



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Tatu Hiltunen

Bioaerosolien muodostumisen ja leviämisen ehkäiseminen metsäteollisuuden biologisilla jätevedenpuhdistamoilla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 31.12.2015

Valvoja: Professori Riku Vahala

Ohjaajat: TkT Anna Mikola ja DI Timo Kanerva

Tekijä Tatu Hiltunen

Työn nimi Bioaerosolien muodostumisen ja leviämisen ehkäiseminen metsäteollisuuden biologisilla jätevedenpuhdistamoilla

Koulutusohjelma Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

Pää-/sivuaine Vesi- ja ympäristötekniikka**Koodi** Yhd-73

Työn valvoja Professori Riku Vahala

Työn ohjaaja(t) TkT Anna Mikola ja DI Timo Kanerva

Päivämäärä 31.12.2015**Sivumäärä** 84+6**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Biologisen jätevedenpuhdistuksen prosesseista vapautuu jäteveden mikrobeja ilmaan aerosolin muodossa. Bioaerosoli voi sisältää patogeenisiä mikrobeja ja endotoksiineja, jotka saattavat levitä ilman mukana ympäristöön aiheuttaen terveyshaittoja lähiympäristön ihmisille. Tutkimusten mukaan aerosolivälitteiset patogeenit voivat lisääntyä metsäteollisuuden biologisessa jätevedenkäsittelyssä ja aerosolisoituvat mm. ilmastusaltaan ilmastimien vaikutuksesta. Bioaerosolien muodostumiseen ja leviämiseen vaikuttavat altaassa käytettyjen ilmastimien tyyppi, jäteveden laatu, vallitseva säätila ja jätevedenpuhdistamon rakenteet.

Tavoitteena oli löytää tehokkaita keinoja bioaerosolialtistuksen vähentämiseksi metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla ja erityisesti ilmastusaltailla. Bioaerosolien ominaisuuksia ja erilaisia keinoja aerosolien muodostumisen ja leviämisen ehkäisemiseksi jätevedenpuhdistamoilla selvitettiin. Sovellettavia tekniikoita ovat täysi- tai osittaiset katteet, tuulensuoja-aidat sekä ilmastintyyppin vaihto. Potentiaalisimpia teknisiä ratkaisuja aerosolien leviämisen vähentämiseksi testattiin ilmastusaltaiden yhteydessä. Tuulensuoja-aidan vaikutuksia arvioitiin Metsä Board Kyrön tehtaalla ja läpäisevää katetta testattiin Kirkkonummella Volskodin pienpuhdistamolla. Tekniikoiden vaikutusta ympäristön aerosolien pitoisuuksiin selvitettiin mittaamalla pitoisuuksia hiukkasmittarilla. Mittauksia varten kehitettiin mittaushjelmaa, jonka avulla havainnoidaan ilmastusaltaan vaikutusta ympäristön hiukkaspitoisuuksiin suhteessa tuuliolosuhteisiin. Mallinnustyökalulla havainnollistettiin mittausten tuloksia.

Mittauksin pyrittiin selvittämään millä tavoin tuulensuoja-aidassa käytetty läpäisevä verkkomateriaali vaikuttaa aerosolien liikkeeseen. Tuulensuoja-aidan ja verkkokatteen käyttökelpoisuutta metsäteollisuuden bioaerosolien aiheuttamien riskien vähentämiseksi arvioitiin tulosten perusteella. Mittaustulosten perusteella läpäisevyydeltään noin 50% tuuliverkolla havaittiin olevan vaikutusta aerosolien leviämiseen. Tuulensuoja-aidan kanssa mitattiin suurempia hiukkaspitoisuuksia ilmastusaltaan päällä ja välittömässä läheisyydessä, mistä voi päätellä aerosolien kauemmaksi leviämisen vähentyvän. Biologiset riskit saattavat nousta ilmastusaltaan välittömässä läheisyydessä tuulensuoja-aitaa käytettäessä. Mittauksen tuloksia havainnollistettiin gaussilaiseen leviämismalliin perustuvalla Matlab-ohjelmalla. Bioaerosolien ominaisuudet ja maaston sekä rakenteiden vaikutuksen huomioon ottavilla malleilla voidaan saada parempia mallinnustuloksia biologisten riskien arvioimiseksi.

Tuulensuoja-aita on toimiessaan halutulla tavalla edullinen keino bioaerosolien leviämisen ehkäisemiseen, mutta vaatii kuitenkin vielä lisää selvityksiä sen kaikkien vaikutusten arvioimiseksi. Läpäisevällä verkkokatteella voidaan myös saavuttaa selviä muutoksia aerosolien leviämiseen ja sitä voidaan käyttää aerosolien liikkeen ohjaamiseen. Täydellinen kattaminen on tehokkain keino bioaerosolien riskien hallintaan leviämisen ilmastusaltaalta estyessä kokonaan.

Avainsanat Bioaerosoli, jätevesi, ilmastusallas, metsäteollisuus, tuulensuoja-aita, leviämismalli



Author Tatu Hiltunen

Title of thesis Prevention of formation and dispersion of bioaerosols at the biological waste water treatment plants of forest industry

Degree programme Degree Programme in Transportation and Environmental Engineering

Major/minor Water and Environmental Engineering

Code Yhd-73

Thesis supervisor Professor Riku Vahala

Thesis advisor(s) PhD Anna Mikola and MSc Timo Kanerva

Date 31.12.2015

Number of pages 84+6

Language Finnish

Abstract

Biological waste water treatment processes release microbes from the waste water to the air as aerosols. Bioaerosol can include pathogenic microbes and endotoxins which may disperse and cause health hazards in the nearby environment. According to research the aerosol transmissible pathogens can reproduce in the biological waste water treatment of forest industry and be aerosolized e.g. by the aerators in the aeration basin. The formation and dispersion of bioaerosols is affected by the type of aeration, quality of the waste water, weather conditions and the structures of the waste water treatment plant.

The objective was to find efficient methods to decrease the exposure to bioaerosols in the waste water treatment plants of forest industry and especially at the aeration basins. The properties of bioaerosols and different methods to prevent formation and dispersion of aerosols were studied. Full or partial covers, windbreak fences and the change of aeration type are applicable techniques. The most potential technical solutions for the control of aerosol dispersion were tested at aeration basins. The effects of windbreak fence were studied at Metsä Board Kyrö mill and porous mesh cover was tested at Kirkkonummi in a small scale municipal WWTP. The effects of the techniques were observed by measuring aerosol concentrations with a particle meter. A measurement program was developed with which the effect of the aeration basin in the surrounding particle concentrations in accordance with the wind conditions was observed. The measurement results were visualized with a modelling tool.

The measurements results were used to analyze how the porous mesh used in the wind break fence affects the aerosol dispersion. The usability of windbreak fence and mesh cover in decreasing the risks of bioaerosols in forest industry was evaluated. According to the results a windbreak fence with a porosity of 50% has effect on aerosol dispersion. Higher particle concentration were measured on and in the immediate vicinity of the aeration basin with the windbreak fence, which leads to decreased dispersion to larger distances. The biological risks may be elevated in the immediate vicinity of the aeration basin when a windbreak fence is used. The results of the measurements were visualized with a Matlab-program using the Gaussian dispersion model. Using models which include properties of bioaerosols and calculate the effects of topography and surrounding structures could give more accurate modelling results to evaluate the biological risks.

Windbreak fence is an inexpensive method in controlling bioaerosol dispersion, but it still needs more research to evaluate all the effects. Evident changes in aerosol dispersion can be achieved also with a porous mesh cover and it can be used to direct the aerosol flow. Complete covers are the most effective method in controlling the risks of bioaerosols when the dispersion is fully prevented.

Keywords Bioaerosol, waste water, aeration basin, forest industry, windbreak fence, dispersion

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin Metsäteollisuus Ry:n toimeksiantona vuoden 2015 toisen puoliskon aikana. Työ toteutettiin Aalto-yliopiston tekniikan tukisäätiön rahoituksella, jossa lahjoittajana toimi Metsäteollisuus Ry. Haluan kiittää asianomaisia mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja sen ohjaamisesta.

Erityisesti haluan kiittää diplomityön ohjaajia Anna Mikolaa ja Timo Kanervaa sekä ohjausryhmän muita jäseniä Fredrik Blomfeltia, Seija Vatkaa ja Kristiina Veitolaa. Kiitos myös työn valvojalle professori Riku Vahalalle. Lisäksi haluan kiittää Vesitekniikan laitoksen, kaikkien työhön liittyvien paperitehtaiden sekä Kirkkonummen vesihuoltolaitoksen työntekijöitä avusta työn toteutuksen kanssa.

Espoo 31.12.2015

Tatu Hiltunen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	1
Merkinnät ja lyhenteet.....	3
1 Johdanto	4
2 Bioaerosolit biologisessa jätevedenkäsittelyssä.....	6
2.1 Bioaerosolien lähteet metsäteollisuudessa	7
2.1.1 Ilmastusallas	7
2.1.2 Jäähdytystornit	10
2.1.3 Lietteen käsittely	10
2.2 Mikrobit ja muut taudinaiheuttajat bioaerosoleissa.....	11
2.2.1 Mykobakteerit	12
2.2.2 Legionella.....	13
2.2.3 Endotoksiinit	14
2.3 Bioaerosolien muodostumisen ja leviämisen hallinta	15
2.3.1 Pinnalla kelluvat katteet	15
2.3.2 Ilmastintyyppin vaikutus aerosolien muodostumiseen	16
2.3.3 Katteet	17
2.3.4 Tuulensuoja-aidat ja kasvillisuusaidanteet.....	20
2.3.5 Biosidien käyttö patogeeneiden hallintaan	24
2.4 Bioaerosoleilta suojautuminen	24
2.5 Bioaerosolien mittaamenetelmät	25
2.5.1 Mikrobiologiset viljelymenetelmät	25
2.5.2 Mikrobilajien tunnistusmenetelmät, PCR ja mikroskopointi.....	27
2.5.3 Biologisten hiukkasten optiset mittalaitteet	27
2.5.4 Hiukkasmittarit.....	28
2.6 Aerosolien leviämisen mallinnusmenetelmät.....	29
3 Menetelmät ja materiaalit.....	34
3.1 Mittausmenetelmät	34
3.2 Tutkimuskohteet, testatut tekniikat ja mittaukset.....	36
3.2.1 Tuulensuoja-aita, Metsä Board Kyrö	37
3.2.2 Verkkokate, Volskodin pienpuhdistamo	41
3.3 Aerosolien leviämisen mallintaminen	43
3.3.1 Mallinnuksen lähtöarvojen etsiminen	43
4 Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	46
4.1 Hiukkaskokojakaumat mittauskohteissa	46
4.2 Tuulensuoja-aita, Metsä Board Kyrö	46
4.2.1 Sääaseman mittaustulokset.....	47
4.2.2 Taustan hiukkaspitoisuudet.....	49
4.2.3 Ilmastusaltaan päältä mitatut pitoisuudet	50
4.2.4 Mittaussarjat	51
4.2.5 Mittaussarjojen vertailu hiukkaskokoluokittain.....	54
4.2.6 Tulosten tarkastelu	57
4.2.7 Virhelähteet.....	58
4.3 Verkkokate, Volskodin pienpuhdistamo	59
4.3.1 Tulosten tarkastelu	62
5 Tekniikoiden kustannusvertailu	63

6	Mallinnetut hiukkaspitoisuuksien leviämiskuviot.....	64
6.1	Tuulen nopeuden vaikutus mallinnettuun leviämiskuvioon.....	67
6.2	Mallinnuksen soveltuminen bioaerosolien riskien arviointiin	70
7	Johtopäätökset.....	72
8	Suosituksset	73
8.1	Suosituksset bioaerosolien hallitsemiseksi	73
8.2	Suosituksset bioaerosolien mittaamiseksi	73
8.3	Jatkotutkimustarpeet.....	74
	Lähdeluettelo.....	75
	Liiteluettelo	84
	Liitteet	

Merkinnot ja lyhenteet

A	[m ³]	lähteen pinta-ala
C	[1/m ³]	hiukkaspitoisuus
H	[m]	lähteen efektiivinen korkeus
U	[m/s]	tuulen nopeus
Q	[1/s] tai [g/s]	lähteestä vapautuva massavirta
d	[m]	halkaisija
g	[m/s ²]	putoamiskiihtyvyys
v _{dep}	[m/s]	laskeumanopeus
v _{set}	[m/s]	laskeutumisnopeus
λ	[1/s]	inaktivaatiovakio tarkasteltavalle mikrobille
σ _y ja σ _z	[m]	pitoisuusjakauman keskihajonnan mukaiset parametrit
μ	[kg/m*s]	ilman dynaaminen viskositeetti
ρ	[kg/m ³]	tiheys

CFD	Computational fluid dynamics
COD	Chemical oxygen demand
EU	Endotoxin units
FLAPS	Fluorescence Aerosol Particle Sensor
IMD	Instantaneous Microbial Detection
MBBR	Moving bed bioreactor, Kantoainebioreaktori
ODTS	orgaanisen pölyn aiheuttama toksinen oireyhtymä
THL	Terveysten ja hyvinvoinnin laitos
UV-APS	Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer
WIBS	Wideband Integrated Bioaerosol Sensor

1 Johdanto

Tämä diplomityö käynnistettiin Metsäteollisuus Ry:n tilaamana ja toteutettiin yhteistyössä Suomessa toimivien metsäteollisuusyhtiöiden kanssa. Työn tarkoituksena oli selvittää metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla muodostuvien bioaerosolien aiheuttamien riskien hallintaan soveltuvia teknisiä ratkaisuja. Biologisen jätevedenpuhdistuksen prosesseista vapautuu mekaanisen sekoittumisen, virtauksen ja tuulen aiheuttaman turbulenssin sekä ilmastimien vaikutuksesta jäteveden mikrobeja ilmaan aerosolin muodossa. Bioaerosoli voi sisältää patogeenisiä mikrobeja ja endotoksiineja, jotka saattavat levitä ilman mukana ympäristöön aiheuttaen terveyshaittoja lähiympäristön ihmisille. Altistuminen bioaerosoleille hengitysteiden kautta voi aiheuttaa infektioita, allergiaa, astmaa ja erilaisia altistuksen oireita kuten kuumetta, lihaskipua, päänsärkyä ja silmien ärsytystä.

Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamojen työntekijöiden altistumista aerosolien välityksellä leviävälle taudinaiheuttajille on tutkittu Suomessa ja jatkuvia tutkimuksia on edelleen käynnissä. Tutkimusten tulosten perusteella on havaittu, että työntekijät altistuvat aerosolien välityksellä ainakin Legionella-bakteereille, mykobakteereille ja endotoksiineille (FEEL-tutkimus, ESIMEPATO 1 ja 2, MEPATO 1 ja 2). Nämä taudinaiheuttajat voivat kulkeutua ilmassa aerosolien mukana pitkien matkojen päähän lähteestään ja aiheuttaa vakavia hengitystieinfektioita. Legionellaa ja muita patogeenisiä mikrobeja voi olla jo tehtaalta puhdistamolle tulevassa jätevedessä ja ne lisääntyvät sopivissa olosuhteissa monissa biologisen jätevedenkäsittelyn prosesseissa.

Tutkimusten mukaan aerosolivälitteiset patogeenit voivat lisääntyä tehokkaasti metsäteollisuuden biologisessa jätevedenkäsittelyssä ja aerosolisoituvat mm. ilmastusaltaan ilmastimien vaikutuksesta. Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla olosuhteet poikkeavat yhdyskuntajätevedenpuhdistamoista jäteveden laadun ja lämpötilan puolesta. Korkeampi lämpötila tehostaa biologista jätevedenkäsittelyä, mutta myös edistää joidenkin patogeenisten mikrobien kasvua. Aerosolien muodostumiseen ja leviämiseen vaikuttavat altaassa käytettyjen ilmastimien tyyppi, jäteveden laatu, vallitseva säätila ja jätevedenpuhdistamon rakenteet.

Metsäteollisuuden prosesseista jätevedenpuhdistamolle tulevan jäteveden lämpötilaa lasketaan usein jäähdystorneilla, jotka toimivat myös otollisena kasvualustana mikrobeille ja voivat levittää bioaerosoleja poistoilman mukana. Jätevedenkäsittelyssä syntyvään lietteeseen mikrobit konsentroituvat ja lietteen käsittely aiheuttaa myös suuria bioaerosolipitoisuuksia. Jäähdystorneille on laadittu toimenpidesuunnitelmat (Tuhkanen ja Hiltunen 2008) bioaerosolien muodostuksen ja työntekijöiden altistuksen vähentämiseksi ja lietteenkäsittelyn aerosolit ovat paremmin hallinnassa suljetussa rakennuksessa ja poistoilma usein käsitellään (Tuhkanen et al. 2007). Ilmastusaltaiden yhteydessä ei ole käytössä selkeitä keinoja ympäristön bioaerosolipitoisuuksien vähentämiseksi.

Tämän diplomityön tavoitteena oli löytää keinoja bioaerosolialtistuksen vähentämiseksi metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla ja erityisesti ilmastusaltailla työsuojelun ohjeistuksen parantamiseksi. Kirjallisessa osuudessa selvitetään bioaerosolien ominaisuuksia ja erilaisia keinoja aerosolien muodostumisen ja leviämisen ehkäisemiseksi jätevedenpuhdistamoilla.

Kirjallisuuden perusteella valittiin potentiaalisimmat tekniset ratkaisut aerosolien leviämisen vähentämiseksi, joita testattiin ilmastusaltaiden yhteydessä. Tuulensuoja-aidan

vaikutuksia arvioitiin Metsä Board Kyrön tehtaalla ja läpäisevää katetta testattiin Kirkkonummella Volskodin pienpuhdistamolla. Tekniikoiden vaikutusta ympäristön aerosolien pitoisuuksiin selvitettiin mittaamalla pitoisuuksia hiukkasmittarilla. Mittauksia varten kehitettiin mittausohjelmaa, jonka avulla havainnoidaan ilmastusaltaan vaikutusta ympäristön hiukkaspitoisuuksiin suhteessa tuuliolosuhteisiin.

Mittauksin pyrittiin selvittämään millä tavoin tuulensuoja-aidassa käytetty läpäisevä verkkomateriaali vaikuttaa ilman virtauksien ja aerosolien liikkeeseen. Ilmastusaltaalla tehdyillä mittauksilla haluttiin selvittää vähentyvätkö altaalta tulevien aerosolien pitoisuudet ympäristössä tuulensuojaverkon vaikutuksesta. Tuulensuoja-aidan ja verkkokatteen käyttökelpoisuutta metsäteollisuuden bioaerosolien aiheuttamien riskien vähentämiseksi arvioitiin tulosten perusteella. Lisäksi mittaustuloksia käytettiin hiukkasten leviämisen matemaattisessa mallinnuksessa. Mittaustuloksien mallinnuksella havainnollistettiin aerosolien leviämistä ja tuulennopeuden vaikutusta hiukkaspitoisuuksien laimenemiseen. Mallinnustyökalun käyttökelpoisuutta bioaerosolien leviämisen tutkimukseen arvioitiin käyttökokemuksen ja mallin antamien tuloksien pohjalta.

Koska mikrobeja vapautuu jätevedenkäsittelyssä käytännössä aina aerosoleja muodostuessa, tutkimuksessa selvitettiin yleisesti aerosolien leviämistä eikä mahdollisten biologisten kontaminanttien läsnäoloon tai laatuun tutkimuskohteissa otettu kantaa. Tutkimus rajattiin koskemaan vain biologisen jätevedenpuhdistamon ilmastusaltaalta vapautuvia bioaerosoleja, koska muut jätevedenpuhdistukseen liittyvät bioaerosolien lähteet ovat paremmin hallittavissa.

2 Bioaerosolit biologisessa jätevedenkäsittelyssä

Bioaerosolit ovat ilman mukana kulkeutuvia suspendoituneita aerosolihiukkasia, jotka sisältävät eläviä organismeja tai biologista alkuperää olevaa materiaalia kuten siitepölyä, pölypunkkeja, mikrobeja, mikrobin osia tai niiden aineenvaihdunnan tuotteita. Bioaerosolihiukkaset voivat olla nestemäisiä pisaroita tai kiinteitä hiukkasia. Bioaerosoleja voi levitä ilmaan kaikesta mikrobien aiheuttaman orgaanisen aineksen hajoamisesta ympäristössä tuulen ja muunlaisen sekoittumisen välityksellä. Ne ovat osa biosfääriä ja ovat läsnä kaikkialla tavallisten ympäristöjen ilmassa. Luonnollinen bioaerosolien pitoisuus ilmassa vaihtelee sijainnin, vuodenajan ja sääolosuhteiden mukaisesti. (Kummer ja Thiel 2008, Goyer et al. 2001.)

Monet ihmisten toiminnot johtavat kohonneisiin bioaerosolipäästöihin ympäröivässä ilmassa. Tavallisia bioaerosolien lähteitä ovat jätteiden ja jätevesien käsittely, kaatopaikat, maatalous, ruoan tuotanto, ilmanvaihtojärjestelmät, jäähdytysjärjestelmät sekä monet teollisuuden prosessit. (Kummer ja Thiel 2008.) Bioaerosolit tavallisissa ympäristöissä eivät aiheuta vaaraa, mutta jotkin antropogeenisistä lähteistä tulevat mikrobit voivat aiheuttaa tauteja aerosolivälitteisesti hengitysteihin joutuessaan (Goyer et al. 2001).

Jätevedet sisältävät suuria määriä mikro-organismeja, jotka voivat vapautua ilmaan aerosolien mukana jätevedenkäsittelyn prosesseissa. Osa näistä voi olla patogeenejä eli taudinaiheuttajia sekä infektoida aerosolien välityksellä. Bioaerosoleja muodostuu biologisessa jätevedenkäsittelyn kaikissa vaiheissa, missä ilma-vesirajapinnassa tapahtuu turbulenssia ja sekoittumista. Mitä enemmän jätevedessä on mikrobeja, sitä enemmän niitä voi päästä myös vapautumaan ilmaan pisaroiden mukana. Puhdistetusta jätevedestä ei yleensä vapaudu mitattavia määriä bioaerosoleja. (Karra ja Katsivela 2007, Carducci et al. 2000.)

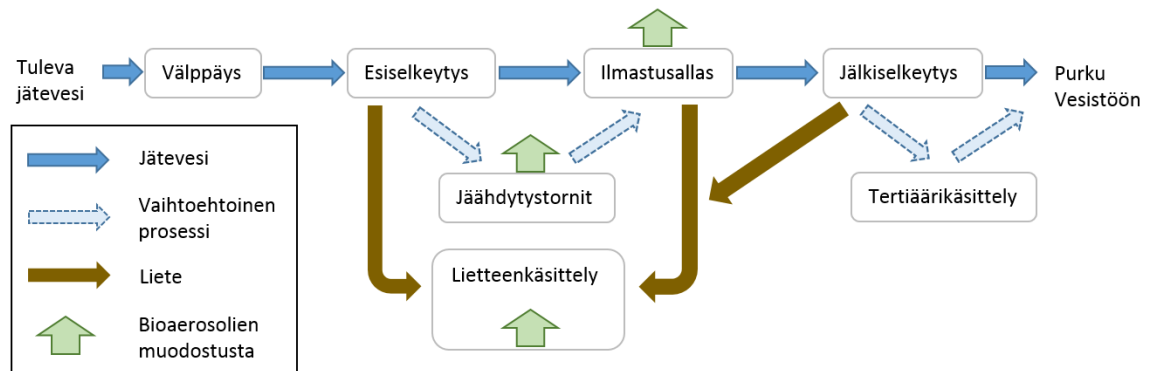
Sekoittimet, ilmastimet, lämpötila, ilmankosteus, tuulen aiheuttama turbulenssi ja tuulen nopeus vaikuttavat aerosolien muodostumiseen. Jäteveden roiskeet ja pisarat leviävät ilmaan, missä mikrobit vapautuvat tuulen mukana kulkeviksi partikkeleiksi veden haihtuessa pisaroista osaksi tai kokonaan. Eniten jätevedenpuhdistamoilla muodostuu bioaerosoleja jäähdytystorneissa, välppäyksessä, hiekanerotuksessa, avoimissa virtauskouruissa, ilmastusaltailla ja lietteenkäsittelyssä. Ilmasta mitattavat pitoisuudet ovat kohde- ja ajankohtariippuvaisia eikä pitoisuuden suuruutta pystytä arvioimaan vastaavanlaisten kohteiden pitoisuuksien perusteella. (Tuhkanen et al. 2007, Laitinen et al. 1991, Sánchez-Monedero et al. 2008, Carducci et al. 2000.)

Jätevedenkäsittelyn lähellä työskentelevät ihmiset voivat altistua jäteveden sisältämille mikrobeille aerosolien välityksellä. Bioaerosolit voivat levitä tuulen mukana kauemaksi syntypaikaltaan ja aiheuttaa infektioriskiä myös puhdistamon alueen ulkopuolella. Mikrobeille altistuminen hengityksen kautta tulee ottaa huomioon työsuojelussa. Hyvin laaditulla kunkin laitoksen olosuhteisiin suunnitellulla vesivälitteisten riskien systemaattisella hallintasuunnitelmalla voidaan välttää altistumista bioaerosoleille. Työsuojelun kannalta on tärkeää, että työntekijät käyttävät asianmukaisia suojaimia bioaerosolien lähteiden lähellä. (Tuhkanen et al. 2007.)

2.1 Bioaerosolien lähteet metsäteollisuudessa

Sellu- ja paperiteollisuudessa on useita prosesseja, joissa voi muodostua bioaerosoleja. Pääsääntöisesti itse tuotannon prosesseissa on kuitenkin käytössä niin korkeat prosessivesien lämpötilat, että mikrobit eivät pysty lisääntymään tai ne tuhoutuvat. Lisäksi monissa prosessivesijärjestelmissä käytetään usein biosideja mikrobin kasvun hillitsemiseksi. (Tuhkanen et al. 2007.) Metsäteollisuuden mikrobiologisista riskeistä ja niiden hallinnasta on tehty opas, jonka avulla pyritään vähentämään työterveydellisiä riskejä (Liukkonen et al. 2010). Henkilökohtainen suojautuminen ja mahdollinen aerosolipäästöjen ehkäiseminen tulisi toteuttaa metsäteollisuudessa erityisesti jätevedenkäsittelyssä, missä on ihanteelliset kasvuolosuhteet hengitystieinfektioita aiheuttavien mikrobin kasvuun. Metsäteollisuuden jätevedet sisältävät paljon helposti hajoavaa orgaanista ainetta ja ovat lämpötilaltaan sopivat (20-45°C) mesofiilisten mikrobin lisääntymiselle, joista monet voivat olla taudinaiheuttajia. (Tuhkanen et al. 2007.)

Metsäteollisuuden jätevedenkäsittelystä leviäviä bioaerosoleja on tutkittu mm. Ruotsissa, Norjassa ja Suomessa 2000-luvulta lähtien. Työntekijöiden on havaittu altistuvan aerosolien välityksellä leviävistä taudinaiheuttajista ainakin legionelloille, mykobakteereille ja endotoksiineille. Muutamia sairastumistapauksia on ollut ja vasta-aineiden noususta on havaittu laajempaakin altistumista patogeeneille. Tärkeimpinä bioaerosolien aiheuttamien tautien lähteinä metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla pidetään jäähdytystorneja, lietteenkäsittelyä ja ilmastusaltaita (Kuva 1). Myös avonaisissa virtauskouruissa ja jälkiselkeytyksessä voi muodostua bioaerosoleja, mutta muodostus on vähäisempää kourujen pienen alan ja selkeyttimien tyynen pinnan takia. Metsäteollisuuden välppäykseen tulevassa jätevedessä ei ole vielä juurikaan mikrobeja ja hiekanerotusta ei tarvita, joten nämä prosessit eivät ole bioaerosolien päästölähteinä metsäteollisuudessa. (Kusnetsov ja Torvinen 2008, Kusnetsov et al. 2007, Kusnetsov et al. 2006, Blatny et al. 2008, Tuhkanen et al. 2007.)



Kuva 1. Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamon yleisimmät prosessit ja bioaerosolien lähteet.

2.1.1 Ilmastusallas

Biologisen jätevedenkäsittelyn aktiivilietteen ilmastusaltaassa kasvaa hyvin tiheä ja monilajinen mikrobikasvusto suspendoituneena aktiivilietteessä. Mitä suurempi COD-pitoisuus tulevassa jätevedessä on, sitä enemmän syntyy myös biomassaa. (Barge et al. 2014, Bauer et al. 2002.) Perinteisessä aktiivilieteprosessissa biomassa kelluu vapaana suspensiona ilmastusaltaassa. Jäteveden biomassaa halutaan pitää tasaisesti jakaantuneena suspensiona koko altaan tilavuudessa, jotta biologinen puhdistusprosessi toimisi te-

hokkaasti ja liete ei laskeutuisi altaan pohjalle. Ilmastimet ja sekoittimet pitävät biomassaa liikkeessä ja samalla aiheuttavat turbulenssia, roiskeita ja haihduntaa altaan pinnalla. Altaan jäteveden pintaan turbulenssia aiheuttavat toiminnot voivat helposti vapauttaa aerosoleja ilmaan mukanaan altaan mikrobeja. (Blatny et al. 2008, Sánchez-Monedero et al. 2008, Hung et al. 2010, Karra ja Katsivela 2007.)

Ilmastusaltaassa käytettävä ilmastintyyppi (Kuva 2) vaikuttaa suuresti syntyvien aerosolien määrään ja laatuun. Pinnan agitaatiota aiheuttavat turbiini- tai roottorimalliset pintailmastimet aiheuttavat huomattavasti enemmän aerosolien muodostusta kuin pohjailmastimet ja erityisesti pientä ilmakuplaa synnyttävät hienokuplailmastimet. Altaaseen valittu ilmastintyyppi riippuu altaan rakenteesta, iästä, jäteveden ominaisuuksista ja suunnitellun prosessin ilmastuksen tarpeesta. Monissa tapauksissa ilmastimia vaihdetaan vähemmän aerosoleja muodostaviin diffusori-ilmastimiin yleensä ilmastuksen hyötysuhteen parantamiseksi. (Brandi et al. 2000, Hung et al. 2010, Sánchez-Monedero et al. 2008, Fernando ja Fedorak 2005.)



Kuva 2. Ilmastintyyppejä: turbiinipintailmastin (vas. ylhäällä, Wastewater study 2015), roottori-ilmastin (Envirodyne Systems Inc. 2015), Kelluva turbiinipohjailmastin (VaraCorp 2015), OKI-pohjailmastin (Sulzer 2015), Diffusorilevyilmastin (Wa-Teq 2015), diffusoriputki-ilmastin (Shanghai Yanph Environment S&T Co. 2015).

Kokonaismikrobimäärää kuvaavien aerobisten mikrobien ja heterotrofisten bakteerien pitoisuudet ovat metsäteollisuuden jätevesien käsittelyn ilmastusaltaissa suuruusluokaltaan vastaavia kuin yhdyskuntajätevesien käsittelyn ilmastusaltaissa (Kusnetsov et al. 2006). Metsäteollisuuden ilmastusaltaista on löydetty suurempia pitoisuuksia ilmastuslaitteita patogeeneja, kuten mykobakteereja ja legionellaa, kuin yhdyskuntajätevesienpuhdistamoilta. Tämä johtuu suurelta osin metsäteollisuuden jätevesien korkeasta lämpötilasta. Suuresta taudinaiheuttajapotentiaalista johtuen metsäteollisuuden ilmastusaltaita

pidetään työsuojelun kannalta riskikohteina, joiden aiheuttamien riskien varalle täytyy tehdä suunnitelmia ja ohjeistusta. (Blatny et al. 2011, Kusnetsov et al. 2006.)

Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoiden ilmastusaltaista on mitattu viljeltäviä legionella-pitoisuuksia 10^{10} pmy/l asti ja ilmastusaltaan yläpuolelta on mitattu pitoisuuksia $5 \cdot 10^3$ pmy/m³ asti (Blatny et al. 2008 ja 2011). Viljeltäviä mykobakteereita on mitattu ilmastusaltaista $6,6 \cdot 10^9$ pmy/l asti. Yhdyskuntajätevesien puhdistamoilla vastavasti pitoisuudet ilmastusaltaissa ovat legionellalle alle 1000 pmy/l luokkaa ja mykobakteereille $6,5 \cdot 10^7$ pmy/l asti. Näitä patogeenisiä mikrobeja on selkeästi enemmän ainakin viljelemällä lisääntymiskykyisinä soluina metsäteollisuuden ilmastusaltaissa verrattuna yhdyskuntajätevesien puhdistamoihin. (Kusnetsov et al. 2006.)

Sawyer et al. (1996) tutkivat bioaerosolien pitoisuuksien muutoksia ilmastusaltaan yläpuolella ja havaitsivat bioaerosolipitoisuuksien vähenevän huomattavasti ilmapatsaassa korkeuden lisääntyessä. Mittauksia tehtiin tasaisesti kahdeksasta pisteestä 0-3 metrin korkeudelta ja heterotrofisten bakteerien pitoisuudet vähenivät kolmen metrin korkeudelle vähintään noin puoleen vedenpinnan läheisyyden tasosta. Heterotrofisten bakteerien pitoisuudet ilmastusaltaan yllä vaihtelivat välillä 170-2500 pmy/m³. Pitoisuuksien vähenemisen syiksi olosuhteiden perusteella arveltiin painavampien hiukkasten laskeutuminen ja organismien kuoleminen. Muita syitä voivat olla pitoisuuksien laimeneminen ympäröivässä ilmassa ja tuulen aiheuttama ilmapatsaan leviäminen.

Ilmastusaltaiden bioaerosolien muodostumista ja leviämistä on tutkittu melko paljon, mutta mitään selkeitä ja yksinkertaisia ratkaisukeinoja riskien vähentämiseksi ei ole. Ilmastustyyppin vaihto hienokuplailmastimiin vähentää huomattavasti aerosolien muodostusta, mutta joissain tapauksissa näilläkin syntyy huomattavaa altaan pinnan turbulenssia suuren ilmastustarpeen takia. Metsäteollisuuden jätevesissä on korkea COD-pitoisuus ja lämpötila, minkä johdosta ilmastusaltaan lietepitoisuus pysyy korkeana lisätilan ilmastuksen tarvetta. (Karra ja Katsivela 2007, Kummer ja Thiel 2008, Sánchez-Monedero 2008, Kusnetsov et al. 2006, Barge et al. 2014.)

Aktiivilietteen mikrobipopulaatio on biologisen jätevedenpuhdistuksen perusta, joten bioaerosolien ehkäiseminen mikrobeja tuhoamalla on mahdotonta. Ilmastusaltaista ei tällöin voida hävittää riskiä aiheuttavia mikrobeja toisin kuin muista bioaerosolien lähteistä kuten jäähdytystorneista. Lisäksi ulkona sijaitsevien ilmastusaltaiden aerosolit pääsevät leviämään vapaasti ympäristöön, jolloin poistoilman käsittely ei ole mahdollista toisin kuin esimerkiksi lietteen kuivauksen rakennuksissa. (Bauer et al. 2002, Tuhkanen et al. 2007.)

Varmin tapa hallita täysin altaalla muodostuvat aerosolit on kattaa allas tiiviisti ja järjestää poistoilman käsittely. Monet yritykset tarjoavat kattamisratkaisuja, mutta nämä ovat usein kalliita ja voivat vaikeuttaa huoltotoimenpiteitä altaalla. (Guo et al. 2014, Tuhkanen et al. 2007, Kummer ja Thiel 2008, Environetics 2015, Ciffa Systemes 2015, GTI covers 2015.) Muita mahdollisia keinoja aerosolien leviämisen ehkäisemiseksi ilmastusaltailta ovat roiskesuojat, osittaiset katteet, tuulensuoja-aidat ja kasvillisuusaidanteet (Kummer ja Thiel 2008, Hong et al. 2015, Cornelis ja Gabriels 2005, Burley et al. 2011, Malone 2004, Santiago et al. 2007).

2.1.2 Jäähdytystornit

Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla joudutaan yleensä jäähdyttämään tehtaan prosesseista syntyvää jätevettä ennen biologiseen puhdistusprosessiin johtamista, koska liian lämmin vesi tuhoaa biologisen käsittelyn perustana olevia mikrobeja. Jäähdytystornien käyttö on yksi yleisesti käytetty tekniikka jäteveden jäähdyttämiseen. Jäähdytystornilla siirretään lämpöä vedestä ympäröivään ilmaan haihduttamalla, jolloin syntyy runsaasti vesihöyryä ja pisara-aerosoleja. Jäähdytystorneissa on kosteuden ja sopivan korkean lämpötilan vuoksi mesofiilille mikrobeille ihanteelliset kasvuolosuhteet ja bakteerikasvusto kertyy jatkuvasti jäähdytystornin rakenteisiin tornin ollessa käytössä. Biofilmistä irtoaa jatkuvasti mikrobeja, jotka voivat levitä ympäristöön tornin poistoilman mukana aerosolien muodossa. (Tuhkanen et al. 2007, Tuhkanen ja Hiltunen 2008.) Jäähdytystornit ovat olleen yksi yleisimmistä bioaerosolivälitteisten infektioiden lähteistä. Metsäteollisuuden jäähdytystorneista on löydetty useissa kohteissa legionellaa ja mykobakteereja. (Kusnetsov et al. 2006 ja 2007.)

Metsäteollisuuden jäähdytystorneille tuotannon prosesseista tuleva jätevesi on usein suhteellisen steriiliä eikä sisällä enterobakteereja tai viruksia. Tehtaiden prosessit lämmittävät vettä usein niin lämpimäksi, että mikrobitoiminta ei ole aktiivista vielä prosessien aikana. Prosesseista tulevat jätevedet voivat kuitenkin jo sisältää haitallisia mikrobeja riippuen raakaveden hygieenisestä laadusta ja tehtaan prosessien luomista kasvuolosuhteista mikrobeille. (Tuhkanen et al. 2007.) Usein jäähdytystorneille tulevaan jätevedeen puretaan lietteenkäsittelyn rejektivedet, jotka sisältävät suuria määriä ilmalevitteisiä patogeneja. Patogeenit mikrobit lisääntyvät jäähdytystornien muodostamissa hyvissä kasvuolosuhteissa muodostaen biofilmiä tornien rakenteisiin. Näin ollen jäähdytystorneille tuleva haitallisten mikrobien kuorma tulisi minimoida johtamalla rejektivedet suoraan ilmastusaltaaseen. (Kusnetsov et al. 2006).

Jäähdytysjärjestelmät tulisi suunnitella niin, että poistoilma ohjattaisiin pois riskikohteista ja säännöllinen puhdistus, desinfiointi sekä näytteenotto olisivat helposti toteutettavissa. Pisanan erottimilla poistoilman ulostulossa saadaan erotettua ja hallittua suuri osa ilman mukana kulkeutuvista aerosoleista. Myös tuloilman ottokohta tulisi valita niin, ettei ilmaa oteta torniin bioaerosolien lähteen, kuten biologisen käsittelyn ilmastusaltaan luota tai jäähdytystornin omasta poistoilmavirrasta. Nykyisin jäähdytystornien käytöstä ollaan yleisesti luopumassa niiden aiheuttamien riskien takia ja vaihtoehtoisia tekniikoita otetaan käyttöön tarvittaessa. Myös energiatehokkuus ja tehtaiden prosessilämpötilojen laskeminen on vähentänyt jäähdytystornien käytön tarvetta. (Tuhkanen et al. 2007, Tuhkanen ja Hiltunen 2008.)

2.1.3 Lietteen käsittely

Jätevesilietteen kuivaus ja käsittely ovat mahdollisia altistusreittejä bioaerosoleille. Lietteen käsittelylaitoksella lietettä kuivatessa lingolla ja kuivattua lietettä liikuteltaessa voi muodostua suuria määriä bioaerosoleja. Selvitysten mukaan metsäteollisuudessa lietteenkäsittelyn kuivauslingot ovat yksi suurimmista bioaerosolien lähteistä. (Laitinen et al. 1991, Tuhkanen et al. 2007.) Kuivaimen tyyppi ja kotelointi vaikuttavat suuresti syntyvien aerosolien määrään, laatuun ja leviämiseen. Lietteen käsittely tapahtuu yleensä suljetussa rakennuksessa, joten ilmanvaihto ja poistoilman käsittely tulee olla toteutettu asianmukaisesti. Poistoilma tulee käsitellä bioaerosolien ulkoilmaan ja ympäristöön leviämisen ehkäisemiseksi. Poistoilmankäsittelyn menetelmiä aerosolien vähentämiseksi.

si ilmavirrasta ovat HEPA-suodatin, UV-käsittely, biosuodin, lämpökäsittely, sähkösuodin ja märkäpesuri. Tehokkaan poistoilman käsittelyn avulla lietteenkäsittelyn bioaerosolien aiheuttamat riskit voidaan minimoida, kun lisäksi käytetään hengityksen suojaimia aina lietteenkäsittelyn rakennuksen sisätiloissa. (Tuhkanen et al. 2007, Goyer et al. 2001.)

