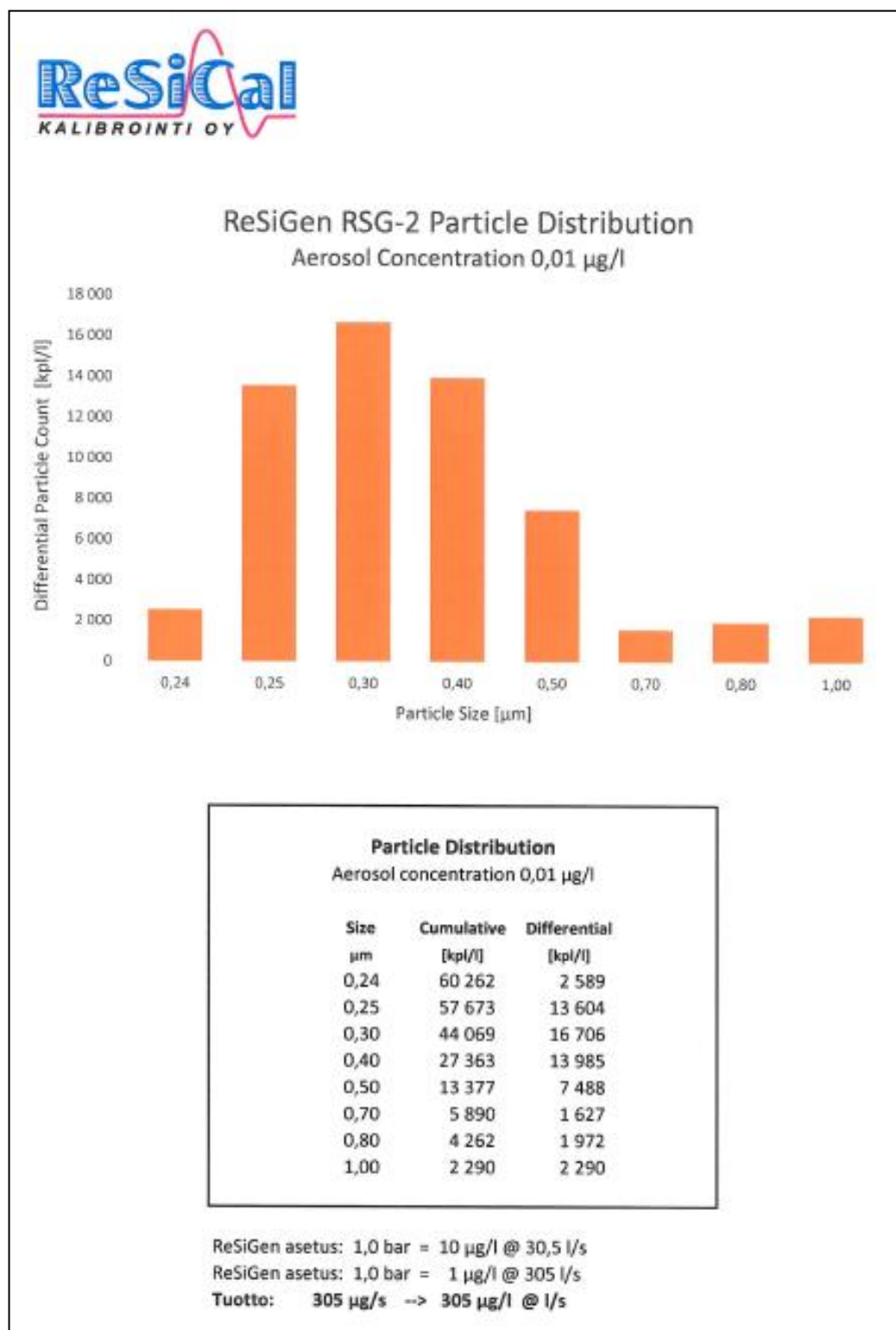
## LÄHTEET

- Bennett, A. (2010). *Air filtration: Innovations in industrial air filtration*. [www.filtsep.com](http://www.filtsep.com): Filtration Separation.com.
- English, T. R. (2016). *A Brief History of Health-Care Ventilation*. [ashrae.org](http://ashrae.org): ASHRAE Journal.
- Filtech. (2018). <http://www.ilmansuodatin.com/index.php/fi/hybridisuodatin>.
- Finvac. (2017). *Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet*. Helsinki: Finvac ry.
- Ilmatieteenlaitos. (Tammikuu 2018). *Ilmanlaatu.fi*. Haettu 2018 osoitteesta <https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmanlaatu>
- Janssen, J. (1999). *The history of ventilation and temperature control*. [ashrae.org](http://ashrae.org): Ashrae Journal.
- Klaus, A. (1970). *History of the changing concept in ventilation requirements*. [ashrae.org](http://ashrae.org): Ashrae Journal.
- REHVA. (2011). *Guidebook no. 11*. Forssa: REHVA.
- RTS, R. (2012). *LVI 31-10507 Hiukkassuodatuksen peruskäsitteet*. Rakennustieto Oy.
- Sandberg, E. (2016). *Ilmastointilaitoksen mitoitus*. Forssa: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Sandberg, E. (2016). *Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät*. Forssa: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Sisäilmayhdistys. (2008). <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Sisailman-tekijat>.
- Stanke, D. (2006). *Explaining science behind standard 62.1-2004*. <http://tinyurl.com/>: IAQ Application.
- Stephens, B.;& Siegel, J. (2012). *Comparison of Test Methods for Determining the Particle Removal Efficiency of Filters in Residential and Light-Commercial Central HVAC Systems*. Texas, USA: Aerosol Science and Technology.
- Sundvik, A. (2017). *EN-ISO 16890:2016 New global standard links filtration performance to outdoor air pollution*. Tukholma: REHVA Journal.
- VTT. (2012). *High-tech sairaala - Korkean hygienian hallinta sairaaloissa*. Helsinki: VTT.

Ympäristöministeriö. (2017). *Asetus 1010/2017*. Helsinki: Ympäristöministeriö.



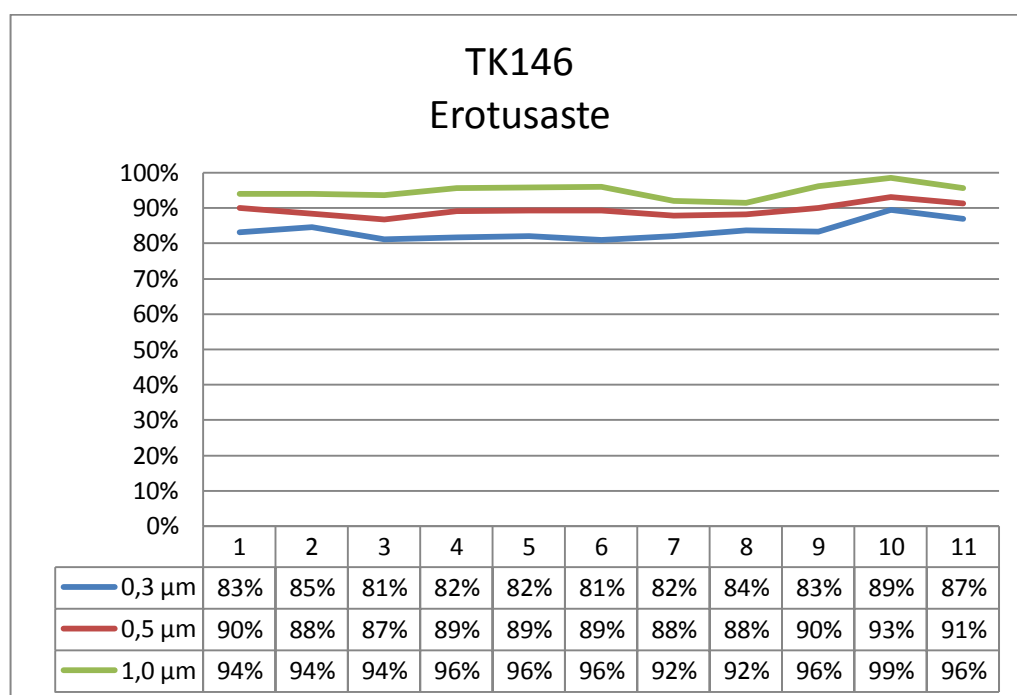
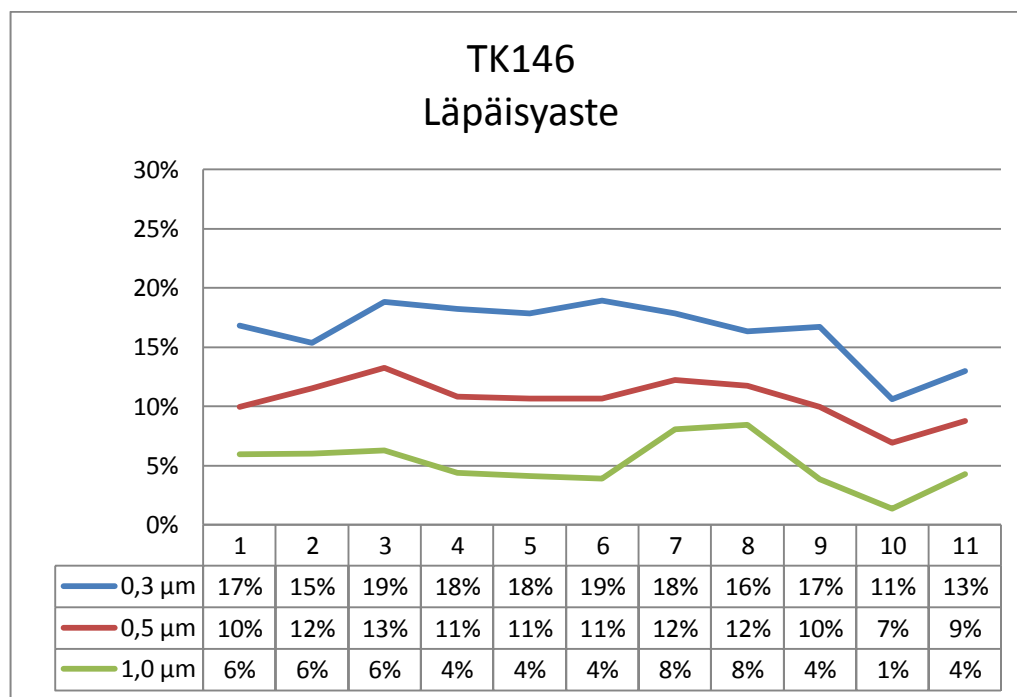
Durasyn 163-testiöljyn hiukkaspitoisuudet ja hiukkasten koot testi-ilmavirralla



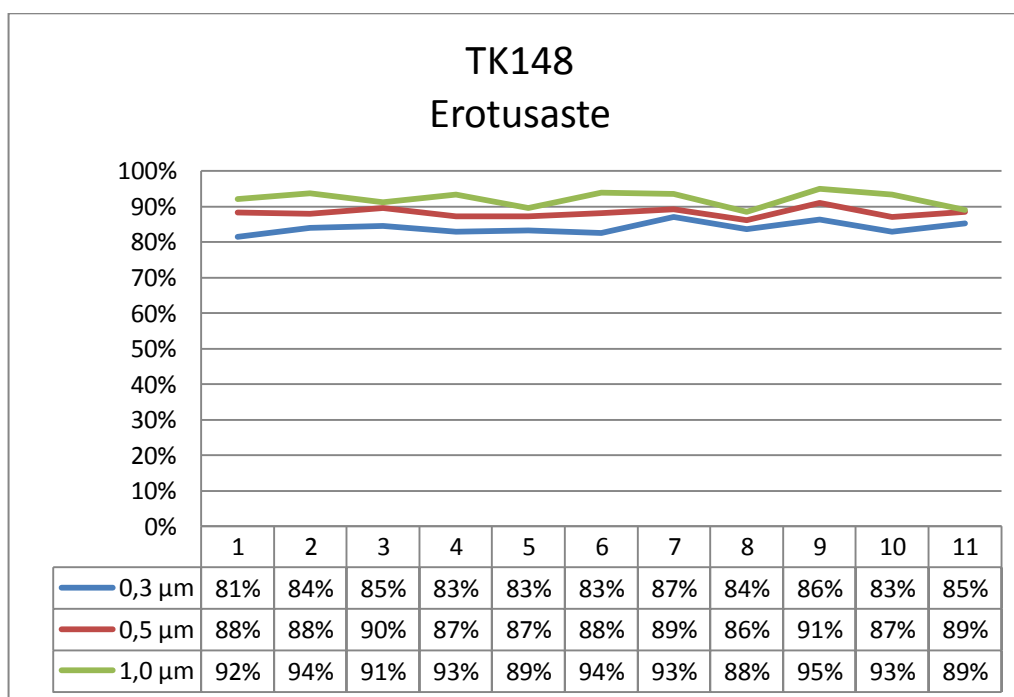
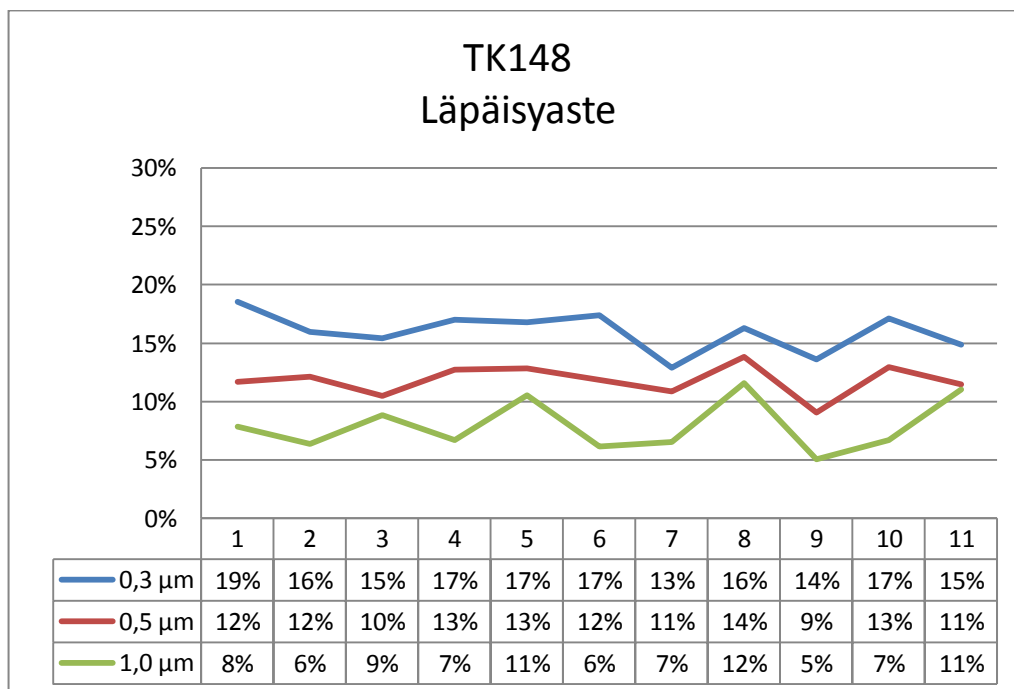
## Laajapintasuodattimien testausraportti