2.2 Mikrobit ja muut taudinaiheuttajat bioaerosoleissa

Jätevedet voivat sisältää suuria määriä bakteereja, viruksia, alkueläimiä, loisia ja mikrobien aineenvaihdunnan tuotteita, joista osa voi olla taudinaiheuttajia tai aiheuttaa immunologista vastetta altistuneille ihmisille. Jätevesien käsittelyssä syntyvät aerosolit voivat tästä syystä aiheuttaa terveystarpeita laitoksen työntekijöille ja lähiympäristön alueella. Jätevedenpuhdistamoiden työntekijöillä on havaittu enemmän terveydellisiä haittavaikutuksia, kuten ruoansulatuskanavan ja hengitysteiden oireita, uupumusta ja päänsärkyä, kuin kontrolliryhmällä ja tämä on yhdistetty bioaerosoleille altistumiseen (Tuhkanen et al. 2007, Kusnetsov et al. 2006, Thorn ja Kerekes 2001, Giusti 2009, Mulloy 2001, Heinonen-Tanski 2009, Carducci et al. 2000).

Yhdyskunta- ja metsäteollisuuden jätevesissä on toisistaan eroavat mikrobikannat erilaisesta lähteestä johtuen. Metsäteollisuuden jätevesistä ei löydy suolistoperäisiä mikrobeja, koska puhdistamoille ei yleensä johdeta käymälöiden jätevesiä. (Kusnetsov et al. 2006.) Yhdyskuntajätevesissä on monia ulosteperäisiä ilmateitse leviäviä patogeenejä, kuten kampylobakteereita, rotavirusta, poliovirusta ja *Cryptosporidiumia*, jotka eivät ole ongelmana metsäteollisuuden jätevesien käsittelyssä (Stellacci et al. 2010). Biologiseen jätevedenkäsittelyyn on liitetty myös joitain homeita kuten *Aspergillus*, *Penicillium* ja *Cladosporium*, mutta näiden ei ole havaittu aiheuttavan erityistä riskiä puhdistamoilla (Goyer et al. 2001). Eniten terveyshaittoja metsäteollisuuden jätevedenkäsittelyn bioaerosoleista ovat selvitysten perusteella aiheuttaneet *Legionella*-bakteerit, mykobakteerit ja endotoksiinit. Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla on mitattu jätevesistä enemmän näitä hengitysteiden kautta infektoivia patogeenejä kuin yhdyskuntajätevesien puhdistamoilta. Nämä voivat aiheuttaa tauteja ilmajälitteisinä toisin kuin useimmat jätevesien mikrobit ja ovat siksi oleelliset indikaattorit metsäteollisuuden bioaerosolialtistusta tarkasteltaessa. (Kusnetsov et al. 2006.)

Jätevedenkäsittelyssä muodostuvien mikrobeja sisältävien bioaerosolihiukkasten koko vaihtelee tyypillisesti välillä 0,5 - 20 µm ja suurin osa mikrobeja sisältävistä aerosoleista ovat aerodynaamiselta halkaisijaltaan 1 - 10 µm. Jätevedenkäsittelyn aerosolien mikrobit ovat yleensä useiden solujen kasaumina tai kiinnittyneinä lietehiukkasiin. (Hung et al. 2009, Li et al. 2010, Goyer et al. 2001, Malakootian et al. 2013, Li et al. 2013.) Halkaisijaltaan 1-10 µm hiukkasten laskeutumisnopeus vaihtelee välillä 10 cm/h – 0,3 cm/s (Lai et al. 2012). Hiukkaset kooltaan 2,5 – 10 µm pysyvät ilmassa minuuteista tunteihin ja voivat kulkeutua jopa kymmenien kilometrien matkoja. Pienemmät hiukkaset voivat pysyä ilmassa päiviä ja kulkeutua jopa satojen kilometrien päähän. Alle 2,5 µm hiukkaset (PM_{2.5}) voivat päätyä keuhkorakkuloihin asti, mutta hiukkaset kooltaan 2,5 – 10 µm (PM₁₀) jäävät pääasiassa jo ylempiin hengitysteihin. Bioaerosolien sisältämät mikrobit voivat aiheuttaa infektioita hengitysteissä jäädessään kiinni limakalvojen pinnalle. Infektion tapahtumiseen vaikuttaa altistusmäärä sekä altistuneen henkilön vastustuskyky (WHO 2013).

Ilman mukana kulkeutuvat mikrobit ovat alttiita sääolosuhteiden vaikutuksille kuten kuivumiselle, lämpötilan vaihteluille ja UV-säteilylle. Pilvisellä säällä ja korkeassa il-

mankosteudessa mikrobit pysyvät elinkykyisinä pitkään ja voivat sopivassa tuulessa kulkeutua hyvin pitkiä matkoja infektiokykyisinä. (Karra ja Katsivela 2007.) Joidenkin taudinaiheuttajien kuten legionellan on arveltu pystyvän leviämään infektiokykyisenä jopa 10 kilometrin päähän lähteestään (Blatny et al. 2011, Kusnetsov ja Torvinen 2008). Korkeat lämpötilat, voimakas UV-säteily ja kuiva ilma inaktivoivat aerosoleina kulkevia mikrobeja nopeasti, joten taudinaiheuttajat eivät välttämättä leviä kovin kauas lähteestään infektiokykyisinä epäsuotuisissa sääolosuhteissa. Sade voi taas huuhtoa ilman aerosolit maahan pysäyttäen niiden leviämisen tuulen mukana. (Karra ja Katsivela 2007.)

2.2.1 Mykobakteerit

Mykobakteerit ovat aktinomykeettien luokkaan kuuluvia *Mycobacterium*-suvun bakteereja, joita tunnetaan noin 120 eri lajia. (THL 2013.) Ympäristö- eli atyyppiset mykobakteerit esiintyvät luonnossa ja niiden ihanteellinen kasvulämpötila on lajista riippuen 30-37°C. Mykobakteereja esiintyy kaikkialla ympäristössä kuten myös suomalaisissa pintavesissä ja maaperässä. Mykobakteerit ovat hidaskasvuisia ja vaativat keinotekoisissa ympäristöissä sopivat olosuhteet lisääntyäkseen ja ne viihtyvät hyvin vesijärjestelmien pinnoilla biofilminä. (Kusnetsov et al. 2006.)

Tuberkuloosia aiheuttava bakteeri kuuluu mykobakteereihin ja monet muut patogeeniset mykobakteerilajit aiheuttavat tuberkuloosin kaltaista keuhkosairautta sekä iho-, imusolmuke- ja pehmytkudosinfektioita. Ei-tuberkuloottiset ympäristömykobakteerit eivät tartu ihmisestä toiseen vaan tartunta tulee aina ympäristöstä. Terveen ihmisen vastustuskyky torjuu mykobakteereita yleensä tehokkaasti, mutta vastustuskyvyltään heikentyneet potilaat voivat olla alttiita mykobakteerien aiheuttamille infektioille. Mykobakteerit voivat päästä elimistöön aerosolien välityksellä haavaumien, suoliston tai hengitysteiden kautta. (THL 2013.)

Suomessa eristetään potilasnäytteistä vuosittain noin 500 ympäristömykobakteeritausta, joista osassa mykobakteeri on toiminut taudinaiheuttajana (THL 2013). Mykobakteerit ovat hyvin hidaskasvuisia lajista riippuen ja niitä onkin hankalaa todeta tavallisilla mikrobiologisilla viljelymenetelmillä. Erilaisia vesilähteitä, kuten lämminvesijärjestelmiä, pidetään mykobakteeritartuntojen yleisimpinä lähteinä. Teknisiin järjestelmiin mykobakteerit leviävät raakaveden, maaperän tai ilman hiukkasten välityksellä. Mykobakteerit kestävät hyvin lämpötilan vaihtelua (10-65°C) ja desinfiointikäsittelyjä, joten ne voivat levitä talousvesiverkostoihin ja vesijärjestelmiin. Suomalaisista verkostoista otetuissa talousvesinäytteissä esiintyy mykobakteereja 26-80 prosentissa näytteistä. Mykobakteerit lisääntyvät erityisesti vesijärjestelmien seinämille kiinnittyneenä biofilmiin. (Kusnetsov et al. 2006.)

Jätevesien on todettu sisältävän enemmän mykobakteereja kuin raakavesien tai puhdistettujen jätevesien. Mykobakteerit, varsinkin nopeakasvuuisemmat lajit, ovat todennäköisesti tarpeellisia osana aktiivilietettä biologisessa jäteveden puhdistamisessa. Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoiden ilmastusaltaista on yleisesti löydetty suuria pitoisuuksia mykobakteereja. Metsäteollisuudessa löydetyt pitoisuudet ovat olleet keskimäärin korkeampia kuin yhdyskuntajätevesien ilmastusaltaissa. Ilmastusaltaan mykobakteeri-pitoisuuksien on havaittu olevan suurempia korkeammassa lämpötilassa. Suomalaisista metsäteollisuuden jätevesistä löydettyjä taudinaiheuttajalajeja ovat mm. *Mycobacterium avium*, *M. peregrinum* ja *M. fortuitum*. (Kusnetsov et al. 2006.)

2.2.2 Legionella

Legionella on luonnossa kosteassa maaperässä ja vesistöissä pieninä pitoisuuksina esiintyvä gram-negatiivinen bakteerisuku. Legionella-lajeja tunnetaan ainakin 50 kappaletta, joista noin puolet on todettu taudinaiheuttajiksi. Yleisin taudinaiheuttajalaji Legionellavussuussa on *L. pneumophila* ja erityisesti sen seroryhmä 1. (THL 2013b.) Legionella on altis kuivumiselle eikä selviydy pitkään poistuttuaan vedestä. Se voi kuitenkin levitä ja infektoida aerosolipisaroiden välityksellä. (Goyer et al. 2001.) Aerosoleina legionellojen on arveltu leviävän infektiokykyisinä jopa kymmenen kilometrin päähän lähteestään sääolosuhteista riippuen (Blatny et al. 2011, Kusnetsov ja Torvinen 2008). Legionellan selviytymistodennäköisyys on suurin 90% suhteellisella ilmankosteudella ja noin kolmanneksen aerosolien populaatiosta on arvioitu selviävän puolen tunnin ajan 20°C lämpötilassa ja 60% suhteellisessa kosteudessa (Tuhkanen et al. 2007).

Legionellat voivat aiheuttaa tauteja aerosolien välityksellä hengitysteihin joutuessaan. Legionellan aiheuttamia tauteja ovat legioonalaistauti (legionelloosi), joka aiheuttaa vakavan keuhkokuumeen, sekä oireiltaan influenssan kaltainen Pontiac-kuume, joka on legionelloosia lievempi tautimuoto. (Kusnetsov et al. 2006.) Legionelloosin itämisaika on 2-10 vuorokautta ja se ei voi tarttua ihmisestä toiseen (THL 2013b). Heikompikuntoiset ihmiset ovat alttiimpia sairastumaan legionellan aiheuttamiin tauteihin. Immuniiteetiltaan heikentyneillä potilailla legionella voi aiheuttaa infektioita kehossa myös haavaumien kautta. Suomessa on havaittu keskimäärin noin 20 legionelloosi-tapausta vuosittain ja havaintojen perusteella altistuneista vain alle 5 prosenttia sairastuu keuhkokuumeeseen. Todellinen legionelloositapausten määrä voi olla jopa 100–200. Legionella-altistusta voidaan arvioida vasta-aineiden noususta havaittavalla immunologisella vasteella altistuneissa henkilöissä ilman taudin puhkeamista. (Kusnetsov ja Torvinen 2008.) Legionellan tartuntaan johtavaa annosta ei tiedetä ja on arvioitu sen vaihtelevan vastustuskyvyn mukaan (Tuhkanen et al. 2007).

Legionellat ovat alkueläinten solunsisäisiä parasiitteja ja pystyvät lisääntymään niiden sisällä. Alkueläinten esiintymisen oletetaan olevan tärkeä tekijä legionellan selviytymiseen ja lisääntymiseen luonnollisissa ja keinotekoisissa ympäristöissä. Alkueläinten kuten amebojen sisällä ollessaan legionella-bakteerit ovat suojassa ympäristön olosuhdevaihteluilta ja ovat resistentteja desinfiointiaineille ja nopeille lämpötilan muutoksille. Aktiivilietteen flokeissa ja biofilmissä viihtyvät alkueläimet suojaavat legionellaa kuivumiselta, biosideilta ja UV-säteilyltä. Yksi ameba voi sisältää satoja legionella-bakteereja ja olla hyvin infektioimiskykyinen bioaerosolina legionellojen purkautuessa hengitysteissä. (Tuhkanen et al. 2007.)

Legionellat lisääntyvät hyvin lämpimissä vesijärjestelmissä niiden kasvulämpötila-alueen ollessa 20-45°C ja ihanteellisen lämpötila-alue on 32-42°C. Legionellaa torjutaan lämminvesijärjestelmistä pitämällä lämpötila jatkuvasti vähintään 55°C. (THL 2013b.) Biologisessa jätevedenkäsittelyssä ei ole mahdollista pitää niin korkeaa lämpötilaa hyödyllisen bakteerikannan tuhoutumisen takia. Metsäteollisuuden jätevedet ovat usein lämpötilaltaan legionellan kasvun kannalta ihannealueella. (Tuhkanen et al. 2007.)

Metsäteollisuuden jätevesien ilmastusaltaista on löydetty Suomessa useissa tutkimuksissa (FEEL-tutkimus, ESIMEPATO 1 ja 2, MEPATO 1 ja 2) vuodesta 2005 lähtien huomattavia viljeltävien legionellojen pitoisuuksia ja myös joitakin legionelloosi-tapauksia tehtaan työntekijöillä. Tutkimusten mukaan lähes jokaisesta Suomen metsäteollisuuden ilmastusaltaasta on löydettävissä toistuvissa testeissä ainakin jossain vaiheessa viljeltä-

viä legionellabakteereja. Näissä tutkimuksissa on kerätty ilmastusaltaiden ympäristöstä myös ilmanäytteitä, joista on löydetty viljeltävää legionellaa ainakin 10 metrin etäisyydelle asti alatuuleen altaalta. (Kettunen 2014, Kusnetsov ja Torvinen 2008, Kusnetsov et al. 2007, Kusnetsov et al. 2006.)

Kusnetsov et al. 2006 selvittivät legionella-pitoisuuksia metsäteollisuuden ilmastusaltaissa ja löysivät viljelysmenetelmällä legionellaa 11 altaasta tutkituista 15 altaasta ja mikroskopointimenetelmällä legionellaa löytyi kaikista altaista. Metsäteollisuudessa tehtyjen selvitysten perusteella legionellaa on havaittu erityisesti ilmastusaltaissa, joiden lämpötilat vaihtelevat 38 ± 5 °C välillä, käsittelyn kemiallisen hapen kulutuksen poistotehot ovat hyvät, lietepitoisuus on korkea ja laitokset suhteellisen uusia. Vanhemmilla tehtailla on havaittu pienempiä legionella-pitoisuuksia. Tämän oletetaan johtuvan vanhempien laitosten erilaisesta jäteveden koostumuksesta tai pitkään toimineen biologisen prosessin erilaisen mikrobikannan kilpailemisesta legionellan kanssa. (Tuhkanen et al. 2007.) Legionelloja on löydetty runsaina pitoisuuksina myös metsäteollisuuden lietteenkäsittelyn lietteistä ja biologista käsittelyä edeltävistä jäädytystorneista jätevedestä sekä biofilmistä (Kusnetsov ja Torvinen 2008, Kusnetsov et al. 2007, Kusnetsov et al. 2006).

2.2.3 Endotoksiinit

Endotoksiinit ovat gram-negatiivisten bakteerien ulkokalvon sisältämiä suurimolekyylisiä lipopolysakkarideja, jotka vapautuvat bakteerin soluseinän hajotessa ja aiheuttavat vahvan immuunivasteen altistuneessa ihmisessä. Endotoksiinit eivät siis ole varsinaisia mikrobeja vaan bakteerien aineenvaihduntatuotteita, joka leviää helposti tuulen ja veden mukana ympäristössä hienojakoisena orgaanisena pölynä. Endotoksiinit on yhdistetty myös orgaanisen pölyn aiheuttamaan toksiseen oireyhtymään (ODTS). Altistuminen voi tapahtua kaikkia bakteerialtistuksen reittejä ja yleinen altistumistapa on hengitysteiden kautta aerosolien välityksellä. Endotoksiinit voivat aiheuttaa jo muutaman tunnin altistumisesta limakalvojen ärsytystä, kuumetta, hengitysteiden ja ruoansulatuskanavan oireita sekä silmä- ja iho-oireita. (De Man et al. 2014, Laitinen et al. 1991.) Pitkäaikainen altistus voi aiheuttaa astman kaltaisia oireita, kroonista hengityksen ahdistusta ja keuhkoputken tulehdusta (Madsen ja Nielsen 2010). Endotoksiinipitoisuuksia mittaamalla voidaan arvioida työntekijöiden bioaerosolialtistusta työpaikoilla. Työilman endotoksiinipitoisuuksien ja työntekijöillä ilmenneiden oireiden välillä on havaittu selvä korrelaatio. (De Man et al. 2014.) Kahdeksalle tunnille aikapainotetuksi työhygieeniseksi raja-arvoksi endotoksiinien pitoisuudelle ilmassa on ehdotettu 30 ng/m^3 (Laitinen et al. 1991) tai 90 EU/m^3 (Liukkonen et al. 2010).

Laitinen et al. (1991) tutkivat teollisuuden ja yhdyskuntajätevesien puhdistamoiden endotoksiinipitoisuuksia ilmasta ja löysivät työhygieenisen raja-arvon ylittäviä pitoisuuksia monissa prosessivaiheissa. Raja-arvo ylittyi ilmastusaltailla, jäteveden virratessa selkeytysaltaalle, ylijäämalietteen palautuksessa sekä lietteen kuivauksessa lietelingolla ja suotonauhalla. Korkeimmat endotoksiinipitoisuudet, $200\text{--}400 \text{ ng/m}^3$, löytyivät lietteenkuivauksen linkohuoneesta. Sisätiloihin sijoitetuilla prosessivaiheilla ilman bakteeri- ja endotoksiinipitoisuudet olivat selvästi suurempia kuin ulkona.

2.3 Bioaerosolien muodostumisen ja leviämisen hallinta

Bioaerosolien aiheuttamia riskejä voidaan hallita työympäristössä teknisillä ratkaisulla ja toimenpideohjeistuksella, jos aerosolien lähteet ja leviämisreitit tunnustetaan (Kusnetsov et al. 2006). Bioaerosolien hallintakeinoina jätevedenpuhdistamoilla voidaan käyttää joko aerosolien muodostusta tai leviämistä ehkäiseviä keinoja. Myös mikrobilähteen eliminointi on mahdollista joissain kohteissa kuten jäähdytystorneissa puhdistus- ja desinfiointikäytännöillä.

Aerosolien muodostusta voidaan vähentää ilmastusaltaassa minimoimalla veden ja ilman rajapinnassa tapahtuva sekoittuminen ja turbulenssi. Runsaasti vedenpinnan liikettä aiheuttavat mekaaniset sekoittimet ja ilmastimet aiheuttavat paljon roiskeita ja pisaranmuodostusta. (Sánchez-Monedero et al. 2008.) Aerosolien muodostuksen ehkäisemiseen sovellettavat keinot riippuvat paljolti ilmastusaltan rakenteista, muodosta ja ilmastimien tyypistä (Sánchez-Monedero et al. 2008).

Bioaerosolit voivat levitä huomattavia matkoja ympäristöön riippuen tuulesta, ilmastuudesta, lämpötilasta sekä ympäristön esteistä kuten rakennuksista ja kasvillisuudesta. (Stellacci et al. 2010.) Bioaerosolien poistuminen ilmasta tapahtuu mikrobien vaurioitumisen kautta, tuulen välityksellä, painovoimaisen laskeutumisen kautta, ilmakehän sekoittumisesta johtuvan laimentumisen johdosta sekä adsorboitumalla pinnoille. Monet ilmiöt voivat vaurioittaa ilmassa olevia mikrobien soluja kuten auringon UV-säteily, kuivuminen, korkea lämpötila sekä fyysiset ja meteorologiset tekijät. (Tuhkanen et al. 2007.) Korkean ilmankosteuden ja matalan lämpötilan on havaittu pidentävän bioaerosolien selviytymisaikaa. Myös happipitoisuus ja ilmansaasteet voivat vaikuttaa solujen vaurioitumiseen. Säätekijöiden lisäksi ilmaan vapautuneiden bakteerien selviämiseen ilmakehän olosuhteissa vaikuttaa kasvuolosuhteet ennen aerosolisoitumista sekä aerosolisoitumistapa. Isommilla soluilla sekä isompiin hiukkasiin kiinnittyneillä soluilla on paremmat mahdollisuudet selvitä aerosolin muodossa ympäröivissä olosuhteissa. (Homes et al. 1999.) Bioaerosolien leviämistä voidaan ehkäistä täydellisillä tai osittaisilla katteilla, roiskesuojilla, tuulensuoja-aidoilla ja kasvillisuusaidanteilla.

2.3.1 Pinnalla kelluvat katteet

Aerosolien muodostusta ilmastusaltan pinnalla voidaan vähentää teknisillä ratkaisulla, jotka pysäyttävät pisaroiden liikkeen ilmassa jo heti veden ja ilman rajapinnassa. Erilaisina altaan pinnalla kelluvista materiaaleista tehtyjä rakenteita on tutkittu ja joitakin kaupallisia sovelluksia on saatavilla. Hung et al. (2010) tutkivat kelluvien ilmalla täytettyjen muovipallojen käyttämistä altaan pinnalle levitettyinä mattona ja havaitsivat aerosolien muodostumisen vähentyvän merkittävästi käytettävien pallojen koosta ja kerrosmäärästä riippuen. Bioaerosolit vähenivät kontrollimitauksiin verrattuna jopa yli 90 % käytettäessä pienempiä palloja ja useampaa kerrosta. Vastaavanlaisena ratkaisuna voidaan käyttää erilaisiin tarkoituksiin suunniteltuja kaupallisia kelluvia kappaleita (Kuva 3), jotka vähentävät haihduntaa, eristävät lämpöä, ehkäisevät levän kasvua sekä vähentävät kaasupäästöjä ja hajuhaittoja. Näitä ei välttämättä ole kuitenkaan suunniteltu aerosolin muodostuksen ehkäisemiseen ja voivat soveltua tähän tarkoitukseen huonosti ilmastuksen materiaalille aiheuttaman mekaanisen eroosion takia. (Lemna Technologies 2015a, Pi²Technologies 2015.)



Kuva 3. Jätevedenkäsittelyn altaissa käytettyjä kelluvia kappaleita mm. hajuhaittojen ehkäisemiseksi (Lemna Technologies 2015a, Pi²Technologies 2015).

2.3.2 Ilmastintyyppin vaikutus aerosolien muodostumiseen

Ilmastuksessa pyritään synnyttämään mahdollisimman paljon veden ja ilman välisiä rajapintoja edistään ilman ja veden välistä kaasujen vaihtoa. Pintailmastimet toimivat nostamalla vettä vedenpinnan yläpuolelle suihkuna ja pisaroina, kun taas pohjailmastimilla siirretään ilmaa ilmastusaltaan pohjalle muodostaen ilmakuplia vesipatsaaseen. Yleensä pintailmastimia käytettäessä muodostuu selvästi enemmän aerosoleja (Kuva 4) kuin pohjailmastimia ja etenkin hienokuplailmastimia käytettäessä. (Sánchez-Monedero et al. 2008.) Sánchez-Monedero et al. (2008) saamien tulosten mukaan pintailmastimet tuottavat jopa yli sata kertaa enemmän bioaerosoleja kuin diffuusori-ilmastimet, joiden muodostamat bioaerosolipitoisuudet olivat lähellä taustan pitoisuuksia. Myös Brandi et al. (2000) havaitsivat mekaanisten pintailmastimien tuottavan huomattavasti enemmän bioaerosoleja kuin hienokuplailmastimien. Aerosolien muodostuksen määrä riippuu suuresti myös pinta- tai pohjailmastimen tyypistä. Erityisesti roottorimalliset pintailmastimet tuottavat huomattavan paljon aerosoleja.

Myös pohjailmastimien välillä on suuria eroja kuplakoon vaikutuksen takia. Ilmassa olevien mikrobien määrä lisääntyy ilmastuksessa muodostuvien kuplien koon kasvaessa. Pohjailmastimia käytettäessä ilmakuplien noustessa vedenpinnasta tapahtuva kuplien luhistumisen aiheuttama paineisku aikaansaa sitä enemmän roiskeita mitä isompi on kuplien koko (Hung et al. 2010). Fernando ja Fedorak (2005) havaitsivat samalla ilmastusaltaalla tehtyjen ilman mikrobipitoisuuksien mittausten perusteella, että laitoksen vaihdettua karkeakuplailmastimet hienokuplailmastimiin bioaerosolien määrä väheni jopa sadasosaan. Karkeakuplailmastimilla ilmastuksen tarve on suurempi ja veden pinta

on turbulenttinen suurien kuplien romahtamisen vaikutuksesta. Lisäksi muodostuvien aerosolien määrään voi vaikuttaa ilmastusaltaan jäteveden lämpötila ja lietepitoisuus. Korkeassa lämpötilassa ja lietepitoisuudessa on molempien vaikutuksesta suurempi ilmastuksen tarve aktiivilietealtaassa, jolloin suurempi määrä ilmakuplia aiheuttaa enemmän pinnan agitaatiota. (Barge et al. 2014.)



Kuva 4. Pintailmastimet (vasemmalla, turbiinipintailmastin) tuottavat silminnähdn enemmän pisanan muodostusta ja roiskeita kuin pohjailmastimet (oikella, hienokuplailmastin) (Aqua-Aerobic Systems 2015, Ashbrook Simon-Hartley 2015).

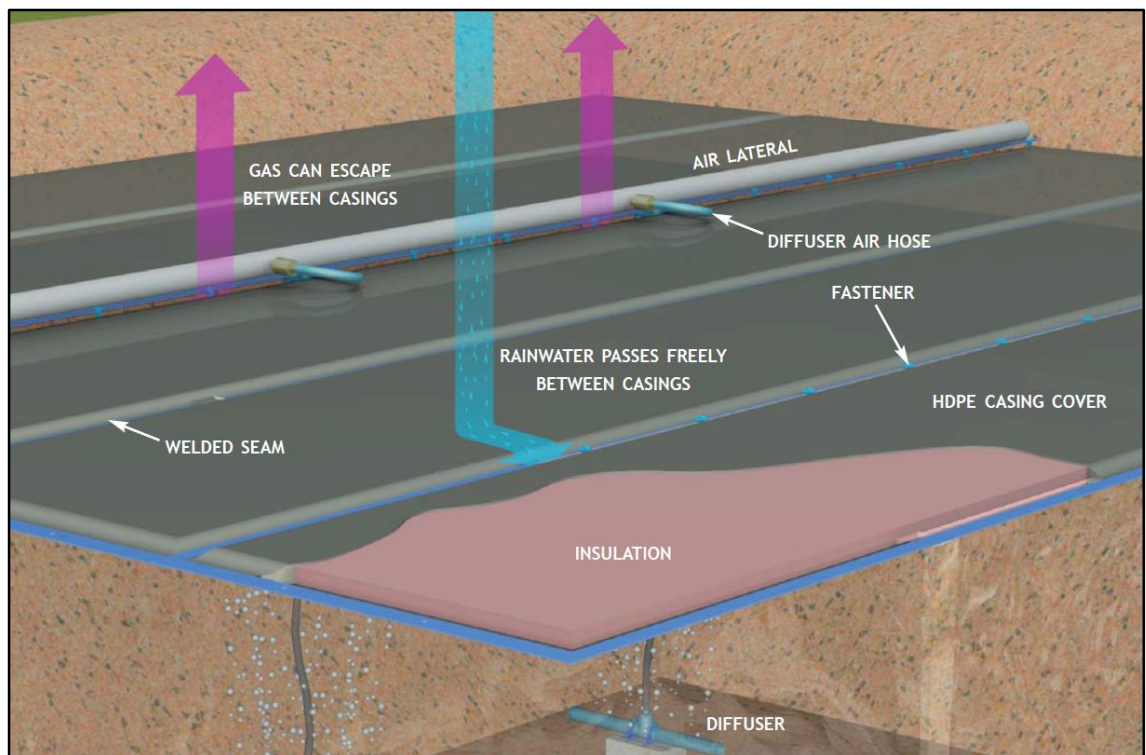
2.3.3 Katteet

Katteet voidaan rakentaa monenlaisista materiaaleista ja osittain tai täysin peittävinä. Katemateriaalit valitaan kuhunkin käyttökohteeseen sopiviksi jäteveden laadun ja ilmastusaltaan rakenteen perusteella. Katteita valmistetaan yleisimmin betonista, alumiinista ja muovimateriaaleista. (Tuhkanen et al. 2007.) Bioaerosolien ehkäisemiseksi katteita käytetään mm. avoimilla kompostointikentillä, jolloin bioaerosolipäästöt ympäristöön ovat vähentyneet 83 – 100 % puoliläpäiseviä kalvokatteita kentän päällä käytettäessä verrattuna kattamattomaan kenttään (Kummer ja Thiel 2008). Fernando ja Fedorak (2005) mittasivat ilmastetussa hiekanerotuksessa bioaerosolien pitoisuuksien altaalla vähenevän yli 70% käytettäessä altaiden katteita.

Katteet voidaan asentaa lähelle jäteveden pintaa tai ylempäs niin että katteen ja altaan väliin jää huoltotilat. Lähelle pintaa asennettavat katteet peittävät näkyvyyden prosessiveteen ja voivat tehdä huoltotöistä vaikeaa. Huoltotöille ja näytteenotolle täytyy tällöin asentaa irrotettavat katteen osat tai huoltoluukut. Katemateriaalin korroosion kestävyys on otettava huomioon erityisesti pintaa lähelle asennettavilla katteilla. (Tuhkanen et al. 2007.) Jotta ilmastuksessa käytetty ilma pääsee poistumaan katteiden alta, katteiden täytyy olla läpäiseviä tai osittain avonaisia (Kuva 5). Ilmanvaihto voidaan hoitaa myös koneellisesti, jolloin poistoilma pystytään käsittelemään päästöjen vähentämiseksi. (Lemna Technologies 2015b.)

Ilmastusaltaan ollessa kokonaan katettu on mahdollista käsitellä poistoilma aerosolien leviämisen vähentämiseksi suodattimilla, biosuodattimilla tai mikrobeja tuhoavilla menetelmillä kuten UV-säteily, lämpökäsittely tai kemialliset hapettimet. Samoja menetelmiä käytetään usein myös hajukaasupäästöjen vähentämiseksi. Biologisen jätevedenkäsittelyn ilmastusaltaat ovat harvemmin täysin katettuja, jolloin mikrobit pääsevät liikkumaan katteen aukeamista ilman virtauksen mukana ulkoilmaan. Mikrobin tuhoami-

nen aerosoleista ulkoilmassa ei ole yleensä kustannustehokasta tai luotettavaa suuresta tilavuudesta ja hallitsemattomasta ilman liikkeestä johtuen. (Guo et al. 2014, Tuhkanen et al. 2007, Kummer ja Thiel 2008.)



Kuva 5. Geokomposiittimateriaalista valmistettu eristetty moduulikalvokate (Lemna Technologies 2015b).

Betonia ja alumiinia käytetään pysyvinä kantavina katerakenteina lähellä jätevedenpintaa tai korkeampina kupuina (Kuva 6). Ne ovat vahvempia materiaaleja kuin lasikuitu tai muovikatteet ja kestävät hyvin talven aikaisen lumikuorman, jolloin isotkin altaat pystytään kattamaan. Betoni voi kuluu korroosion vaikutuksesta jäteveden ominaisuuksista riippuen, joten siitä tehdyt katerakenteet täytyy pinnoittaa. Alumiinin korroosiokestävyyttä lisätään metalliseoksia käyttämällä ja alumiiniset kateet voidaan asentaa myös avattaviksi rakenteiksi. (CST industries 2015, Tuhkanen et al 2007.)

Synteettisiä tekstiilejä, geokalvoja ja muovikomposiittikatteita käytetään kelluvina kateina tai rakennekehikoiden varassa ylempänä tai vedenpinnan tasolla. Muovi- ja yhdistelmäateriaalit voivat olla hyvin kestäviä UV-suojattuina ja niistä voi tehdä monimuotoisia katteita (Kuva 7), jotka voivat esimerkiksi kerätä tai läpäistä kaasut sekä päästää sadeveden altaaseen tai johtaa sen pois kateen päältä (Environetics 2015, Ciffa Systemes 2015, GTI covers 2015).



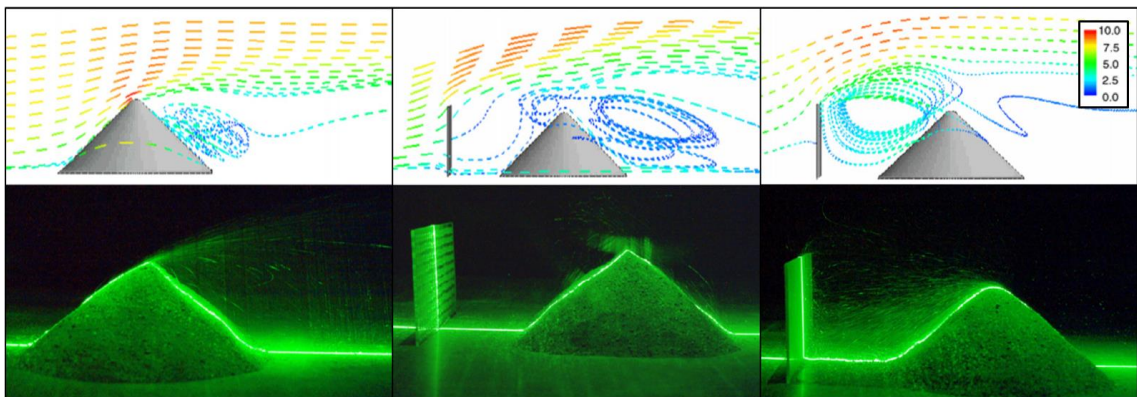
Kuva 6. Alumiinista (CST Industries 2015) sekä betonista (FP McCann Ltd. 2015 oik. yllä) valmistettuja katteita jätevesialtaissa.



Kuva 7. Erilaisia muovimateriaaleista tehtyjä kateratkaisuja jätevesialtaissa. (Enviro-netics 2015 vas. yllä, Ciffa Systemes 2015 oik. yllä ja vas. alla, GTI covers 2015 oik. alla)

2.3.4 Tuulensuoja-aidat ja kasvillisuusaidanteet

Tuulensuoja-aitoja käytetään teollisuudessa, liikenneväylillä ja maataloudessa pienhiukkasten, hajujen ja maa-aineksen leviämisen sekä eroosion ehkäisemiseksi (Hong et al. 2015, Santiago et al. 2007, Steffens et al. 2012). Tuulensuoja-aidat hidastavat tuulen nopeutta aidan korkeudella, sieppaavat osan ilman hiukkasista suoralla impaktiolla ja lisäävät ilmassa sekoittumista vertikaalisesti ja edistävät pitoisuuksien laimenemista ylemmissä ilmakerroksissa. Tuulen nopeuden hidastuessa ilmassa olevat hiukkaset pääsevät laskeutumaan tehokkaammin lyhyemmän matkan aikana, jolloin aerosolien leviäminen kauemmas ympäristöön vähenee (Kuva 8). Maanpinnan lähellä tuulen nopeus lähestyy nolaa pinnan karkeuden aiheuttaman kitkan seurauksena ja kasvaa ylemmäs mentäessä. Karkealla epätasaisella pinnalla on suurempi karkeuskerroin kuin sileällä esteettömällä pinnalla; tuulen nopeus hidastuu, turbulenssi lisääntyy ja ilmanvastus kasvaa esteiden kuten kasvillisuuden ja rakenteiden vaikutuksesta. (Brandle et al. 2009, Tyndall ja Colletti 2007.)



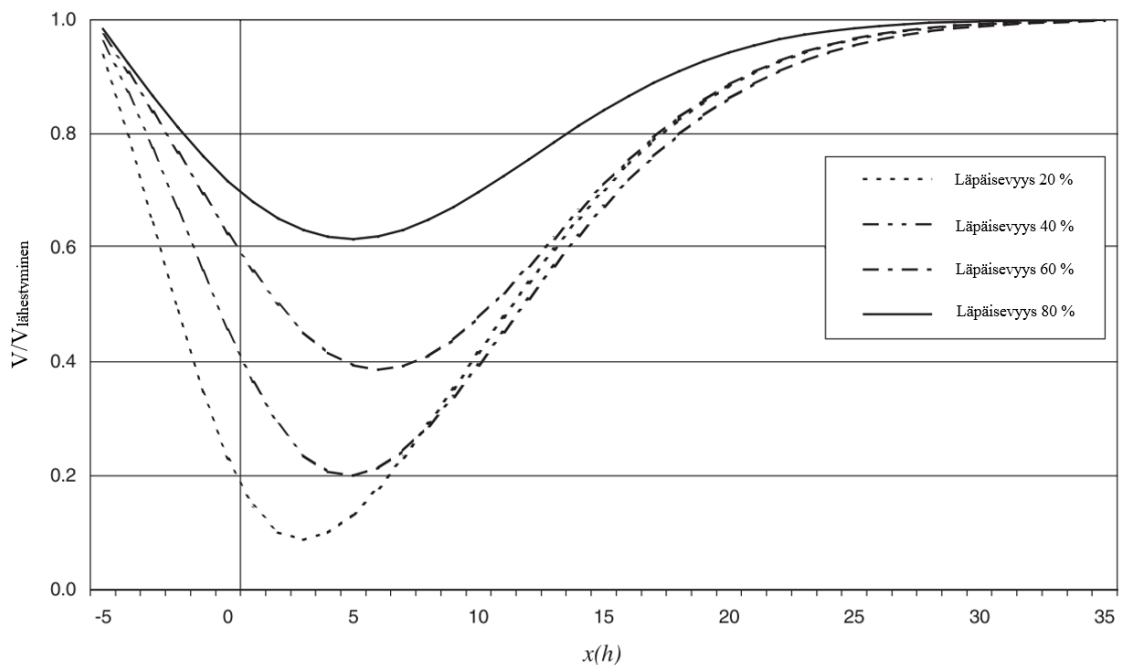
Kuva 8. Yeh et al. (2010, muokattu) mallinsivat tuulensuoja-aidan vaikutusta hiukkasten liikkeeseen ja nopeuteen (m/s) tuulitunnelikokeessa. Läpäisevyydeltään 30% aita (keskellä) vähentää tehokkaimmin tuulen nopeutta ja hiukkasten liikettä. Vertailussa koe ilman suoja-aitaa (vasemmalla) ja kiinteä suoja-aita (oikealla).

Tuulensuoja-aidat hidastavat tuulen nopeutta tehokkaasti pitkällä etäisyydellä aidasta aidan läpäisevyydestä ja korkeudesta riippuen. Myös aukkojen muoto ja jakautuminen sekä aidan muoto ja tuulen suunta vaikuttavat tuulen hidastumiseen. Tuulta hidastava vaikutus on tehokkain tuulen ollessa kohtisuoraan aitaa vastaan. Aidan läpäisevyydellä tarkoitetaan aidan aukkojen pinta-alan suhdetta aidan kokonaisalaan. Läpäisevyydeltään 20-40 % aidat hidastavat tehokkaammin tuulen nopeutta aiheuttamatta turbulenssia ja pyörteitä aidan takana (Kuva 9). Tiiviit (läpäisevyys < 20%) aidat aiheuttavat enemmän turbulenssia ja pyörteitä tuulen suuntaan nähden aidan takapuolella muodostuvan alipaineisen alueen takia voidaan lisätä aerosolien nousemista ja leviämistä. (Santiago et al. 2007, Vigiak et al. 2003, Cornelis ja Gabriels 2005.)