 <b>ReSiCal</b> <b>KALIBROINTI OY</b> Pikkamäentie 7 A 2, 20750 Turku	Fyysikkopohjan laatinut: Jere Sinisalo Fyysikkopohjan tarkastanut: Markus Sinisalo Fyysikkopohjan hyväksynyt: Niina Sinisalo Fyysikkopohjan rev. Pvm: 8.12.2018	Dok. Nro: 348-01 Versio: 1.0 Sivut: 1 ( 1 ) Liitteet: --																																					
	<b>TESTAUSRAPORTTI</b> <b>Nro: 170313.4.749-01</b>																																						
	<b>Tilaaaja:</b> TYKS / Käyttötieteellinen Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri <b>Kohde:</b> T-Sairaala, IV-konehuone <b>Tilattu työ:</b> Suodattimen testaus: F9	<b>Mittauksen suoritti:</b> Jere Sinisalo <b>Allekirjoitus:</b>  <b>Mittauspäivämäärä:</b> 19.01.2017																																					
	<b>TESTAUSMENETELMÄ:</b> Painehäviötestissä ajetaan ilmävirtaustestipenkissä suodattimen läpi tunnettu ilmävirtaus, jonka jälkeen mitataan mikromanometrillä suodattimen yli jäävä painehäviö. Erotusastetestissä tuotetaan aerosoligeneraattorilla haluttu partikkelipitoisuus, joka ajetaan suodattimen läpi. Partikkelipitoisuus mitataan suodattimen molemmilta puolilta aerosolifotometrillä, jolloin saadaan laskettua suodattimen erotusaste. Testiaerosolina käytetään Durasyn 164 testidilyä.																																						
<b>TESTATTAVA SUODATIN:</b> <table border="1"> <tr> <td>Testattu suodatin:</td> <td>Laajapintasuodatin</td> <td>Suodattimen paino:</td> <td>4 506</td> <td>g</td> </tr> <tr> <td>Valmistaja:</td> <td></td> <td>Nimellispainehäviö:</td> <td>--</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Malli / Tyyppi:</td> <td></td> <td>Suodattimen luokka:</td> <td>F9</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sarja nro S/n:</td> <td>-- #4</td> <td>Suodattimen mitat:</td> <td>--</td> <td>mm</td> </tr> </table>				Testattu suodatin:	Laajapintasuodatin	Suodattimen paino:	4 506	g	Valmistaja:		Nimellispainehäviö:	--		Malli / Tyyppi:		Suodattimen luokka:	F9		Sarja nro S/n:	-- #4	Suodattimen mitat:	--	mm																
Testattu suodatin:	Laajapintasuodatin	Suodattimen paino:	4 506	g																																			
Valmistaja:		Nimellispainehäviö:	--																																				
Malli / Tyyppi:		Suodattimen luokka:	F9																																				
Sarja nro S/n:	-- #4	Suodattimen mitat:	--	mm																																			
<b>1. Suodattimen painehäviön mittaus:</b> Filter Pressure Loss <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Ilmävirtaustestipenkin tiedot : Referenssi</th> <th>Mitattu Painehäviö, Δp (Suodatin)</th> </tr> <tr> <th>Laippa #</th> <th>Ilmävirtaus</th> <th>Mittalaipan paine-ero</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6</td> <td>200 l/s</td> <td>450 Pa</td> <td></td> <td>11,3 Pa</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>250 l/s</td> <td>707 Pa</td> <td></td> <td>14,7 Pa</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>300 l/s</td> <td>1023 Pa</td> <td></td> <td>18,0 Pa</td> </tr> </tbody> </table>				Ilmävirtaustestipenkin tiedot : Referenssi				Mitattu Painehäviö, Δp (Suodatin)	Laippa #	Ilmävirtaus	Mittalaipan paine-ero			6	200 l/s	450 Pa		11,3 Pa	6	250 l/s	707 Pa		14,7 Pa	6	300 l/s	1023 Pa		18,0 Pa											
Ilmävirtaustestipenkin tiedot : Referenssi				Mitattu Painehäviö, Δp (Suodatin)																																			
Laippa #	Ilmävirtaus	Mittalaipan paine-ero																																					
6	200 l/s	450 Pa		11,3 Pa																																			
6	250 l/s	707 Pa		14,7 Pa																																			
6	300 l/s	1023 Pa		18,0 Pa																																			
<b>2. Suodattimen erotusasteen mittaus:</b> Filter Efficiency: Erotusaste mitattu ajaa suodattimen läpi 250 l/s näytelilävirtausta. <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Läpäisyaste, p</th> <th colspan="2">Erotusaste, E</th> <th colspan="2">Toleranssi Vaadittu IN / OUT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>%</td> <td>97</td> <td>%</td> <td>&gt; 70 %<sup>1)</sup></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Läpäisyaste, p		Erotusaste, E		Toleranssi Vaadittu IN / OUT		3	%	97	%	> 70 % <sup>1)</sup>																									
Läpäisyaste, p		Erotusaste, E		Toleranssi Vaadittu IN / OUT																																			
3	%	97	%	> 70 % <sup>1)</sup>																																			
<sup>1)</sup> Standardin SP5-EN 770:2012 mukainen vähimmäiserotusaste F9-luokan suodattimelle.																																							
<b>MITTAUSLAITTEISTO:</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="3">Kalibrointi</th> <th></th> </tr> <tr> <th>Laitte</th> <th>Tyyppi nro</th> <th>Sarja nro</th> <th>Pvm.</th> <th>Toim.nro</th> <th>Voimassa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mikromanometri</td> <td>TBI 8706-M-F1</td> <td>02010385</td> <td>04.03.2016</td> <td>160923.321-04</td> <td>03 / 2017</td> </tr> <tr> <td>Aerosolifotometri</td> <td>Virtis JM-9000</td> <td>213573</td> <td>08.12.2016</td> <td>164920.724-01</td> <td>12 / 2017</td> </tr> <tr> <td>Aerosoligeneraattori Virtis</td> <td>175356</td> <td>204899</td> <td>KT</td> <td>--</td> <td>--</td> </tr> <tr> <td>Tuulitunneli</td> <td>Multipoint 2500</td> <td>9701</td> <td>EMK</td> <td>--</td> <td>--</td> </tr> </tbody> </table>						Kalibrointi				Laitte	Tyyppi nro	Sarja nro	Pvm.	Toim.nro	Voimassa	Mikromanometri	TBI 8706-M-F1	02010385	04.03.2016	160923.321-04	03 / 2017	Aerosolifotometri	Virtis JM-9000	213573	08.12.2016	164920.724-01	12 / 2017	Aerosoligeneraattori Virtis	175356	204899	KT	--	--	Tuulitunneli	Multipoint 2500	9701	EMK	--	--
		Kalibrointi																																					
Laitte	Tyyppi nro	Sarja nro	Pvm.	Toim.nro	Voimassa																																		
Mikromanometri	TBI 8706-M-F1	02010385	04.03.2016	160923.321-04	03 / 2017																																		
Aerosolifotometri	Virtis JM-9000	213573	08.12.2016	164920.724-01	12 / 2017																																		
Aerosoligeneraattori Virtis	175356	204899	KT	--	--																																		
Tuulitunneli	Multipoint 2500	9701	EMK	--	--																																		
<b>HUOMAUTUKSET:</b> Ympäristöolosuhteet: 20 °C 25 %RH 1015 mbar																																							
EMK = Ei sisällyttävä Kalibrointiä KT = Kalibrointi tarvittaessa NIA = Ei saatavissa / ei spesifikaatio (Not applicable)																																							

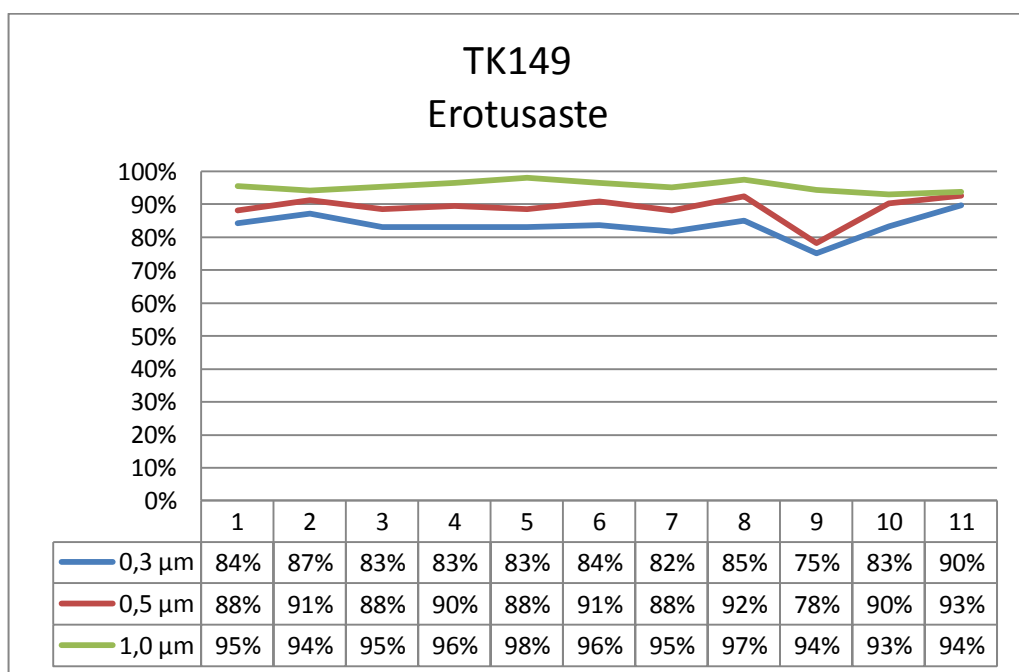
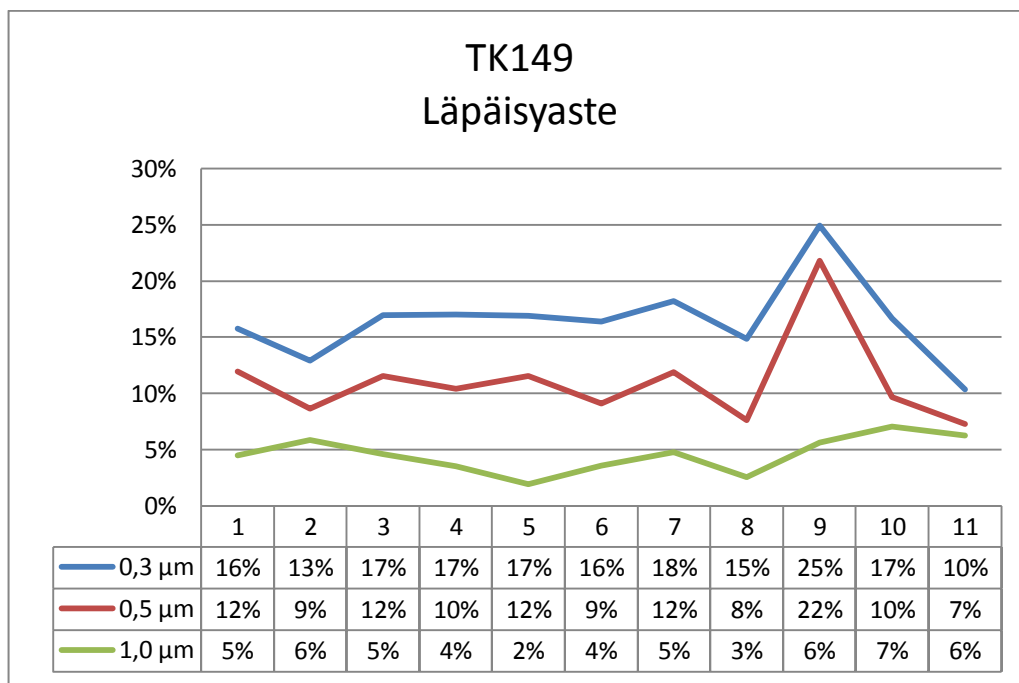
## Laajapintasuodattimen TK146 läpäisy- ja erotusaste