Hiukkasten laskeutumisen lisäksi tuulensuoja-aita pysäyttää sen läpi kulkevien hiukkasten liikettä impaktioon ja Brownin liikkeeseen perustuen sitä paremmin mitä pienempi on aidan läpäisevyys. Brownin liike on merkittävää vain alle $0,1\mu\text{m}$ hiukkasille, joten bioaerosolien kokoluokissa aidan elementtien hiukkasia pysäyttävä vaikutus perustuu impaktioon. Liian tiiviin aidan läpi kuitenkin ohjautuu vain pieni osa ilmavirrasta ja hiukkasista valtaosan liikkua turbulentsin ilmavirtauksen mukana aidan ympärillä. Raupach et al. (2001) ennustivat laskumalliin perustuen läpäisevyydeltään 20-50% tuulensuoja-aidanteiden pysäyttävän suoralla törmäyksellä noin 20% kooltaan $10\mu\text{m}$

hiukkasista ja huomattavasti suuremman osan isommista hiukkasista. Vanella et al. (2013) testasivat pisaroiden pidättymistä tuulensuojaverkkoihin ja havaitsivat läpäisevyydeltään 64% verkon pidättävän 30,5% kaikista vesisuihkun pisaroista ja huomasivat pisaroiden maahan laskeutumisen lisääntyvän 2m etäisyydellä aidasta ja vähenvän huomattavasti kauempana.

Aidan tuulelta suojaaman alueen koko on verrannollinen aidan korkeuteen ja tuulta hidastava vaikutus jatkuu jopa 25 kertaiselle etäisyydelle aidan korkeuteen verrattuna. Aidan korkeuteen verrattuna kymmenenkertaisella etäisyydellä tuulen alapuolella tuulen nopeus on alle puolet aitaa lähestyvän tuulen nopeudesta aidan läpäisevyyden ollessa 20 – 60 %. (Vigiak et al. 2003.) Yeh et al. (2010) mallinsivat hiilipölyn leviämistä tuulensuoja-aidan korkeudeltaan H ympäröimistä varastokasoista kasojen ollessa $0,75H$ ja aitaverkon läpäisevyyden ollessa 30%. Aitojen ympäröimä varastoalue oli mallinnuksessa $25H * 50H$ suuruinen. Mallinnusten perusteella arvioitiin tuulensuoja-aitojen vähentävän pölyn leviämistä varastokasoista 17-56% aitojen kokoonpanosta ja tuulen suunnasta riippuen.



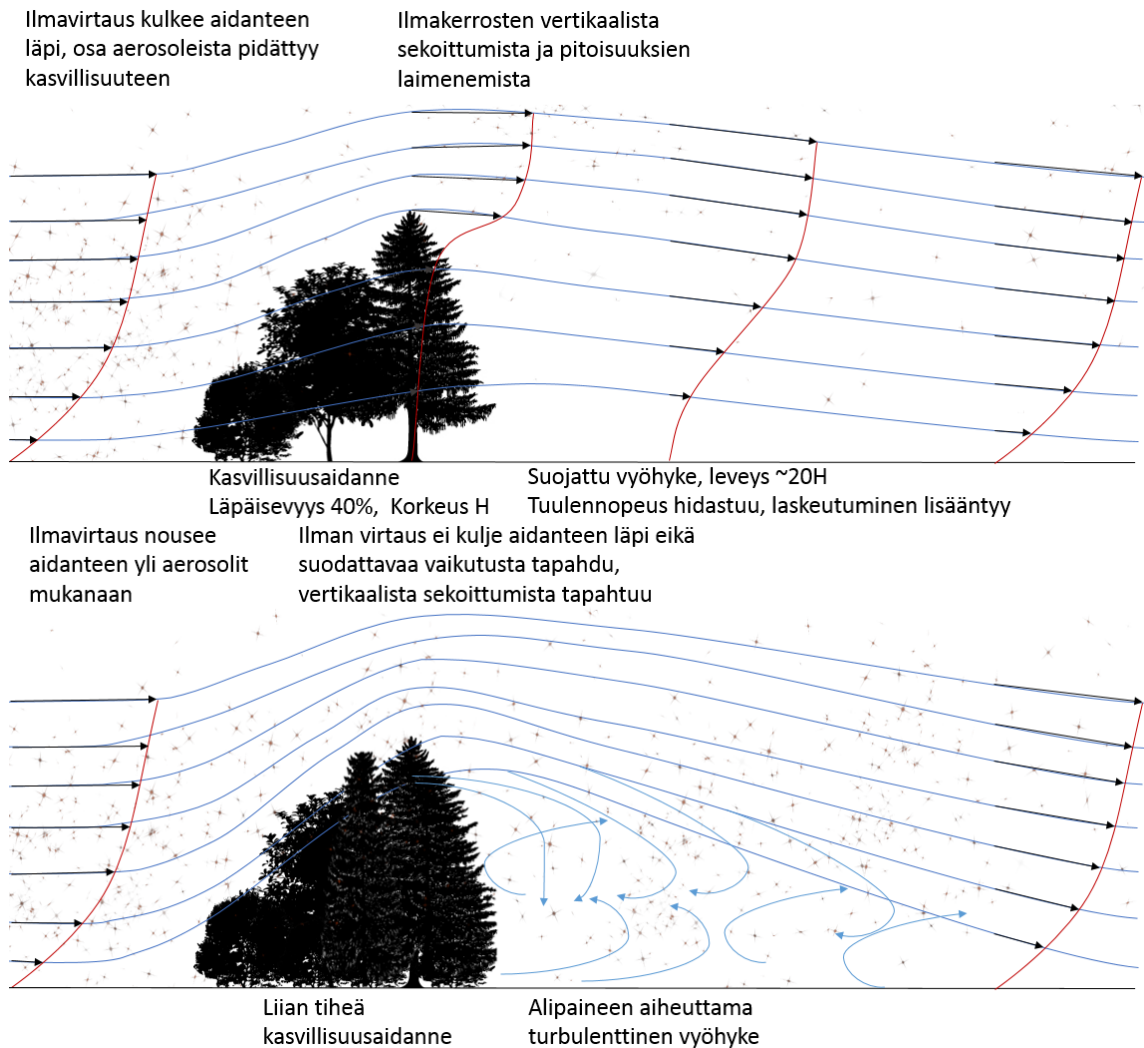
Kuva 9. Tuulensuoja-aidan läpäisevyyden vaikutus tuulen nopeuteen. Tuulen nopeus kuvaajassa on suhteessa lähestyvän tuulen nopeuteen ja etäisyys $x(h)$ on suhteessa aidan korkeuteen h . (Vigiak et al. 2003, muokattu).



Kuva 10. Metallinen tuulensuoja-aita hiiliteollisuudessa ja muovinen tuulensuojaverkkoaita maataloudessa (AWD Windbreak panels company 2015, Cosio industries 2015).

Tuulensuoja aitoja valmistetaan teollisuuteen useimmiten puusta, metalliritilöistä ja muoviverkosta (Brandle et al. 2009) (Kuva 10). Maataloudessa käytetään yleisesti kasvillisuutta tuulensuojana peltojen tai eläintilojen ympärillä vähentämään maan eroosiota sekä ehkäisemään pölyn, hajujen, ravinteiden, kasvinsuojeluaineiden ja tautien leviämistä. Kasvillisuudella voi olla lisäksi hiukkasia ja mikrobeja suodattava vaikutus. Kasvillisuusvyöhykkeiden käyttöä tuulen nopeuden hidastamiseen rajoittaa kasvillisuuden ominaisuuksien hallitsemattomuus kuten lehtien määrä, runkojen muoto, tilan tarve, muutokset ajan kuluessa ja epähomogeenisuus. Lisäksi kasvien oksat ja lehdet suuntautuvat kovalla tuulella enemmän tuulen suunnan mukaisesti, jolloin aidanteen läpäisevyys suurenee ja aerosolien pidättyminen voi vähentyä (Raupach et al. 2001, Steffens et al. 2012, Bouvet et al. 2007). Samat ominaisuudet vaikuttavat kuitenkin tuulen hidastumiseen sekä kasvillisuusaidanteissa että tuulensuoja-aidoissa, joten kasvillisuuden sopivalla läpäisevyydellä, riittävän monella rivillä ja riittävällä korkeudella voidaan hidastaa tehokkaasti tuulen nopeutta ja ehkäistä aerosolien leviämistä (Hong et al. 2015, Cornelis ja Gabriels 2005, Burley et al. 2011, Malone 2004, Bouvet et al. 2007).

Kasvillisuus on huomattavasti tehokkaampaa hiukkasten sieppaamisessa ilmasta kuin keinotekoiset tuulensuoja-aidat suuremman pinta-alansa vuoksi. Havupuiden on havaittu olevan lehtipuita tehokkaampia hiukkasten sieppaamisessa neulasten muodon monimutkaisuudesta johtuvan suuremman alan vuoksi. Myös jotkin lehtipuulajit ovat tehokkaita hiukkasten sieppaamisessa, erityisesti lajit joiden lehtien pinta on karvainen ja epätasainen. Talvikaudella lehtipuiden lehdettömien runkojen ja oksien on mitattu pysäyttävän kohtuullisen osan hiukkaskuormasta sopivissa olosuhteissa. Kasvillisuusvyöhykkeen läpäisevyyteen pätee sama kuin tuulensuoja-aitaan; liian tiivis vyöhyke aiheuttaa tuulen nousemisen vyöhykkeen yli nostaten samalla tuulen mukana kulkevat hiukkaset mukanaan, jolloin hiukkasten leviäminen kauemmas voi tehostua (Kuva 11). (Tyndall ja Colletti 2007, Mercer 2009.)



Kuva 11. Kasvillisuusaidanteen vaikutus ilman virtaukseen ja aerosolien leviämiseen.

Raupach et al. (2001) testasivat hiukkasten pidättymistä kasvillisuusaidanteisiin ruiskutustesteillä. Testien perusteella arvioitiin noin 80-90% mediaanihalkaisijaltaan $80\mu\text{m}$ pisaroista pidättyvän aidanteeseen. Tämä koskee vain aidanteen läpi kulkevaa ilmavirran osuutta eikä ota huomioon aidanteen yli ohjautuvaa virtausta. Hiukkaskooltaan bioaerosolien kokoluokkaa olevat ($1-10\mu\text{m}$) hiukkaset pidättyvät suoraan aidanteeseen huomattavasti huonommin, mutta tuulen hidastumisen vaikutuksesta myös hiukkasten laskeutuminen tehostuu. Kanatilalla toteutetussa tutkimuksessa (Malone 2004) havaittiin noin 50 % vähenemiä pölyn ja aerosolien kulkeutumisessa tuulen alapuolelle kolmirivistä kasvillisuusvyöhykettä käytettäessä. Samassa tutkimuksessa arvioitiin keskimäärin 19 % bioaerosolien vähenemä vyöhykkeen takana.

Mao et al. (2013) tutkivat tien vieressä sijaitsevan kaksirivisen kasvillisuusaidanteen vaikutusta tiepölyn hiukkasten laskeutumiseen ja pidättymiseen. Noin 5m leveän ja 10m korkean kaksirivisen kasvillisuusvyöhykkeen ei havaittu vähentävän bioaerosolien kokoluokan hiukkasten (keskimäärin $\sim 6\mu\text{m}$) pitoisuuksia ilmassa vyöhykkeen takana. Kyseisellä sijainnilla ja aidanteella havaittiin jopa kohonneita PM_{10} -pitoisuuksia. Tämän arvioitiin johtuvan pienhiukkasten vähäisestä inertiasta, jonka vaikutuksesta tuulen liikkeet ohjaavat hiukkaset kasvillisuuden ohi siihen törmäämättä, sekä tuulen suunnan muutoksesta aiheutuneesta hiukkasten laskeutumisesta vähentävästä nosteesta. Näitä tuloksia arvioitiin alustavaksi löydökseksi yhden tyyppiselle kasvillisuusaidanteelle eikä sitä voida yleistää koskemaan kaikenlaisia aidanteita.

2.3.5 Biosidien käyttö patogeeneiden hallintaan

Patogeeneiden hallinta bioaerosolien lähteessä ei yleensä ole mahdollista biologisessa jätevedenkäsittelyssä, jonka puhdistusteho perustuu runsaan mikrobikannan toiminnan ylläpitämiselle niille ihanteellisissa olosuhteissa. Biosidit, hapettavat aineet ja fysiologiset mikrobien torjuntamenetelmät tuhoaisivat myös haluttua mikrobistoa ilmastusaltaassa. (Tuhkanen et al. 2007.) Patogeeneiden mikrobien spesifisiä biosideja ei ole juurikaan saatavilla tai ne ovat liian kalliita jatkuvaan käyttöön. Joitain ilmastusaltaaseen tulevia tunnetusti paljon patogeeneja sisältäviä virtauksia voidaan desinfioida ennen ilmastukseen johtamista. Esimerkiksi vähäisen virtaaman rejektivedet lietteenkäsittelystä sisältävät tutkimusten perusteella paljon mykobakteereja ja legionellaa. Käyttämällä nopeasti hajoavia biosideja tai lämpökäsittelyä rejektivesien kierrossa ennen ilmastusaltaalle johtamista voidaan vähentää patogeeneiden mikrobien mahdollista konsentroitumista biologisessa käsittelyssä. Rejektivesien johtamista jäähdytystorneille tulisi myös välttää. (Kusnetsov et al. 2006.)

2.4 Bioaerosoleilta suojautuminen

Biologisessa jätevedenkäsittelyssä ei voi välttää mikrobien aerosolisoitumista ja leviämistä, elleivät jätevesialtaat ole täysin katettuja. Mahdollisesti käytössä olevat aerosolien leviämisen ehkäisykeinot eivät estä mikrobien liikettä ilmassa täydellisesti. Bioaerosolien lähteiden lähellä on aina kohonneet mikrobipitoisuudet ilmassa. Laitoksen tulisi tehdä riskien arviointi tunnistuen bioaerosolien lähteet ja laatia tarkkailuohjelma ja työturvallisuusohjeistus. Mahdolliset toimet bioaerosolien lähteiden minimoimiseksi toteutetaan ja työntekijöiden altistusta vähennetään. (Goyer et al. 2001)

Bioaerosolien aiheuttamien riskien vähentämiseksi on aina suositeltavaa suojautua suojaruustuksella bioaerosolien lähteiden luona työskennellessä. Jätevedenpuhdistamoiden alueella ja etenkin tunnetusti paljon aerosoleja muodostavien kohteiden lähellä, kuten jäähdytystornit, ilmastusallas sekä lietteenkäsittely- ja -kuivaustilat, tulisi aina käyttää sopivia suojavälineitä. Työntekijöiden tulisi myös olla tietoisia aerosolivälitteisten tautien riskeistä ja oireista. Henkilökohtaisten suojaamien käyttöön tulee olla ohjeistus ja suojaamia täytyy huoltaa asianmukaisesti. (Tuhkanen ja Hiltunen 2008) Jätevedenpuhdistamoiden työntekijöillä on yleisesti havaittu altistusta mikrobeille vasta-aineiden noususta ja oireista, joten kaikilla puhdistamoilla olisi hyvä käyttää suojaamia, vaikkei kyseiseltä puhdistamolta olisikaan löydetty aerosolivälitteisiä patogeeneja (Thorn ja Kerekes 2001, Giusti 2009, Mulloy 2001, Heinonen-Tanski 2009.)

Hengityksensuojaimet ovat tärkein suojaruustus aerosolivälitteisiä tauteja vastaan. Etenkin puhdistus- ja huoltotoimia riskikohteissa suoritettaessa tulisi kiinnittää erityisesti huomiota suojaukseen. Hengityssuojaimen suodattimen suojausluokaksi suositellaan P3-luokan hiukkassuodatinta. (Laitinen et al. 1991) Tavalliset hengityksen suojaukseen tarkoitetut puolimaskit aiheuttavat vastusta hengittämiselle eivätkä sovellu kovin hyvin pitkäaikaiselle käytölle. Pidempiaikaiseen käyttöön ja raskaammissa työtehtävissä suositellaan moottoroituja kokokasvojen hengityssuojaamia. Suojaimien tehokkuuteen vaikuttavat hengityksen suojaamisen suodattimen materiaali, suojaamisen istuvuus ja tiiviys, huoltaminen, varastointi, desinfiointi sekä uudelleen käyttö. (Rengasamy et al. 2004) Hengityksensuojaimen lisäksi paljon aerosoleja synnyttävissä työtehtävissä riskikohteissa tulisi käyttää vedenpitävää helposti puhdistettavaa työvaatetusta mikro-

bien leviämisen ehkäisemiseksi. Esimerkiksi jäähdystorneja puhdistettaessa painepe-surilla ja kemikaaleilla tulisi olla hengityksen suojaimen lisäksi käytössä vedenpitävät haalarit, kumihansikkaat ja -saappaat sekä kasv suojuukset. (Tuhkanen et al. 2007.)

2.5 Bioaerosolien mittausmenetelmät

Bioaerosolien pitoisuutta ja laatua voidaan tutkia joko mikrobien viljelymenetelmillä, mikroskopoimalla, biologisin ja kemiallisin menetelmin tai mittalaitteilla. Mikrobien tunnistusmenetelmillä voidaan tutkia haluttujen taudinaiheuttajien esiintymistä näytteis-sä tai vaihtoehtoisesti voidaan tutkia kokonaismikrobipitoisuuksia bioaerosolien muo-dostumisen ja määrän arvioimiseksi. (Karra ja Katsivela 2007, Sánchez-Monedero et al. 2008, Kusnetsov et al. 2006.) Endotoksiinipitoisuuksia mitataan LAL- tekniikalla (Li-mulus amebocyte lysate) ja muilla biokemiallisilla tai kaasukromatogra-fia/massaspektrometria -menetelmillä (Duquenne et al. 2012). Bioaerosolien lähteen taudinaiheuttajariskin arvioimiseksi voidaan myös ilmastusaltaan jätevedestä määrittää tunnettujen aerosolivälitteisten mikrobien pitoisuuksia. Aktiivilietealtaan jätevesi sisäl-tää hyvin runsaasti mikrobeja, joten näyte täytyy valmistella jätevedelle sopivalla mene-telmällä haluttujen mikrobien tunnistamiseksi. (Kusnetsov et al. 2006)

2.5.1 Mikrobiologiset viljelymenetelmät

Mikrobien viljelymenetelmiä käytettäessä ilmasta otetaan aerosolinäytteitä laskeutus-maljoille tai keräimen avulla suoraan viljelyalustalle tai suodattimelle, josta mikrobit siirretään viljelyalustalle. Yleisimmin käytetty keräintyyppi on hiukkasen inertiaan pe-rustuva impaktori, joka voi olla yksi- tai monivaiheinen aerosolien kokojakauman sel-vittämiseksi. Impaktori kerää ilmanäyteen pumpun avulla ja hiukkaset, joilla on riittävä inertia törmäävät kokojakauman mukaiselle keräyslevylle aerodynaamiselta halkaisijal-taan pienempien hiukkasten jatkaessa ilmapirran mukana seuraavalle tasolle tai pois keräimestä. Yleisimmin mikrobinäytteenottoon käytetty impaktori on Andersenin keräin (Kuva 12). (Loo ja Cork 1988, Novick ja Alvarez 1987, Park et al. 2009.)

Keräimen rakenteesta riippuen kerättävien mikrobien elinkelpoisuus kasvatusalustalla vaihtelee (Chang ja Hung 2012). Impaktori voi aiheuttaa mikrobeille vaurioita, minkä vaikutuksesta viljelemällä todettavien mikrobien määrä ei välttämättä vastaa aerosoleis-sa olevien viljeltävien mikrobien kokonaismäärää. Tarkkuuden parantamiseksi voidaan käyttää virtuaalista impaktoria, joka jakaa ilmapirran kahteen osaan ja ohjaa inertialtaan suuremmat partikkelit hitaampaan ilmapirtaan. Virtuaalinen impaktori korvaa törmäys-pinnan hitaasti liikkuvalla ilmalla vähentäen mikrobien vahingoittumista ja parantaen mittauksen luotettavuutta. (Loo ja Cork 1988, Novick ja Alvarez 1987, Park et al. 2009, TSI 2013.) Aerosolien keräämiseen voidaan käyttää myös sykloni- tai nestekeräimiä (impinger), jotka keräävät aerosolit nesteeseen aiheuttamatta aerosolien mikrobeille suurta räsitusta. Syklonikeräimen etuna bioaerosolien näytteenotossa pidetään sen ky-kyä erotella hiukkasiin kasautuneet mikrobit elinkykyisinä nesteeseen törmäyttämällä, jolloin viljelyn tuloksena voidaan saada tarkemmin yksittäisten mikrobien määrä eikä vain mikrobeja sisältävien hiukkasten määrää. (Blatny et al. 2011, Mathieu et al. 2006.)



Kuva 12. Aerosolien keräämiseen ja mittaukseen käytettäviä laitteita: Andersenin keräin (Mars Bioanalytical Pvt. Ltd. 2015), Fluke 985 hiukkaslaskuri (Fluke Corporation 2015), Button-henkilökohtainen keräin (SKC Inc. 2015) ja fluoresenssiin perustuva bioaerosolihukkasten mittalaite IMD (BioVigilant 2015).

Aerosolinäytemaljojen mikrobiviljely toteutetaan samoilla menetelmillä kuin vesinäytteille tehtävä viljely. Mikrobiviljelyn tulokset esitetään yksikössä pmy/m^3 (ilmanäyte) tai pmy/l (vesinäyte) eli pesäkettä muodostavaa yksikköä ilmakehiä tai näytelitraa kohti. (Kusnetsov et al. 2006.) Mikrobin viljelymenetelmillä ei pystytä määrittämään kaikkia ilma- tai vesinäytteessä olevia soluja tai solunosia vaan ainoastaan alustalle päätyvät lisääntymiskelpoiset solut tai solukasaumat. Kokonaissolumäärä näytteessä on aina suurempi kuin mitä pystytään viljelemällä saamaan lisääntymään. Kokonaissolumäärää pystytään arvioimaan mikroskopointimenetelmillä, PCR-tekniikalla tai fluoresointiin perustuvilla mittalaitteilla. Lisääntymiskelpoisten solujen pitoisuuden arviointi voi kuitenkin antaa paremmin tietoa infektoimiskykyisten solujen pitoisuudesta näytteessä. (Blais-Lecours et al. 2015, Kusnetsov et al. 2006.)

Ilmanäytteen viljeltävien mikrobin kokonaispitoisuuden arvioimiseksi voidaan tutkia aerobien mikrobin, heterotrofisten bakteerien, mesofiilisten bakteerien tai joidenkin indikaattorimikrobin pitoisuuksia. (Karra ja Katsivela 2007, Sánchez-Monedero et al. 2008, Kusnetsov et al. 2006.) Aerobien mikrobin viljelyalustana käytetään TH-kasvualustaa ja inkubointi tehdään $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa kahden vuorokauden ajan. Heterotrofibakteerien viljelyalustana käytetään R2A-kasvualustaa ja inkubointi tapahtuu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa 3-14 vuorokauden ajan. (Kusnetsov et al. 2006) Mesofiiliset bakteerit viljellään ei-selektiivisellä ravinneagarilla $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa kahden vuorokauden ajan (Karra ja Katsivela 2007).

ISO 11731 on standardi viljeltävien legionellojen pitoisuuden määrittämiseksi vesinäytteestä. Runsaasti mikrobeja sisältävää jätevettä täytyy aluksi laimentaa luettavan tuloksen saamiseksi viljelyalustalta. (Kusnetsov et al. 2006.) Menetelmän huono puoli on, että näytteen valmistelun jälkeen näytteen inkuboiminen viljelyalustalla $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa kestää vähintään 10 päivää. Tulosten saamisen hitauden lisäksi viljelymenetelmä on työläs ja legionellojen pienin havaittavissa oleva pitoisuus jätevesinäytteestä on yleensä $1000\text{ pmy}/\text{l}$, joten näytteiden tulee olla hyvin edustavia tutkimuskohteesta toivotun tarkkuuden saavuttamiseksi. (Kusnetsov et al. 2006.)

Mykobakteerien viljelyä varten vesinäyte esikäsitellään kemiallisesti mykobakteereja nopeampikasvuisten mikrobin kasvun estämiseksi. Viljelyn jälkeen solut tunnistetaan mykobakteereiksi happovärijäyksen ja kaasukromatografisen analyysin avulla. Mykobakteerit ovat hidaskasvuista ja niiden viljely kestää jopa kaksi kuukautta, joten mene-

telmällä saadaan hyvin hitaasti tietoa kohteen mahdollisesta bioaerosolien aiheuttamasta riskistä. (Kusnetsov et al. 2006, Hardy Diagnostics 2015, BD 2015.)

Työntekijöiden bioaerosolialtistusta voidaan tutkia henkilökohtaisten kannettavien keräimien (Kuva 12) avulla kiinnittämällä keräin työpäivän ajaksi keräämään ilmaa suunnilleen hengityskorkeudelta. Henkilökohtaisissa keräimissä on yleensä pieni pumppu, jonka avulla kerätään aerosoleja suodattimelle tai sykloniteknikalla. Kerätyt aerosolit voidaan analysoida halutuilla menetelmillä päivän aikana ilmenneen hiukkas- ja mikrobialtistuksen selvittämiseksi. (Aizenberg et al. 2000, Kenny et al. 1999, Agranovski et al. 2005.)

2.5.2 Mikrobilajien tunnistusmenetelmät, PCR ja mikroskopointi

Tarkemman tiedon saamiseksi biologisen hiukkasen lajista voidaan käyttää molekyyli-biologista polymeerasiketjureaktio- eli PCR-tekniikkaa (polymerase chain reaction) tunnistusmenetelmänä, jonka avulla pystytään tunnistamaan mikrobi lajitasolla DNA- ketjujen monistamiseen perustuen. PCR-menetelmän etuna viljelymenetelmiin verrattuna on analyysin tulosten valmistuminen muutamissa tunneissa viljelyn jopa useisiin päiviin verrattuna sekä tarkka tutkittavien lajien tunnistus. (Peccia ja Hernandez 2006, Blatny et al. 2011, Pascual et al. 2001.)

Joillekin mikrobeille kuten *Legionella pneumophilalle* ja *Mycobacterium aviumille* voidaan käyttää suoria mikroskopointimenetelmiä solujen laskemiseksi vesinäytteestä. FISH-värjäysmenetelmällä solut muutetaan fluoresoiviksi lajispesifisellä koettimella, minkä jälkeen ne voidaan tunnistaa ja laskea mikroskoopin avulla. Menetelmällä saadaan viljelymenetelmiä nopeammin ja tarkemmin tietoa bakteerien esiintymisestä ja pitoisuudesta. Värjäysmenetelmällä voidaan tunnistaa myös lisääntymiskyvyttömät solut. Tuloksena saadaan solua/l ja tarkkuus voi olla muutaman sadan solun luokkaa litrassa näytettä. (Kusnetsov et al. 2006.) FISH-menetelmän huonoja puolia on ollut lajispesifisiksi luultujen koettimien tarttumisen myös muihin lajeihin, jolloin mikroskoopimalla saatetaan laskea muitakin lajeja analysoitavaksi lajiksi. Spesifisiä koettimia kehitetään jatkuvasti tarkempia tuloksia antaviksi. (Whiley et al. 2011, Sizova et al. 2015.)

2.5.3 Biologisten hiukkasten optiset mittalaitteet

Bioaerosolien pitoisuuksien suoraan mittaamiseen ilmasta käytetään biologisten hiukkasten optisia mittalaitteita. Nämä perustuvat yleensä biologisten hiukkasten fluoresenssiin, jossa biologisesti aktiivinen molekyyli viritetään ultraviolettiaallonpituudella lasersäteellä saaden sen säteilemään tunnistettavalla aallonpituudella. Näyteilma johdetaan virittävän valon ja optisten sensorien ohi, jotka mittaavat hiukkasten määrän, kokojakauman ja biologisten hiukkasten lukumäärän fluoresenssin perusteella. (Courvoisier et al. 2008, TSI 2002) Fluoresenssiin perustuvan menetelmän huono puoli on, että myös jotkin orgaaniset molekyylit virittyvät säteilemään fluoresenssivaloa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi joissakin laitteissa käytetään kahdella eri aallonpituudella hiukkasia virittävää järjestelmää, jonka avulla erotetaan biologiset hiukkaset säteily-spektrin perusteella fluoresoivista kemiallisista hiukkasista. (O'Connor et al. 2015, Courvoisier et al. 2008.) Fluoresoivaan menetelmään perustuvia laitteita ovat mm. WIBS (Wideband Integrated Bioaerosol Sensor, O'Connor et al. 2015), UV-APS (Ultraviolet Aerodynamic

Particle Sizer, TSI 2002), FLAPS (Fluorescence Aerosol Particle Sensor, TSI 2012, Blatny et al. 2011) ja IMD (Instantaneous Microbial Detection, Bhupathiraju et al. 2007, Kuva 12). Biologisten hiukkasten mittalaitteet ovat yleensä isokokoisia, painavia eivätkä sovellu tällöin hyvin laajamittaisiin kenttämittauksiin. (TSI 2002, BioVigilant 2013.) Virtaussytometri on fluoresenssiin ja valon sirontaan perustuva bioaerosolien mittari, josta on myös kenttäolosuhteisiin paremmin sopivia kaupallisia ratkaisuja. Virtaussytometrillä pystytään tunnistamaan myös bakteerilajeja fluoresoivien leimausmenetelmien avulla. (Tuominen 2006.)

2.5.4 Hiukkasmittarit

Jätevesialtaasta muodostuvat aerosolihiukkaset sisältävät suurella todennäköisyydellä biologisia komponentteja, joten tavallisella pienhiukkasmittauksella voidaan jo saada tietoa bioaerosolien muodostumisesta ja leviämisestä tunnetun lähteen ympäristössä hiukkasjakauman ja -pitoisuuden poiketessa taustasta. Mikrobeja sisältävien aerosolien ollessa pääasiassa hiukkaskooltaan 0,5 - 10 µm riittää hiukkasmittarin tarkkuudeksi tämän kokoluokan hiukkasten mittaaminen (Hung et al. 2009, Li et al. 2010, Goyer et al. 2001). Hiukkasmittarit (Kuva 12) mittaavat aerosolien kokojakauman ja hiukkasmäärän ilmatilavuudessa halutulta aikajaksolta. Hiukkasmittareista on monia helppokäyttöisiä, kevyitä ja hyvin kenttämittauksiin soveltuvia kaupallisia laitteita (esim. Fluke ja TSI).

Mitattaessa keinotekoisien tuulensuoja-aitojen vaikutusta aerosolien pitoisuuksiin tutkimuksissa on havainnointu pääasiassa suuremman tai pienemmän kokoluokan hiukkasia, joten bioaerosolien kokoluokan aerosolien vähenemisestä tuulensuoja-aitojen tai läpäisevien katteiden vaikutuksesta ei löydy suoraan vertailukelpoista tietoa julkaisuista (Vanella et al 2013, Raupach et al. 2001, Steffens et al. 2012, Mercer 2009). Raupach et al. (2001) laskivat matemaattisella mallilla läpäisevyydeltään 50% tuulensuoja-aidanteiden pysäyttävän suoraan ainakin noin 20 % kooltaan 10µm hiukkasista ja arvioivat tehon pienemmillä hiukkasilla huonommaksi. Pidättymisen lisäksi tuulensuoja-aidat lisäävät hiukkasten laskeutumista, lisäävät vertikaalista sekoittumista ja pitoisuuksien laimenemista sekä vähentävät tuulen mukana kauemmas leviämistä, joten etäämmällä aidanteesta myös pienhiukkaspitoisuudet ovat teoriassa pienemmät (Hong et al. 2015, Santiago et al. 2007, Malone 2004). Kasvillisuusaidanteiden on arvioitu vähentävän PM10-hiukkaspitoisuuksia tuulen alapuolella 0-60 % aidanteen kokoonpanosta, ulottuvuuksista, läpäisevyydestä ja kasvilajeista riippuen (Tyndall ja Colletti 2007, Malone 2004, Raupach et al. 2001, Mao et al. 2013, Tiwary et al. 2005).

Hiukkasten mittaaminen ei anna tietoa mahdollisten taudinaiheuttajien läsnäolosta tai leviämisestä infektiokykyisinä. Mikrobit voivat inaktivoitua nopeasti ilmasto-olosuhteiden vaikutuksesta, joten hiukkaspitoisuudet aerosolien lähteen ympäristössä eivät suoraan kuvaa altistusriskiä taudinaiheuttajille vaan antavat arvion aerosolien leviämisestä lähteen ympäristössä. Hiukkaspitoisuuden ja bioaerosolien riskin välille on vaikea valita raja-arvopitoisuuksia, koska muodostuvien aerosolien laatu ja aerosolien mikrobipitoisuudet ovat lähdekohtaisia. (Karra ja Katsivela 2007, Dowd et al. 2000.)

2.6 Aerosolien leviämisen mallinnusmenetelmät

Monimutkaiset fyysiset prosessit määrittävät aerosolien liikkumista ja leviämistä ilmassojen mukana aerosolin lähteen ympäristössä. Aerosolien liikkeitä ulkoilmassa hallitsee ilmakehän tuulikentät, jotka luokitellaan vaakatasoisen ulottuvuuden ja aikajakson mukaan mikro-, meso- ja makroskaalan tapahtumiin. Makroskaalaksi lasketaan yli 2000 km etäisyydet ja yli 3 päivän tapahtumat, mikroskaalaksi alle 2 km ja alle 1 tunnin tapahtumat ja mesoskaala on näiden välillä. Mikroskaalan prosessit ovat pääasiainen vaikuttava voima paikallisille tuulikentille rakennusten ympärillä. Nämä paikalliset tuulikentät syntyvät ilmakehän ja paikallisen turbulenssin, katukanjoni-ilmion ja lämpötilaerojen vaikutuksesta. (Blatny et al. 2008.)

Aerosolit kulkeutuvat pääasiallisesti tuulen suunnan mukaisesti, mutta ilmakehän turbulenssiset ja konvektiiviset liikkeet vaikuttaa hiukkasten leviämiseen pysty- ja vaakatasossa sekä kohtisuorasti tuulen suuntaan nähden. Ilmakehän turbulenssin määrään eli stabiilisuuteen vaikuttavat tuulen nopeus, lämpötilaerot, ilmanpaine, auringon säteilyn määrä ja ilmankosteus. Ilmakehän stabiilisuus määrittää turbulenssin määrän ilmakehässä ja on siksi merkittävässä asemassa aerosolien leviämisen arvioimisessa. (Das 2013.)

Ilmakehän stabiilisuus määritetään yleensä Pasquillin tekemän stabiilisuusluokituksen mukaisesti (Taulukko 1) tuulen nopeuteen, auringon säteilyyn ja pilvipeitteen määrään perustuen. Ilmakehän turbulenssin määrä jaetaan luokituksessa kuuteen tyyppilliseen tilanteeseen (A-F), jotka pystytään määrittämään yksinkertaisesti sääolosuhteiden arviosta. Luokka F tarkoittaa hyvin stabiilia tilannetta, jossa pystysuuntainen sekoittuminen on vähäistä, ja luokka A tarkoittaa hyvin epästabiilia eli labiilia tilannetta, jossa pystysuuntainen sekoittuminen on merkittävää. Auringon säteilyn määrä arvioidaan voimakkaaksi auringon kulman ollessa yli 60° ja pilvipeitteen ollessa vähäistä, kohtalaiseksi kulman ollessa 35° - 60° sekä pilvipeitteen vähäistä ja heikoksi kulman ollessa alle 35° tai hallitsevammalla pilvipeitteellä. Täyden pilvipeitteen vallitessa tilanne tulkitaan neutraaliksi (D) sekä päivällä että yöllä. (Allen ja Durrenberger 2003).

Taulukko 1. Pasquillin stabiilisuusluokitus ja luokkia vastaavat sääolosuhteet (Allen ja Durrenberger 2003).

Tuulennopeus m/s	PÄIVÄ			YÖ	
	Saapuva auringon säteily Voimakas	Kohtalainen	Heikko	Pilvipeite > 4/8	< 3/8
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

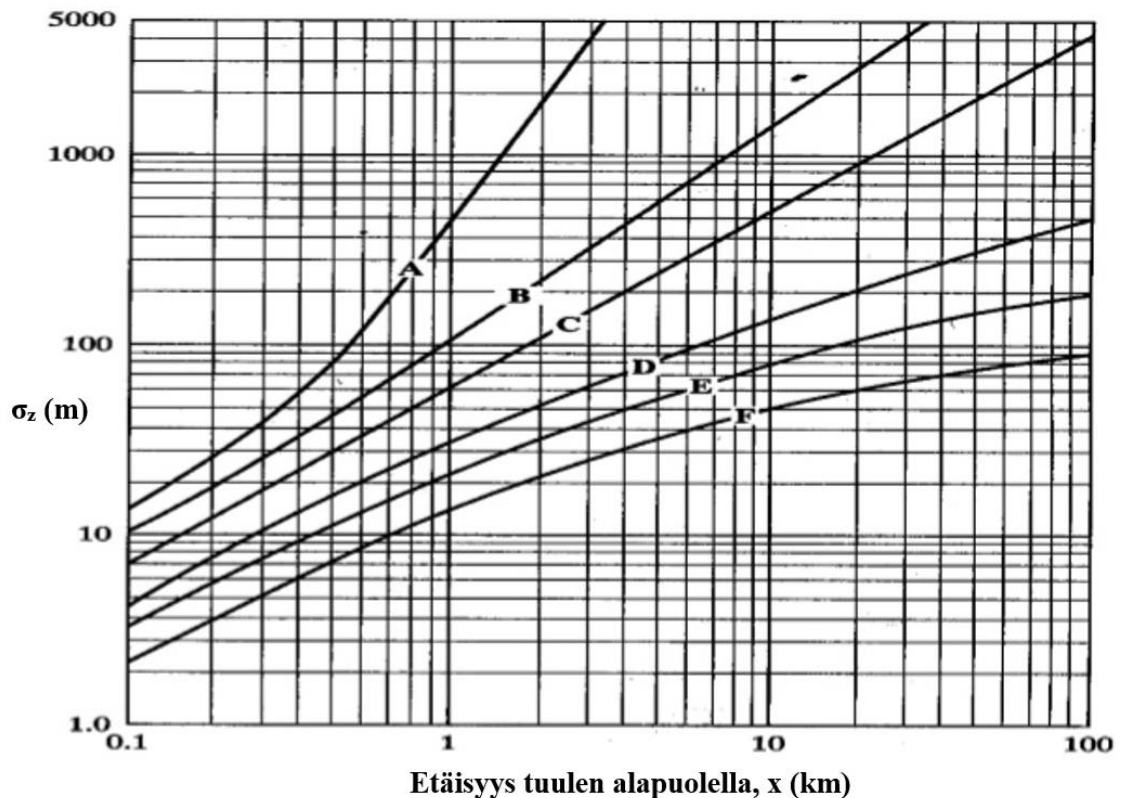
Aerosolien ja kaasujen pitoisuuksien leviämistä, hajaantumista ja laimenemista arvioidaan ilmansaasteiden leviämisen mallien avulla. Mallien avulla voidaan laskea erilaisista lähteistä (piste, viiva, alue) tulevien massavirtojen aiheuttamien pitoisuuksien leviämistä kolmiulotteisesti eri etäisyyksillä lähteestä. Yleisin ja yksinkertaisin mallinnuksissa käytetty laskumenetelmä on Gaussilainen leviämisyhtälö (1), johon useat eri käyttötarkoituksiin räätälöidyt ilmansaastemallinnukset perustuvat. Yhtälö 1 on yleisin muoto pistelähteelle tarkoitettua Gaussilaisesta leviämisyhtälöstä, jossa viimeinen eksponenttitermi kuvaa ilmansaasteen täydellistä heijastumista maahan osuessaan. Heijastumisen

termi voidaan jättää pois, jos oletetaan epäpuhtauksien kuten hiukkasten adsorboituvan maahan osuessaan. (Allen ja Durrenberger 2003, Dowd et al. 2000, Smith 1995, Holden ja Babcock 1985.)

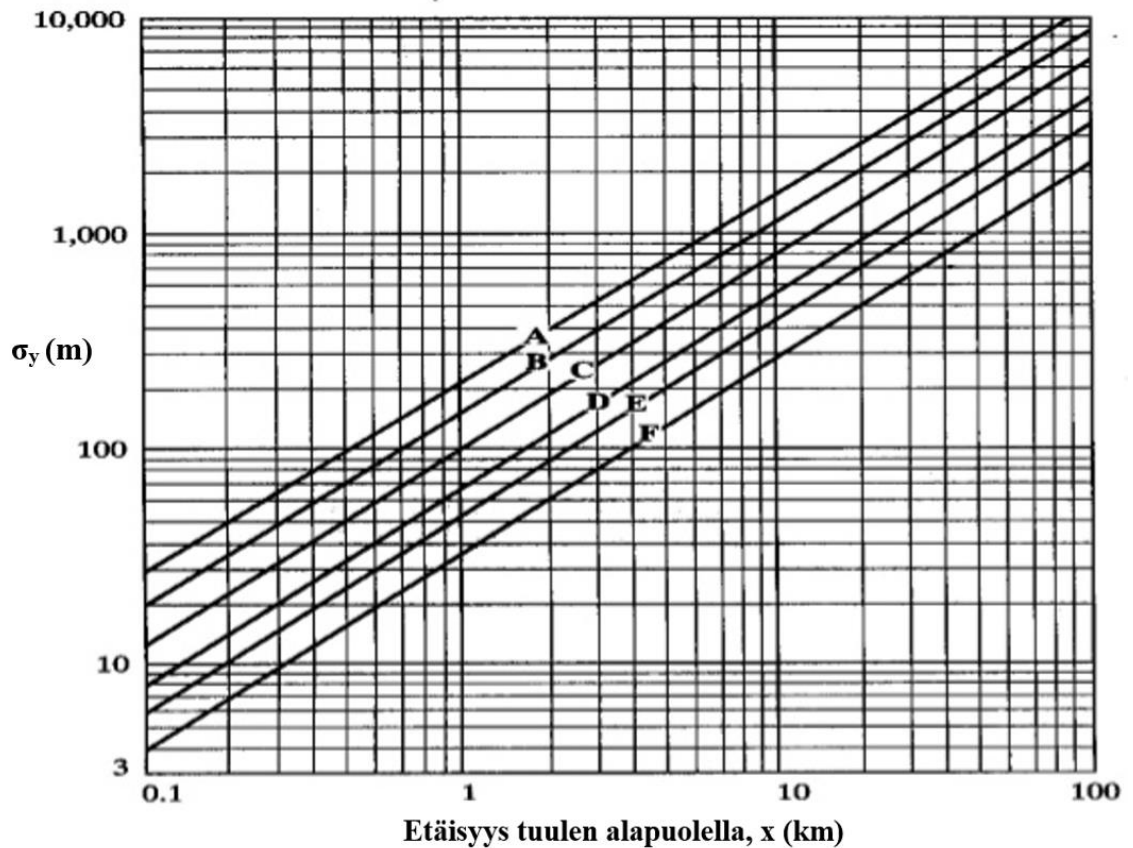
$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left(\exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right) \quad (1)$$

missä $C(x,y,z)$ on pitoisuus koordinaatissa (x,y,z) [g/m^3] tai [$\text{hiukkasta}/\text{m}^3$]
 x, y ja z etäisyys päästölähteestä [m]
 Q on lähteestä vapautuva massavirta [g/s] tai [$\text{hiukkasta}/\text{s}$]
 u on vallitseva tuulen nopeus [m/s]
 σ_y ja σ_z ovat pitoisuusjakauman keskihajonnan mukaiset parametrit [m]
 H on lähteen efektiivinen korkeus [m]

Gaussilainen yhtälö (viuhkamalli) olettaa pitoisuuden leviävän Gaussin jakauman mukaisesti pysty- ja vaakatasossa tasaisena viuhkana (plume). Pitoisuuden keskihajontaa merkitään laimenemistermeillä vaakatasossa σ_y ja pystytasossa σ_z . Nämä parametrit luetaan stabiilisuusluokan mukaisesti kuvaajista (Kuvat 13 ja 14) tai lasketaan olosuhteiden mukaisiin vakioihin perustuen. Yhtälöllä lasketaan vakiotilaoletuksella (steady state) pitoisuus halutulla etäisyydellä lähteestä annettuihin parametreihin pohjautuen. Pohjatietona tarvitaan sääolosuhdetietoja (stabiilisuusluokka, tuulen nopeus), päästölähteen ominaisuudet ja päästöjen massavirta. (Allen ja Durrenberger 2003.)



Kuva 13. Vaakatason laimenemistermi σ_z etäisyyden funktiona lähteestä alatuuleen eri stabiilisuusluokille (Allen ja Durrenberger 2003).



Kuva 14. Pystytason laimenemistermi σ_y etäisyyden funktiona lähteestä alatuuleen eri stabiilisuusluokille (Allen ja Durrenberger 2003).

Gaussilaisen yhtälön soveltuvuus bioaerosolien leviämisen arviointiin aluelähteestä on rajallinen, koska hiukkaspäästöjen massavirtaa aluelähteestä (hiukkasta/s/m²), kunkin mikrobin tuhoutumisnopeutta ja muodostuvan hiukkasjakauman keskimääräistä laskeutumisenopeutta ei pystytä yksiselitteisesti mittaamaan ja niiden arvioimisen tekniikat ovat epätarkkoja. Tilastollisella mallinnuksella, joka perustuu mittausdataan ja tilastolliseen analyysiin, voidaan päästä yhtä hyvään arvioon aerosolien leviämisestä Gaussilaisen yhtälön rajoitusten vuoksi. (Holden ja Babcock 1985.) Gaussilaista yhtälöä voidaan parantaa ja käyttää alue- tai pistelähteisiin tunnetun mikrobin leviämisen mallintamiseen arvioimalla hiukkasten vapautumisnopeus mittausten ja taaksepäin laskemisen periaatteella (2) sekä käyttämällä kyseiselle mikroбилle ja vallitseville ilmasto-olosuhteille määritettyä inaktivaatiovakioita (3). Tällöin yhtälön avulla voidaan arvioida tunnetusti lähteestä leviävän taudinaiheuttajan leviämistä (Van Leuken et al. 2015, Dowd et al. 2000, Smith 1995).

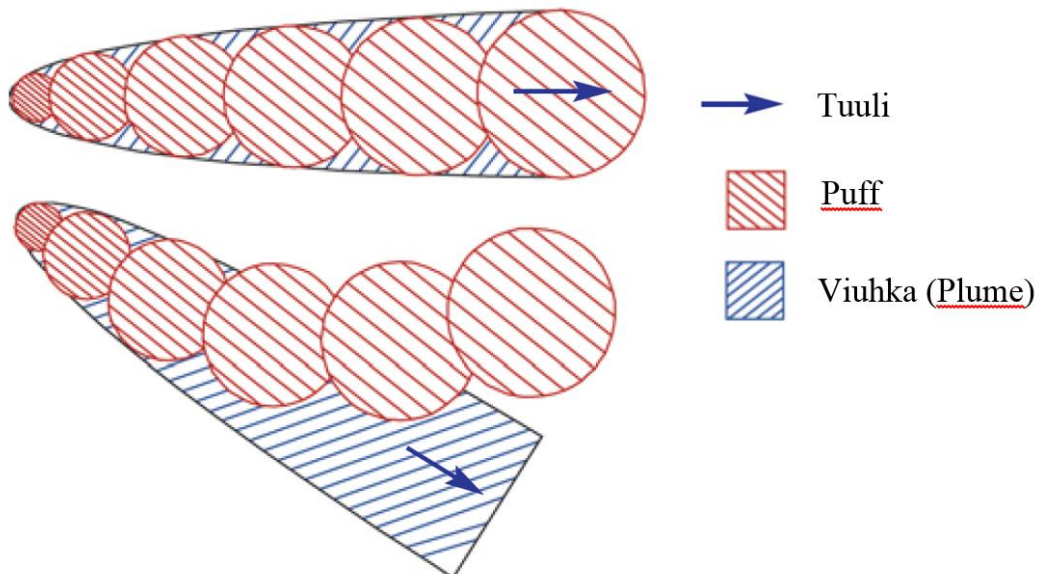
$$Q = C \cdot U \cdot A \quad (2)$$

missä Q on lähteestä vapautuva massavirta [hiukkasta/s]
 C on hiukkaspitoisuus [hiukkasta/m³]
 U on vallitseva tuulen nopeus [m/s]
 A lähteen pinta-ala [m²]

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left(\exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right) \exp\left[-\lambda \cdot \frac{x}{u}\right] \quad (3)$$

missä $C(x,y,z)$ on pitoisuus koordinaatissa (x,y,z) [g/m^3] tai [hiukkasta/ m^3]
 x, y ja z etäisyys päästölähteestä [m]
 Q on lähteestä vapautuva massavirta [g/s] tai [hiukkasta/s]
 u on vallitseva tuulen nopeus [m/s]
 σ_y ja σ_z ovat pitoisuusjakauman keskihajonnan mukaiset parametrit [m]
 H on lähteen efektiivinen korkeus [m]
 λ on inaktivaatiovakio tarkasteltavalle mikrobille [1/s]

Gaussilaiseen yhtälöön perustuvat mallit yksinkertaistavat tuulikentän kauttaaltaan homogeeniseksi eivätkä mallinna yksityiskohtaisesti ympäristön muodon vaikutuksia ilman turbulenssiin (Van Leuken et al. 2015). Mallia voidaan parantaa ja ottaa huomioon muutokset päästövirrassa ja tuulen suunnassa laskemalla halutuun aikavälein vapautuva päästöpilvi erillisenä pakettina. Tätä kutsutaan puff-laskennaksi ja sen avulla päästöjen leviämistä voidaan mallintaa ajan ja paikana mukaan muuttuvan tuulen mukaisesti eri suuntiin liikkuvina pilvinä (Kuva 15). Gaussilaisten mallien lisäksi muita ilmansaasteiden leviämisen mallinnukseen käytettäviä laskentatapojen perusteella jaoteltuja mallityyppejä ovat laatikkomallit, Euler- ja Lagrange-tyyppiset mallit sekä virtausmallit. (HSY 2015, Chamecki 2012, Das 2013, Van Leuken et al. 2015.)



Kuva 15. Laskentamallien erot viuhka- ja puff-tyyppisissä leviämismallinnuksissa. Puff-malli ottaa huomioon ajan ja paikan mukaiset muutokset tuulen suunnassa ja nopeudessa. (Lakes Environmental 2015, muokattu.)

Euler- ja Lagrange mallit kuvaavat saasteiden leviämistä tarkemmin myös vaihtelevissa maastonmuodoissa. Euler-tyyppisissä malleissa on kiinteä kolmiulotteinen koordinaatisto, jossa pitoisuuksia kuvataan ajan funktiona valitussa kiinteässä hilapisteessä. Euler-mallit perustuvat yleensä advektio-diffuusioyhtälöön, joka on Navier–Stokesin yhtälön yksinkertaistettu muoto. Lagrange-tyyppisissä malleissa saasteiden kulkeutumista mallinnetaan ilman virtauksen mukana liikkuvassa koordinaatistossa. Virtausmallit eli CFD-mallit (Computational fluid dynamics) mallintavat kaikkein tarkimmin fysikaalisia

tapahtumia perustuen massan, liikemäärän ja energian säilymisen yhtälöihin. CFD-malleilla päästään hyvään tarkkuuteen monimutkaisten maastonmuotojen aiheuttamien muutosten mallintamiseen ja sitä voidaan käyttää yhdistettynä Euler- ja Lagrange-tyyppiseen mallinnukseen. CFD-mallit antavat luotettavimpia tuloksia mikroskaalan ilmiöistä, mutta ne tarvitsevat suuren määrän lähtötietoa ja laskenta-aikaa simulaation toteuttamiseen. (HSY 2015, Van Leuken et al. 2015, Blatny et al. 2008.) Käyttäen joko yhtä tai useampaa mallityyppiä laskentapohjanaan on luotu useita eri tarkoituksiin käytettäviä ilmansaasteiden leviämismalleja, joista useita on sovellettu bioaerosolien leviämisen mallinnukseen (Taulukko 2). (Van Leuken et al. 2015.) Tämän diplomityön tulosten mallinnuksessa käytettiin Gaussilaista viuhkamallia ilman bioaerosolien inaktivaation vakiota.

Taulukko 2. Bioaerosolien leviämisen tutkimuksessa käytettyjä ilmansaasteiden leviämismalleja (Van Leuken et al. 2015).

Mallin nimi	Kehittäjä	Mallin tyyppi
ADMS	Cambridge Environmental Research Consultants (UK)	Gaussilainen viuhkamalli
AERMOD	AMS (USA); EPA (USA)	Gaussilainen viuhkamalli
ALOHA	NOAA (USA)	Gaussilainen viuhkamalli
CALPUFF	EPA (USA)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
DERMA	Danish Meteorological Institute (Tanska)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
DREAM	University of Malta	Euler/Advektio-diffuusio
Fluent	ANSYS (USA)	Euler/CFD
GIADA	Italian Environmental Protection Agency	Gaussilainen viuhkamalli
HPAC	Defense Threat Reduction Agency (USA)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
HYSPLIT	NOAA (USA); ABM (Australia)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
ICAIR	-	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
INPUFF	EPA (USA)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
LODI	Department of Energy (USA), University of California (USA)	Lagrange/hiukkasmalli
MLCD	University of Alberta (Kanada); Canadian Meteorological Centre (Kanada)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
NAME	Met Office (UK)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
OMEGA	Center for Atmospheric Physics, Science Applications International Corporation (USA)	Euler/Advektio-diffuusio ja Lagrange/Gaussilainen puff-malli
OPS-ST	National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) (Alankomaat)	Gaussilainen viuhkamalli
RIMPUFF	Risø National Laboratory (Tanska)	Lagrange/Gaussilainen puff-malli
SCREEN3	EPA (USA)	Gaussilainen viuhkamalli

3 Menetelmät ja materiaalit

Potentiaalisimpia tekniikoita bioaerosolien leviämisen ehkäisemiseksi kokeiltiin jätevedenpuhdistamoilla testikohteiksi soveltuvilla pienemmillä ilmastusaltailta. Sopivia tekniikoita tutkittiin kirjallisuuden pohjalta ja saatavia materiaaleja etsittiin suomalaisilta maahantuojilta. Tutkimuskohteisiin sopivat tekniikat valittiin yhdessä kohdepuhdistamoista vastaavan henkilökunnan kanssa. Tutkittaviksi rakenteiksi valittiin tuulensuoja-aita ja läpäisevä katemateriaali. Tuulensuoja-aitoja on käytetty toimivana tekniikkana teollisuudessa ja maataloudessa hiukkasten leviämisen ehkäisemiseksi ja sen tehoa haluttiin testata ilmastusaltalta vapautuviin aerosoleihin. Läpäisevien katemateriaalien tehokkuutta haluttiin testata niiden edullisuuden ja keveyden ansiosta. Muut aerosolien leviämisen hallintaan käytettävät tekniikat kuten täysikatteet tarvitsevat raskaampia rakenteita, joiden asentaminen on liian työlästä ja kallista käytettäväksi lyhytaikaisessa tutkimuksessa.

Testattavien tekniikoiden tehokkuuden arvioimiseksi tehtiin mittauksia, joita varten kehitettiin olosuhteisiin soveltuvaa mittaushjelmaa. Mittaukset toteutettiin käyttäen hiukkasmittaria aerosolien pitoisuuksien mittaukseen ja sääasemaa tuuliolosuhteiden arvioimiseen. Mittausten tulosten perusteella arvioitiin testattujen rakenteiden vaikutusta aerosolien leviämiseen ilmastusaltailta. Mittaustuloksia mallinnettiin hiukkasten leviämismallilla leviämisen havainnollistamiseksi ja tuulen nopeuden vaikutuksen arvioimiseksi.

3.1 Mittausmenetelmät

Aerosolien leviämisen mittaamiseen testikohteissa valittiin hiukkasten pitoisuutta ilma-asta laskeva mittari. Hiukkasmittari laskee ilmasta kiinteät sekä nestemäiset aerosolihiukkaset. Tavalliseen hiukkasmittariin biologisten hiukkasten mittauksen sijaan päädyttiin oletuksella, että ilmastusaltailta muodostuu selkeästi taustan hiukkaspitoisuudesta poikkeava aerosolikuorma. Runsaasti mikrobeja sisältävästä ilmastusaltasta muodostuvissa aerosoleissa on aina mukana myös biologisia hiukkasia, joten hiukkasmittaus antaa oletettavasti jo riittävän kuvan bioaerosolien leviämisestä. Lisäksi hiukkasmittarit ovat suunniteltu kannettaviksi ollen kooltaan pieniä ja kevyitä verrattuna isoihin ja painaviin biologisten hiukkasten mittareihin, joten ne sopivat huomattavasti paremmin kenttämittauksiin. Tässä selvityksessä ei siis oteta kantaan mahdollisten biologisten riskien olemassaoloon tai leviämiseen vaan selvitetään ainoastaan aerosolien leviämistä estävien rakenteiden vaikutusta ympäristön hiukkaspitoisuuksiin.

Hiukkasmittausten käyttämisestä tämän tyyppisessä tutkimuksessa ei löytynyt julkaisuja, joten mittaussuunnitelmaa kehitettiin tämän tutkimuksen aikana testimittauksin (kuva 16). Hiukkasten leviämisen teorian ja testimittauksista saadun kokemuksen perusteella kehitettiin tutkimuksessa käytetty mittaushjelma (Liite 1). Mittausten tulosten tulkinta tehtiin vertaillen eri mittaustilanteiden mittaustuloksia toisiinsa vertailukelpoisten ennakkotutkimusten puuttuessa. Lopuksi mittaushjelman soveltuvuutta aerosolien leviämisen tutkimukseen arvioitiin.



Kuva 16. Mittausohjelman kehitykseen johtanut prosessi.

Testimittauksissa havainnoitiin hiukkaspitoisuuksien muuttumista erilaisilla ilmastusolosuhteilla etäisyyden myötä, hiukkaskokojakaumien eroavuuksia, taustamittauksen pitoisuuksien kokoluokkaa ja mittausjakson pituuden vaikutusta tulosten tulkintaan. Varsinaiset mittaukset mukaan lukien mittauskohteita oli kolme, joissa mittauksia otettiin useammalla altaalla (Taulukko 3). Sääasemaa ei ollut käytössä testimittauksen aikana tuuliolosuhteiden tarkempaan tarkasteluun. Testimittauksia tehtiin kahdessa kohteessa ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Testimittauskohteet olivat Sappi Kirkniemen ja Metsä Board Kyrön tehtaiden jätevedenpuhdistamot ja erityisesti näiden ilmastusolosuhteiden ympäristöt. Kirkniemen ilmastusolosuhteet ovat perinteisiä aktiivilietealtaita ja näistä toisessa on putki-ilmastimet ja toisessa OKI-ilmastimet. Kyrön tehtaalla toinen ilmastusallas on MBBR-bioreaktori pohjailmastimilla ja toinen isompi allas on aktiivilieteallalla pintailmastimilla.

Taulukko 3. Mittausohjelman testikohteet ja mittausten määrä sekä varsinaisen tutkimuksen mittaukset.

Mittauskohde	Ilmastintyyppi	Päivämäärä	Mittaus-tyyppi	Mittausten lukumäärä	Mittausjaksot
Kirkniemi, ilmastusallas 2	Pohja- (putki)	24.8.2015	Testi	4	1-5 min
Kirkniemi, ilmastusallas 3	Pinta- (OKI)	24.8.2015	Testi	3	1 min
Kirkniemi, jälkiselkeytin	-	24.8.2015	Testi	2	1 min
Kyrö, aktiivilieteallas	Pinta- (turbiini)	7.9.2015	Testi	8	1-2 min
Kyrö, MBBR	Pohja- (putki)	7.9.2015	Testi	4	1 min
Kyrö, MBBR	Pohja- (putki)	8.10.2015	Tutkimus	60	1 min
Kyrö, MBBR	Pohja- (putki)	10.11.2015	Tutkimus	40	1 min
Kirkkonummi, Volskoti	Pohja-	18.11.2015	Tutkimus	30	1 min

Mittalaitteena käytettiin Fluke 985 pienhiukkasmittaria, joka mittaa hiukkaset kuudessa kokoluokassa välillä 0,3 – 10 µm. Mittarin mittaamat kokojakaumat ovat 0,3-0,5 ; 0,5-1 ; 1-2 ; 2-5 ; 5-10 ; 10- µm. Mittarin pumppaama ilman virtaama on 2,83 l/min. Mittari antaa tulokset hiukkaspitoisuutena yksikössä hiukkasta/m³. Mittarin tarkkuudeksi ilmoitetaan 50 % halkaisijan 0,3 µm hiukkasille ja 100 % halkaisijaltaan yli 0,45 µm hiukkasille. Mittausajanjaksoksi valittiin yksi minuutti, jolta tallennettiin pitoisuudet yhden sekunnin jaksoissa kuvaajan piirtämisen mahdollistamiseksi mittausjaksolta. Minuutin mittausjaksoon päädyttiin, koska minuutin aikana nähdään jo riittävän hyvin jakson aikana tapahtuva vaihtelu ja mahdolliset piikit. Minuutti on myös riittävän lyhyt aika, jotta täydellinen mittaussarja ehditään tehdä tarpeeksi lyhyessä ajassa ilman tuuliolosuhteiden merkittäviä muutoksia. Samalta mittauspisteeltä otettiin vähintään kaksi mittausjaksoa ja tuulen suunnan vaihdeltaessa tarvittaessa enemmän. Tuloksien esittämisessä käytettiin häiriöttä onnistuneiden mittausjaksojen keskiarvopitoisuutta.

Hiukkasmittausten tulosten tulkinnassa otettiin huomioon vain suurimman osan ilmastusolosuhteilla muodostuvien bioaerosolihiukkasten mikrobeista sisältävät kokoluokat 0,5-1 ; 1-2 ; 2-5 ja 5-10 µm. Tulosten tulkinnassa käytettiin altaalta muodostuvan hiukkaskuorman keskiarvopitoisuutta, joka laskettiin kussakin kokoluokassa. Mittauspisteen mittausjaksoilta laskettiin pitoisuuden keskiarvo ja pisteen mittausjaksojen keskiarvosta vähennettiin taustan mittauspisteen keskiarvo (4). Jos mittauspisteen hiukkaspitoisuus

oli pienempi kuin taustan pitoisuus ja vähennyslaskusta saatiin negatiivinen luku, tämä merkittiin nolllaksi.

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{c}_i}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m \bar{c}_j}{m} \quad (4)$$

missä \bar{C} on mittauspisteen keskiarvopitoisuus [hiukkasta/m³]
 n on mittauspisteen mittausjaksojen lukumäärä
 i on mittauspisteen mittausjakson numero
 \bar{c}_i on mittausjakson keskiarvopitoisuus [hiukkasta/m³]
 m on taustamittauspisteen mittausjaksojen lukumäärä
 j on taustamittauspisteen mittausjakson numero
 \bar{c}_j on taustamittausjakson keskiarvopitoisuus [hiukkasta/m³]

Mittauksia otettiin ilmastusaltaiden päältä ja ympäristöstä sopivilta etäisyyksiltä kohteesta riippuen aerosolien leviämisen arvioimiseksi. Taustan aerosolipitoisuuksien selvittämiseksi taustamittaukset otettiin sopivasta kohdasta tuulen yläpuolelta 7-50 metrin päästä ilmastusaltaalta. Ilmastusaltaalla muodostuvien aerosolien pitoisuuksien arvioimiseksi mittauksia tehtiin ilmastusaltaan reunalta sekä tuulen alapuolelta noin 0-50 metrin etäisyydeltä altaalta. Mittauspisteet valittiin mittauspäivänä paikan päällä sääaseman asennuksen jälkeen, jonka avulla arvioitiin tuulen pääsuunta. Mittauslinjat valittiin tuulen suunnan mukaisesti ja mittauspisteet (Kappaleessa 2.2.1.) valittiin maaston ja rakenteiden mahdollistamista kohdista niin että saatiin neljä mittauspistettä altaasta alatuuleen noin 50 metrin sisällä. Mittauspisteet otettiin samalta mittauslinjalta samansuuntaisen tuulen aikana, koska hiukkasten taustakuorma voi vaihdella tuulen suunnan mukaan ympäristön hiukkaslähteistä riippuen. Tuulennopeus voi myös vaikuttaa taustakuorman määrään, koska pitoisuuksien laimeneminen ja hiukkasten kulkema etäisyys riippuu tuulennopeudesta.

Vallitsevien sääolosuhteiden mittaamiseen käytettiin WH1080 sääasemaa, jolla mitattiin lämpötilaa, ilmankosteutta sekä tuulen suuntaa ja nopeutta. Sääaseman anturit asennettiin mittaamaan mittauskohteen luokse hiukkasmittausten ajaksi. Mittari tallentaa mitattujen suureiden keskimääräiset arvot 5 minuutin jaksolta. Sääaseman mittaustuloksista saatiin aerosolien leviämiseen vaikuttavien tuuliolosuhteiden tiedot hiukkasmittausten ajalta.

3.2 Tutkimuskohteet, testatut tekniikat ja mittaukset

Tutkimukseen valittiin kohteet sijainnin ja ilmastusaltaan koon, rakenteiden sekä ilmastintyyppin perusteella. Alustavasti tutkimukseen suunnitellut paperitehtaiden ilmastusaltaat osoittautuivat lyhytaikaista pilotointia varten liian hankaliksi ja suuritöisiksi kohteiksi, joten kohteiksi valittiin lopulta pienempiä ja helpommin käsiteltäviä kohteita. Tuulensuoja-aidan tutkimuskohteena oli Metsä Board Kyrön tehtaan kantoainebioreaktori ja läpäisevää katemateriaalia katteena testattiin yhdyskuntajäteveden pienpuhdistamolla Kirkkonummella.

Molemmissa tutkimuskohteissa käytettiin tuulensuojaverkkoa materiaalina koerakenteissa. Tuulensuojaverkkoa oli Suomessa saatavilla melko harvalta yritykseltä ja materiaalina käytettiin sopivinta saatavilla olevaa tuotetta. Käytetty tuulensuojaverkko oli Arigonin valmistama malli 3045 WO Scirocco MD Green, jonka silmäkoko on 1,39 mm

x 1,72 mm (Arrigoni 2015). Tuotteen läpäisevyydestä ei löytynyt tietoa, mutta sen arviointiin olevan noin 50 %. Verkkoa käytettiin tuulen nopeuden hidastamiseen ilmastusaltaalla asennettuna ympäröimään koko altaan. Katemateriaalin tutkimuksessa verkko asetettiin ilmastusaltaan päälle ilman kiinteitä rakenteita.

3.2.1 Tuulensuoja-aita, Metsä Board Kyrö

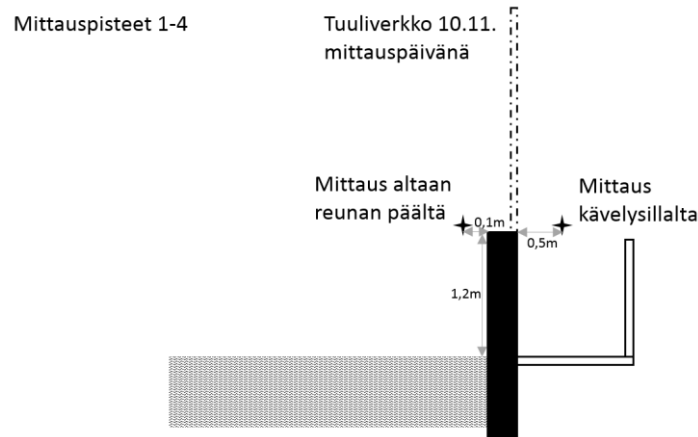
Metsä Board Kyröllä on yksi kartonkikone ja yksi paperikone, joilla tuotetaan kartonkia 190,000 t/vuosi ja paperia 105,000 t/vuosi. Tehtaan biologisen jätevedenpuhdistamon pääasiallinen ilmastusallas on aktiivilieteallas pintailmastimilla, minkä lisäksi puhdistamolla on pienempi kantoainebioreaktori. Bioreaktorissa käsitellään osa jätevedestä ennen aktiivilietealtaaseen johtamista.

Kyrön tehtaan jätevedenpuhdistamon bioreaktorilla testattiin tuulensuoja-aidan vaikutusta aerosolien leviämiseen. Aitaan käytetyn tuulensuojaverkon oletettiin vähentävän hiukkaspitoisuuksia lähteen ympäristössä tuulen hidastumisen ja verkon suodattavan vaikutuksen johdosta. Hiukkasmittauksia tehtiin sekä tuulensuoja-aidalla että ilman aita sen vaikutusten arvioimiseksi. Tuulensuoja-aidan materiaalina käytettiin 2 metriä korkeaa tuulensuojaverkkoa. Tuulensuojaverkolle rakennettiin tukipylväät altaan ympärille.

Kyrön tehtaan jätevedenpuhdistamon kantoainebioreaktori (Kuva 17) valittiin testikohteeksi laitoksen pääasiallisen ilmastusaltaan sijaan sen pienemmän koon vuoksi. Kantoaineallas on FlooBed MBBR bioreaktori, halkaisijaltaan 16,8 metriä ja se nousee maan pinnan yläpuolelle 8,2 metriä. Vedenpinnan korkeus on 7 metriä ja altaassa on pohjailmastimet. Allasta ympäröi kävelysilta, jolta tehtiin mittaukset altaan reunan lähellä. Bioreaktorilta vapautuvien hiukkasten määrään ja laatuun vaikuttaa todennäköisesti reaktorin tyyppi. Kantoaineprosessissa suurin osa biomassasta on sitoutuneena kantoaineeseen ja mikrobeja ei välttämättä vapaudu ilmaan yhtä paljon kuin perinteisestä aktiivilieteprosessista.



Kuva 17. Metsä Board Kyrön kantoaineallas, kuvassa näkyy sääaseman mittarit asennettuna 8.10. tangon päähän kävelysillalla vasemmassa reunassa.

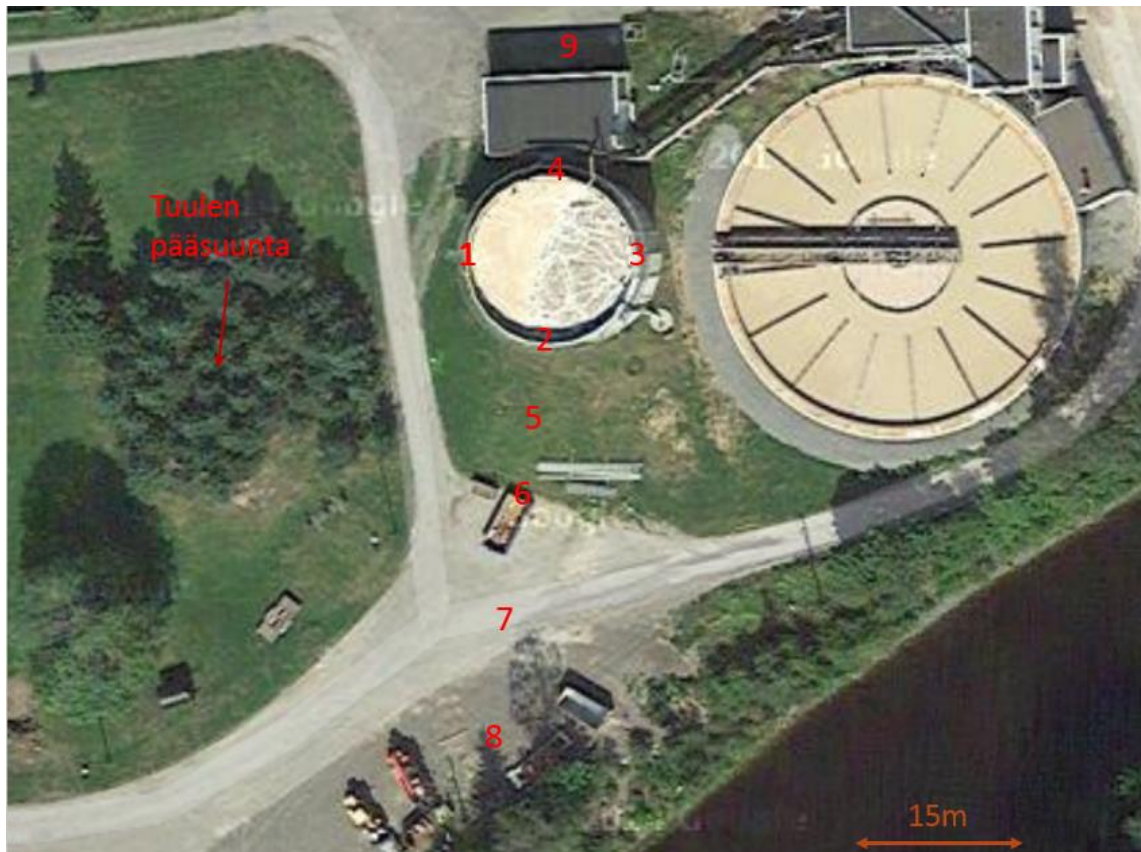


Kuva 18. Mittauspisteet 1-4 Kyrön kantoainealtaan reunan vieressä

Mittaussarjojen mittaukset tehtiin altaan reunan korkeustasolta. Kävelysillalla mittaukset tehtiin noin puolen metrin päästä altaan reunasta (Kuva 18), jotta altaan päällä leijuva suurin pisarakuorma ei näkyisi huomattavina piikkeinä mittaustuloksissa. Mittauksia tehtiin myös altaan reunan päältä maksimipitoisuuksien suuruusluokan näkemiseksi. Mittaukset altaan ympäristössä tehtiin henkilönostimen avulla, jotta aerosolipitoisuuksia voitiin mitata altaan yläreunan korkeudelta.

Altaalla on vaahdon muodostumisen ehkäisemiseksi vaahdonestosuihkut, jotka ovat normaalisti päällä. Vaahdonestosuihkut aiheuttavat huomattavaa pisaran muodostusta, mikä voi näkyä mittauksissa suurentuneina hiukkaspitoisuuksina altaan läheisillä mittauspisteillä. Vaahdonestoruiskut lisäävät keinotekoisesti altaalta tulevaa pisarakuormaa, mikä voi auttaa aerosolien leviämisen tarkastelua. Tuulensuojaverkon vaikutusta aerosolien leviämiseen voi olla helpompi todentaa mittauksin suihkujen ollessa päällä suuremmasta aerosolikuormasta johtuen. Mittaukset toteutettiin Kyröllä molemmissa tapauksissa, vaahdonestosuihkuilla ja ilman, monipuolisempien tulosten saamiseksi ja mittausten tulkinnan helpottamiseksi.

Ensimmäiset mittaukset Kyröllä ennen tuulensuojaverkon asentamista tehtiin 8.10.2015. Mittauspaikalle asennettiin aluksi sääasema, jonka avulla havainnoitiin tuulen pääsuunta ja nopeus. Sääasema asennettiin kävelysillalle noin kolme metriä korkean tangon päähän, jolloin tuulimittaukset saatiin noin 10 metrin korkeudelta maan pinnasta. Sää oli pilvetön, lämpötila 7°C, ilmankosteus 51% ja tuuliolosuhteet olivat lievät. Aluksi tuuli oli lähes olematonta, mutta myöhemmin tuuli voimistui puhaltamaan pohjoisesta noin 0,5 m/s keskinopeudella. Tuulen nopeus arvioitiin riittäväksi aerosolien leviämisen havainnoimiseksi ja hiukkasmittaukset aloitettiin. Mittauspisteet valittiin altaan ympäriltä kävelysillalta, sekä tuulen suuntaisesti etelä-pohjoislinjassa (Kuva 19). Mittauspisteiden 5, 6, 7 ja 8 etäisyydet altaalta olivat 7,5 ; 15 ; 30 ja 45 metriä.



Kuva 19. Hiukkasmittauspisteet Kyrön kantoainereaktorilla ja tuulen pääsuunta ensimmäisen mittaussarjan aikana.

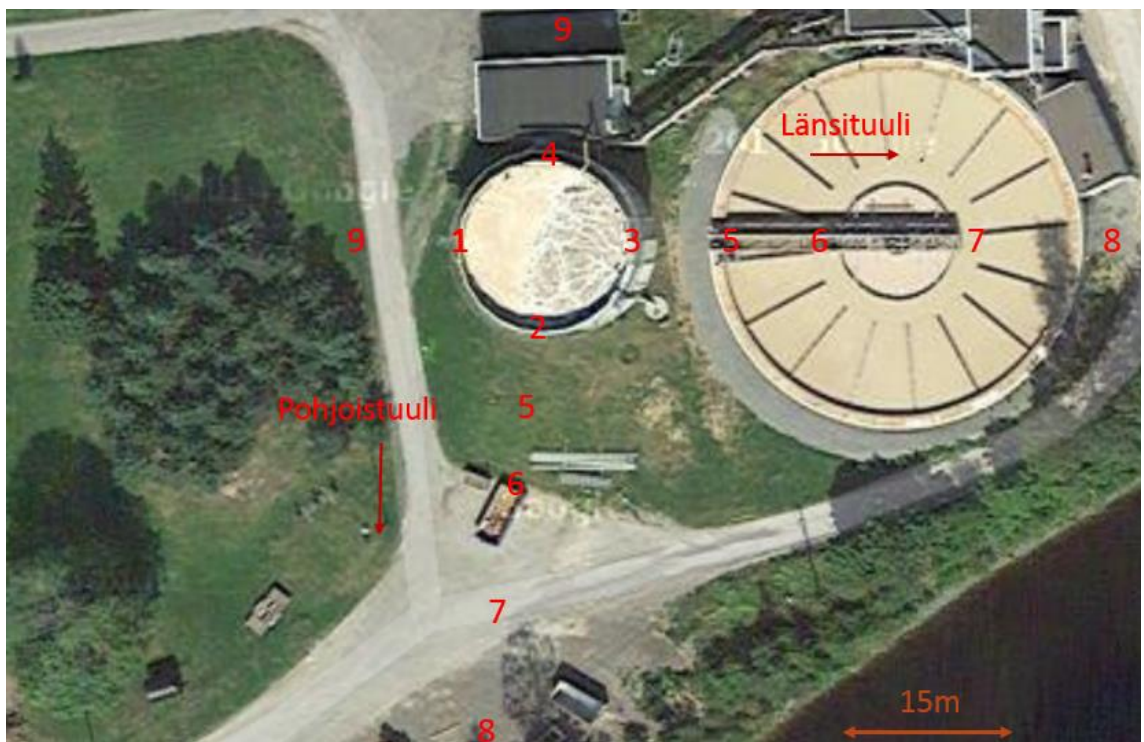
Toiset mittaukset Kyröllä toteutettiin 10.11.2015 tuuliverkon (Kuva 20) asennuksen jälkeen. Tuuliverkko oli asennettu tukipylväiden varaan ympäröimään ilmastusallasta altaan reunasta kahden metrin korkuisena. Tuulensuoja-aitaan oli jätetty itäpuolelle noin kahden metrin levyinen aukko mittainstrumenttien takia. Tästä aukosta aerosolit pääsivät mahdollisesti virtaamaan esteettä verkon sisältä ulos sopivalla tuulella.

Toisena mittauspäivänä sää oli puolipilvinen, lämpötila 7°C, ilmankosteus 87% ja tuuliolosuhteet olivat hyvin lievät ja vaihtelevat. Mittauspisteet valittiin samoilta etäisyyksiltä kuin ensimmäisellä mittauskerralla vallitsevan tuulen suunnan mukaisesti. Kuten ilman tuulensuojaverkkoa mittauksia otettiin lähteen pisarakuorman arvioimiseksi myös altaan reunan päältä nyt tuuliverkon sisäpuolelta. Tällä mittauskerralla mittaukset otettiin vain vaahdonestoesuihkujen ollessa päällä, koska ensimmäisistä mittauksista ei saatu vertailukelpoista mittaussarjaa ilman suihkuja. Sääaseman mittarit asennettiin tällä kertaa noin 1,5 metriä korkeammalle, jotta saatiin tuulimittaukset tuulensuojaverkon yläpuolelta ilman verkon tuulta hidastavaa vaikutusta.



Kuva 20. Tuulensuojaverkko asennettuna Kyröllä bioreaktorin reunalle.

Tuuliolosuhteet osoittautuivat hankaliksi Kyrön toisena mittauspäivänä. Tuulensuunnan muutoksia tarkkailtiin sääaseman näytöltä jatkuvasti edellisten mittauksen tuulensuunnan muutoksesta aiheutuneen turhan mittaussarjan takia. Tuuli kääntyi ensimmäisiä mittauksia useammin ja mittauslinjaa jouduttiin hakemaan useaan otteeseen, kunnes saatiin otettua mittaussarjat jokaiselta mittauspisteeltä samansuuntaisella tuulella. Mittauspisteellä jouduttiin odottelemaan mittauksen aloittamista, kunnes tuulimittarista sekä altaalta leijuvista aerosoleista nähtiin tuulen nopeuden olevan riittävä ja sopivan suuntainen. Mittaussarja saatiin otettua täydellisenä kahdelle mittauslinjalle: länsituulella sekä pohjoistuulella (Kuva 21).