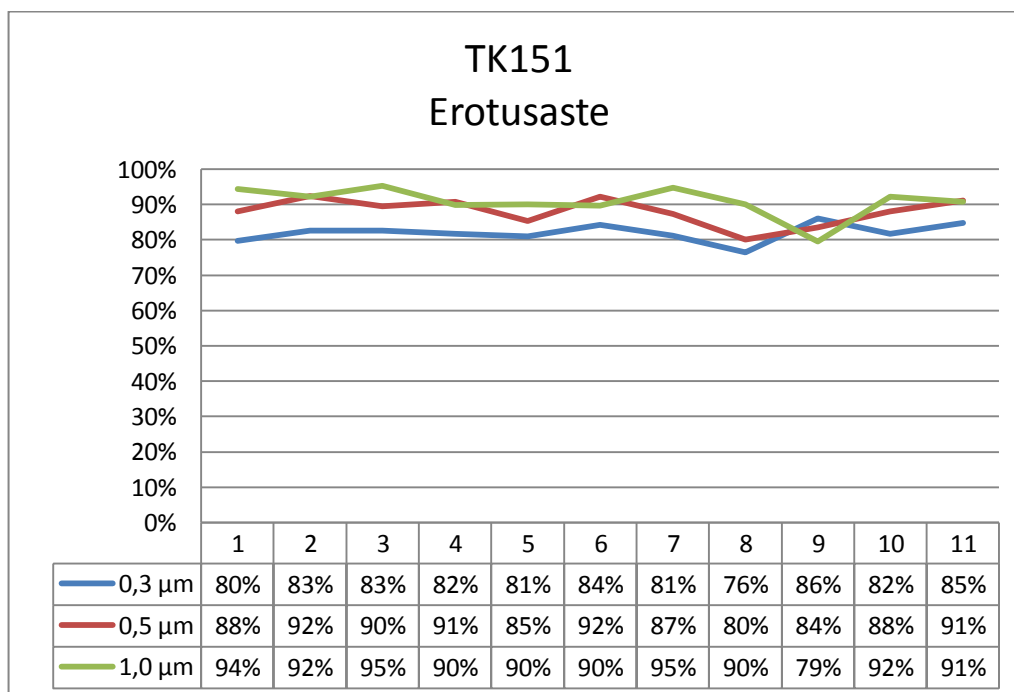
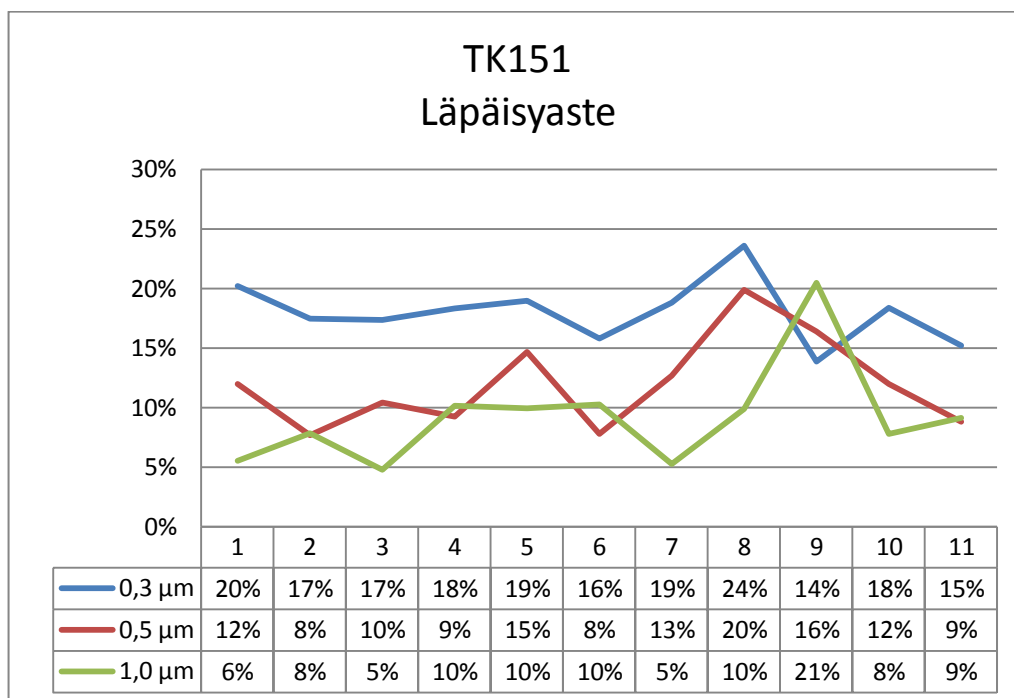
## Laajapintasuodattimen TK148 läpäisy- ja erotusaste



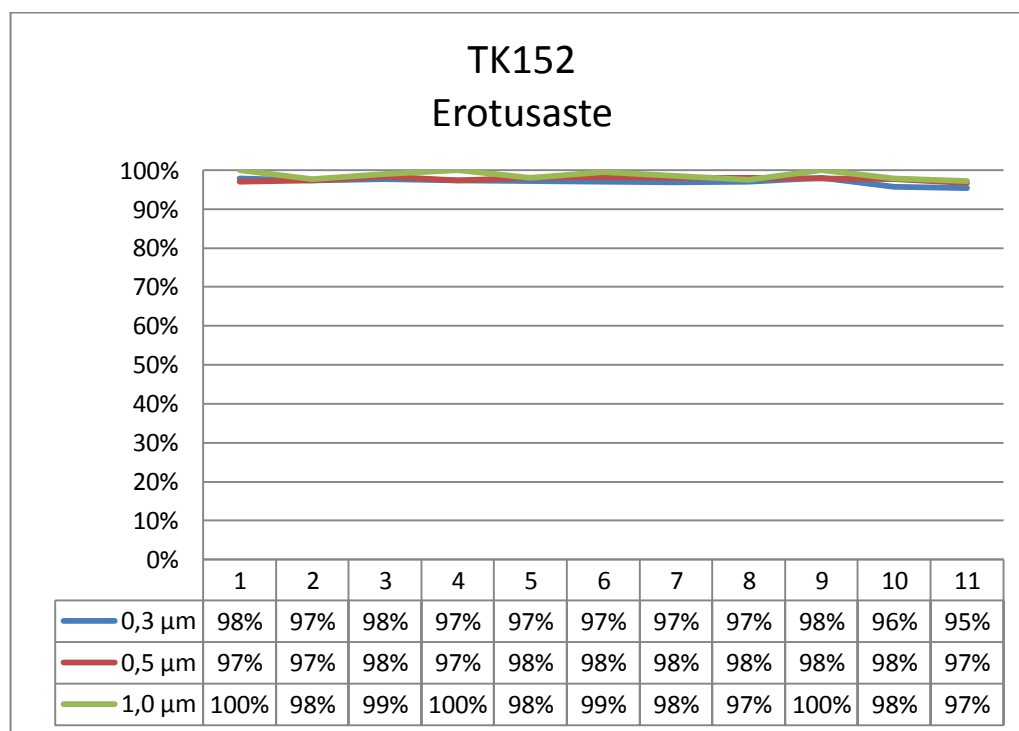
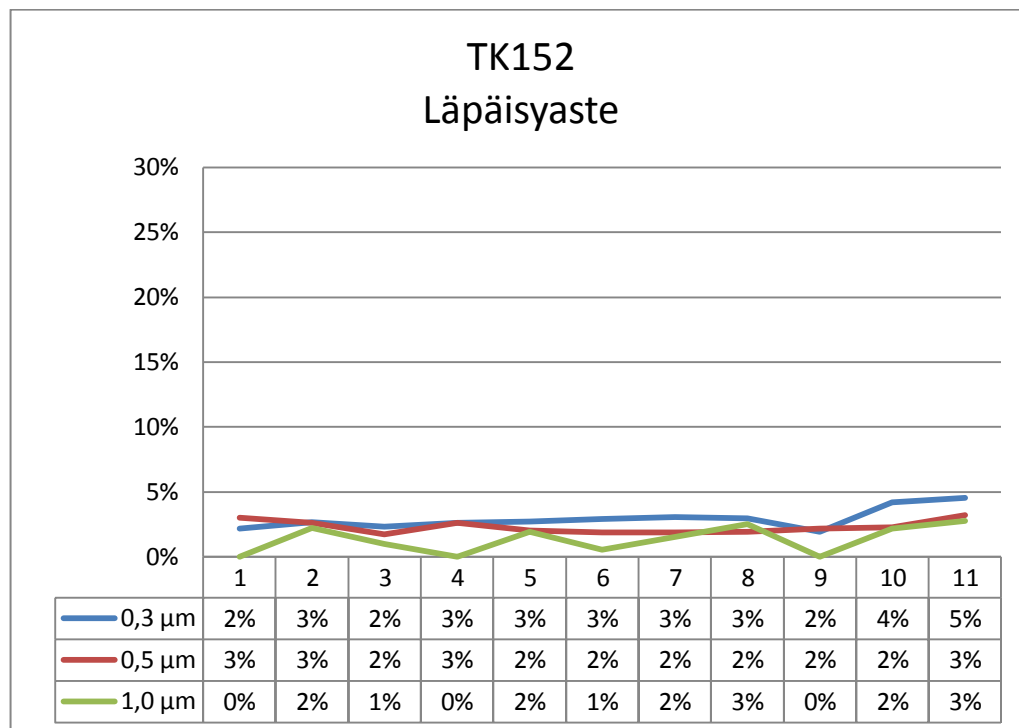
## Laajapintasuodattimen TK149 läpäisy- ja erotusaste