Kuva 21. Hiukkasmittauspisteet Kyrön kantoainereaktorilla 10.11. pohjois- sekä länsituulen mittauslinjoissa.

3.2.2 Verkkokate, Volskodin pienpuhdistamo

Läpäisevää katemateriaalia testattiin vaihtoehtona raskaammille läpäisemättömille katteille oletuksena, että kevyet läpäisevät katemateriaalit suodattavat ilmavirtauksen aerosoleja sekä vähentävät suoraan altaalta ylöspäin kohoavaa ilmavirtausta ja aerosolikuormaa. Pilotoinnin materiaalivalinnassa oli haastavaa löytää materiaaleja, jotka voisivat olla myös käytännön pysyvämmissä kateratkaisuissa mahdollisia käyttää kestävänsä ja ominaisuuksiensa puolesta. Pysyvän katteen pitäisi kestää vaihtuvat sääolot, kantaa lumikuormaa sekä läpäistä tai johtaa pois vesi. Näistä syistä läpäisevän katteen soveltaminen todellisiin rakenneratkaisuihin on haastavaa varsinkin isommissa kohteissa. Katemateriaalina mittauksissa testattiin tuulensuoja-aidassakin käytettyä tuulensuojaverkkoa, joka on kevyt ja suhteellisen kestävä läpäisevä materiaali soveltuen hyvin väliaikaiseen pienen mittakaavan asennukseen.

Sopivan testikohteen löytäminen oli haasteellista, koska etsittiin pientä avonaista tai osin avattavaa ilmastusallasta. Kattamisen tuli onnistua nopeasti mittauspäivänä ilman kiinteitä rakenteita. Metsäteollisuuden ilmastusaltaat osoittautuivat liian suuriksi ja hankaliksi kohteiksi katteiden väliaikaiselle asentamiselle. Testikohde löytyi Kirkkonummen vesihuoltolaitoksen alueelta. Verkkokatteen vaikutusta aerosolien leviämiseen ilmastusaltaalla testattiin Volskodin yhdyskuntajäteveden pienpuhdistamolla Kirkkonummella. Puhdistamolla käsitellään lähinnä Volskodin vanhainkodilta tulevat jätevedet, jotka varastoidaan käsittelyn jälkeen säiliöön poiskuljetusta odottamaan. Jäteveden virtaama pienpuhdistamolla on noin 15 m³/vrk ja hienokuplailmastetun ilmastusaltaan tilavuus on noin 40m³. Allas on pinta-alaltaan noin 8m * 2,5m ja se on katettu alumiini-levyillä, joiden reunoilla olevista aukoista ilma pääsee purkautumaan altaalta.

Sää oli mittauspäivänä 18.11.2015 pilvistä, ajoittain vähäistä sadetta, lämpötila noin 7°C, ilmankosteus 92% ja tuuli keskimäärin idästä noin 0,3 m/s. Altaasta irrotettiin yksi katelevyistä täysin avonaiseksi mittauksia varten. Mittaukset tehtiin täysin katettuna, avatulla katelevyllä sekä verkkokatteen kanssa (kuva 22).

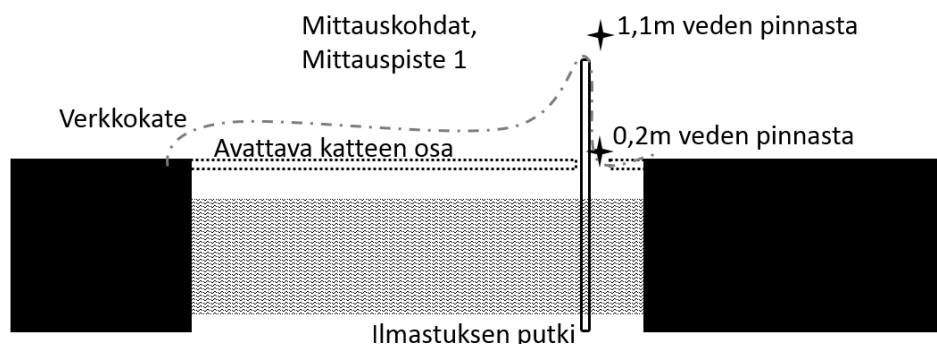


Kuva 22. Volskodin pienpuhdistamon ilmastusaltaan avattu osa peitettynä verkkokatteella.

Puhdistamo sijaitsi noin 2 metriä syvässä notkelmassa, joten mittauslinjaa tuulen alapuolelta ei pystytty hakemaan ja mittaukset otettiin maaston ja rakenteiden sallimista kohdista. Mittauspisteet (Kuva 23) valittiin altaan reunalta (piste 1) 20cm ja 110cm veden yläpuolelta (Kuva 24), altaan viereltä alatuulella noin 2 metriä avatusta luukusta (piste 2) ja noin 5 metriä altaalta tuulen yläpuolella (piste 3). Veden pinnan läheltä (0,2m) tehty mittaus otettiin suljetun alumiinikatteen tilanteessa ilmastuksen putken kohdalle muodostuvasta aukosta (noin 15cm*15cm). Tämä mittaus kuvaa kiinteän kateen sisäpuolella vallitsevaa pitoisuutta. Näin nähdään kiinteän kateen vaikutus hiukaspitoisuuksien konsentroitumiseen ja poistumiseen altaalta. Lisäksi otettiin taustamittauksia noin 30 metrin päässä ylätuulella altaalta (piste 4), mutta näiden mittausten pitoisuudet olivat kohonneita jonkin taustalähteen seurauksena eikä niitä pystytty käyttämään taustan pitoisuutena. Taustan mittauspisteinä käytettiin lopulta pistettä 3. Pisteesä 3 pitoisuudet olivat alhaisimmat ja lähes samat kaikissa mittaustilanteissa.



Kuva 23. Mittauspisteet Volskodin pienpuhdistamolla.



Kuva 24. Volskodin pienpuhdistamon ilmastusaltaan mittaukset vedenpinnan yläpuolella (mittauspiste 1).

3.3 Aerosolien leviämisen mallintaminen

Hiukkasmittausten jälkeen hiukkasten leviämistä mallinnettiin mittaustulosten tulkinnan avuksi sekä mallinnuksen soveltumisen arvioimiseksi mahdollisten jatkotutkimusten työkaluksi. Aerosolien mallinnukseen sopivaa työkalua etsittiin Aalto yliopiston ja Helsingin yliopiston verkostoista. Mallinnukseen sopivia ilmaisia työkaluja on jonkin verran saatavilla, mutta nämä ovat yleensä yksinkertaisia laskukaavojen sovelluksia ilman graafista käyttöliittymää. Mallinnuksen työkaluksi valikoitui Ilmatieteen laitoksen käyttämä Matlab-pohjainen laskuohjelma.

Kyrön kantoainealtaan hiukkasmittauksista saatuja tuloksia mallinnettiin Matlabille suunnitellulla laskuohjelmalla käyttäen gaussilaista leviämismallia. Laskumalli hyödyntää Ermakin ratkaisua, joka ottaa huomioon hiukkasten laskeutumisen ja pidättymisen maahan. Mallia ei ole suunniteltu bioaerosolien leviämisen mallintamiseen vaan se on tarkoitettu pääasiassa savukaasujen pienhiukkasten leviämisen tarkasteluun. (Stockie 2011.) Käytetty malli sisältää kaksi osaa: Pitoisuuden laskukaavan, jonka avulla pitoisuus lasketaan lähtöarvoista halutussa koordinaatissa, sekä leviämiskuvion tulostavan mallin, joka antaa kuvaajaan pitoisuudet maanpinnan tasolla. Mallinnus antaa vain hetkellisen kuvan hiukkaspitoisuuksien leviämisestä eikä ota huomioon tuulen suunnan ja nopeuden muutoksia. Tuulen nopeus vaikuttaa pitoisuuksiin siten, että kovemmalla tuulella pitoisuudet laimenevat enemmän, jolloin pitoisuudet lähteen lähellä ovat pienemmät ja hiukkaset voivat levitä pidempiä matkoja alatuuleen. Lisäksi tuulen nopeuden kasvu lisää hiukkasten poistumista ilmasta eli laskeumaa (Nimmatoori ja Kumar 2013).

Mallinnuksessa laskettiin inerttien hiukkasten leviämistä eikä otettu huomioon bioaerosolien mikrobien inaktivaatiota ilmakehässä. Näin ollen leviämismallinnuksen tulokset eivät kuvaa altistusriskiä bioaerosoleille.

3.3.1 Mallinnuksen lähtöarvojen etsiminen

Mallinnuksessa käytetty laskuohjelma on tarkoitettu pistemäisille lähteille, joiden päästöjen massavirta on tiedossa. Tästä syystä malli ei sovellu parhaiten aluelähteen kuten ilmastusaltaan mallintamiseen. Aluelähteen voi kuitenkin yksinkertaistaa pistemäiseksi lähteeksi, kun tarkkaillaan altaan ympäristön pitoisuuksia ja pitoisuuksien leviämistä. Ilmastusaltaan hiukkaspäästöjen massavirtaa (hiukkasta/s) on mahdotonta arvioida, joten mallia käytettiin takaisinlaskuperiaatteella. Ilmastusaltaan tilannetta vastaavaa päästöjen massavirtaa etsittiin syöttämällä iteroiden massavirran lähtöarvoja kunnes saatiin hiukkaspitoisuuksien mittaustuloksia eniten vastaavat pitoisuudet vastaaville etäisyyksille mallin leviämiskuviossa. Massavirran arvo ei ole itsessään olennainen ja sitä käytetään vain mallinnuksen tuloksien sovittamiseen mitattujen pitoisuuksien kanssa. Malli on kirjoitettu laskemaan pitoisuus yksiköissä mg/m^3 , mikä piti aerosolihiukkasten tapauksessa muuttaa muotoon $\text{hiukkasta}/\text{m}^3$.

Massavirran lähtöarvojen etsiminen tehtiin vain ilman tuulensuoja-aitaa (8.10.2015) mitatulle täydelle mittaussarjalle, koska käytetyllä mallilla ei pystytty mallintamaan rakenteiden ja esteiden vaikutusta aerosolien leviämiseen. Lähtöarvoiksi malliin syötetään hiukkasten ominaisuuksia, päästölähteen massavirta ja tuulen nopeus (Taulukko 4).

Taulukko 4. Leviämismallinnuksen lähtöarvot.

Suure	Mallinnuksessa käytetty arvo	Yksikkö
Putoamiskiihtyvyys, g	9,8	m/s ²
Ilman dynaaminen viskositeetti (~10°C), μ	$1,8 \cdot 10^{-5}$	kg/m*s
Bioaerosolihiukkasen tiheys, ρ	1100 (Lai et al. 2012)	kg/m ³
Hiukkasen halkaisija (Luokka 0,5-1 μ m), d	$0,75 \cdot 10^{-6}$	m
Hiukkasen halkaisija (Luokka 2-5 μ m), d	$3,5 \cdot 10^{-6}$	m
Laskeutumisnopeus, v_{set}	$2\rho g d^2 / 9\mu$	m/s
Laskeumanopeus, v_{dep}	$v_{dep} = v_{set}$	m/s
Tuulen nopeus, U_w	Mittausjakson keskiarvo = 0,6	m/s
Päästölähteen korkeustaso, H	8	m
Päästölähteen massavirta (hiukkasta), Q	Arvioidaan iteroimalla	Milj./s

Mallinnuksen yksinkertaistamiseksi valittiin kaksi hiukkasten kokoluokkaa, joiden keskiarvohalkaisijoita käytettiin mallinnukseen tarvittavan hiukkasen laskeutumisnopeuden laskemiseen. Kokoluokka 0,5-1 μ m valittiin mallinnukseen, koska tämän kokoluokan hiukkaset poistuvat hitaimmin ilmasta tarkastelluista kokoluokista ja voivat tästä syystä levitä laajimmalle alueelle. Lisäksi mallinnukseen valittiin kokoluokka 2-5 μ m, koska tämä on halkaisijaltaan keskiarvoluokka, näitä muodostuu eniten lähteellä ja tässä kokoluokassa on suurin osa bioaerosolien mikrobeista.

Laskeumanopeus oletettiin tässä samaksi kuin laskeutumisnopeus, vaikka käytännössä se on yleensä hieman suurempi (Nimmatoori ja Kumar 2013). Laskeumanopeus tarkoittaa hiukkasten maahan laskeutumista ja pidättymistä. Pistemäinen lähde asetettiin mallin koordinaateissa altaan tuulen yläpuoliselle reunalla (mittauspiste 4), jolloin maksipitoisuudet asettuvat suoraan altaan yläpuolelle. Näin asetettuna altaan alatuulen reuna (mittauspiste 2) sijaitsee x-koordinaatissa 17 metriä jne. Tästä asetelmasta lähdettiin etsimään mallin avulla mittaustuloksia vastaavia pitoisuuksia. Lähteen sijaintioletusta jouduttiin kuitenkin muuttamaan 2-5 μ m kokoluokan hiukkasten mallinnuksessa.

Mallinnus ajettiin etsien mittaussarjan pitoisuuksia vastaavilta etäisyyksiltä mallinnuksen koordinaatistosta päästölähteen korkeustasolta (8 metriä). Mittaussarjasta jätettiin pois altaan reunan päältä mitatut maksimipitoisuudet, koska näiden sovittaminen mallinnuksen tulokseen oli hankalaa. Ilman tuulensuoja-aitaa (8.10.) kokoluokassa 0,5-1 μ m mitattuja hiukkaspitoisuuksia melko hyvin vastaavat mallinnetut pitoisuudet (Taulukko 5) löydettiin asettamalla päästölähteen massavirraksi 17 miljoonaa hiukkasta/s.

Taulukko 5. Mitatut (8.10.2015) ja mallinnetut hiukkaspitoisuudet (0,5-1 μ m) Kyrön bioreaktorilla massavirralla 17 miljoonaa hiukkasta/s.

Mittauspiste ja etäisyys lähteestä (x-koordinaatti)	Mitattu hiukkaspitoisuus, 0,5-1 μ m (miljoonaa/m ³)	Mallinnettu hiukkaspitoisuus, 0,75 μ m (miljoonaa/m ³)	Poikkeama mitatun ja mallinnetun välillä (miljoonaa/m ³)
4 (0m)	0,10	0	0,10
3 (8,5m)	0,18	2,34E-04	0,18
1 (8,5m)	0,54	2,34E-04	0,54
2 (17m)	0,79	0,4628	0,33
5 (24,5m)	0,32	0,2542	0,07
6 (32m)	0,14	0,1645	0,02
7 (47m)	0,10	0,0914	0,01
8 (62m)	0,05	0,0633	0,01

Kokoluokalle 2-5 μm ei löytynyt samoilla lähteen sijainnin oletuksilla sopivaa massavirran arvoa mittausarjan tuloksille. Mitatut pitoisuudet putoavat etäämmäksi lähteestä mentäessä jyrkemmin kuin mallinnetut pitoisuudet, joten lähde siirrettiin mallissa lähemmäksi mittauspistettä 2. Mittauspiste 2 asetettiin kahden metrin päähän lähteestä. Allasta lähin piste alatuulella (mittauspiste 2) antoi silti mitattuna mallinnusta huomattavasti suurempia pitoisuuksia. Tämä voi johtua altaalla muodostuvasta suuresta pisarakuormasta, josta suuri osa laskeutuu todellisuudessa mallinnettua nopeammin tai muodostaa pienempiä hiukkasia haihdunnan takia. Mallinnuksen ja mittauksen eroihin vaikuttaa myös mallinnuksessa käytetyn pistelähteen ominaisuus; Todellisuudessa lähde on koko altaan pinta-ala ja pisaroita muodostuu aivan mittauspisteen 2 vierelläkin.

Taulukon 6 pitoisuuksien mallintamiseen käytettiin massavirtaa 2 miljoonaa hiukkasta/s. Kokoluokan 2-5 μm aerosoleja muodostuu mittauksen mukaan altaalla kokoluokan 0,5-1 μm hiukkasia enemmän. Mittausarjan tulosten mallinnuksen mukaan massavirta 2-5 μm hiukkasille on kuitenkin pienempi, jolloin mallinnetut maksimipitoisuudet ovat mallinnettuna pienemmät suuremmilla hiukkasilla. Tämä johtuu myös siitä, että mallinnuksen massavirtaa haettaessa ei käytetty mittausarjan maksimipitoisuuksia.

Taulukko 6. Mitatut (8.10.2015) ja mallinnetut hiukkaspitoisuudet (2-5 μm) Kyrön bio-reaktorilla massavirralla 2 miljoonaa hiukkasta/s.

Mittaus-piste ja lähteestä (x-koordinaatti)	Mitattu hiukkaspitoisuus, 2-5 μm (miljoonaa/ m^3)	Mallinnettu hiukkaspitoisuus, 3,5 μm (miljoonaa/ m^3)	Poikkeama mitatun ja mallinnetun välillä (miljoonaa/ m^3)
4 (-15m)	0,010	0	0,010
3 (-6,5m)	0,017	0	0,017
1 (-6,5m)	0,263	0	0,263
2 (2m)	2,286	0,9102	1,376
5 (9,5m)	0,079	0,0707	0,008
6 (17m)	0,014	0,0272	0,013
7 (32m)	0,009	0,0096	0,0006
8 (47m)	0,016	0,0053	0,0107

Mallinnetut pitoisuudet tuulen suunnan mukaan kohtisuoraan altaan reunoilla (pisteet 1 ja 3) sekä altaan reunalla ylätuulella (piste 4) eivät vastaa mitattuja pitoisuuksia, koska päästölähde on yksinkertaistettu pisteeksi sekä siksi että mallinnuksessa pitoisuudet eivät leviä yhtään vastatuuleen. Todellisuudessa turbulentit virtaukset ja noste levittävät hiukkasia vähäisessä määrin myös vastatuuleen altaan välittömässä läheisyydessä.

4 Tulokset ja tulosten tarkastelu

4.1 Hiukkaskokojakaumat mittauskohteissa

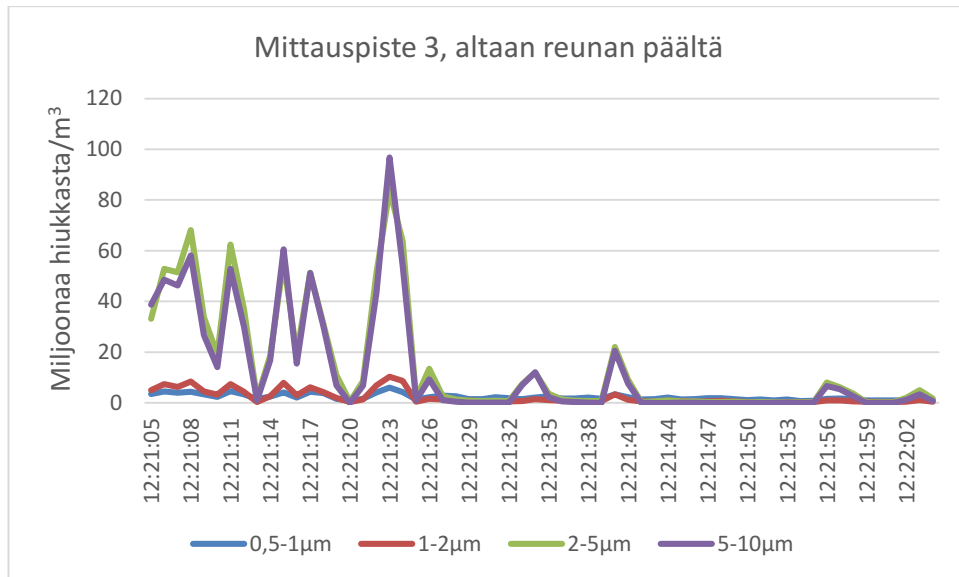
Testimittausten ja varsinaisten mittausten perusteella ei havaittu huomattavia eroja hiukkaskokojakaumissa erityyppisillä ilmastusaltailla tai ilmastimilla. Testi- ja tutkimuskohteissa erityyppisillä ilmastimilla tehdyt mittaukset eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään, koska mittausetäisyydet jäteveden pinnasta vaihtelivat kohteen rakenteiden mukaan. Vedenpinnan läheltä otetuista mittauksista sai paremmin tietoa muodostuvasta pisarakuormasta. Testikohteissa, joissa mittaukset täytyi ottaa kävelysillalta yli kahden metrin korkeudelta vedenpinnasta, ei saatu selkeää eroa pitoisuuksien suuruusluokkiin eri mittauspisteiden välillä. Näistä syistä eri ilmastintyyppien kanssa mitattuja pitoisuuksia ei vertailla keskenään tuloksissa eikä pintailmastimilla muodostuvaa suurempaa hiukkaskuormaa (Sánchez-Monedero et al. 2008, Brandi et al. 2000) todennettu näissä mittauksissa. Yleisesti havaittiin ilmastuksen tyypistä riippumatta veden pinnan lähellä tehdyistä mittauksista altailla muodostuvan eniten kokoluokkien 2-10 μm hiukkasia. Suurempien hiukkaskokoluokkien pitoisuudet laskivat nopeasti etäämmälle veden pinnasta mentäessä kokoluokan 0,5-1 μm pitoisuuden pysyessä korkeammalla tasolla etäämmillä mittauspisteillä.

4.2 Tuulensuoja-aita, Metsä Board Kyrö

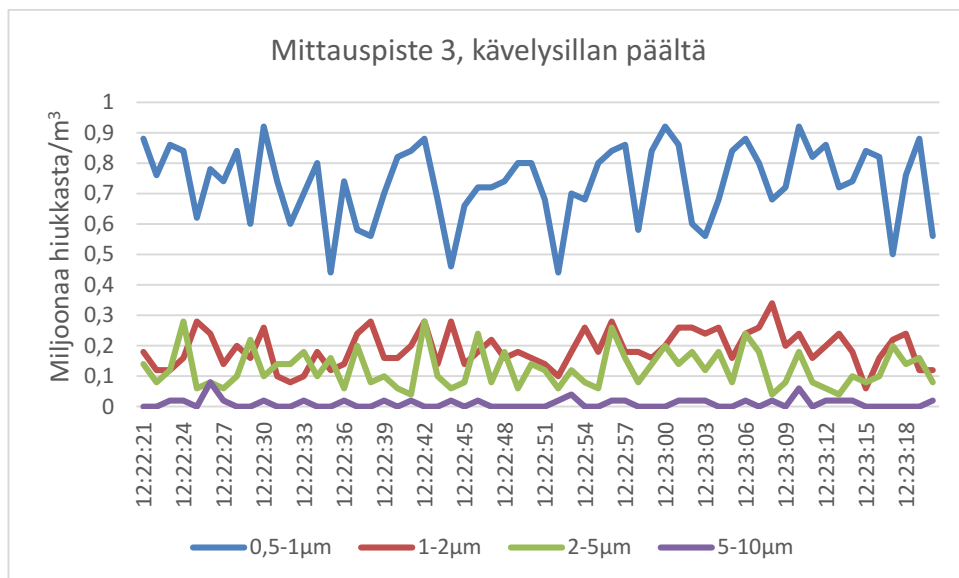
Kyrön bioreaktorilla 8.10. sekä 10.11. tehdyistä hiukkasmittauksista (Liite 2) saatiin yhteensä kolme täyttä mittaussarjaa sekä yksi tuulensuunnan muutoksen takia vajaaksi jäänyt mittaussarja, josta on mittaustulokset vain mittauspisteiltä 1-4.

Esimerkkinä yksittäisestä mittausjaksosta altaan reunan päältä otetuista mittauksista pisteessä 3 (Kuva 25) nähdään hiukkaspitoisuuksien käyneen hetkittäin lähes 100 miljoonassa/ m^3 (kokoluokat 2-5 μm ja 5-10 μm). Pitoisuudet etenkin kokoluokissa 2-5 ja 5-10 μm olivat huomattavasti koholla näiden pitoisuuspiikkien aikana. Pitoisuusmuutokset ja hetkittäiset piikit johtuvat altaan päällä ilman virtauksien mukana liikkuvasta hiukkas- ja pisarakuormasta, jotka saattavat hajaantua tuulen ajoittaisten puuskien takia.

Kuvassa 26 on vastaava mittausjakso samalta pisteeltä kävelysillan päältä. Kuvaajasta nähdään suurimpien pitoisuuksien olleen tällöin kokoluokassa 0,5-1 μm noin 0,7 miljoonaa hiukkasta/ m^3 tasolla. Suurempien kokoluokan hiukkasten pitoisuudet olivat etäämpänä altaalla otetuissa mittauksissa matalampia kuin pienempien kokoluokkien hiukkasten pitoisuudet. Halkaisijaltaan yli 2 μm hiukkasten pitoisuudet olivat korkeimmalla tasolla vain altaan reunalta ja vierestä alatuulella otetuissa mittauksissa, kun taas etäämpänä otetuissa mittauspisteissä kokoluokan 0,5-1 μm hiukkasia oli eniten.



Kuva 25. Yksittäisen mittausjakson (Mittauspiste 3, altaan reunan päältä) kuvaaja Kyröllä 8.10. toteutetuissa mittauksissa.

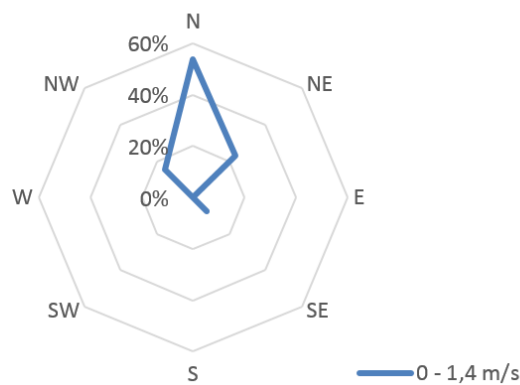


Kuva 26. Yksittäisen mittausjakson (Mittauspiste 3, kävelysillan päältä) kuvaaja Kyröllä 8.10. toteutetuissa mittauksissa.

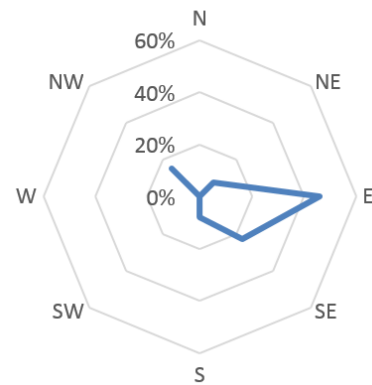
4.2.1 Sääsaman mittaukset

Ensimmäisenä mittauspäivänä 8.10. ilman tuulensuoja-aitaa tuuliolosuhteet pysyivät melko tasaisina mittauksen ensimmäisen tunnin ajan ollen keskiarvoltaan 0,6 m/s pohjoisesta, jolloin ehdittiin tekemään mittaukset vaahdonestosuihkujen kanssa sekä aloittamaan mittaukset ilman suihkuja. Sääsaman tuulimittauksista nähdään, että mittauksen toisen tunnin aikana kääntyi tuulemaan pääsuuntaisesti idästä (Kuva 27). Tuulen kääntymistä altaalta tuleva hiukkaskuorma ei enää kulkenut mittauslinjan mukaisesti, mikä nähtiin mittauslinjan mittauspisteiden taustamittausta vastaavina tai pienempinä pitoisuuksina lopuissa mittauksissa. Mittauksia ilman vaahdonestosuihkuja ei siis pystytty käyttämään tulosten vertailussa. Lopuksi hiukkasmittaukset otettiin myös maanpinnan tasolta samoista pisteistä, mutta kääntyneen tuulen suunnan vuoksi nämäkään mittaukset eivät antaneet tietoa altaan aerosolien leviämisestä.

Tuulen suunta, 8.10. mittauksen ensimmäinen tunti



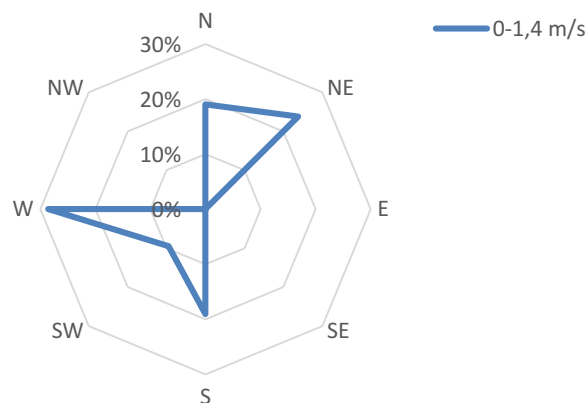
Toinen tunti



Kuva 27. Tuuliruusut Kyrön ensimmäisten hiukkasmittausten (8.10.2015) ajalta.

Tuulensuoja-aidan kanssa tehtynä mittauspäivänä 10.11. tuuliolosuhteet olivat vaihtelevammat ja tuuli hitaampaa kuin ensimmäisenä päivänä. Sääaseman tuulimittauksen tuloksista (kuva 28) nähdään keskimääräisen tuulensuunnan pysyvän länsituulen mittausarjan aikana lännestä tulevana vain alle puolet ajasta. Sääasema tallentaa keskiarvoisen tuulen viiden minuutin jaksolta, joten mittausjakson sisällä tuuli ehti silti kääntyä mittauslinjan mukaiseksi mittauksen ajaksi. Tuulen keskinopeus oli 0,27 m/s nopeuden ollessa usein nollassa. Mittauksen aikana sääaseman näytöltä silmämääräisesti arvioituna tuuli puhalsi lähes kääntyilemättä pohjoistuulen mittausarjan aikana. Sääaseman lähettimestä loppui patterit tämän sarjan aikana, joten tallennettua mittausdataa tuulesta ei jäänyt aseman muistiin pohjoistuuleen mittausarjalle.

Tuulen suunta, hiukkasmittausten 10.11. länsisuuntainen sarja

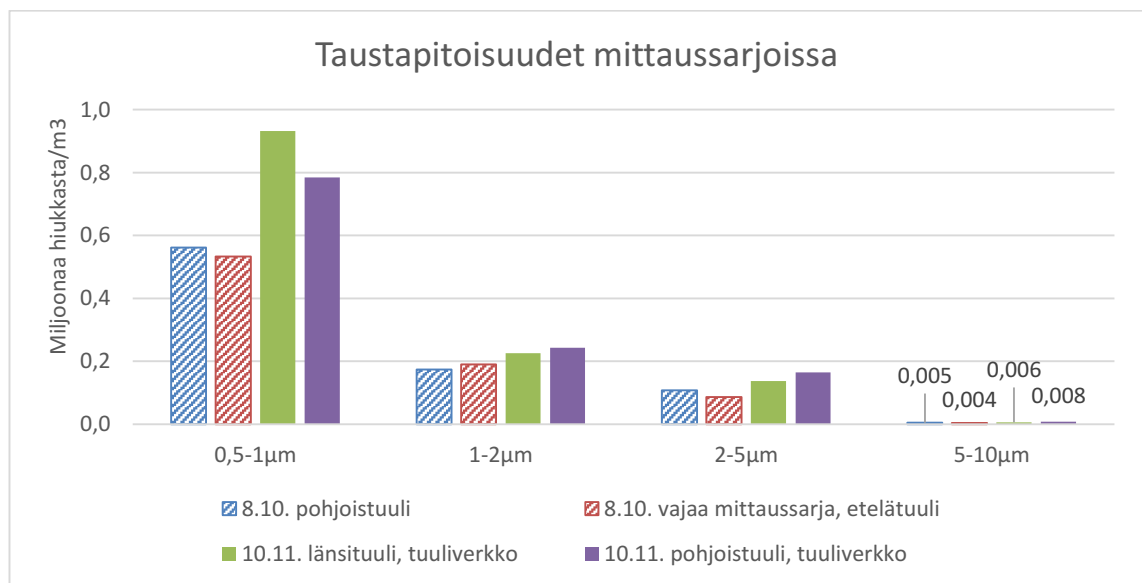


Kuva 28. Tuuliruusu Kyrön toisten hiukkasmittausten (8.10.2015) länsituulen mittauslinjan ajalta.

Tulosten analysoinnin perusteella huomattiin sääaseman tallentaman 5 minuutin keskiarvon olevan turhan karkea tieto tuuliolosuhteiden hetkellisten muutosten tarkkailuun käytettäessä minuutin mittausjaksoa hiukkasmittarilla. Sääaseman näyttöä tarkkailemalla saatiin kuitenkin oleellinen tieto mittauksen aikana tapahtuvista muutoksista.

4.2.2 Taustan hiukkaspitoisuudet

Taustan mittaustuloksista huomataan taustan hiukkaspitoisuuksien poikkeavan jonkin verran toisistaan eri mittauspäivänä ja tuulensuunnalla (Kuva 29). Kyseessä voi olla taustan hiukkaskuorman satunnaista vaihtelua tai tuulen suunnasta ja nopeudesta johtuvaa taustan hiukkaslähteiden vaihtelua. Toisena mittauspäivänä 10.11. Taustan pitoisuudet olivat molemmilla tuulen linjoilla ensimmäistä mittauspäivää suuremmat. Tuuli oli tällöin pääsääntöisesti hitaampaa kuin ensimmäisenä päivänä, joten taustan hiukkaspitoisuuksien laimeneminen tuulen vaikutuksesta on nähtävästi vähentynyt. Näissä mittauksissa taustan keskiarvopitoisuudet (hiukkasta/m³) vaihtelivat kokoluokassa 0,5-1µm välillä 500 000 – 1 000 000, kokoluokassa 1-2µm välillä 170 000 – 250 000, kokoluokassa 2-5µm välillä 80 000 – 170 000 ja kokoluokassa 5-10µm välillä 4000 – 10 000.



Kuva 29. Taustan hiukkaspitoisuudet Kyröllä mittaussarjoissa.

Taustan kuorman osuuden tarkastelu (8.10. täydestä mittaussarjasta) antaa mittasuhteita altaalla muodostuvien aerosolien kuorman suuruudelle. Mittauspisteet 1-4 ovat kävelysillalta pisteen 4 ollessa tässä mittaussarjassa ylätuulen puolella ja pisteen 2 alatuulella. Tälle mittaussarjalle mitattiin pisteellä 3 reunan päältä otetuista mittauksista suurimmat hiukkaspitoisuudet kaikissa kokoluokissa, joten tämä on lähimpänä altaalla muodostuvien hiukkasten lähdepitoisuutta.

Taustan pitoisuuksien osuus laskettiin kaikkien mittauspisteiden pitoisuuksista jokaiselle kokoluokalle (Taulukko 7). Altaan vieressä alatuulella taustan osuus hiukkaspitoisuuksista oli suurin kokoluokassa 0,5-1 µm. Taustan osuus lähdekuormasta vähenee suuremmilla hiukkaskoilla. Kokoluokassa 5-10 µm taustan osuus muodostuvasta hiukkaskuormasta oli lähes nolla prosenttia. Taustan osuus lähenee sataa prosenttia kaikilla kokojakaumilla kauimmalla mittauspisteellä. Kokoluokilla 2-5 ja 5-10 µm etäisimmän mittauspisteen (piste 8) pitoisuudet nousivat verrattuna edelliseen mittauspisteeseen (piste 7). Tämä voi johtua taustan tai lähteen kuorman satunnaisesta vaihtelusta tai alueella työskennelleen kuormaajan nostattamasta pölystä.

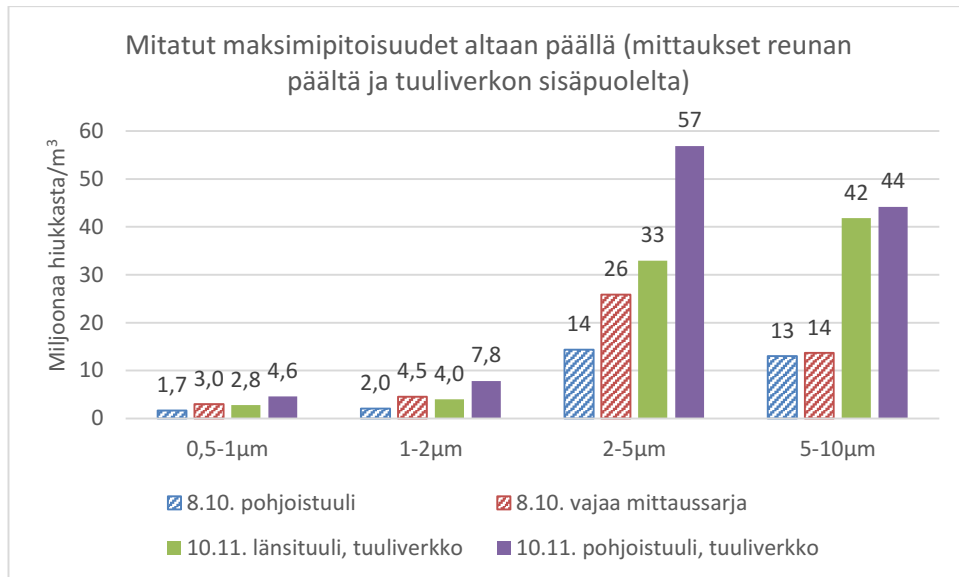
Taulukko 7. Taustan hiukkaspitoisuuksien keskiarvon osuus kunkin mittauspisteen hiukkaspitoisuuksista (8.10.) tarkastelluissa kokojakaumissa.

Mittauspiste (etäisyys altaasta)	Taustan osuus mitatuista pitoisuuksista (%)			
	0,5-1 μ m	1-2 μ m	2-5 μ m	5-10 μ m
4 (0m)	85 %	93 %	92 %	112 %
3 (0m)	76 %	92 %	87 %	47 %
1 (0m)	51 %	39 %	29 %	13 %
3 reunan päältä (-0,1m)	25 %	8 %	1 %	0 %
2 (0m)	41 %	24 %	5 %	0 %
5 (7,5m)	64 %	62 %	58 %	40 %
6 (15m)	80 %	95 %	88 %	81 %
7 (30m)	85 %	95 %	92 %	94 %
8 (45m)	92 %	96 %	87 %	43 %

4.2.3 Ilmastusaltaan päältä mitatut pitoisuudet

Altaan reunan päältä mitattiin mittaussarjojen maksimipitoisuudet (Kuva 30). Kuvaajasta huomataan altaan päältä mitattujen pitoisuuksien olleen pääasiassa korkeampia 10.11. tuuliverkon kanssa toteutettuna mittauspäivänä kuin 8.10. ilman tuuliverkkoa. Vain alle 2 μ m hiukkasissa länsituulen mittaussarjan pitoisuudet ovat pienemmät kuin 8.10. mitatun vajaan mittaussarjan pitoisuudet. Muissa kokoluokissa ja mittaussarjoissa mitattiin aina korkeammat maksimipitoisuudet tuuliverkon kanssa. Tuuliverkon mittauspäivänä tuulen nopeus oli keskimäärin 0,27 m/s ja ilman tuulensuojaverkkoa toteutettuna mittauspäivänä 0,6 m/s. Pienempi tuulennopeus ja tuuliverkko ovat vaikuttaneet altaalla mitattuja hiukkaspitoisuuksia kohottavasti. Suurimmat pitoisuudet mitattiin 10.11. pohjoistuulen mittaussarjan aikana, jolloin tuulennopeus kävi ajoittain nollassa.

8.10. mitatun täyden mittaussarjan (pohjoistuuli) aikana maksimipitoisuudet mitattiin pisteessä 3 reunan päältä otetussa mittauksessa. Maksimipitoisuudet olivat yli 2 μ m kokoluokissa 14 miljoonan hiukkasen tasolla ja alle 2 μ m kokoluokissa 2 miljoonan tasolla. Ilman vaahdonestosuihkuja 8.10. mitatun osittain epäonnistuneen mittaussarjan suurimmat pitoisuudet mitattiin pisteestä 1 altaan reunan päältä otetussa mittauksessa pitoisuuden ollessa noin 25 miljoonaa hiukkasta/m³ kokoluokan 2-5 μ m hiukkasilla. Länsituulen mittaussarjalle (10.11.) mitatut maksimipitoisuudet mitattiin mittauspisteellä 3 ja ne olivat yli 30 miljoonaa hiukkasta/m³ halkaisijaltaan yli 2 μ m hiukkasille. 10.11. mitatun pohjoistuulen mittaussarjan maksimipitoisuudet altaan päällä olivat mittaussarjoista suurimmat kaikissa kokoluokissa ollen yli 40 miljoonaa hiukkasta/m³ halkaisijaltaan yli 2 μ m hiukkasille. Jälkimmäisen sarjan suurimmat pitoisuudet mitattiin poikkeuksellisesti kyseisen mittaussarjan ylätuulen puolisolalla reunalla pisteessä 4. Mittausten aikaan tuuli oli ajoittain pysähtynyt, joten pitoisuudet konsentroituivat verkon sisäpuolelle tasaisesti tuulen pääasiallisesta suunnasta riippumatta. Kuvaajasta nähdään altaalla muodostuvan eniten kokoluokan 2-5 μ m hiukkasia ja vähiten kokoluokan 0,5-1 μ m hiukkasia.



Kuva 30. Kyrön bioreaktoriaaltaan reunan päältä mitatut maksimipitoisuudet mittaussarjoissa. Tuuliverkon kanssa mittaus otettiin tuuliverkon sisäpuolelta.

4.2.4 Mittaussarjat

Mittaussarjojen kuvaajissa (Kuvat 31-34) etäisyys ilmastusaltaan reunasta tarkoittaa mittauspisteen etäisyyttä ilmastusaltaan alatuulen puolista reunasta tuulen suunnassa. Yksittäisten mittaussarjojen kuvaajista on jätetty pois altaan reunan päältä mitattu maksimipitoisuus, koska sen lisääminen tekee kuvan mittakaavasta vaikeasti luettavan muiden pisteiden pitoisuuden jäädessä maksimia huomattavasti pienemmälle tasolle. Kokonaisten mittaussarjojen kuvaajista on jätetty pois myös tuulen suunnassa altaan sivusta mitatut tulokset, koska ne eivät anna oleellista tietoa mittauslinjan pitoisuuksien muutoksesta. Näiden tuulen suunnassa altaalta kohtisuorassa olevien mittauspisteiden pitoisuudet olivat yleensä koholla toisen pisteen jäädessä aina enemmän tuulen alapuolelle, mikä näkyi kohonneina hiukkaspitoisuuksina. Esimerkiksi mittauspäivänä 8.10. tehdystä kokonaisesta mittaussarjasta mittauspisteellä 1 mitattiin korkeampia pitoisuuksia kuin pisteellä 3.

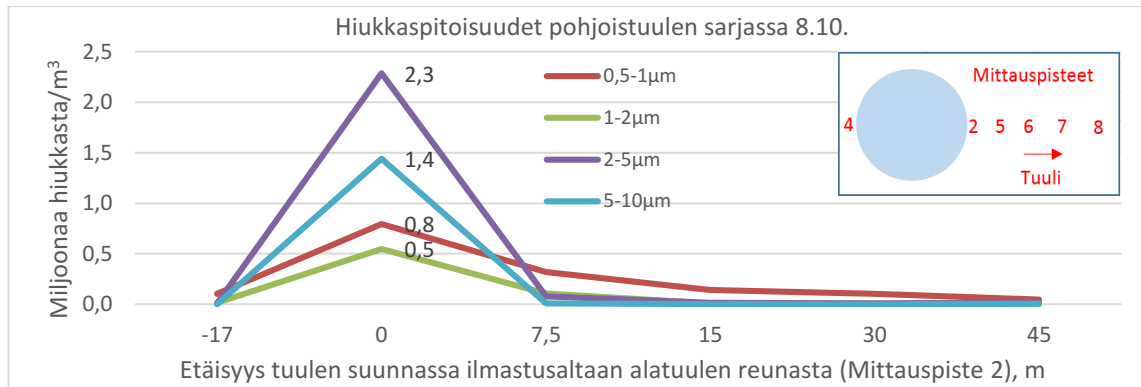
Kyröllä 8.10. tehdyn pohjoistuulen mittaussarjan tuloksista (Kuva 31) nähdään altaalta lähtevän liikkeelle eniten kokoluokan 2-5 µm hiukkasia näiden pitoisuuden ollessa yli 2 miljoonaa hiukkasta/m³. Mittaussarja on hyvin johdonmukainen ja pitoisuudet vähenevät tasaisesti oletetun mukaisesti etäisyyden kasvaessa. Suurempien kokoluokkien hiukkaset poistuvat ilmasta nopeammin, jolloin pitoisuudet etäämpänä lähteestä pienenevät yli 2µm kokoluokilla nopeammin kuin pienemmillä hiukkasilla.

Tuulen suunnan kääntynyt mittauspäivänä 8.10. ainoan ilman vaahdonestosuihkuja tehdyn mittaussarjan aikana mittauksista ei saatu käyttökelpoista täyttä mittaussarjaa. Mittaustuloksista bioreaktorin vierestä kuitenkin nähdään, että hiukkaspitoisuudet altaan vieressä ilman vaahdonestosuihkuja (Kuva 32) olivat samaa luokkaa kuin suihkujen kanssa tehdyissä mittauksissa (pohjoistuulen sarja). Taustan pitoisuutena tässä on käytetty pisteen 2 pitoisuutta, koska tämän suuntaiselle tuulelle ei tehty muuta taustamittausta.

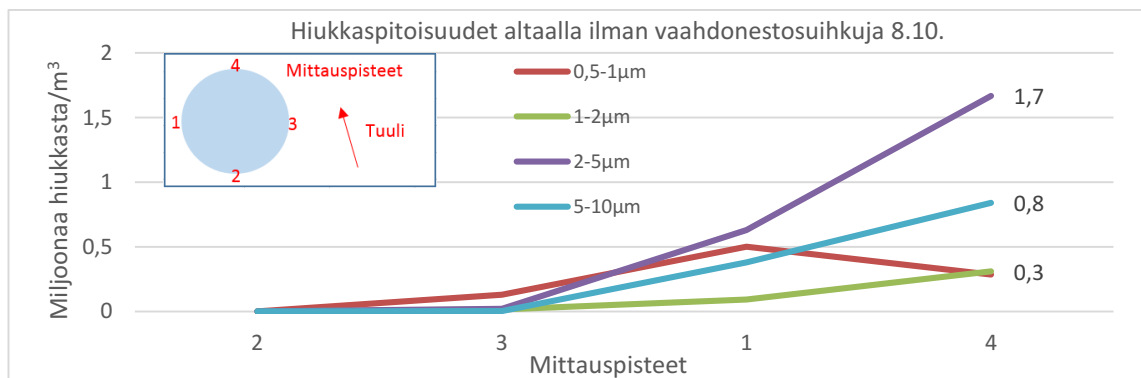
Toisena mittauspäivänä 10.11. tuuliverkon asennuksen jälkeen saatujen mittaustulosten perusteella arvioidaan tuuliverkon vaikutusta hiukkaspitoisuuksien leviämiseen. Kyseisenä mittauspäivänä saatiin otettua kaksi täyttä mittaussarjaa: Länsituulen mittaussarja (Kuva 33) ja pohjoistuulen mittaussarja (Kuva 34).

Länsituulen linjan mittaussarjassa hiukkaspitoisuudet altaan vierestä kävelysillan päältä alatulessa otetuissa mittauksissa olivat huomattavasti suurempia kuin pohjoistuulella ja 8.10. tehdyissä mittaussarjoissa. Piste 3 mittauksen pitoisuudet yli $2\mu\text{m}$ hiukkasille olivat yli 12 miljoonaa hiukkasta/ m^3 . Mittauspäivänä 10.11. tuulenoisuus (0,27 m/s) oli keskimäärin yli puolet pienempi kuin 8.10. (0,6 m/s) ja tuulensuojaverkon vaikutus altaalla hidasti tuulta tästä edelleen. Hitaamman tuulen johdosta hiukkaspitoisuudet altaan lähistöllä ovat teoriassa suurempia tuulen laimentavan vaikutuksen vähentyessä, kuten länsituulen linjan mittauksissa olivatkin.

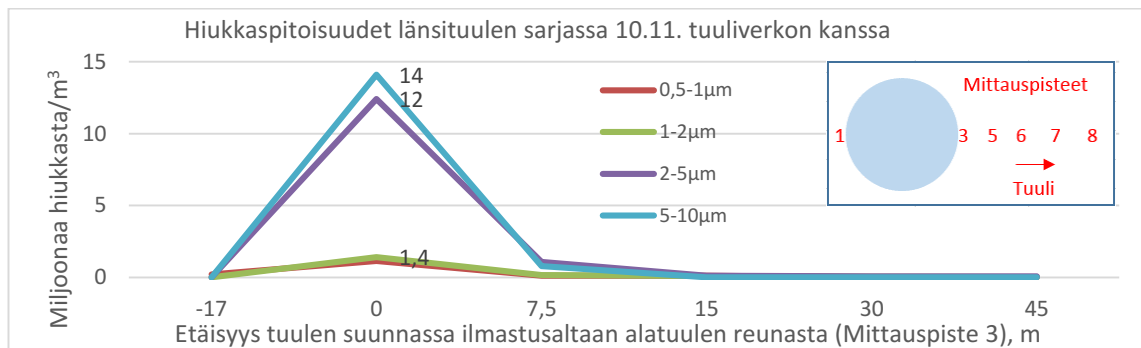
Pohjoistuulen linjan mittauksissa pitoisuudet altaan ympärillä kävelysillalla olivat selvästi 8.10. tehdyn mittaussarjan pitoisuuksia pienemmät. Pohjoistuulen mittaussarjassa kokoluokkien 2-5 ja 5-10 μm hiukkaspitoisuudet eivät ole selkeästi koholla altaan vieressä kuten muissa mittaussarjoissa. Altaan ylätuulen puolella mitattiin jopa korkeampia pitoisuuksia kuin alatulessa. Mittauslinjan pisteiden 5-8 mittaukset otettiin ennen pisteitä 1-4. Juuri ennen pisteiden 1-4 mittauksia tuuli laantui ja oli ajoittain nollassa. Mahdollisesti tästä syystä kokoluokkien 2-5 ja 5-10 μm hiukkaset eivät liikkuneet suurissa määrin tuuliverkon ulkopuolelle, jolloin verkon ulkopuolella mitatut pitoisuudet pysyivät pieninä myös aivan altaan vierellä. Vain kokoluokan 0,5-1 μm pitoisuudet ovat koholla ilmastusaltaan vieressä ja laskevat tasaisesti etäämmälle mentäessä. Suuremman kokoluokan hiukkaspitoisuudet ovat hieman koholla 7,5-15 metrin etäisyydellä altaasta, mikä voi johtua lähteen satunnaisesta kuorman vaihtelusta, tuulenoisuuden muutoksista tai hiukkasten kohoamisesta altaalta nousevan ilman mukana ja laskeutumisesta etäämpänä altaasta.



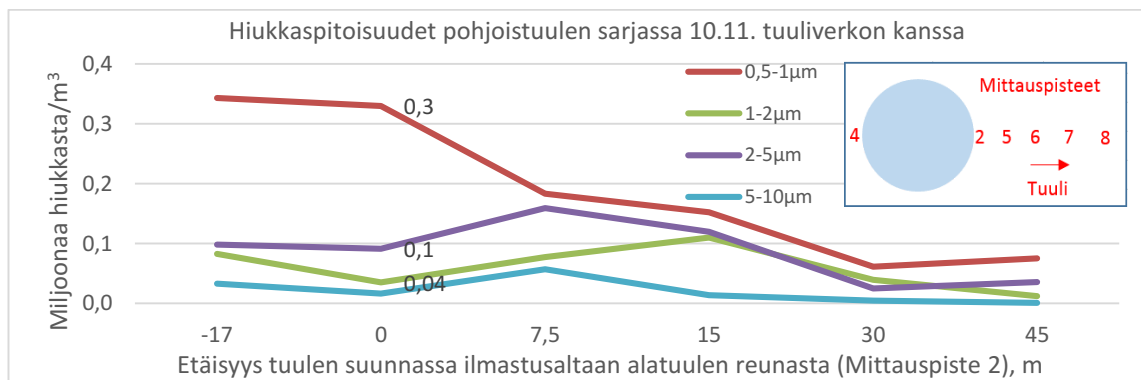
Kuva 31. Hiukkaspitoisuudet 8.10. Kyrön bioreaktorilla pohjoistuulen mittaussarjassa.



Kuva 32. Hiukkaspitoisuudet 8.10. Kyrön bioreaktorilla ilman vaahdonestosuihkuja, tuulen suunnan muutoksen vuoksi pitoisuustulokset vain altaan vierestä.



Kuva 33. Hiukkaspitoisuudet Kyrön bioreaktorilla tuulensuojaverkon kanssa 10.11. länsituulen mittaussarjassa.



Kuva 34. Hiukkaspitoisuudet Kyrön bioreaktorilla tuulensuojaverkon kanssa 10.11. pohjoistuulen mittaussarjassa.

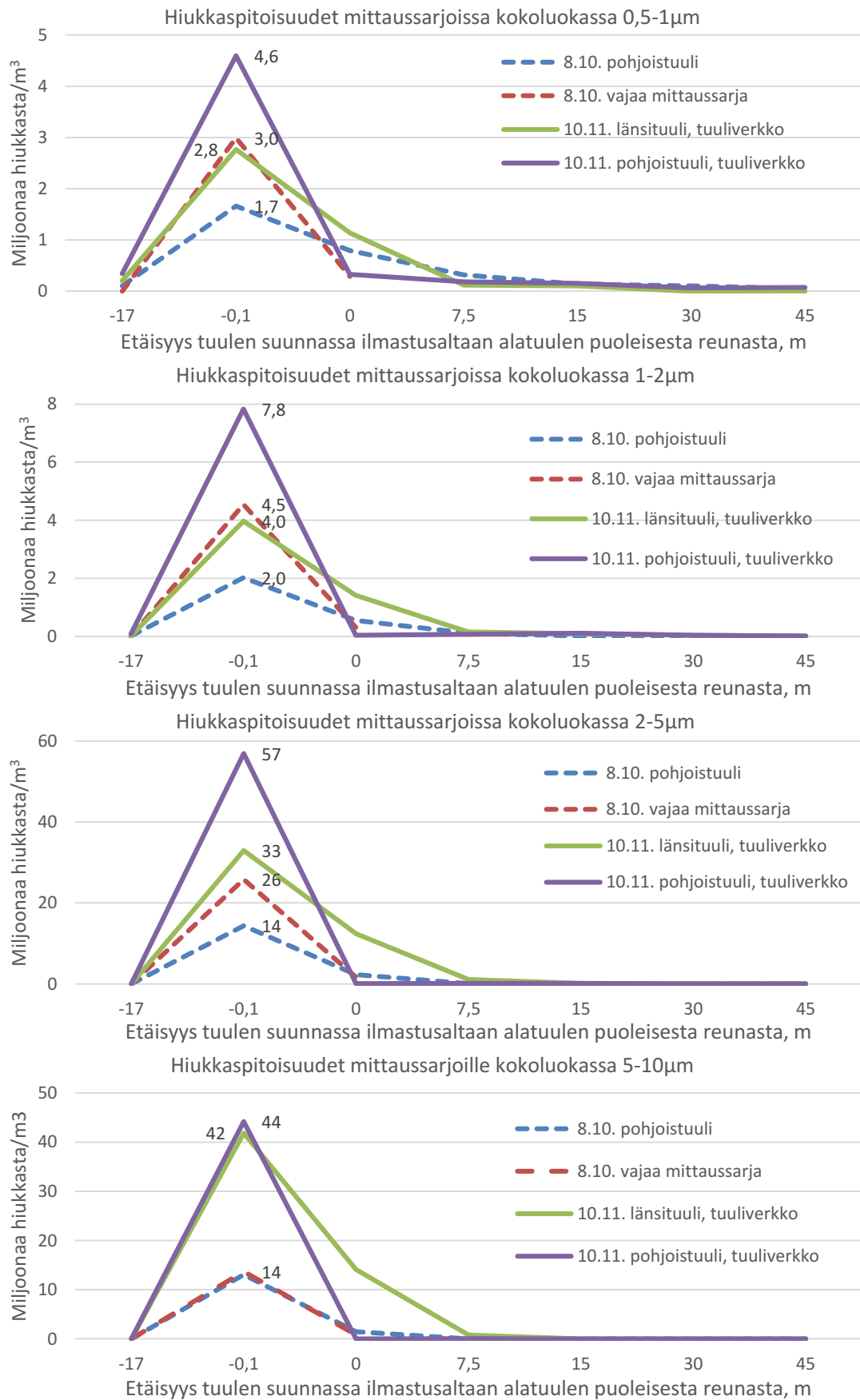
Tuulensuojaverkon kanssa 10.11. tehtyjen mittausten tulokset eivät ole yhtä johdonmukaisia, etenkin pohjoistuulen sarjassa, kuin 8.10. pohjoistuulen mittaussarjan mittaus tulokset. Tuuliolosuhteiden jatkuva muutos on luultavasti aiheuttanut ympäristön pitoisuuksien satunnaista vaihtelua ja myös tuulensuoja-aidalla on ollut todennäköisesti huomattava vaikutus ympäristön pitoisuuksiin suuren osan hiukkaskuormasta pysyessä tuuliverkon sisäpuolella mittauspäivän hitaalla tuulella. Lähes tuulettomat olosuhteet ja tuuliverkko ovat todennäköinen selitys korkeammille hiukkaspitoisuuksille altaan päällä ja ympäristössä. Tuuliverkko vaikuttaisi vähentävän hiukkasten liikettä verkon läpi toimituksessaan hidasteena ilman virtauksille. Vaihtuvien tuuliolosuhteiden vuoksi tulosten vertailu ilman verkkoa ja verkon kanssa otetuille mittauksille ei ole yksiselitteistä.

4.2.5 Mittaussarjojen vertailu hiukkaskokoluokittain

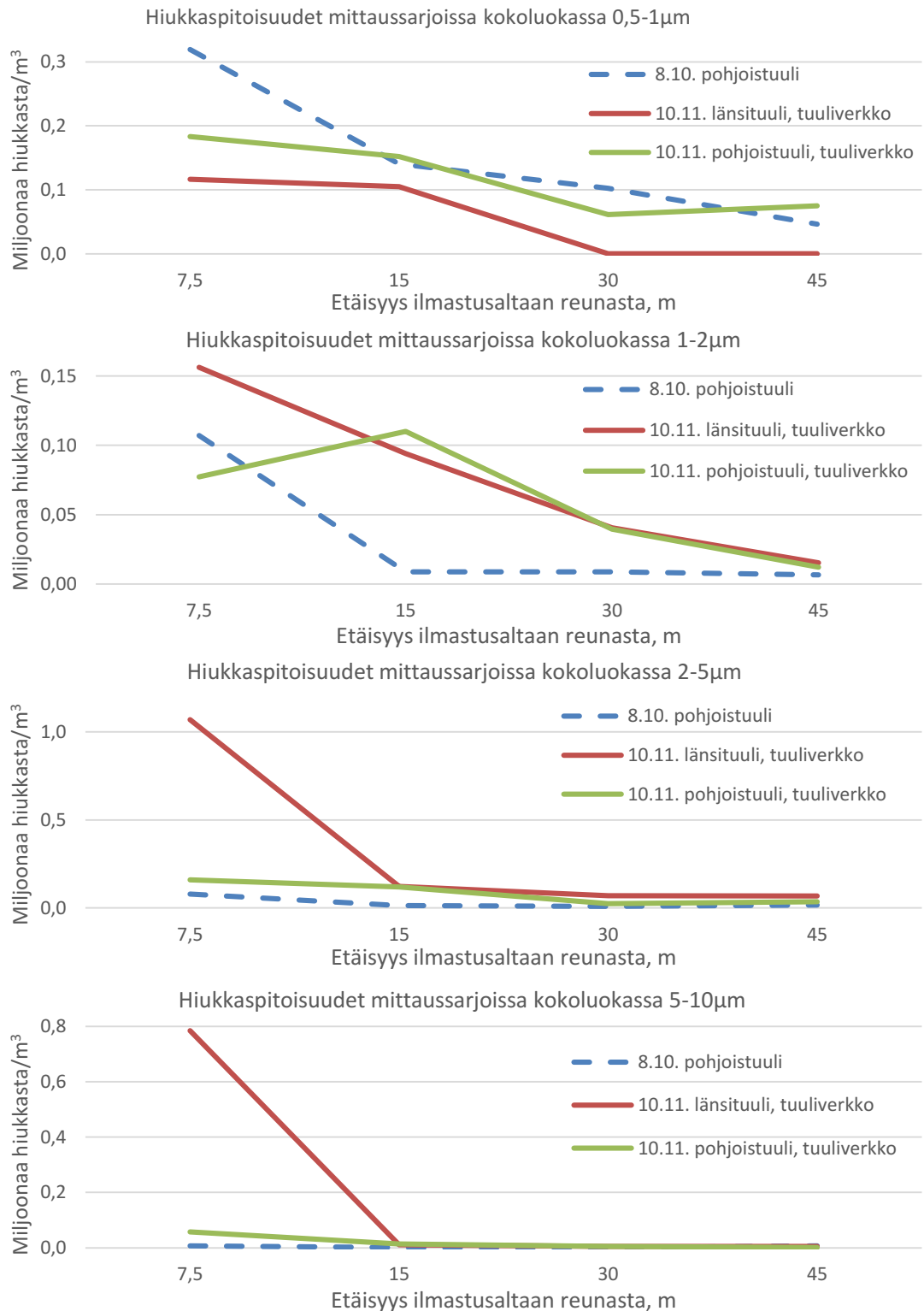
Vertaillessa hiukkaspitoisuuksia kaikilla mittaussarjoilla (Kuva 35) nähdään hiukkasten lähdepitoisuuksien altaan päällä (etäisyys -0,1 kuvaajassa) poikenneen mittaussarjoissa suuresti toisistaan varsinkin suuremmissa hiukkaskokoluokissa. Mittauspäivänä 10.11. tuuliverkon kanssa altaan päällä on ollut suurempi hiukkaskuorma kuin ensimmäisenä mittauspäivänä. Tuuliverkon mittauksissa pohjoistuulen mittaussarjassa maksimipitoisuudet altaalla ovat kaikista mittaussarjoista suurimmat. Näiden mittausten aikana tuuli oli lähes nollassa, jolloin hiukkaset eivät ole liikkuneet altaalta tuuliverkon ulkopuolelle aiheuttaen mittaussarjaan muilla pisteillä alhaiset pitoisuudet.

Kokoluokassa 0,5-1 μ m hiukkaspitoisuudet vaikuttavat pienenevän tuuliverkon kanssa nopeammin etäämmälle altaalta mentäessä kuin ilman tuulensuoja-aitaa. Suuremmissa kokoluokissa taas ilman verkkoa otetussa pohjoistuulen mittaussarjassa mitattiin mittaussarjoista pienimmät pitoisuudet yli 7,5 metrin etäisyyksiltä. Kokoluokassa 5-10 μ m mitatut hiukkaspitoisuudet pienenevät lähes nolnaan jo mittauslinjan suurimman etäisyyden sisällä kaikissa sarjoissa.

Tarkasteltaessa täydellisten mittaussarjojen hiukkaspitoisuuksia etäämpänä altaasta (Kuva 36) havaitaan pitoisuuserojen mittaussarjojen välillä vähentyvän. Kokoluokassa 0,5-1 μ m tuuliverkon kanssa otetun länsituulen mittaussarjan pitoisuudet ovat pienimmät kaikilla mittauspisteillä pitoisuuksien laskiessa nolnaan 30 metrin etäisyydellä. Yli 1 μ m kokoluokissa mitattiin ilman tuuliverkkoa 8.10. mitatussa sarjassa pienimmät pitoisuudet lähes kaikilla mittauspisteillä. Yli 2 μ m kokoluokissa länsituulen mittaussarjan altaan lähellä mitatut kohonneet pitoisuudet näkyvät vielä 7,5 metrin etäisyydellä muita mittaussarjoja selvästi korkeampina pitoisuuksina. Tästä etäämmillä pisteillä pitoisuuserot vähenevät pitoisuuksien lähentyessä nolnaan. Etäämpien mittauspisteiden mittaustuloksista voi päätellä hiukkaspitoisuuksien yli 1 μ m kokoluokissa altaan ympäristössä olevan hiukan koholla tuuliverkon kanssa tehtynä mittauspäivänä. Tämä voi johtua mittauspäivän hitaammasta tuulesta sekä tuuliverkon hiukkasten leviämistä vähentävästä vaikutuksesta.



Kuva 35. Hiukkaspitoisuudet kaikissa mittaussarjoissa kokoluokille 0,5-1 ; 1-2 ; 2-5 ja 5-10 µm. Kuvaajiin on merkitty mittaussarjojen maksimi-arvot altaan reunan päältä otetusta mittauksesta (etäisyys -0,1).



Kuva 36. Mittausarjojen hiukkaspitoisuudet etäämpänä altaasta (etäisyydet 7,5-45m ; mittauspisteet 5-8) kokoluokille 0,5-1 ; 1-2 ; 2-5 ja 5-10 µm.

4.2.6 Tulosten tarkastelu

Kyrön bioreaktorilla tehdyissä hiukkasmittauksissa havaittiin hiukkaspitoisuuksien altaan päällä ja vieressä poikkeavan selvästi toisistaan ennen ja jälkeen tuulensuoja-aidan asennuksen. Tuuliverkon kanssa mitatut pitoisuudet altaan päällä verkon sisäpuolella olivat huomattavasti suurempia kuin ilman verkkoa. Pitoisuudet laskivat etäämmille mittauspisteille samalle tasolle ilman verkkoa mitattujen pitoisuuksien kanssa. Tämä voi johtua osaksi mittauspäivien keskituulennopeuden erosta, mutta myös tuulensuojaverkon vaikutuksesta. Toisena mittauspäivänä keskituulennopeus oli noin puolet ensimmäisestä päivästä ja tuuliverkko hidasti tuulta altaalla edelleen.

Mittaussarjojen vertailun perusteella ei pystytä sanomaan yksiselitteisesti vähentääkö tuulensuojaverkon vaikutus ympäristön aerosolipitoisuuksia. Hiukkaspitoisuudet vaikuttaisivat yleisesti olevan koholla altaan ympäristössä hitaan tuulennopeuden vallitessa. Etäisimmällä mittauspisteellä (45 metriä) pitoisuudet ovat jo lähellä taustan pitoisuuksien tasoa, joten mittausten tarkkuus ei riitä arvioimaan hiukkasten kauemmaksi leviämistä.

Tuulensuoja-aidan vaikutusta bioaerosolien aiheuttamiin riskeihin on vaikea arvioida tuuliverkon vaikuttaessa monin tavoin hiukkasten liikkeisiin ilmastusaltaalta. Tuulensuojaverkko hidastaa tuulen nopeutta altaalla ja hidastaa tästä syystä hiukkasten leviämistä johtaen hiukkasten laskeutumiseen lähempänä lähdettä. Aidan kanssa pitoisuudet lähteellä voivat nousta korkeammiksi laimentumisen hidastuessa, mutta leviäminen kauemmaksi vähentyy. Tuulensuoja-aidan vaikutus on paikallinen vaikuttaen tuulen nopeuteen vain aidatun alueen läheisyydessä. Vaikka tuuli hidastuu hetkellisesti ja hiukkaset ehtivät laskeutumaan tehokkaammin altaan ympäristössä, tuuli nopeutuu taas vallitsevien olosuhteiden mukaiseksi etäämpänä altaalta. Kirjallisuudessa on todettu ilmavirtausten suunnan muuttuvan aidan ja muiden rakenteiden yhteisvaikutuksesta lisäten ilmamassojen sekoittumista ja hiukkaspitoisuuksien laimenemista. (Santiago et al. 2007, Vigiak et al. 2003, Cornelis ja Gabriels 2005.)

Tutkimuksissa käytettiin kahden metrin korkuista aita ja verkon läpäisevyytenä noin 50%. Korkeammalla tuulensuoja-aidalla voisi mahdollisesti saada tehokkaampia tuloksia. Verkon läpäisevyys voisi lisäksi olla pienempi aidan alaosassa ja suurentua yläreunaa kohti, jolloin aidan turbulenttisia virtauksia aiheuttava vaikutus voi pienentyä. (Brandle et al. 2009, Vigiak et al. 2003, Cornelis ja Gabriels 2005.)

Tuulta hidastava vaikutus ei ole ainoa tuulensuoja-aidan hiukkaspitoisuuksien leviämiseen vaikuttava mekanismi. Verkko voi toimia myös suodattimena etenkin suurempien hiukkasten ja pisaroiden törmätessä verkkoon vähentäen ympäristöön leviävää aerosolikuormaa. Tuuliverkon suodattavaa vaikutusta ei tutkittu Kyrön mittauksissa, mutta verkkoa havainnoitiin silmämääräisesti. Tuuliverkossa näkyi selkeästi vettä, mikä osoittaa että osa altaalta tulevista pisaroista pidättyi verkkoon. Tästä voi olettaa verkolla olevan suodattavaa vaikutusta ainakin jossain määrin ja enemmän suuremmille pisaroille. Läpäisevyydeltään 50% tuulensuoja-aidan on arvioitu pysäyttävän suoraan noin 20% kooltaan 10 μ m hiukkasista ja suodatusteho lisääntyy hiukkaskoon kasvaessa (Raupach et al. 2001).

Pohjailmastuksessa käytettävä paineilma tekee ilmastusaltaasta erikoislaatuisen kohteen tuuliverkon käyttökohteena. Verkon lävitse kulkeva ilmavirtaus on rajoittunut, joten ilmastusaltaalta nouseva ilmamassa voi nostaa aerosoleja suoraan ylöspäin verkon muo-

dostamaa putkea pitkin. Osa suuremmista aerosoleista saattaa tällöin ehtiä laskeutumaan takaisin altaaseen jo verkon sisäpuolella, kun taas osa saattaa nousta aidan yli ylempiin ilmvirtauksiin kulkien näiden mukana mahdollisesti jopa verkotonta tilannetta kauemmaksi altaalta. Tällöinkin tuuliverkon vaikutus voi silti olla pitoisuuksia laimentava hiukkasten noustessa ylempiin turbulenttisiin ilmvirtauksiin johtaen pitoisuuksien tehokkaampaan laimenemiseen (Das 2013, Tyndall ja Colletti 2007). Tätä paineilman ja tuulensuoja-aidan yhteisvaikutusta pohjailmastetussa altaassa tulisi selvittää. Pintailmastimilla tätä vaikutusta ei synny, joten tuulensuoja-aita saattaa soveltua paremmin pintailmastettuihin altaisiin.

Ilmastusaltan rakenteella voi olla suuri vaikutus aerosolien leviämisen laajuuteen. Korkearakenteinen ilmastusallas voi vähentää altaalta vapautuvien bioaerosolien riskiä tehdasalueella. Toisaalta korkealla sijaitsevalta aerosolien lähteeltä hiukkaset voivat kulkeutua ympäristön rakenteiden ja kasvillisuuden yli, jolloin biologiset riskitekijät saattavat kulkeutua paljon laajemmalle alueelle kuin lähempänä maanpinnantasoa muodostuessaan. Korkeammalla tuulen voimakkaampi pitoisuuksia laimentava vaikutus saattaa kuitenkin toimia kokonaisriskiä vähentävästi. (Das 2013, Blatny et al. 2008.)

4.2.7 Virhelähteet

Mittauksiin liittyy paljon epävarmuustekijöitä, joiden vuoksi kukin mittaussarja poikkeaa toisistaan. Tuuliolosuhteiden arvaamattomuus on mittausohjelman suurin epävarmuustekijä, minkä takia yhdenkin mittaussarjan hakeminen tuottaa vaikeuksia. Yhden mittaussarjan ottamiseen menee puolesta tunnista tuntiin mittausten lukumäärästä riippuen. Tänä aikana tuuli voi kääntää suuntaa tai muuttaa nopeutta. Kahden mittauspäivän aikana saatiin yhteensä vain kolme täydellistä mittaussarjaa. Toteutuneina mittauspäivinä ei osunut yhtään kovempituulista päivää, joten mittaussarjoja ei saatu tuulisemmissä olosuhteissa. Kovemmallalla tuulella otettujen mittaussarjojen tulkinta saattaa olla vielä vaikeampaa, koska pitoisuudet laimenevat nopeammin.

Virhettä mittausten pitoisuuksiin on voinut aiheutua ympäristön muista hiukkaslähteistä. Altaan itäpuolella on selkeytinallas, jolta silminnähdyn nousevat höyryt ovat voineet vaikuttaa tältä puolelta otettujen mittauspisteiden mittaustuloksiin. Itäpuolella otettujen mittausten tuloksissa ei kuitenkaan näy selvästi kohonneita pitoisuuksia, joten nousevat höyryt eivät luultavasti kondensoituneet mittarin tunnistamiksi pisaroiksi. Kantoainealtaan ympärillä kulki huoltoteitä, joita pitkin ajaneet autot ja kuormaajat saattoivat nostattaa ajoittain pölyä mittauskorkeudellekin. Mitattaessa kahdeksan metrin korkeudessa todennäköisesti vältettiin virhelähteiden vaikutusta, koska maanpinnan tason lähteiden hiukkaset eivät välttämättä nouse mittauskorkeudelle. Selvästi poikkeavat ja hetkittäisen tuulen muutoksen aikaiset mittausjaksot jätettiin pois mittauspisteen keskiarvopitoisuuksien laskennasta.

Mittausten toteutuneet mittaussarjat otettiin kantoainealtaan vaahdonestosuihkujen ollessa päällä. Suihkuista tulevat pisarat ovat puhdasta vettä, jolloin veden haihtuessa ilmaan ei jää kiinteää hiukkasta toisin kuin jäteveden bioaerosolien tapauksessa. Tällöin kauemmas altaalta mentäessä suihkujen vaikutus voi näkyä nopeasti pienentyvänä hiukkaspitoisuutena. Vaahdonestosuihkuilla voi olla myös altaalta tulevaa aerosolikuormaa vähentävä vaikutus suurempien suihkun pisaroiden pestessä altaalta nousevia hiukkasia takaisin altaaseen.

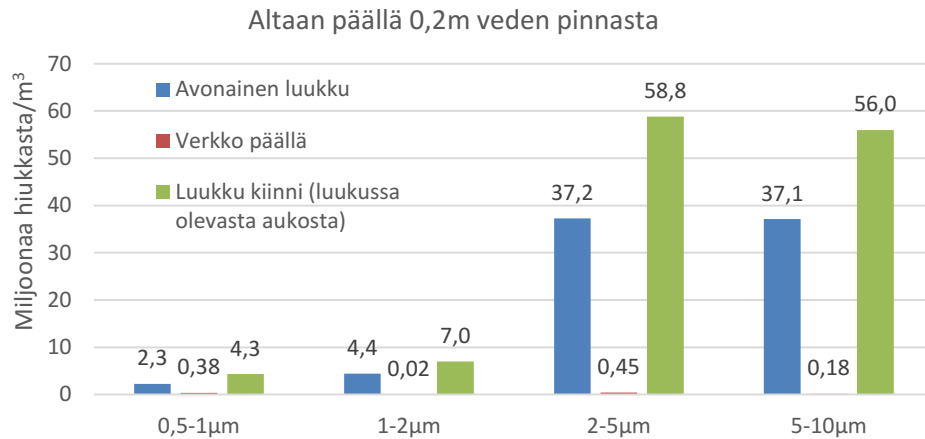
4.3 Verkkokate, Volskodin pienpuhdistamo

Volskodin jätevedenpuhdistamon ilmastusaltaalla tutkittiin tuuliverkon vaikutusta ympäristön hiukkaspitoisuuksiin katteena käytettäessä. Mittaustulokset (Liite 2) saatiin kolmessa mittaustilanteessa kolmelle mittauspisteelle.

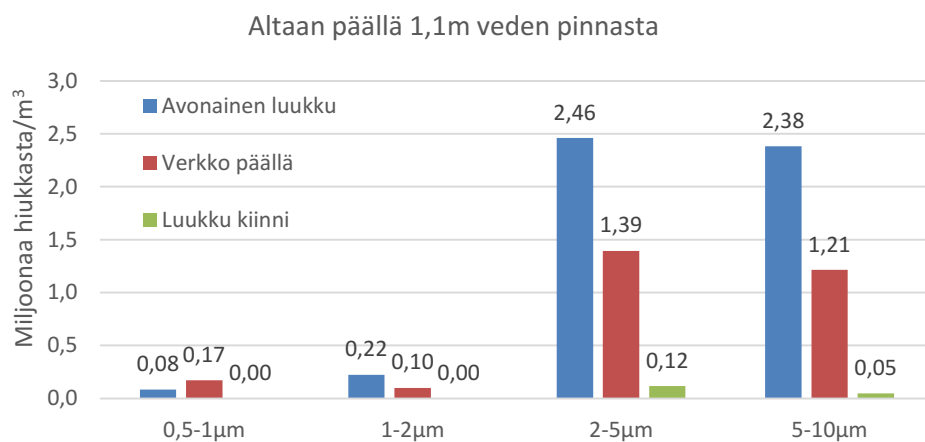
Altaan päältä veden pinnan läheltä (0,2m) otettujen mittausten tuloksista nähdään (Kuva 37) hiukkaspitoisuuksien pienentyneen huomattavasti verkkokatteen kanssa. Pitoisuudet pienenevät noin sadasosaan kaikissa kokoluokissa verrattuna avoimen luukun tilanteeseen. Verkon kanssa pitoisuudet olivat alle puoli miljoonaa hiukkasta/m³ kaikissa kokoluokissa, kun taas avoimella luukulla pitoisuudet nousivat yli 37 miljoonaa hiukkaseen/m³ molemmissa yli 2µm kokoluokissa. 0,2 metrin päässä vedestä mittaus verkon kanssa otettiin muutaman sentin päästä verkosta, joten verkolla täytyi olla huomattavaa ilmanvirtausta ohjaavaa tai hiukkasia suodattavaa vaikutusta. Alumiinikatteen luukun ollessa kiinni tämän mittauspisteen kohdalla oli ilmastuksen putkea varten aukko, jonka kohdalta suljetun katteen tilanteen mittaus otettiin. Tällöin altaalta karkaava ilma ja konsentroituneet hiukkaset virtasivat tästä aukosta ulos altaalta aiheuttaen kaikkein suurimmat pitoisuudet tämän pisteen mittauksissa. Pitoisuudet kohosivat yli 56 miljoonaa hiukkaseen/m³ yli 2µm kokoluokissa.

Mittauspisteessä 1,1 metriä jäteveden yläpuolella hiukkaspitoisuudet ovat sekoittuneet ja laimentuneet vedenpinnan läheisestä tilanteesta, jolloin luukun ollessa kiinni katteen aukosta karkaavien konsentroituneiden hiukkasten vaikutusta ei nähdä kohonneina pitoisuuksina (Kuva 38). Kiinteällä alumiinikatteella oli selkeästi hiukkaspitoisuuksia vähentävä vaikutus tällä mittauspisteellä pitoisuuksien ollessa pienimmät kaikissa kokoluokissa. Verkkokatteen vaikutus näkyi myös selkeänä tälläkin etäisyydellä vähentäen yli 1µm hiukkasten pitoisuuksia noin puoleen verrattuna avonaiseen luukkuun.

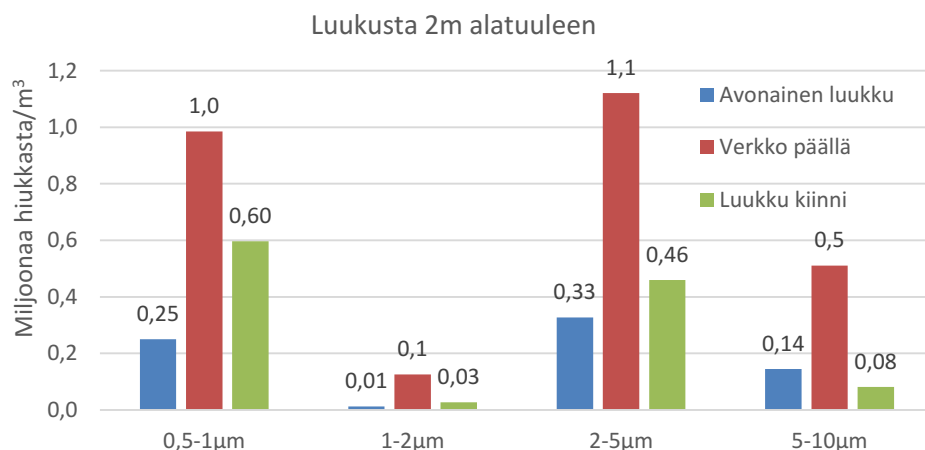
Avatusta luukusta 2 metriä alatuulen mitatuista tuloksista (Kuva 39) nähdään pitoisuuksien verkon kanssa kohonneen selvästi sekä avonaisen luukun että suljetun luukun tilanteisiin verrattuna. Verkkokatteeseen muodostui yhteen kohtaan aukko ilmastuksen putkien vuoksi, joka suuntautui alatuulen mittauspisteen suuntaan. Konsentroituneet hiukkaset ovat voineet ohjautua tästä kohtaa ulos ja kohottaa mittauspisteen pitoisuuksia. Paineilmaa ja konsentroituneita hiukkasia purkautuu puhdistamon notkelmassa myös muista ilmastusaltaan alumiinikatteen aukoista. Tämä on voinut johtaa mittaustuloksissa näkyvään kohonneisiin pitoisuuksiin suljetun luukun tilanteessa verrattuna avoimen luukun tilanteeseen. Luukun ollessa auki hiukkaset pääsevät leviämään laajemmalle alalle purkautuessaan avoimesta luukusta laimentaen tämän pisteen pitoisuuksia.