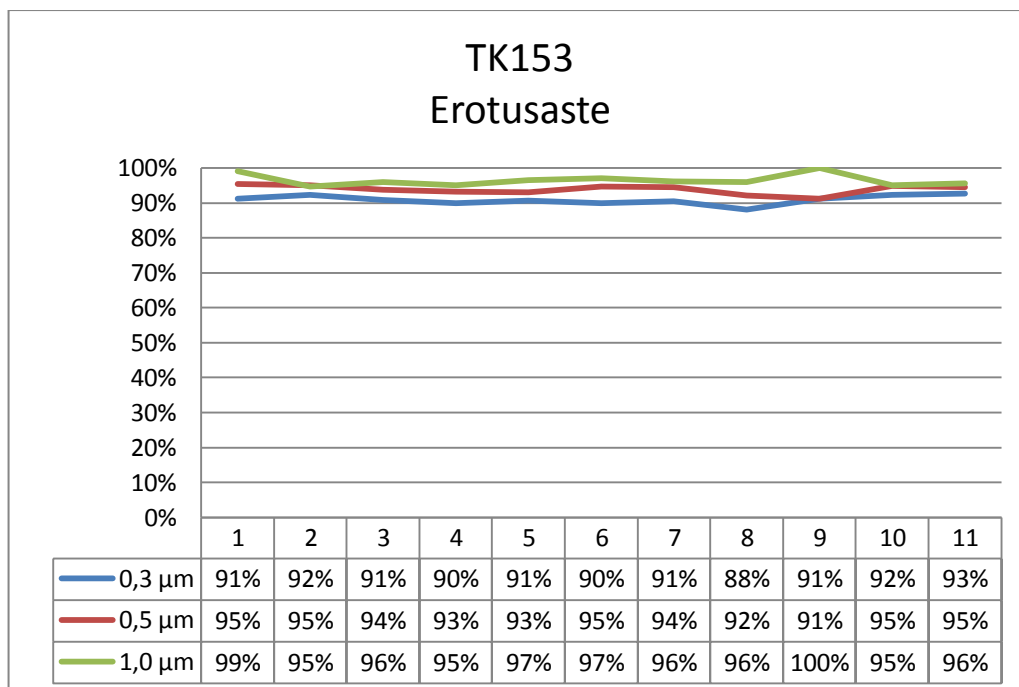
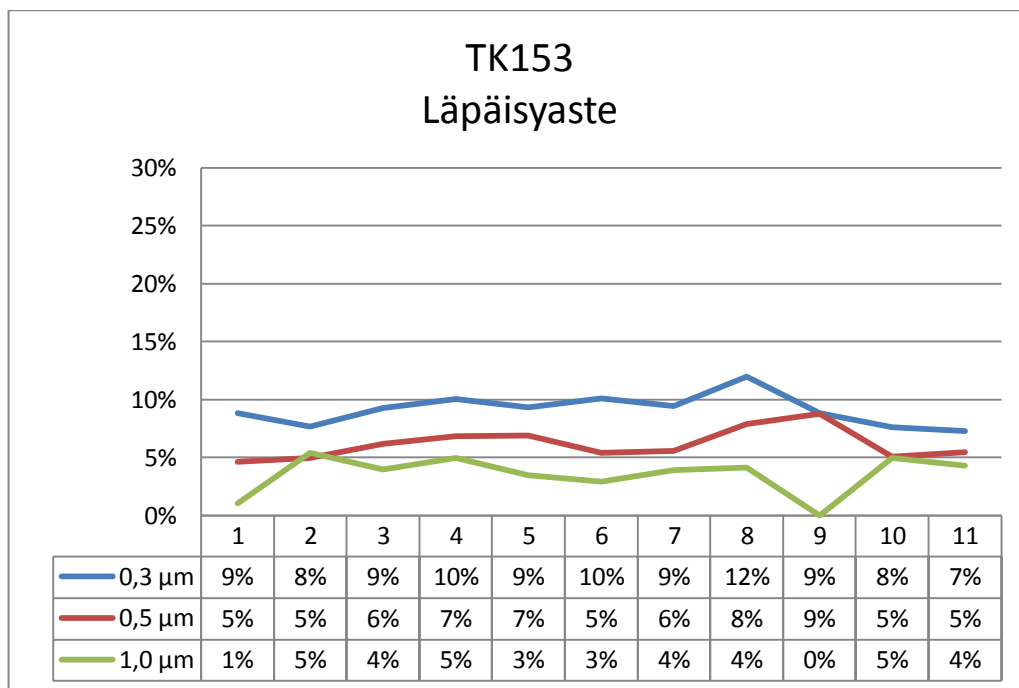
## Laajapintasuodattimen TK151 läpäisy- ja erotusaste



## Laajapintasuodattimen TK152 läpäisy- ja erotusaste

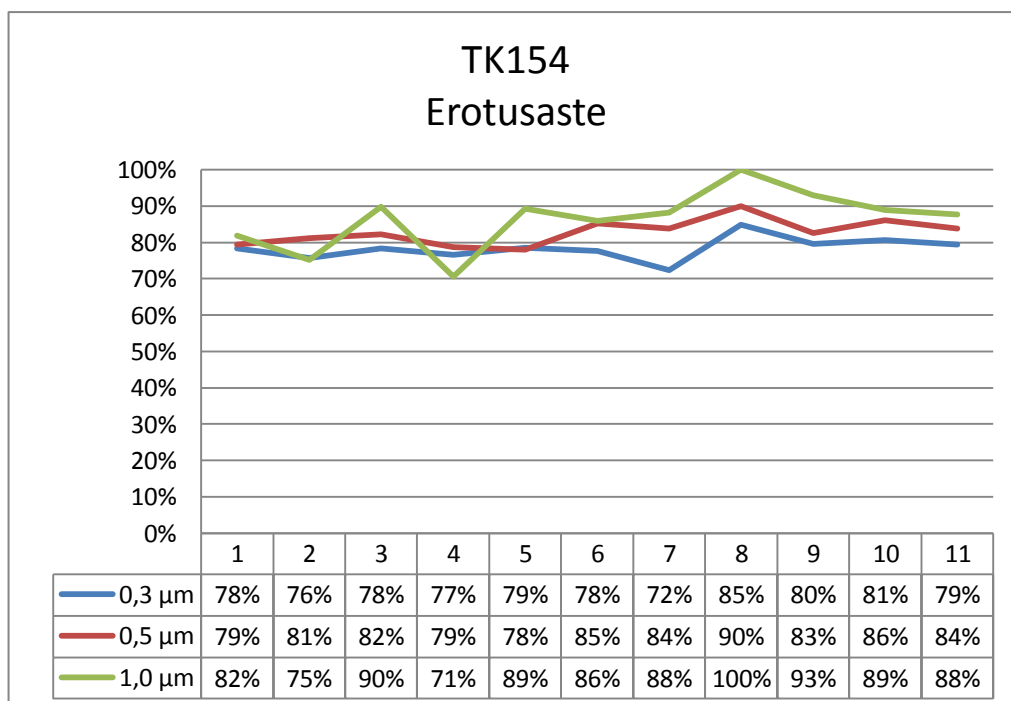
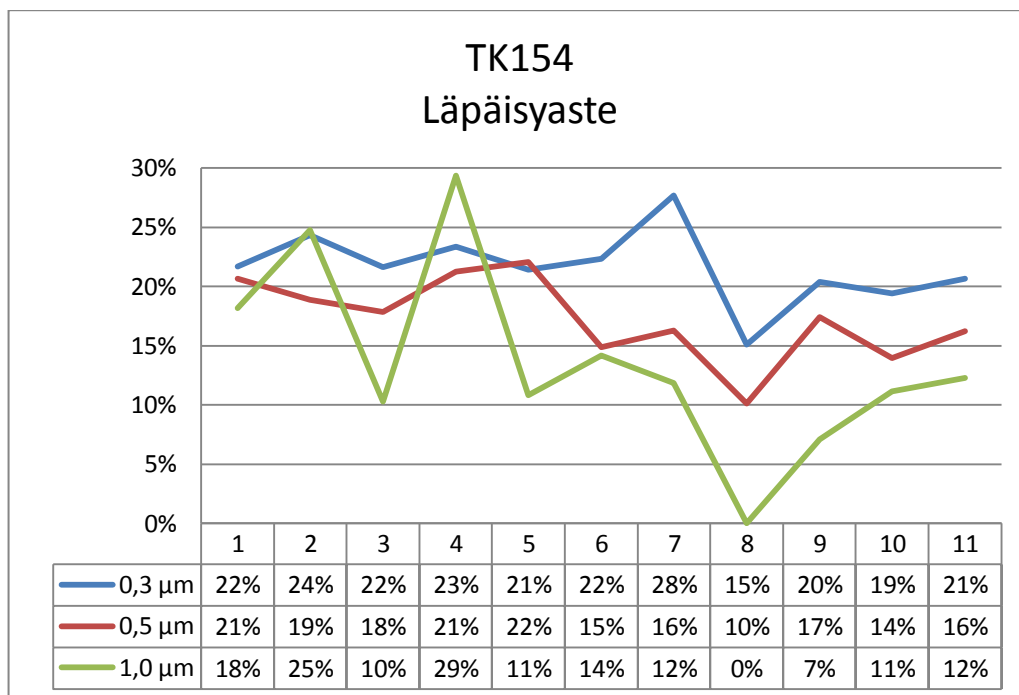


## Laajapintasuodattimen TK153 läpäisy- ja erotusaste

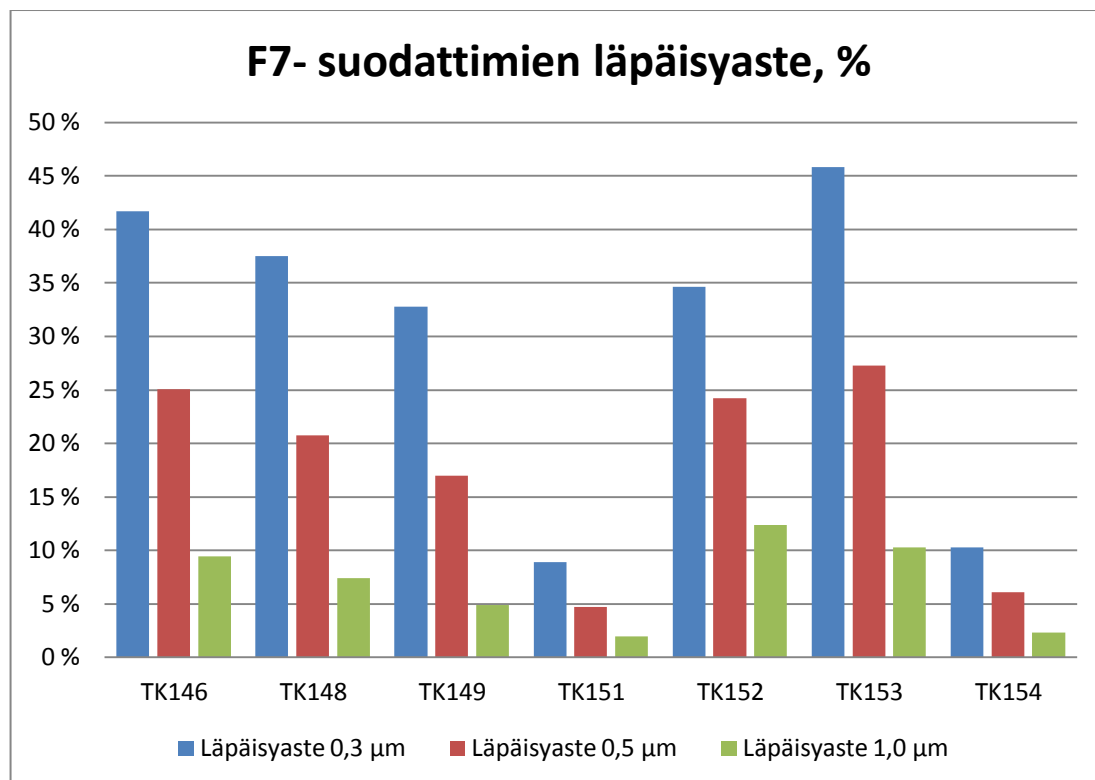




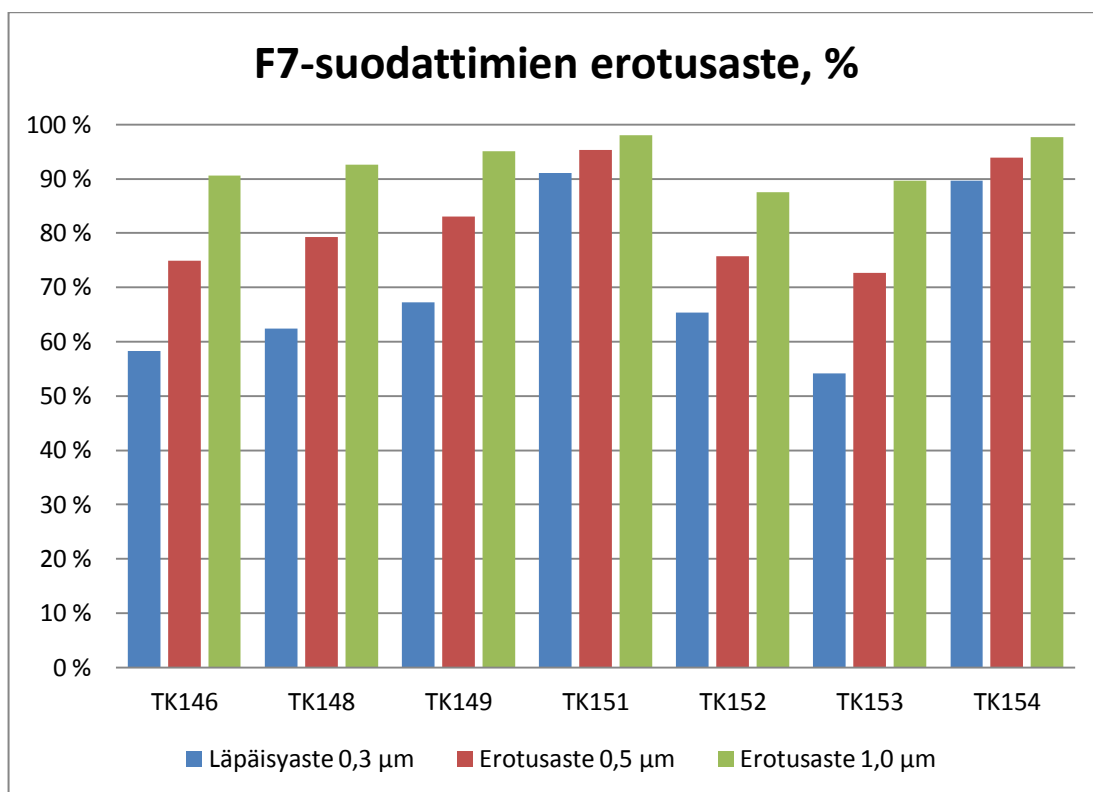
## Laajapintasuodattimen TK154 läpäisy- ja erotusaste



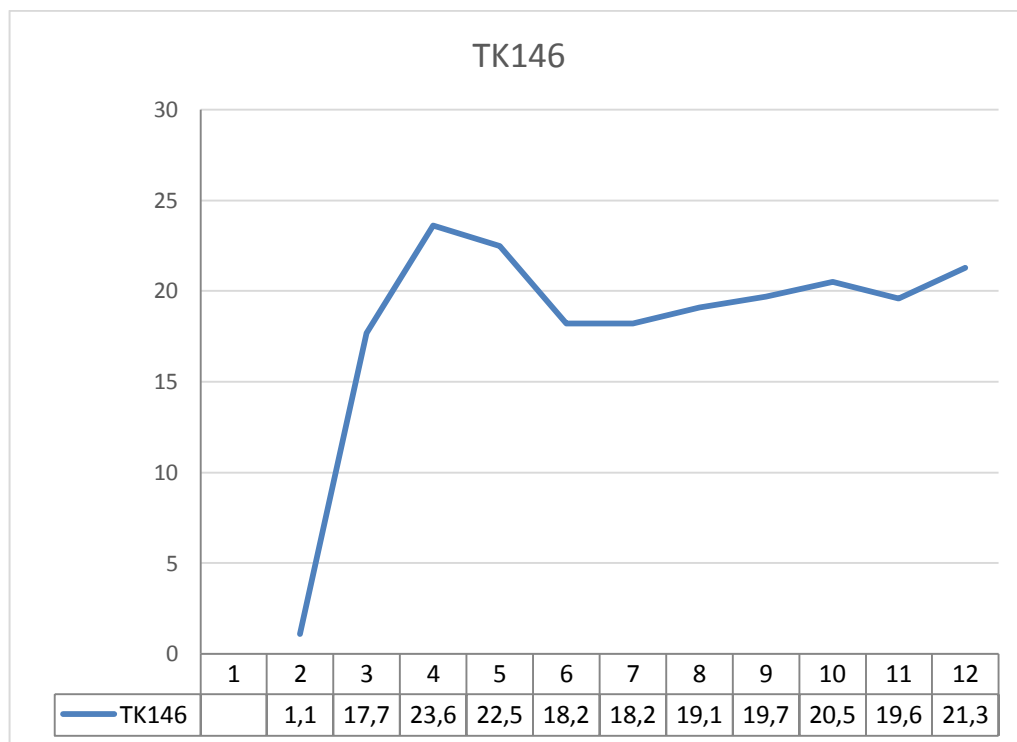
Kenttämittauksissa mitatut pussisuodattimien läpäisyasteiden keskiarvo mittausjak-  
solla, %



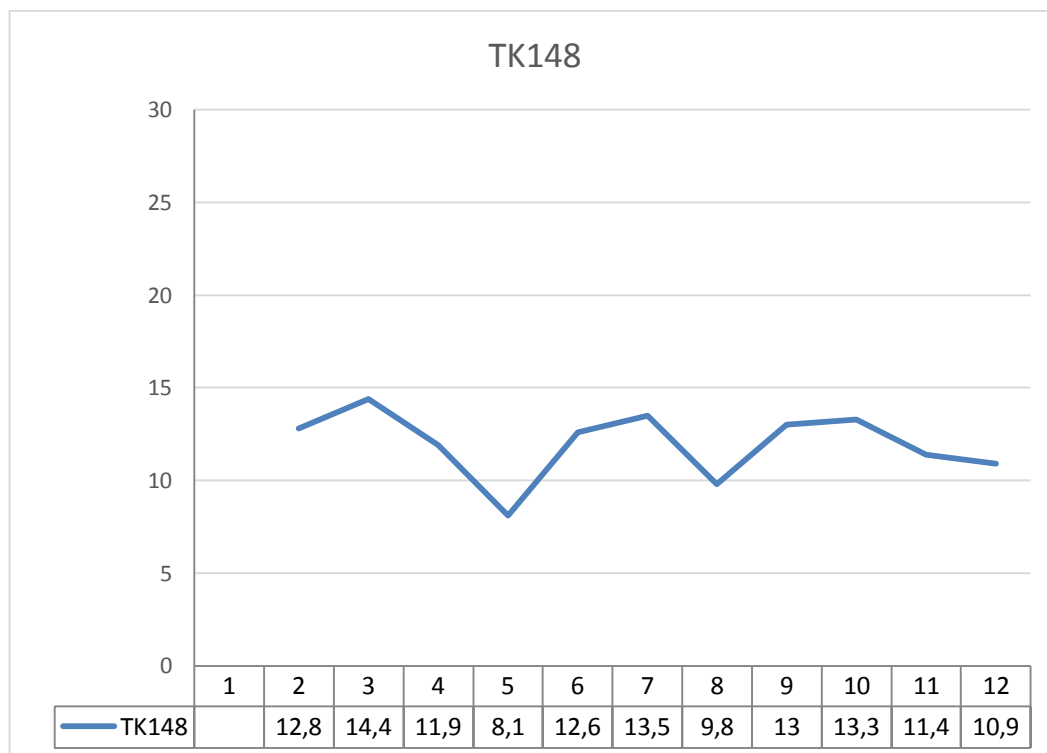
Kenttämittauksissa mitatut pussisuodattimien erotusasteiden keskiarvot mittaussyksiköllä, %