Kuva 37. Hiukkaspitoisuudet Volskodin ilmastusaltaalla 0,2m veden pinnan päällä.



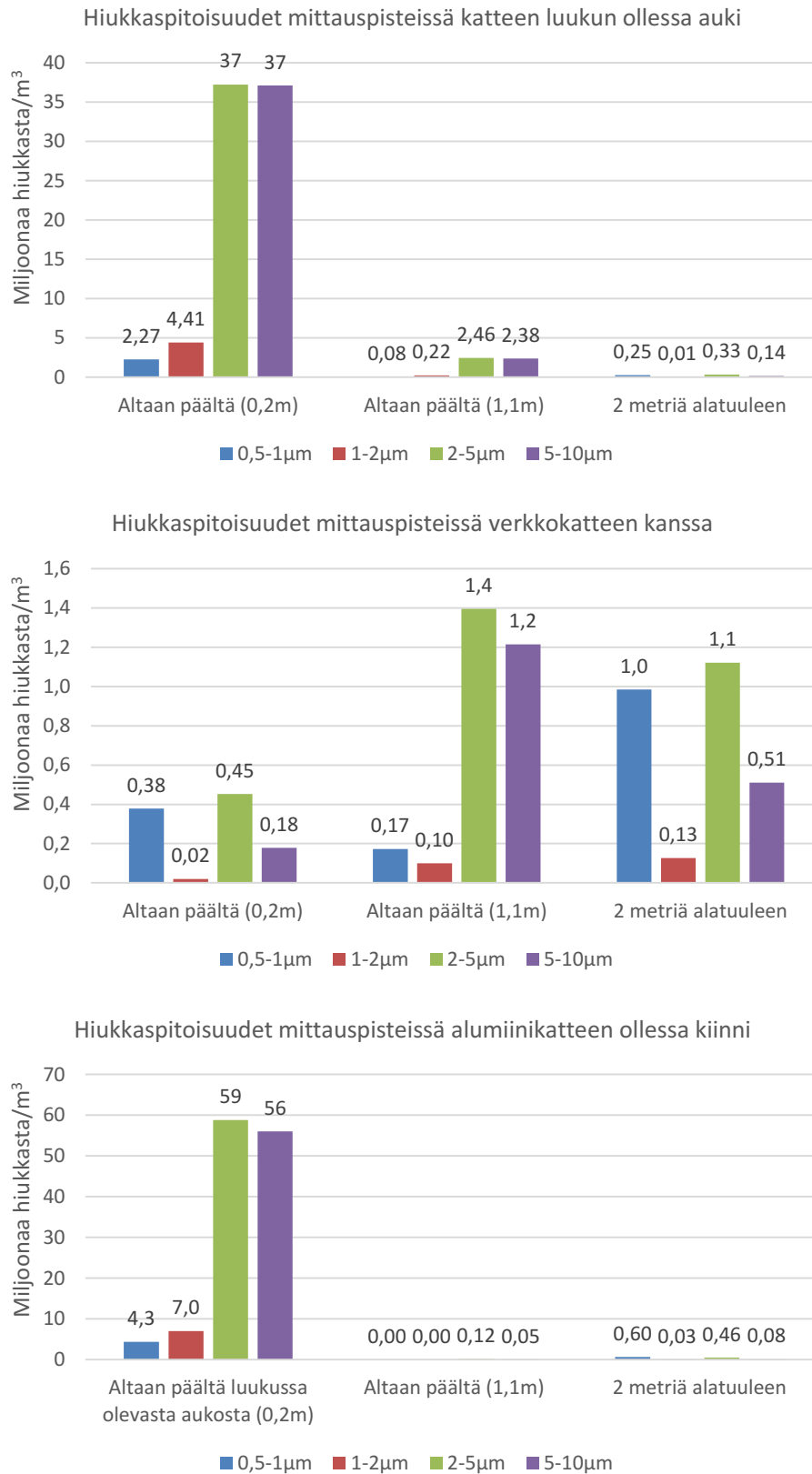
Kuva 38. Hiukkaspitoisuudet Volskodin ilmastusaltaalla 1,1m veden pinnan päällä.



Kuva 39. Hiukkaspitoisuudet Volskodin ilmastusaltaalta avatusta katteen osasta 2m alatuuleen.

Mittaustuloksista nähdään verkkokatteella olleen selvää vaikutusta hiukkasten leviämiseen altaan ympäristössä (Kuva 40). Pitoisuudet kaikissa kokoluokissa laskevat huomattavasti mentäessä etämmälle vedenpinnan läheltä molemmista ilman verkkokatetta tehdyissä mittaustilanteissa. Verkkokate muuttaa hiukkasten virtauksia niin että hiukkaspitoisuudet nousevat mentäessä etämmälle vedenpinnan ja verkon läheiseltä mitauspisteeltä. Verkon takaa vedenpinnan läheltä otetuissa mittauksissa hiukkaspitoisuus

det olivat kaikissa kokoluokissa alle 0,5 miljoonaa hiukkasta/m³. Etäämpänä vedenpin-
nasta molemmilla mittauspisteillä mitattiin yli miljoonan pitoisuuksia.



Kuva 40. Hiukkaspitoisuudet eri kokoluokissa Volskodin ilmastusaltaalla kullakin mit-
tauspisteellä avoimen luukun, verkkokatteen ja suljetun luukun tilanteissa.

4.3.1 Tulosten tarkastelu

Verkkokatteella saatujen mittaustulosten perusteella verkkokate ohjaa tehokkaasti hiukkasten liikettä ja ilmavirtauksia. Lämpäisevä kate vaikuttaa suuresti hiukkaspitoisuuksiin ilmastusaltaan ympäristössä. Hiukkaset vaikuttivat liikkuvan hyvin vähäisessä määrin verkon läpi. Verkkokatetta käyttämällä voisi saada huomattavia muutoksia hiukkasten leviämiseen ilmastusaltaalta.

Verkkokatetta ei kiinnitetty tiiviisti altaan päälle ja metallikatteessa oli aukkoja laidoilla, jolloin ilmavirta altaalta ohjautui katteiden avoimista kohdista ulos. Tiiviisti asennetulla verkkokatteella voisi olla erilainen suodattava vaikutus aerosoleille kaiken ilmavirran kulkiessa verkon läpi. Koska verkko on kevyt ja helposti asennettava materiaali, sitä voisi käyttää ainakin altaiden osittaiseen kattamiseen ja ilmavirtausten ohjaamiseen. Ohjaamalla konsentroituneet bioaerosolit pois työskentelyalueelta voitaisiin parantaa työturvallisuutta alueella ja mahdollisesti vähentää aerosolien leviämistä kauemmaksi ympäristöön ohjaamalla ilmavirta kohteesta riippuen vaikka metsikön suuntaan.

Volskodin mittauksissa havaittiin verkkokatteessa olevalla aukolla olevan suuri merkitys hiukkasvirran ohjauksessa. Mittausten perusteella käytetty verkkomateriaali ohjasi ilman virtauksen osin kulkemaan katteen ohi sen reunoille muodostuneista aukoista hiukkaset mukanaan. Tämän havainnon perusteella myös Kyrön tuulensuoja-aitaan itäpuolelle jätetyllä aukolla voi olla merkittävä vaikutus hiukkasten virtauksiin. Tämä voi osaksi selittää 10.11. mitatun länsituulen sarjan suuria pitoisuuksia altaan itäpuolella kävelysillalla ja mittauspisteessä 5. Mittausten tulosten perusteella myös kiinteän katteen aukoilla on huomattava merkitys altaalla kohonneiden hiukkaspitoisuuksien leviämiseen. Kiinteillä katteilla saavutetaan tutkitusti tehokas aerosolien leviämisen vähentyminen ja huomioon tulisi ottaa myös poistoilman käsittely tai sen suuntaaminen pois työskentelyalueelta (Guo et al. 2014, Kummer ja Thiel 2008).

Volskodin mittaustulokset voivat selittää tuulensuoja-aidan kanssa Kyröllä mitattuja tuloksia suuren osan hiukkasista pysyessä verkon vaikutuksesta vähäisellä tuulella verkkoaidan sisäpuolella. Tuulensuoja-aidan kanssa mitatuissa mittaussarjoissa pitoisuudet altaan päällä olivat korkeampia kuin ilman aitaa. Verkon kanssa mitatussa pohjoistuulen mittaussarjassa hiukkaspitoisuudet välittömästi tuulensuojaverkon ulkopuolella olivat alhaiset, mikä voi selittyä verkon vaikutuksesta aerosolien osin estyneellä leviämisellä hitaalla tuulella.

5 Tekniikoiden kustannusvertailu

Ilmastusaltaan kattamisesta tehtiin kustannusvertailua esimerkkikohteena Sappi Kirkniemen paperitehtaan ilmastusallas. Tehtaan kahdesta ilmastusaltaasta toisen kattamista suunniteltiin aluksi yhtenä mittauskohteena, mutta pilotoinnista luovuttiin väliaikaisten rakenteiden asentamisen suuren työn ja mittauksen epävarmuustekijöiden vuoksi. Tehtaan kaksi ilmastusallasta ovat toisiaan lähekkäin, jolloin hiukkaspitoisuuksien lähteen varmentaminen vaikeutuu ja vertailukelpoisten tulosten saaminen ei ole itsestään selvää. Altaiden suuri koko tekee katteiden asentamisesta työlästä ja rakenteiden kestävyyydestä epäluotettavaa ilman kokemusta omaavaa urakointifirmaa. Vaihtelevissa sääoloissa ja kovalla tuulella ison pinta-alan katemateriaalilta ja rakenteilta vaaditaan suurta kestävyyttä. Tehtaan pyöreälle ilmastusaltaalle päätettiin pyytää tarjouksia kattamisesta ulkopuolisilta kattamisista toteuttavilta yrityksiltä. Ilmastusallas on halkaisijaltaan 41 metriä.

Katemateriaalien pilotointia varten katteita suunniteltiin Kirkniemelle vain väliaikaiseen käyttöön, joten ensimmäinen tarjous pyydettiin telineratkaisuja vuokraavalta ja asennuksia toteuttavalta yritykseltä (Teline Kataja) katteiden ja telineiden vuokrasta sekä asentamisesta. Tarjous koski KH-sääsuojaa, joka sisältää PVC-peitteen ja kattoristikon, sekä Allround-telinerunkoa. Teline Katajan tarjoama kattamisen kokonaishinta seitsemän päivän ajalle oli 46 100€. Materiaalien vuokra ja työn toteuttaminen nousi liian kalliiksi tätä tutkimusta varten. Lisäksi tarjous koski läpäisemätöntä katetta, jolloin hiukkaspitoisuuksien mittaaminen ei luultavasti anna yleisesti sovellettavia tuloksia katteiden vaikutuksesta aerosolien leviämiseen.

Kirkniemen pilotoinnista luopumisen jälkeen ilmastusaltaan pysyvän täyskatteen toteuttamistapoja ja kustannuksia selvitettiin kahdeksalta suomalaiselta jätevesilaitosten urakoitsijalta, mutta yhtään urakoitsijaa ei löytynyt toteuttamaan tämän kokoluokan ilmastusaltaan kattamista. Urakoitsijoilla ei ollut kokemusta ilmastusaltaiden kattamisesta tai katettava kohde oli liian iso kyseiselle urakoitsijalle. Suomessa ilmastusaltaat ovat harvoin katettuja, mutta ulkomailta löytyy enemmän tämän tyyppisiä hankkeita ja urakoitsijoita. Yleisesti ottaen ilmastusaltaan täydellinen kattaminen on kallista suuren kokoluokan kohteissa. Konsultilta saatu arvio kiinteän katteen toteuttamisesta kyseiselle altaalle oli 700 000 – 1 500 000 euroa.

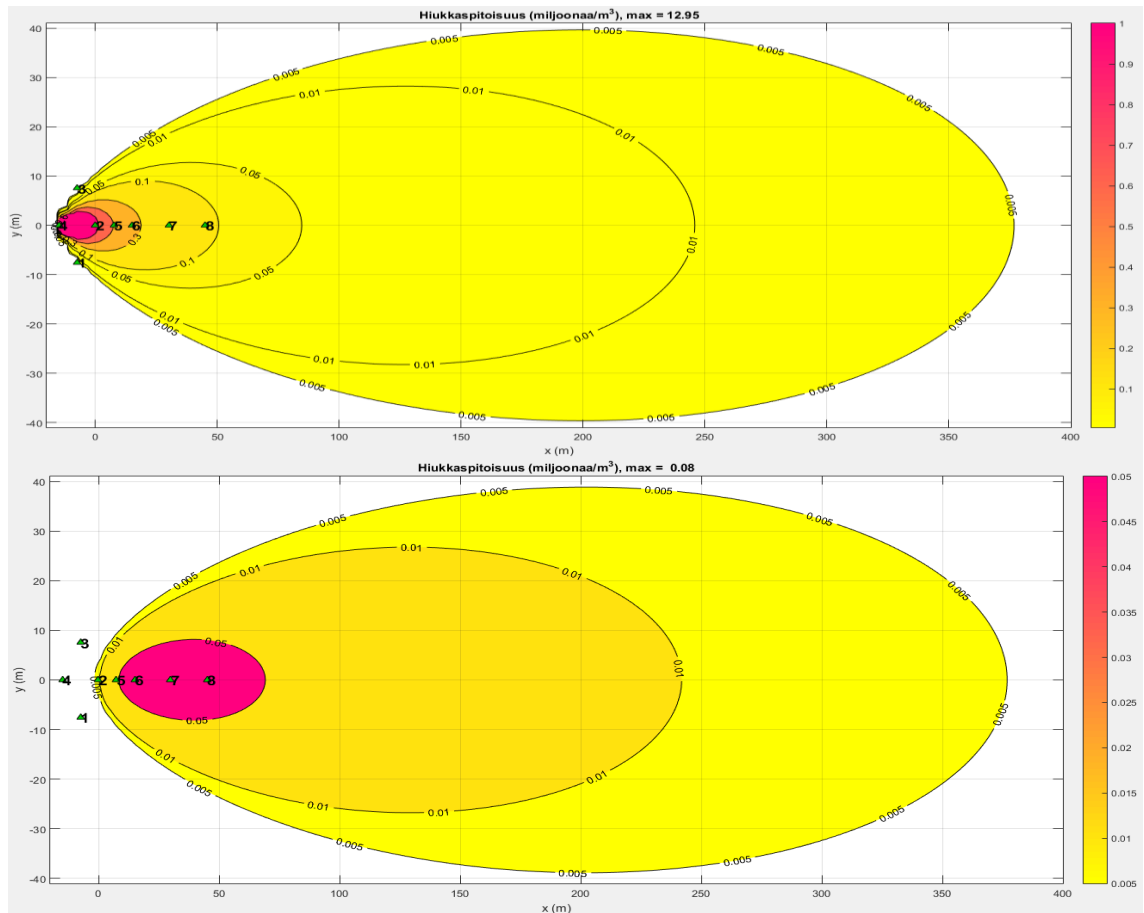
Tuulensuoja-aidan asentaminen kevyestä tuulensuojaverkosta osoittautui edulliseksi ratkaisuksi. Tuulensuojaverkko (Arrigoni 3045 WO Scirocco MD Green, Rautialta) maksoi 185€ kahden metrin levyisenä ja sadan metrin pituisena rullana. Lisäksi aitaan tarvittiin puutavaraa tukirakenteisiin, mitkä asennettiin Kyröllä tehtaan henkilökunnan toimesta. Tuulensuoja-aidan asentaminen on useimmissa kohteissa suhteellisen yksinkertaista ja materiaalien kustannukset eivät nouse kovin isoiksi edes isommilla ilmastusaltailla. Verkkomateriaalin käyttäminen ainakin osittaisissa katteissa voisi olla mahdollista joissakin kohteissa, jolloin myös kattamisen kustannuksia voitaisiin vähentää. Verkkokatteen mahdollisia hyötyjä ja rakennesuunnittelua tulee kuitenkin vielä tutkia toimivan tekniikan kehittämiseksi.

6 Mallinnetut hiukkaspitoisuuksien leviämiskuviot

Hiukkaspitoisuuksien leviämiskuviot mallinnettiin 8.10. otetun mittaussarjan tulosten avulla löydettyjen lähtöarvojen perusteella. Mallin leviämiskuvioon tulostuu hiukkaspitoisuudet vain maanpinnan tasolla, joten tähän mallinnukseen lähteen korkeustason pitoisuuksia mallinnettaessa päästölähde syötettiin malliin sijaitsemaan myöskin maan pinnan tasolla. Tällöin leviämiskuvio ei vastaa täysin hiukkasten leviämistä 8 metrin korkeudella, mutta antaa parhaan kuvan hiukkasten leviämisestä lähteen korkeustasolla. Lisäksi leviämiskuviot tuotettiin myös maanpinnan tasolle lähteen ollessa todellisella 8 metrin korkeustasolla. Mallinnuksen koordinaatisto suuntautuu tuulen suunnan mukaisesti x-akselin merkitessä tuulen suuntaista etäisyyttä ja y-akselin tuulta kohtisuoraan olevaa etäisyyttä. Leviämiskuvion kuvaajaan merkittiin mittauspisteet (vihreät kolmiot). Mallinnuksessa käytettiin hiukkaskokoluokille 0,5-1 μm ja 2-5 μm aiemmin löydettyjä massavirtoja sekä 0,6 m/s tuulennopeutta.

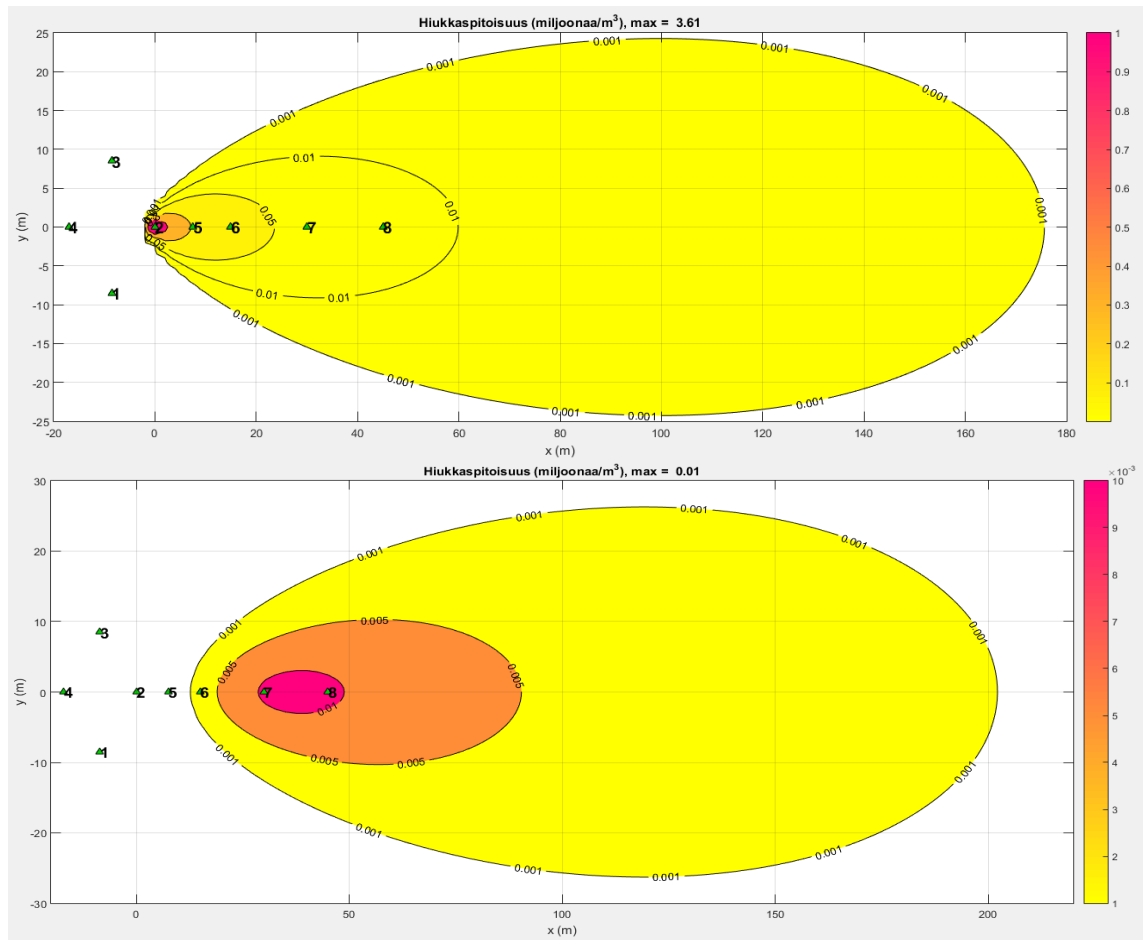
Kokoluokan 0,5-1 μm hiukkasille lähteen korkeustason mallinnetusta leviämiskuviosta nähdään pitoisuuksien laimenevan alle 5 000 hiukkasta/ m^3 tasoon 400 metrin etäisyydellä alatulessa (Kuva 41 yllä). Maksimipitoisuudet sijaitsevat altaan pinnalla ja ovat kuvaajan perusteella 13 miljoonaa hiukkasta/ m^3 tasolla. Mallinnettu maksimipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin mitattu maksimipitoisuus 1,7 miljoonaa hiukkasta/ m^3 . Tämä johtuu mallinnetusta pistelähteestä, jonka hiukkaset konsentroituvat lähteen lähellä enemmän kuin aluelähteen päästöt tekisivät. Kuvaajiin ilmoitettu maksimipitoisuus ei ole välttämättä todellinen mallinnuksen antama maksimi, koska mallinnuksen kuvaan asetetulla isolla mittakaavalla kuvan koordinaattipisteiden erottelukyky huononee ja oikea maksimipitoisuus ei näy kuvaajassa. Kuvan tulostava koodi hakee maksimipitoisuuden vain resoluution mukaisilla tasapisteiltä, jolloin maksimi voi jäädä pisteiden väliin ollen kuvaajassa ilmoitettua suurempi.

Maanpinnan tason leviämiskuviosta (Kuva 41 alla) nähdään pitoisuuksien laimenevan huomattavasti mentäessä lähteen korkeudelta maanpinnan tasolle lähellä lähettä, kun taas kauempana lähteestä maan tason pitoisuus ei eroa juurikaan lähteen korkeustason pitoisuudesta. Maanpinnan tason pitoisuudet ovat suurimmillaan noin 40 metrin päässä altaasta ollen enimmilläänkin alle 100 000 hiukkasta/ m^3 tasolla ja ovat yli 400 metrin etäisyydellä alatulessa alle 5 000 hiukkasta/ m^3 tason.



Kuva 41. Mallinnetut hiukkaspitoisuudet ($0,5-1\mu\text{m}$) tuulennopeudella $0,6\text{ m/s}$ ilmastusaltaan yläreunan tasolla (yllä) sekä maanpinnan tasolla (alla).

Mallinnetussa leviämiskuviossa halkaisijaltaan $2-5\ \mu\text{m}$ hiukkasten pitoisuus on noin 200 metrin etäisyydellä alatulessa alle $1000\ \text{hiukkasta}/\text{m}^3$ tason sekä altaan yläreunan että maanpinnan tasolla (Kuva 42). Suuremman kokoluokan hiukkaset poistuvat ilmasta paljon nopeammin kuin pienemmät hiukkaset, joten pitoisuudet vähenevät nopeasti etäämmäksi altaalta mentäessä. Toisaalta suurempi hiukkanen voi teoriassa aiheuttaa suuremman terveysriskin pienempänä pitoisuutena, koska suuremmassa bioaerosolihiuksessa voi olla enemmän mikrobeja. Kuvaajan mukaan suurimmat pitoisuudet maanpinnan tasolla ovat noin 40 metrin päässä altaalta. Todellisessa tapauksessa turbulenssiset virtaukset luultavasti aiheuttavat suuria pitoisuuksia myös aivan ilmastusaltaan juurelle, jolloin ei muodostu kuvaajan kaltaista alhaisten pitoisuuksien vyöhykettä ilmastusaltaan alapuolelle.



Kuva 42. Mallinnetut hiukkaspitoisuudet (2-5 μm) tuulennopeudella 0,6 m/s ilmastusalttaan yläreunan tasolla (yllä) sekä maanpinnan tasolla (alla).

Mallinnetun hiukkaspitoisuuden leviämisen prosentuaalista vähentymää arvioitiin laskeamalla pitoisuuksien osuutta lähteen reunan (mittauspiste 2) pitoisuudesta (Taulukko 8). Arvioinnissa käytettiin 8.10. mitatun mittaussarjan mukaista mallinnettua tilannetta ja lähteen korkeustasoa. Pitoisuudet vähenivät kokoluokassa 2-5 μm alle yhteen prosenttiin lähteen pitoisuudesta jo 45 metrin etäisyydellä lähteestä. Pienemmät hiukkaset poistuvat ilmasta hitaammin, joten kokoluokan 0,5-1 μm hiukkasten pitoisuus oli alle yhden prosentin vasta 400 metrin päässä lähteestä.

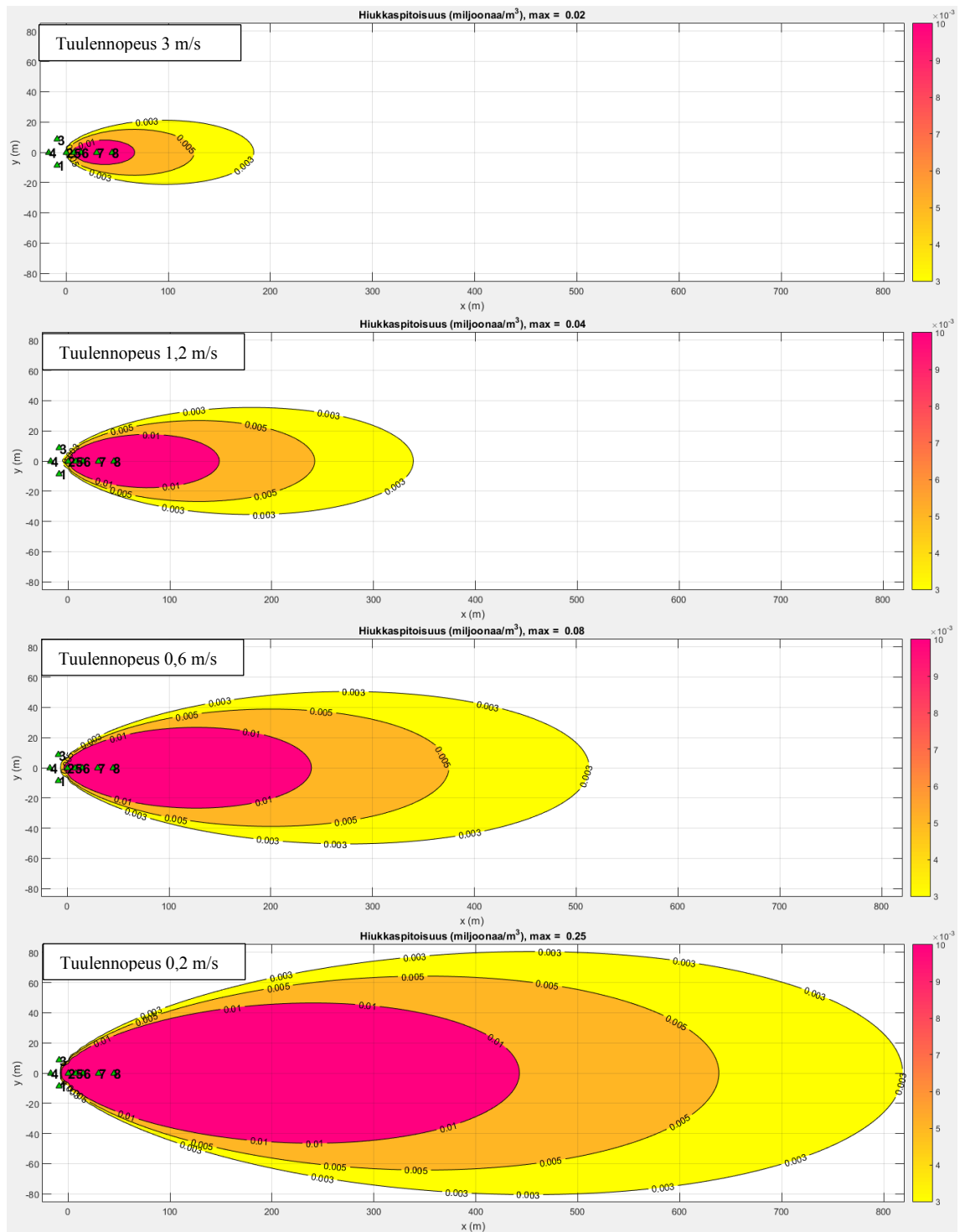
Taulukko 8. Pitoisuuksien prosentuaalinen osuus lähteen reunan pitoisuudesta etäisyyden mukaisesti.

Etäisyys (m)	0	7,5	15	30	45	400
0,5-1 μm	100 %	55 %	36 %	20 %	14 %	0,9 %
2-5 μm	100 %	8 %	3 %	1,1 %	0,6 %	0,1 %

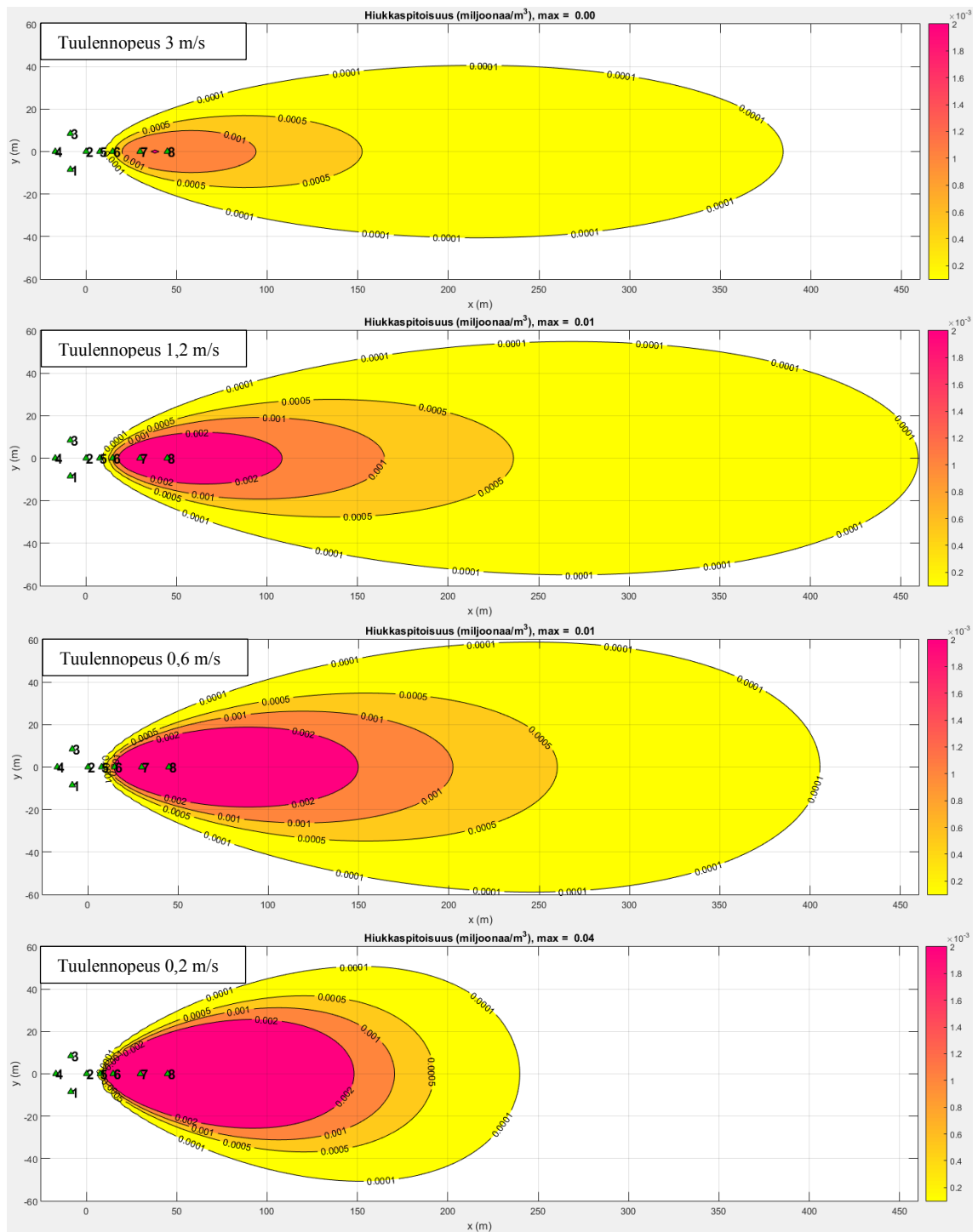
6.1 Tuulen nopeuden vaikutus mallinnettuun leviämiskuvioon

Leviämiskuvio tuotettiin lisäksi tuulen nopeutta muuttaen halkaisijaltaan 0,5-1 μ m sekä 2-5 μ m hiukkasille tuulen nopeuden vaikutuksen arvioimiseksi (Kuvat 43 ja 44). Tuulensuojaverkon vaikutus voidaan yksinkertaistaa malliin tuulen hidastumiseksi. Läpäisevyydeltään 50% tuulensuoja-aidan tuulta hidastava vaikutus on teoriassa enintään noin 70% vähennys tuulennopeudessa ja vaikutusetäisyys noin 40 kertaa aidan korkeus. Kaksi metriä korkean tuulensuoja-aidan tapauksessa tuulen suuntainen vaikutusalue olisi siis noin 80 metrin pituinen. Ympyrän muotoisen tuulensuoja-aidan tuulta hidastava vaikutus on kaksinkertaistunut ja vaikutusetäisyys pidentynyt. Mallissa tuulen hidastavaa vaikutusta ei pystytä mallintamaan paikallisesti, joten verkon tuulta hidastavaksi kokonaisvaikutukseksi valittiin 66% antaen tuulennopeudeksi tässä 0,6 m/s tuulen tapauksessa 0,2 m/s. Tuulensuojaverkon ilman virtauksille ja hiukkasten liikkeelle aiheutuvaa muutosta ei huomioida muulla tavoin tässä mallinnuksessa.

Leviämiskuviot mallinnettiin tuulennopeuksilla 0,2 ; 0,6 ; 1,2 m/s ja 3 m/s. Näihin leviämiskuvioihin valittiin pienemmät minimipitoisuudet, jotta tuulen vaikutusta pystyttäisiin havainnoimaan pidemmältä matkalta. Kuvaajissa kokoluokan 0,5-1 μ m hiukkasille käytettiin minimipitoisuutta 3000 hiukkasta/m³ ja kokoluokan 2-5 μ m hiukkasille minimipitoisuutta 100 hiukkasta/m³. Leviämiskuviot ovat maanpinnantasolta lähteen ollessa 8 metrin korkeudessa.



Kuva 43. Hiukkaspitoisuuden ($0,5-1\mu\text{m}$) leviämiskuviot tuulennopeuksille 0,2 ; 0,6 ; 1,2 ja 3 m/s.



Kuva 44. Hiukkaspitoisuuden (2-5 μ m) leviämiskuviot tuulennopeuksille 0,2 ; 0,6 ; 1,2 ja 3 m/s.

Leviämiskuvioista huomataan, että suuremmalla tuulennopeudella hiukkasia on vähemmän lähteen lähistöllä tuulen laimentavan vaikutuksen lisääntyessä. Kokoluokalla 0,5-1 μ m (Kuva 43) pitoisuudet vähenevät tasaisesti mallinnetulla etäisyydellä tuulennopeuden noustessa. Tuulennopeudella 0,2 m/s pitoisuuden 3000 hiukkasta/m³ yltäessä noin 800 metrin etäisyydelle tuulen suunnassa tämä pitoisuusalue ylittää enää alle 200 metrin päähän lähteestä tuulennopeuden ollessa 3 m/s.

Kokoluokan 2-5 μ m hiukkasten leviämiskuvaajista (Kuva 44) nähdään pitoisuuksien lähteen lähellä kohoavan suuremmiksi pienellä tuulen nopeudella, mutta hiukkaset eivät

leviä yhtä suuria etäisyyksiä kuin kovemalla tuulella. Kovemalla tuulella vähäisemmän pitoisuuden alueet yltävät kauemmaksi lähteestä. Tuulen nopeuden kasvaessa alle 1000 hiukkasen pitoisuuden alueet kasvavat suuremman pitoisuuden alueen pienenessä. Kuitenkin jo 3 m/s tuulennopeuden leviämiskuviosta huomataan tuulen laimentavan vaikutuksen lisääntyvän, jolloin pitoisuudet myös etäämpänä alkavat vähentyä. Sama alhaisen pitoisuusalueen kasvamisen ilmiö nähtäisiin myös 0,5-1 μ m hiukkasten leviämiskuvioista tarkasteltaessa pienempiä pitoisuuksia ja suurempia etäisyyksiä. Tuulen vaikutusta arvioitaessa leviämiskuvioista havaitaan, että kovemalla tuulella yksittäiset hiukkaset saattavat liikkua suurempia etäisyyksiä lähiympäristön pitoisuuksien laimentuessa alhaisemmalle tasolle.

Lievemmillä tuulennopeudella pitoisuudet eivät laimene tehokkaasti tuulen pois kuljetavasta ja sekoittavasta vaikutuksesta, jolloin pitoisuudet pysyvät korkeampina lähteen välittömässä läheisyydessä. Kovemalla tuulella aerosolit kulkeutuvat nopeammin pois lähteen luota laimentaen lähiympäristön pitoisuuksia. Yksittäiset hiukkaset voivat kulkeutua kauemmaksi lähteestä kovalla tuulella. Tuulettomissa olosuhteissa hiukkaspitoisuudet pääsevät kasvamaan huippuunsa, koska hiukkasten poistumiseen paikallaan olevasta ilmasta vaikuttaa vain painovoimainen laskeutuminen.

6.2 Mallinnuksen soveltuminen bioaerosolien riskien arviointiin

Aerosolien leviämisen mallintaminen havainnollisesti mitattujen pitoisuuksien teoreettista leviämistä. Tässä käytetyn mallinnuksen tuloksia ei voi rinnastaa todelliseen tilanteeseen eikä kannata käyttää bioaerosolien aiheuttamien riskien arvioimiseen. Käytetty malli laski inerttien hiukkasten leviämistä yksinkertaistetuissa olosuhteissa pistelähteen tilanteessa, eikä hiukkaspitoisuuksien yhteyttä mikrobialtistukseen voida arvioida. Mallinnus kuitenkin osoitti, että bioaerosolien leviäminen pienenä pitoisuutena useiden kilometrien päähän ilmastusaltaalta on teoriassa mahdollista. Leviämismalleja voisi hyödyntää bioaerosolitutkimukseen laajemmin, jos vain sopivampia malleja otetaan käyttöön. Aluelähteen mallinnukseen kykenevän aerosolien leviämismallin käyttäminen olisi suotavaa. Mallinnukseen antaisi lisäarvoa sääolosuhteiden monipuolisempi mallinnus ja ajalliset muutokset, mikrobien inaktivaation kerroin yhdistettynä malliin sekä maastonmuotojen ja rakenteiden vaikutusten mallintaminen.

Hiukkaspitoisuuden ja mikrobialtistusriskin välillä ei ole mitään selkeää yhteyttä eikä mallinnuksessa tutkitun kohteen bioaerosolien mikrobipitoisuuksia tiedetä. On myös otettava huomioon, että mallinnuksen antamat pitoisuudet ovat vain yhden kokoluokan hiukkasten pitoisuuksia. Todellisessa tilanteessa kokonaishiukkasten pitoisuus on siis suurempi ja bioaerosolien tapauksessa yksikin hiukkanen saattaa sisältää huomattavan määrän mikrobeja. Leviämiskuvioiden minimipitoisuus on vaikea valita niin että se antaisi oleellista tietoa bioaerosolien leviämisestä ja niiden aiheuttamista terveysriskeistä. Pääasiallisesti vain lähteen lähiympäristössä hiukkaspitoisuudet ovat niin korkeat, että mikrobeille altistuminen on todennäköistä.