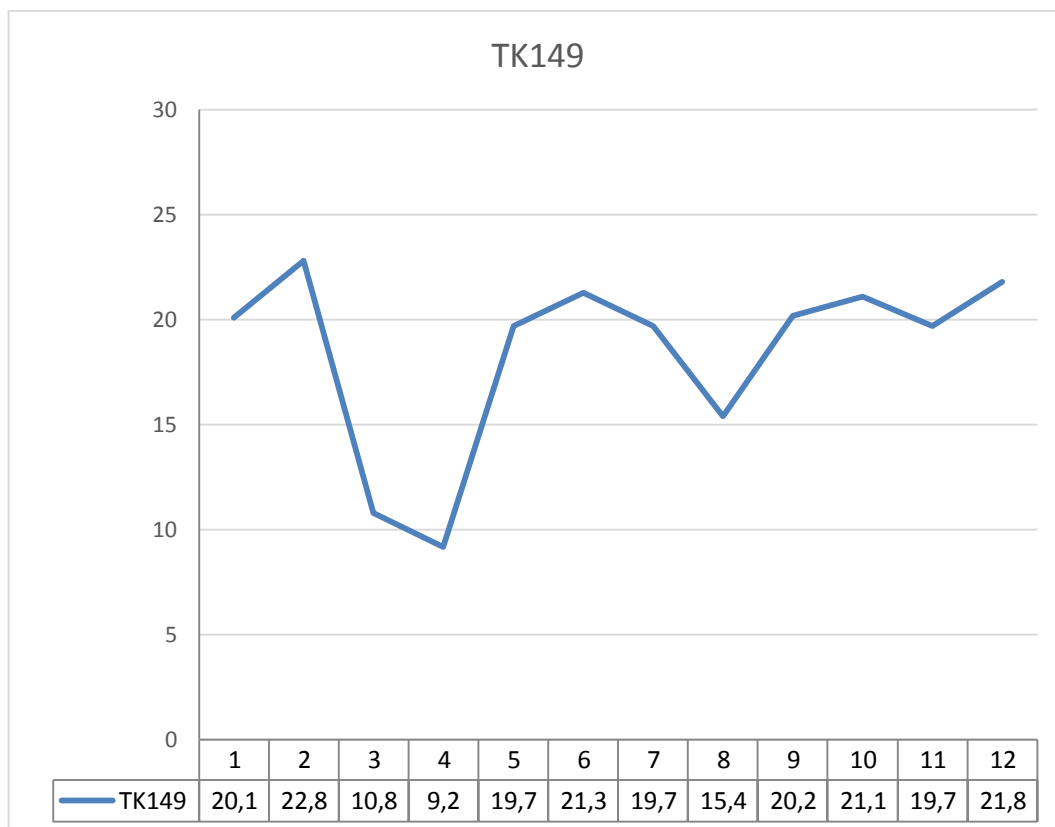
TK146:n laajapintasuodattimen painehäviö mittausjaksolla



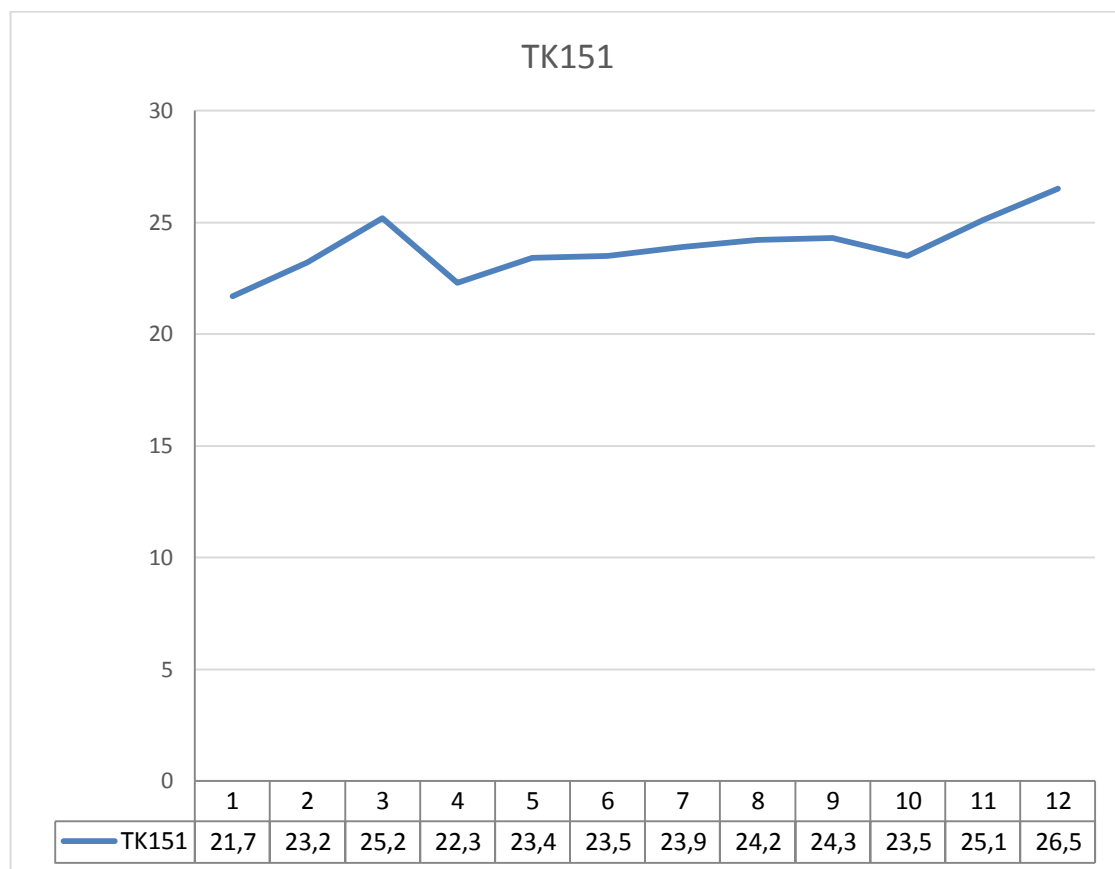
TK148:n laajapintasuodattimen painehäviö mittausjaksolla



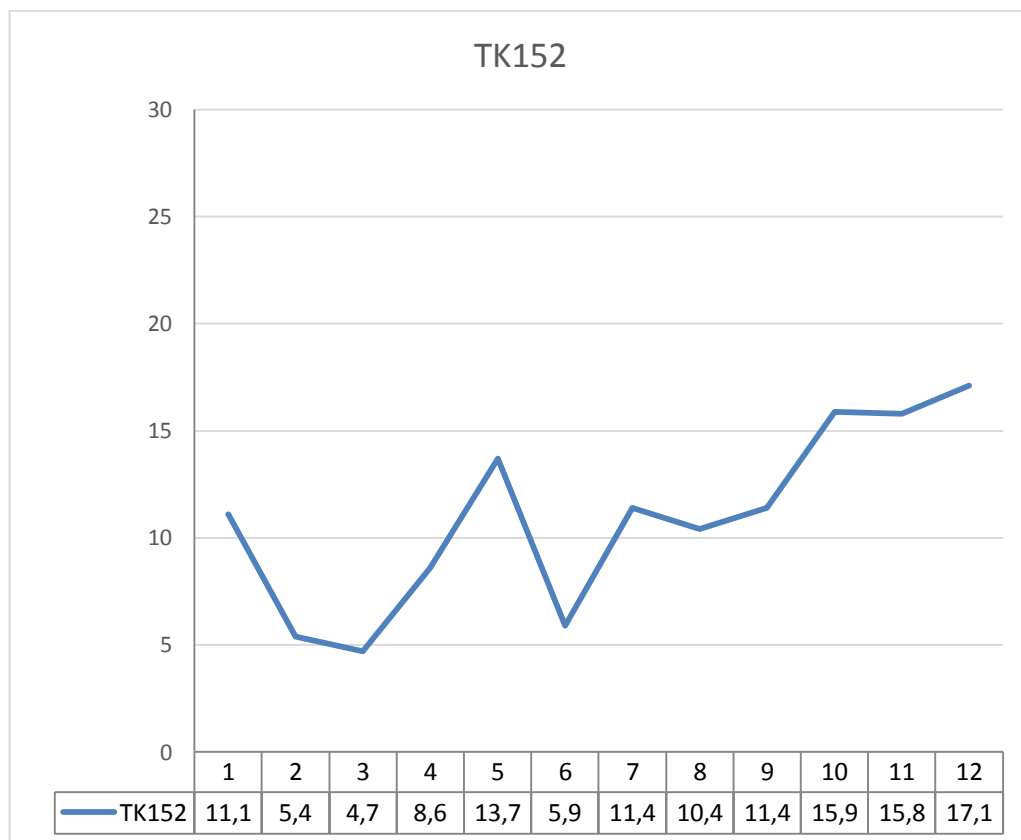
TK149:n laajapintasuodattimen painehäviö mittausjaksolla



TK151:n laajapintasuodattimen painehäviö mittausjaksolla

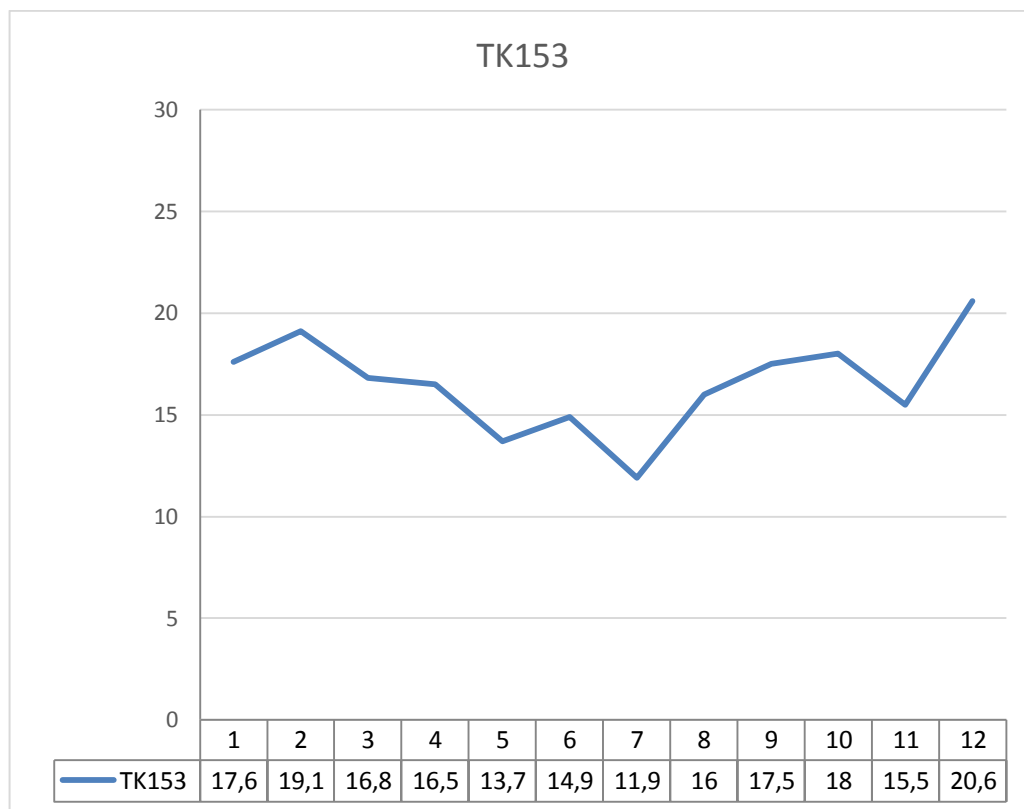


TK152:n laajapintasuodattimen painehäviö mittausjaksolla

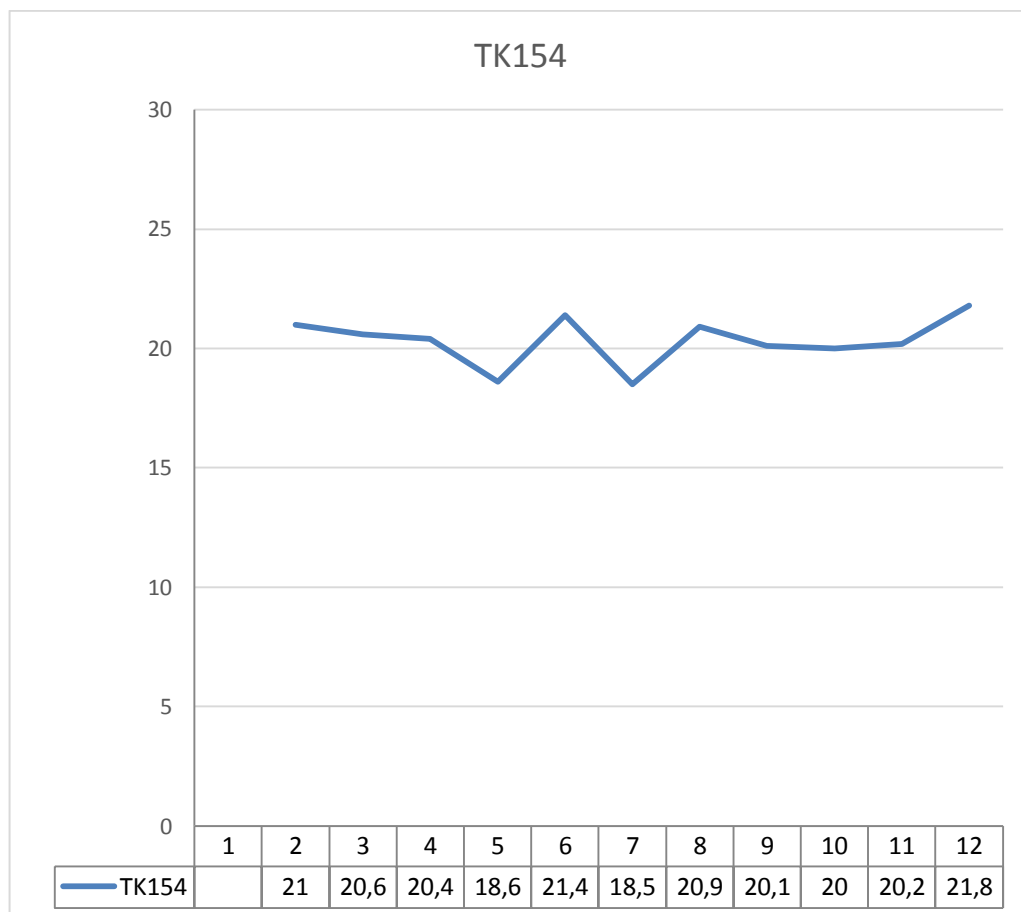




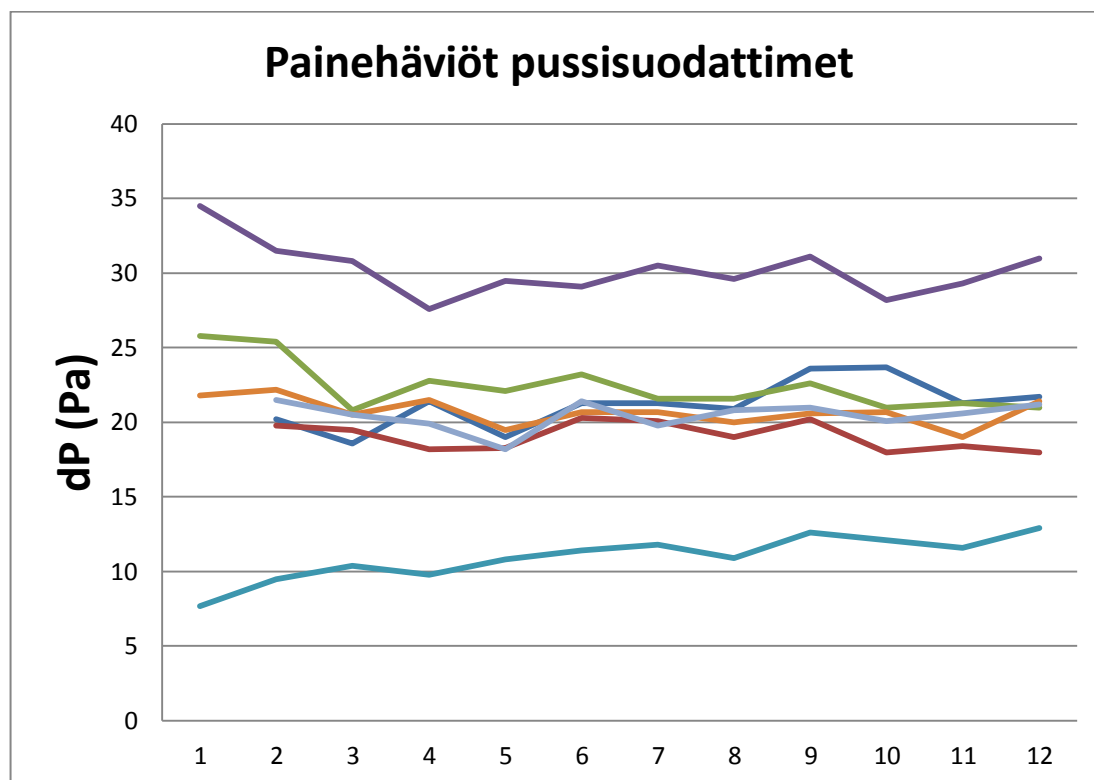
TK153:n laajapintasuodattimen painehäviö mittausjaksolla



TK154:n laajapintasuolettimen painehäviö mittausjaksolla



Mitatut paine-erot kaikkien mittauksessa mukana olleiden pussisuodattimien yli



Pussisuodattimien painehäviöt, Pa						
TK146	TK148	TK149	TK151	TK152	TK153	TK154
20,2	19,8	25,4	31,5	9,5	22,2	21,5
18,6	19,5	20,8	30,8	10,4	20,5	20,5
21,4	18,2	22,8	27,6	9,8	21,5	19,9
19	18,3	22,1	29,5	10,8	19,5	18,2
21,3	20,3	23,2	29,1	11,4	20,7	21,4
21,3	20,1	21,6	30,5	11,8	20,7	19,8
20,9	19	21,6	29,6	10,9	20	20,8
23,6	20,2	22,6	31,1	12,6	20,6	21
23,7	18	21	28,2	12,1	20,7	20,1
21,3	18,4	21,3	29,3	11,6	19	20,6
21,7	18	21	31	12,9	21,4	21,2