Käytetyllä mallinnusmenetelmällä mallinnettu leviämiskuvio on kaksiulotteinen leviämisen tilanne pysyvissä olosuhteissa, joten se ei sovellu kovin hyvin lähteen oikean ympäristön pitoisuuksien arviointiin. Todellisuudessa tuulen suunta ja nopeus vaihtelevat paljon sekä ympäristön muodot vaikuttavat virtauksiin ja hiukkasten pidäytymiseen,

jolloin leviämistä ja laimenemista tapahtuu enemmän ja kaikkiin suuntiin. (Blatny et al. 2008.)

Leviämisen havainnollistamiseksi mallinnetun leviämiskuvion voi asettaa kartalle kuvaamaan hiukkasten leviämistä mallinnetun lähteen ympäristössä. Leviämiskarttoja ei liitetty tähän työhön, koska ne eivät ole hyviä arvioita todellisesta hiukkasten leviämisestä. Kartalle asetetun leviämiskuvion minimipitoisuuden valinta voi antaa hyvinkin erilaisen kuvan hiukkasten leviämisestä. Pienellä minimipitoisuudella leviämiskuviosta tulee hyvin laaja ja pitkälle matkalle ulottuva, mikä antaa epärealistisen kuvan aerosolien leviämisestä. Todellisessa tapauksessa tuuli ei pysy samansuuntaisena ja yhtä nopeana pitkää aikaa, jolloin leviämiskuvio ei ole niin tiivis ja symmetrinen. Lisäksi hiukkasia pidättyy alueen kasvillisuuteen ja kohoaviin maastonmuotoihin, jolloin pitoisuudet ovat todellisuudessa pienempiä ja kulkevat paikallisten ilmajvirtausten mukana. Lisäksi bioaerosolien tapauksessa tulisi ottaa huomioon mikrobien inaktivaatio. (Van Leuken et al. 2015, Dowd et al. 2000, Smith 1995, Holden ja Babcock 1985.)

Pistemäisen päästölähteen sovittaminen aluelähteellä mitattuihin hiukkaspitoisuuksiin on ongelmallista. Pistemäisen lähteen mallintaminen aluelähteen tapauksessa ei anna osuvaa mittaustulosten mallinnusta edes suhteellisen pienen ympyränmuotoisen aluelähteen tapauksessa. Lähteen etäisyyden voi sovittaa mittauspisteisiin monella tapaa, jolloin mallinnuksen tulokset voivat muuttua suurestikin. Lähteen massavirraksi sovitettu arvo riippuu täysin pistelähteen etäisyydestä mittauspisteisiin. Myös muiden lähtöarvojen epätarkkuus voi muuttaa jonkin verran mallinnettua tilannetta. Jätevedestä muodostuvan aerosolin tiheydelle ja laskeumanopeudelle voisi etsiä tarkempia arvoja. (Lai et al. 2012.)

Mallinnukseen aiheutti epätarkkuutta pistemäisen päästölähteen käytön lisäksi mahdollisesti myös ilmastusaltaalla syntyvien aerosolien laatu. Hiukkasmittari mittaa altaan lähellä paljon muodostuvaa ja nopeasti laskeutuvaa pisarakuormaa, joten altaan lähistön hiukkaspitoisuudet eivät välttämättä vastaa kauemmas leviävää hiukkaskuormaa. Tästä syystä altaan lähistön mittaustulokset voi olla vaikeaa sovittaa mallinnettavaan leviämiskuvioon. Ilmastusaltaalla aerosolit syntyvät jätevedestä ollen suurimmaksi osaksi vettä, mikä saattaa haihtua pisaroista ilmassa pienentäen ilmaan jäävän aerosolin hiukkaskokoa. Veden haihtumisen määrä ja nopeus riippuu vallitsevasta lämpötilasta ja ilman kosteudesta. Mallinnuksen lähtöarvoina käytetyn mittaussarjan mittauspäivänä 8.10. oli aurinkoista, ilman kosteus oli 51 % ja lämpötila 7°C, joten sääolosuhteet ovat hyvin voineet edistää veden haihtumista. (Sánchez-Monedero et al. 2008, Carducci et al. 2000.)

7 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää keinoja bioaerosolialtistuksen vähentämiseksi metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla. Tuulensuoja-aidat, täysikatteet, läpäisevät katteet sekä kasvillisuusaidanteet ovat potentiaalisia tekniikoita bioaerosolien leviämisen ehkäisemiseksi. Tuulensuojaverkon ominaisuuksia aerosolien leviämisen ehkäisemiseen testattiin mittauksin Kyrön tehtaan bioreaktorilla tuuliaidassa ja Volskodin pienpuhdistamolla katteena.

Aerosolien leviämisen arvioimiseen kehitettiin mittausohjelmaa, jota käytettiin Kyrön bioreaktorilla. Mittauksissa käytettiin kannettavaa hiukkasmittaria aerosolien tuulensuuntaisen leviämisen arvioimiseksi. Ohjelmalla saatiin vertailukelpoiset tulokset ja mittauspisteiden etäisyydet valittiin sopiviksi. Etäisintä mittauspistettä (45 metriä) kauempana pitoisuudet laimenevat lähes taustan tasolle, joten mittauslinjan pituutta ei ole hyödyllistä kasvattaa.

Mittausohjelman avulla haluttiin selvittää vaikuttaako tuulensuoja-aita aerosolien liikkeisiin ilmastusaltaan ympäristössä. Mittaustulosten perusteella läpäisevyydeltään noin 50% tuuliverkolla on vaikutusta aerosolien leviämiseen. Tuulensuoja-aita on toimissaan halutulla tavalla edullinen keino bioaerosolien leviämisen ehkäisemiseen. Tekniikka vaatii kuitenkin vielä lisää selvityksiä sen kaikkien vaikutusten arvioimiseksi.

Käytetty mittausohjelma soveltuu vaihtelevasti ulkona tehtyihin mittauksiin muuttuvien sääolojen vuoksi. Täyden ja johdonmukaisen mittaussarjan ottaminen tuottaa vaikeuksia tuulen suunnan ja nopeuden vaihdellessa mittausten aikana. Mittaustuloksia tuulensuojaverkon kanssa ja ilman ei ole yksiselitteistä verrata keskenään, koska kokonaisia sarjoja on vaikea saada mitattua ja hetkelliset tuuliolosuhteet vaikuttavat sarjojen pitoisuuksiin.

Läpäisevän katteen vaikutusta ilman virtauksiin ja aerosolien liikkeeseen ilmastusaltaan pyrittiin selvittämään. Mittaustulosten perusteella verkkokatteella saadaan aikaiseksi selkeitä muutoksia ilmastusaltaan ympäristön hiukkaspitoisuuksiin. Verkkomateriaali näyttäisi ohjaavan tehokkaasti aerosolien virtauksia verkkoon kohdistuvan paineen ollessa vähäinen. Verkkomateriaalin käyttökelpoisuutta ilmastusaltaan katemateriaalina voisi selvittää laajemminkin sen edullisuuden vuoksi.

Mittaustulosten mallintamisella havainnollistettiin aerosolien leviämistä ja tuulennopeuden vaikutusta hiukkaspitoisuuksien laimentumiseen. Käytetty yksinkertainen Matlab-pohjainen laskumalli selvitti hyvin tuulennopeuden vaikutusta hiukkasten leviämiseen, mutta ei sovellu monimutkaisempien tilanteiden mallinnukseen ja bioaerosolien todellisen leviämisen arviointiin. Mittausten ja mallinnuksen tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että bioaerosolien aiheuttamat riskit työskennellessä ilmastusaltaan lähitöllä saattavat nousta ajoittain lievissä tuuliolosuhteissa ja mahdollisesti myös tuulensuoja-aidan vaikutuksesta samalla riskien vähentyessä kauempana ympäristössä.

8 Suositukset

8.1 Suositukset bioaerosolien hallitsemiseksi

Bioaerosolien lähteiden riskitekijöitä voidaan potentiaalisesti vähentää asentamalla tuulensuoja-aitoja lähteen ympärille ja alueen reunoille tai perustamalla kasvillisuusvyöhykkeitä ympäristöön. Tuulensuojaverkot voivat sopivissa tapauksissa olla edullinen ja toimiva keino bioaerosolien leviämisen vähentämiseksi, mutta vaativat vielä jatkotutkimuksia mahdollisesti altaan välittömässä läheisyydessä kasvavien riskien välttämiseksi. Kattamalla ilmastusaltaat kokonaan päästään parhaaseen tulokseen, mutta kustannukset nousevat korkeiksi täysin peittävän kiinteän katteen kohdalla. Lämpäisevällä kevyellä katteella voidaan ohjata ja ehkäistä bioaerosolien leviämistä edullisemmin, jos parhaita rakenneratkaisuja tutkitaan ja soveltuvat ratkaisut otetaan käyttöön.

Kasvillisuusvyöhykkeet ovat kirjallisuuden perusteella tehokkaita aerosolien sitomisessa, joten korkeamman kasvillisuuden kuten puu- ja pensasaidanteiden sekä metsiköiden suosiminen bioaerosolien lähteiden ympäristössä voi tehokkaasti vähentää biologisia riskejä. Kasvillisuusvyöhykkeiden perustaminen on kuitenkin hidasta ja ne vievät paljon tilaa. Kasvillisuuden vaikutusta voi osin korvata tuulensuojarakenteilla, jotka vievät vähemmän tilaa ja voidaan asentaa helpommin haluttuun muodostelmaan.

Jätevedenpuhdistuksen prosessien suunnittelussa voidaan vaikuttaa bioaerosolien muodostumiseen. Ilmastusaltaan tai muun bioaerosoleja ilmaan vapauttavan lähteen rakennusvaiheessa tulisi ottaa huomioon tekniikka, sijainti ja rakenteelliset tekijät bioaerosolien kannalta. Kirjallisuuden perusteella ilmastuslaitteiden tyyppillä on suuri vaikutus muodostuvien aerosolien määrään. Vähentämällä ilmastusaltaan pinnan agitaatiota vältetään aerosolien muodostumista. Tunnettujen bioaerosolien lähteiden korvaaminen vaihtoehtoisilla tekniikoilla ja mahdollisen poistoilman käsittely tulisi ottaa aina huomioon. Välttämällä jäähdytystornien käyttöä jätevesien viilentämiseen vähennetään biologisten riskien lisääntymistä.

Bioaerosolien lähteen ympäristön rakenteet ja muodot vaikuttavat paljon aerosolien kulkeutumiseen ja sitoutumiseen ympäristössä. Bioaerosolien lähde voisi olla ihanteellista sijoittaa alemmaksi maaston muodoissa ja metsä- tai puistoalueen keskelle, jolloin aerosolien leviäminen ympäristöön vähentyy ja sitoutuminen lisääntyy. Ympäristön metsikkö voi toimia tehokkaana tuulen nopeuden hidastajana ja aerosolien sitojana, jolloin biologiset riskitekijät eivät kulkeudu helposti pois tehdasalueelta. Korkealla sijaitseva bioaerosolien lähde taas saattaa vähentää ympäristön bioaerosolipitoisuuksia tehokkaamman laimenemisen johdosta, mutta aerosolit voivat potentiaalisesti levitä tällöin laajemmalle alueelle (vrt. savukaasut).

8.2 Suositukset bioaerosolien mittaamiseksi

Tuulensuoja-aidan vaikutuksia on työlästä todentaa hiukkasmittausten perusteella muuttuvien tuuliolosuhteiden takia. Mittausohjelmaa (Liite 1) voisi edelleen kehittää hyödyntäen pidempikestoisia mittauksia useampien mittaussarjojen ottamiseksi. Hiukkasmittauksilla on kuitenkin rajoitteensa bioaerosolien tutkimuksessa. Hiukkaspitoisuuden ja mikrobiologisen riskin välille on vaikea löytää selvää yhteyttä raja-arvopitoisuuden määrittämiseksi muodostuneiden aerosolien laadun ja biologisten kontaminanttien pitoi-

suuden riippuessa lähteestä. Kohdekohtaista tai yleistettyä raja-arvoselvitystä voisi kehittää, koska aerosolien pitoisuuksia on helppo seurata hiukkasmittausten helppouden ansiosta. Mittauksissa tulee kuitenkin aina ottaa huomioon hetkellinen taustan hiukkaskuorma vallitsevissa olosuhteissa.

Jatkotutkimuksissa voisi kokeilla biologisten hiukkasten keräämistä pidempijaksoisesti laskeutusmaljoille tai bioaerosolien jatkuvatoimista mittausta (IMD, UV-APS) sopivissa pisteissä lähteen lähistöllä. Tulosten arvioinnin avuksi tulisi alueella olla jatkuvatoiminen sääasema, jonka tulokset tallentuisivat lyhyellä intervallilla sääolosuhteiden nopeiden muutosten havainnoimiseksi. Tulosten vertailu verkon kanssa ja ilman saaduilla tuloksilla voi edelleen olla haasteellista sääolosuhteiden vaihdellessa satunnaisesti, mutta pidempikestoisilla mittauksilla saavutettaisiin suurempi vertailuaineisto. Mittausohjelmaa voisi käyttää myös muiden tekniikoiden kuten verkkokatteen tai kasvillisuusaidanteen tutkimuksissa.

8.3 Jatkotutkimustarpeet

Tärkeänä kysymyksenä tuuliaidan käytössä ilmastusaltaalla on, että pysyvätkö korkeat hiukkaspitoisuudet pääasiassa tuuliverkon sisäpuolella vai kulkevatko hiukkaset myös altaan lähiympäristöön. Tuuliverkolla voidaan vähentää hiukkasten leviämistä kauemaksi lähteeltä, mutta sen ei olisi suotavaa lisätä bioaerosolien riskiä ilmastusaltaan lähellä työskenteleville. Ilmastusaltaasta nousevan ilman vaikutusta hiukkasten liikkeeseen tulisi tutkia, koska se saattaa nostaa hiukkaset altaalta tuuliverkon yli. Lisäksi tuulensuojaverkon korkeuden ja läpäisevyyden vaikutuksia aerosolien leviämiseen voisi selvittää.

Kasvillisuusaidanteiden tehokkuutta bioaerosolien leviämisen vähentämiseen voisi todentaa mittauksin sopivissa kohteissa. Haasteena tässä on löytää sopiva mittauskohde maastonmuotojen ja rakenteiden puolesta. Kasvillisuusaidanteen tulisi olla sopivan lähellä ilmastusallasta niin, että mittaukset pystyttäisiin ottamaan samalla tuulella sekä kasvillisuusaidanteen ollessa mittauslinjalla että ilman kasvillisuusaidannetta mittausarjojen vertailun mahdollistamiseksi. Sopiva kasvillisuusaidanne olisi esimerkiksi kolmirivinen, kymmenen metriä korkea ja linjaltaan kohtisuorassa ilmastusallasta vasten.

Tuuliverkon ominaisuuksia voisi testata tarkemmin hallituissa laboratorio-olosuhteissa. Kenttämittausten ongelmana oli sääolosuhteiden arvaamattomuus. Verkon ilman virtauksia ohjaavia ja aerosoleja suodattavia vaikutuksia voisi tutkia käyttämällä tuulikonetta ja tuottamalla aerosoleja keinotekoisesti. Koealtaan voisi kattaa verkolla materiaalin kateominaisuuksien tutkimiseen. Ilmanpaineen vaikutusta aerosolien virtaukseen verkon läpi voitaisiin testata avaamalla kate osaksi.

Rakenteiden ja maaston muotojen mallinnukseen kykenevällä mallilla voisi tutkia bioaerosolilähteen ominaisuuksien ja ympäristön vaikutusta aerosolien leviämiseen. Myös tuuliverkon vaikutusta voisi olla mahdollista mallintaa kehittyneemmällä malleilla.

Lähdeluettelo

Agranovski, I.E. Safatov, A.S. Borodulin, A.I. Pyankov, O.V. Petrishchenko, V.A. Sergeev, A.N. Agranovski, V. Grinshpun, S.A. 2005. New personal sampler for viable airborne viruses: feasibility study. *Aerosol Science*. Vol. 36. S. 609–617.

Aizenberg, V. Grinshpun, S.A. Willeke, K. Smith, J. Baron, P.A. 2000. Performance Characteristics of the Button Personal Inhalable Aerosol Sampler. *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association*. Vol. 61. Issue. 3. S. 398-404. DOI:10.1080/15298660008984550.

Allen. Durrenberger. 2003. Gaussian plume modeling. *Chemical engineering 357*. http://www.utexas.edu/research/ceer/che357/PDF/Lectures/gaussian_plume_modeling.pdf. University of Texas at Austin.

Aqua-Aerobic Systems. 2015. Kuva. Aqua-Jet® - Aqua-Aerobic Systems. Viitattu 8.7.2015. www.aqua-aerobic.com.

Arrigoni. 2015. Tuotekuvasto. Wind protection. Viitattu 13.10.2015. http://www.arrigoniagriculture.net/eng/climatic_control/protection_net_from_wind.htm.

Ashbrook Simon-Hartley. 2015. Kuva. Diffused aeration. Viitattu 8.7.2015. <http://www.as-h.com/us/en-us/diffusedaeration.aspx>.

AWD Windbreak panels company. 2015. Kuva. Windbreak panel wall for coal mine 4. Viitattu 8.7.2015. <http://www.windbreakpanels.com/application/index.html>

Barge, P. Malviya, R.K. Parmar, N. 2014. A Review on Oxygen Transfer Rate, Efficiency, Capacity and their Kinetic on Aeration System in Activated Sludge Process of Sewage Treatment Plant. *International Journal of Scientific and Research Publications*. Vol. 4, Issue 12.

Bauer, H. Fuerhacker, M. Zibuschka, F. Schmid, H. Puxbaum, H. 2002. Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants. *Water Research*. Vol. 36. S. 3965–3970.

BD. 2015. Esite. Seven H11 Agars. Viitattu 22.7.2015. https://www.bd.com/europe/regulatory/Assets/IFU/Difco_BBL/283810.pdf.

Bhupathiraju, V.K. Varnau, B. Nelson, J.R. Jiang, J.P. Bolotin, C. 2007 Evaluation of an Instantaneous Microbial Detection System in Controlled and Cleanroom Environments. *Biopharm International – The science and business of biopharmaceuticals*. Environmental Monitoring.

BioMérieux. 2015. Esite. Detection and Enumeration of Legionella. Viitattu 22.7.2015. <http://www.biomerieux-culturemedia.com/pdf/20140410113843.pdf>.

BioVigilant. 2013. Esite. IMD-A® Series Rapid Biologic Detection System for Air – Product specifications. Viitattu 23.7.2015. <http://biovigilant.com/wp-content/uploads/2014/07/PDS-IMD-A-LI0051001121.pdf>.

BioVigilant. 2015. Kuva. IMD-A 300-Series Instantaneous Microbial Detection Systems. Viitattu 28.7.2015. <http://biovigilant.com/products/>.

Blais-Lecours, P. Perrott, P. Duchaine, C. 2015. Non-culturable bioaerosols in indoor settings: Impact on health and molecular approaches for detection. *Atmospheric Environment*. Vol. 110. S. 45-53.

Blatny, J.M. Anders, B. Reif, P. Skogan, G. Andreassen, O. Høiby, E.A. Ask, E. Waagen, V. Aanonsen, D. Aaberge, I.S. Caugant, D.A. 2008. Tracking Airborne Legionella and Legionella pneumophila at a Biological Treatment Plant. *Environmental Science & Technology*. Vol. 42. S. 7360-7367.

Blatny, J.M. Ho, J. Skogan, G. Fykse, E.M. Aarskaug, T. Waagen, V. 2011. Airborne Legionella bacteria from pulp waste treatment plant: aerosol particles characterized as aggregates and their potential hazard. *Aerobiologia*. Vol. 27. S. 147–162.

Bouvet, T. Loubet, B. Wilson, J.D. Tuzet, A. 2007. Filtering of windborne particles by a natural windbreak. *Boundary-Layer Meteorol*. Vol. 123. S. 481–509.

Brandi, G. Sisti, M. Amagliani, G. 2000. Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems. *Journal of Applied Microbiology*. Vol. 88. S. 845-852.

Brandle, J.R. Hodges, L. Tyndall, J. Sudmeyer, R.A. 2009. Windbreak practices. *North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice*. 2nd edition. American Society of Agronomy. S. 75-104.

Burley, H.K. Adrizal, A. Patterson, P.H. Hulet, R.M. Lu, H. Bates, R.M. Martin, G.P. Myers, C.A.B. Atkins, H.M. 2011. The potential of vegetative buffers to reduce dust and respiratory virus transmission from commercial poultry farms. *The Journal of Applied Poultry Research*. Vol. 20. S. 210-222. Poultry Science Association, Inc.

Carducci, A. Tozzi, E. Rubulotta, E. Casini, B. Cantiani, L. Rovini, E. Muscillo, M. Pacini, R. 2000. Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment. *Water Research*. Vol. 34. No. 4. S. 1173-1178.

Chamecki, M. 2012. An analytical model for dispersion of biological particles emitted from area sources: Inclusion of dispersion in crosswind direction. *Agricultural and forest meteorology*. Vol. 157. S. 30-38.

Chang, C-V. Hung, P-Y. 2012. Evaluation of sampling techniques for detection and quantification of airborne legionellae at biological aeration basins and shower rooms. *Journal of aerosol science*. Vol. 48. S. 63-74.

Ciffa Systemes. 2015. Nettisivu. Viitattu 10.7.2015. <http://www.ciffasystemes.com/en/>.

Cornelis, W.M. Gabriels, D. 2005. Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments*. Vol. 61 S. 315–332.

Cosio industries. 2015. Kuva. WINDBREAK ULTRA-PRO XS Medium Knitted Windbreak. Viitattu 9.7.2015. <http://www.cosio.co.nz/hort-products/wind-fab>.

Courvoisier, F. Bonacina, L. Boutou, V Guyon, L. Bonnet, C. Thuillier, B. Extermann, J. Roth, M. Rabitz, H. Wolf, J-P. 2008. Identification of biological microparticles using ultrafast depletion spectroscopy. *Faraday Discussions*. Vol. 137. S. 37-49.

CST industries. 2015. Nettisivu. Viitattu 10.7.2015. <http://www.cstindustries.com/>.

Das, S. 2013. Nettiartikkeli. Modeling atmospheric dispersion of pollutants. Viitattu 30.7.2015. Päivitetty 30.3.2013. <http://www.eoearth.org/view/article/154653>. The Encyclopedia of Earth.

De Man, H. Heederik, D.D.J. Leenen, E.J.T.M. De Roda Husman, A.M. Spithoven, J.J.G. Van Knapen, F. 2014. Human exposure to endotoxins and fecal indicators originating from water features. *Water Research*. Vol 51. S. 198-205.

Dowd, S.E. Gerpa, C.P. Pepper, I.L. Pillai, S.D. 2000. Bioaerosol transport modeling and risk assessment in relation to biosolid placement. *Journal of environmental quality*. Vol. 29. S. 343-348.

Duquenne, P. Marchand, G. Duchaine, C. 2012. Measurement of Endotoxins in Bioaerosols at Workplace: A Critical Review of Literature and a Standardization Issue. *The Annals of Occupational Hygiene*. doi:10.1093/annhyg/mes051. 36 s.

Envirodyne Systems Inc. 2015. Kuva. Brush Rotor Oxidation Ditch. Viitattu 25.8.2015. http://www.envirodynesystems.com/?page_id=784.

Environetics, Inc. 2015. Nettisivu. Defender floating cover. Viitattu 10.7.2015. <http://www.environeticsinc.com/Floating%20Cover.htm>.

Fernando, N.L. Fedorak, P.M. 2005. Changes at an activated sludge sewage treatment plant alter the numbers of airborne aerobic microorganisms. *Water Research*. Vol. 39. S. 4597-4608.

Fluke Corporation. 2015. Kuva. Fluke 985 –hiukkaslaskuri. Viitattu 28.7.2015. <http://www.fluke.com/fluke/fifi/lvi-/sisailmanlaatutyokalut/ilmanlaatutesterit/fluke-985.htm?PID=74257>.

FP McCann Ltd. 2015. Nettiartikkeli. Viitattu 10.7.2015. <http://fpmccann.co.uk/news/kingsmead-road-sewerage-upgrade-works>.

Giusti, L. 2009. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste management*. Vol 29. S. 2227-2239.

Goyer, N. Lavoie, J. Lazure, R. Marchand, G. 2001. Bioaerosols in the workplace: Evaluation, control and prevention guide. IRSST, Occupational Health and Safety Research Institute Robert Sauvé. Québec. 56 s.

GTI covers, Geomembrane Technologies Inc. 2015. Nettisivu. Viitattu 10.7.2015. <http://www.gticovers.com/>.

Guo, X. Wu, P. Ding, W. Zhang, W. Li, L. 2014. Reduction and characterization of bio-aerosols in a wastewater treatment station via ventilation. *Journal of environmental sciences*. Vol. 26. S. 1575-1583.

Hardy Diagnostics. 2015. Nettiartikkeli. Middlebrook 7H11 agar, Instructions for use. Viitattu 22.7.2015. https://catalog.hardydiagnostics.com/cp_prod/Content/hugo/Middlebrook7H11Agar.htm.

Heinonen-Tanski, H. Reponen, T. Koivunen, J. 2009. Airborne enteric coliphages and bacteria in sewage treatment plants. *Water research*. Vol 43. S. 2558-2566.

Holden, J.A. Babcock, L.R. 1985. The use of plume dispersion modelling for viable aerosols from an activated sludge sewage treatment plant. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*. Vol. 9, Issue 3. S. 215–235.

Homes, M.J. Heber, A.J. Wu, C.C. Clark L.K. Grant R.H. Zimmerman, N.J. Hill, M.A. Strobel, B.R. Peugh, M.W. Jones, D.D. 1999. Viability of bioaerosols produced from a swine facility. Nettiartikkeli. Viitattu 6.7.2015. <https://www.extension.purdue.edu/pork/house/conf.htm>

Hong, S-W. Lee, I-B, Seo, I-H. 2015. Modelling and predicting wind velocity patterns for windbreak fence design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 142. S. 53-64.

Hung, H.F. Kuo, Y.M. Chien, C.C. Chen, C.C. 2009. Use of floating balls for reducing bacterial aerosol emissions from aeration in wastewater treatment processes. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 175. S. 866-871.

HSY. 2015. Mallityypit. Nettiartikkeli. Viitattu 21.7.2015. Päivitetty 14.1.2015. https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/ilmansuojelu/tietoakaupunkisuunnittelijoille/Levia_mismallit-kaupunkisuunnittelussa/Sivut/Mallityypit.aspx.

Karra, S. Katsivela, E. 2007. Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site. *Water Research*, Vol. 41. S. 1355-1365.

Kenny, L.C. Bowry, A. Crook, B. Stancliffe, J.D. 1999. Field Testing of a Personal Size-selective Bioaerosol Sampler. *The Annals of Occupational Hygiene*. Vol. 43. No. 6. S. 393-404.

Kettunen, A. 2014. MTR0002 III Legionellat vesi-, ilma- ja laskeumanäytteissä: Vaikutukset tehtaiden varoalueisiin. *Teollisuuden Vesi*. Ei julkinen.

Kummer, V. Thiel, W. R. 2008. Bioaerosols – Sources and control measures. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. Vol. 211. S. 299-307.

Kusnetsov, J. Torvinen, E. Lehtola, M. Miettinen, I. 2006. Metsäteollisuuden jätevesipuhdistuksen ja tuotannon prosessivesijärjestelmien ympäristöperäisten potentiaalisten patogeeneimikrobien esiintyminen ja prosessitekniset torjuntamahdollisuudet 1. ja 2.

esitutkimus (ESIMEPATO 1-2). Kansanterveyslaitos, ympäristömikrobiologian laboratorio. Kuopio. Ei julkinen.

Kusnetsov, J. Martimo, K. Aho, J. Jäppinen, P. Lehtiniemi, A. Lehtola, M. Mutru, J. Putus, T. Taipale, J. Toivola, M. Torvinen, E. Nguyen, T. M. N. 2007. Metsäteollisuuden työntekijöiden altistuminen legionelloille ja muille hengitysteitse infektioita aiheuttaville ympäristöbakteereille (FEEL-tutkimus). Työsuojelurahaston hanke nro 105304.

Kusnetsov, J. Torvinen, E. 2008. Metsäteollisuuden jätevesipuhdistuksen ja tuotannon prosessivesijärjestelmien ympäristöperäisten potentiaalisten patogeenimikrobien esiintyminen ja prosessitekniset torjuntamahdollisuudet (MEPATO 2). Kansanterveyslaitos, ympäristömikrobiologian laboratorio. Kuopio. Ei julkinen.

Lai, A.C.K. Wong, L.T. Mui, K.W. Chan, W.Y. Yu, H.C. 2012. An experimental study of bioaerosol (1-10 μm) deposition in a ventilated chamber. *Building and Environment*. Vol. 56. S. 118-126.

Laitinen, S. Martikainen, P. Liesivuori, J. Kotimaa, M. Nevalainen, A. Kangas, J. Sarantila, R. Husman, K. 1991. Työilman endotoksiinit ja työntekijöiden oireilu aktiivilietelaitoksilla. Työsuojelurahaston loppuraportti. Kuopio: Kuopion Alue työterveyslaitos.

Lakes Environmental. 2015. Kuva. A schematic depicting the tracking differences of a puff and a plume model. Viitattu 5.8.2015. http://www.weblakes.com/products/calpuff/resources/lakes_calpuff_view_brochure.pdf.

Lemna Technologies, Inc. 2015a. Esite. LemTec™ Hexa-Cover® Floating Disc System Brochure. Viitattu 8.7.2015. <http://www.lemnatechnologies.com/pdf/LemTecHexa-CoverFloatingDiscSystemBrochure.pdf>.

Lemna Technologies, Inc. 2015b. Esite. Cover Product Brochure. Viitattu 8.7.2015. <http://www.lemnatechnologies.com/pdf/CoverBrochure.pdf>.

Li, L. Gao, M. Liu, J. 2011. Distribution characterization of microbial aerosols emitted from a wastewater treatment plant using the Orbal oxidation ditch process. *Process Biochemistry*. Vol. 46. S. 910-915.

Li, Y. Yang, L. Meng, Q. Qiu, X. Feng, Y. 2013. Emission Characteristics of Microbial Aerosols in a Municipal Sewage Treatment Plant in Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 13. S. 343-349.

Liukkonen, T. Rautiala, S. Reiman, M. Kallio, N. Mäkinen, M. 2010. Työympäristön mikrobiologisten riskien hallinta massan ja paperin valmistuksessa. Metsäteollisuus Ry.

Loo, B.W. Cork, C.P. 1988. Development of High Efficiency Virtual Impactors. *Aerosol Science and Technology* Vol. 9 S. 167-176.

Madsen, A.M. Nielsen S.H. 2010. Airborne endotoxin associated with particles of different sizes and affected by water content in handled straw. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. Vol. 213. S. 278-284.

Malakootian, M. Radhakrishna, N. Pourshaaban, M. Hossaini, H. 2013. Desalination and water treatment. Vol. 51. S. 4478-4488.

Malone, B. 2004. Using Trees to Reduce Dust and Odour Emissions From Poultry Farms. University of Delaware. College of agriculture & natural resources. Cooperative extension. Georgetown.

Mao, Y. Wilson, J.D. Kort, J. 2013. Effects of a shelterbelt on road dust dispersion. Atmospheric Environment. Vol. 79. S. 590-598.

Mars Bioanalytical Pvt. Ltd. 2015. Kuva. Six Stage Viable (Microbiological) Impactor. Viitattu 28.7.2015. <http://www.marsbioanalytical.com/cimpactors.html>.

Mathieu, L. Robine, E. Deloge-Abarkan, M. Ritoux, S. Pauly, D. Hartemann, P. Zmirou-Navier, D. 2006. Legionella bacteria in aerosols: sampling and analytical approaches used during the Legionnaires' disease outbreak in Pas-de-Calais. Journal of Infectious Disease. Vol. 193. S. 1333-1335.

Mercer, G.N. 2009. Modelling to determine the optimal porosity of shelterbelts for the capture of agricultural spray drift. Environmental Modelling & Software. Vol. 24 S. 1349-1352.

Mulloy, K.B. 2001. Sewage workers: toxic hazards and health effects. Occupational Medicine 16 (1). S 23-38.

Nimmatoori, P. Kumar, A. 2013. Development and evaluation of a ground-level area source analytical dispersion model to predict particulate matter concentration for different particle sizes. Journal of Aerosol Science. Vol. 66. S. 139-149.

Novick, V.J. Alvarez, J.L. 1987. Design of a Multistage Virtual Impactor. Aerosol Science and Technology. Vol. 6. S. 63-70.

O'Connor, D.J. Daly, S.M. Sodeau, J.R. 2015. On-line monitoring of airborne bioaerosols released from a composting/green waste site. Waste Management. Vol 42. S. 23-30.

Park, D. Kim, Y-H. Park, C.W. Hwang, J. Kim, Y-J. 2009. New bio-aerosol collector using a micromachined virtual impactor. Aerosol Science. Vol. 40. S. 415-422.

Pascual, L. Pérez-Luz, Sara. Amo, A. Moreno, C. Apraiz, D. Catalán, V. 2001. Detection of Legionella pneumophila in bioaerosols by polymerase chain reaction. Canadian Journal of Microbiology. Vol. 47. S. 341-347.

Peccia, J. Hernandez, M. 2006. Incorporating polymerase chain reaction-based identification, population characterization, and quantification of microorganisms into aerosol science: A review. Atmospheric Environment. Vol. 40. S. 3941-3961.

Pi²Technologies. 2015. Nettisivu. Päivitystietoa ei saatavilla. Viitattu 2.7.2015. <http://www.pi2technologies.com/>

- Raupach, M.R. Woods, N. Dorr, G. Leys, J.F. Cleugh, H.A. 2001. The entrainment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment*. Vol. 35. S. 3373-3383.
- Rengasamy, A. Zhuang, Z. BerryAnn, R. 2004. Respiratory protection against bioaerosols: Literature review and research needs. *American Journal of Infection Control*. Vol. 32. S. 345-354.
- Sánchez-Monedero, M.A. Aguilar, M.I. Fenoll, R. Roig, A. 2008. Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants. *Water research*. Vol. 42. S. 3739-3744.
- Sandberg, Maria. 2012. Efficient Treatment of Forest Industry Effluents. Väitöskirja. Karlstad University. Faculty of Technology and Science. 71 s.
- Santiago, J.L. Martín, F. Cuerva, A. Bezdenejnyk, N. Sanz-Andrés, A. 2007. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks. *Atmospheric Environment*. Vol. 41. S. 6406–6420.
- Sawyer, B. Rao, K.C. O'Brien, P. Elenbogen, G. Zenz, D. Lue-Hing, C. 1996. Changes in bacterial aerosols with height above aeration tanks. *Journal of environmental engineering*. Vol. 122. S. 368-373.
- Shanghai Yanph Environment S&T Co. Ltd. 2015. Kuva. Pipe aerator. Viitattu 25.8.2015. http://sa.made-in-china.com/co_yanphvip/product_Pipe-Aerator_hnrsynygg.html.
- Sigma-Aldrich. 2015. Esite. Buffered charcoal yeast extract agar, Legionella BCYE Agar. Viitattu 22.7.2015. <http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/docs/Fluka/Datasheet/1/78123dat.pdf>.
- Sizova, M.V. Doerfert, S.N. Gavrish, E. Epstein, S.S. 2015. TM7 detection in human microbiome: Are PCR primers and FISH probes specific enough? *Journal of Microbiological Methods*. Vol. 114. S. 51–53.
- SKC Inc. 2015. Kuva. Button Aerosol Sampler. Viitattu 28.7.2015. http://www.skcinc.com/catalog/index.php?cPath=400000000_401000000_401000200.
- Smith, R.J. 1995. A Gaussian Model for Estimating Odour Emissions from Area Sources. *Mathematical and Computer Modelling*. Vol. 21. No. 9. S. 23-29.
- Steffens, J.T. Wang, Y.J. Zhang, K.M. 2012. Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmospheric Environment*. Vol. 50. S. 120-128.
- Stellacci, P. Liberti, L. Notarnicola, M. Haas, C. N. 2010. Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants: A case study. II. Estimating airborne biological hazard. *Desalination*. Vol. 253. S. 106–111.
- Stockie, J.M. 2011. The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. Vol. 53. No. 2. S. 349–372. <http://people.math.sfu.ca/~stockie/atmos/>.

Sulzer. 2015. Kuva. Uppoasenteinen ilmastin ABS OKI. Viitattu 25.8.2015. <https://www.sulzer.com/fi/Products-and-Services/Pumps-and-Systems/Compressors-and-Aeration/Submersible-Aerator-Type-ABS-OKI>.

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). 2013. Mykobakteeri. Nettiartikkeli. Päivitetty 18.2.2013. Viitattu 22.6.2015. <https://www.thl.fi/fi/web/infektiotaudit/taudit-ja-mikrobit/bakteeritaudit/mykobakteeri>.

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL). 2013b. Legionella. Nettiartikkeli. Päivitetty 18.2.2013. Viitattu 30.6.2015. <https://www.thl.fi/fi/web/infektiotaudit/taudit-ja-mikrobit/bakteeritaudit/legionella>.

Thorn, J. Kerekes, E. 2001. Health effects among employees in sewage treatment plants: A literature survey. *American Journal of Industrial Medicine* 40 (2). S. 170-179.

Tiwary, A. Morwan, H.P. Colls, J.J. 2005. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *Aerosol Science*. Vol. 37. S. 990-1015.

TSI Incorporated. 2002. Esite. Model 3314 Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer® Spectrometer.

TSI Incorporated. 2012. Esite. Fluorescence Aerosol Particle Sensor™ (FLAPST™) III System Model 3317. http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3317spec.pdf.

TSI Incorporated. 2013. Esite. How a virtual impactor works. Viitattu 22.7.2013. http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/ITI-051.pdf.

Tuhkanen, T. Hiltunen, P. 2008. Metsäteollisuuden jäähdytystornien legionella-bakteerin riskinhallinta. Tampereen teknillinen yliopisto. Bio- ja ympäristötekniikan laitos. 41 s.

Tuhkanen, T. Korhonen, S. Möbes, A. 2007. Occurrence of bioaerosols (*Legionella* spp.) in the pulp and paper industry and their control method. Tampere University of Technology. Institute of Environmental Engineering and Biotechnology. 61 s.

Tuominen, M. 2006. Bioaerosolien tunnistus mikrobispesifisillä koettimilla. Pro gradu -tutkielma. Tampereen yliopisto. Lääketieteellisen teknologian instituutti. 86 s.

Tyndall, J. Colletti, J. 2007. Mitigating swine odor with strategically designed shelter-belt systems: a review. *Agroforestry Systems*. Vol. 69. S. 45–65.

Van Leuken, J.P.G. Swart, A.N. Havelaar, A.H. Van Pul, A. Van der Hoek, W. 2015. Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock – A review to inform risk assessment studies. *Microbial Risk Analysis*. In Press. doi:10.1016/j.mran.2015.07.002.

Vanella, G. Salyani, M. Balsari, P. 2013. Spray interactions with a windbreak netting used in orchard applications. *Crop Protection*. Vol. 44. S. 95-103.

VaraCorp. 2015. Kuva. Wastewater Aeration. Viitattu 25.8.2015. <http://www.varacorp.com/index-8.html>.

Vigiak, O. Sterk, G. Warren, A. Hagen, L.J. 2003. Spatial modeling of wind speed around windbreaks. *Catena*. Vol 52. S. 273-288.

Wa-Teq. 2015. Kuva. Aeration and Mixing Equipment. Viitattu 25.8.2015. <http://wa-teq.com/#!/product23>.

Wastewater study. 2015. Kuva. Surface Aerator. Viitattu 25.8.2015. <https://wastewaterstudy.wordpress.com/plant-equipment/secondary-treatment/>

Whiley, H. Taylor, M. Bentham, R. 2011. Detection of Legionella species in potting mixes using fluorescent in situ hybridisation (FISH). *Journal of Microbiological Methods*. Vol. 86. S. 304–309.

World Health Organization (WHO). 2013. Health effects of particulate matter - Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. WHO Regional Office for Europe. Kööpenhamina. 15 s.

Yeh, C-P. Tsai, C-H. Yang, R.J. 2010. An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. S. 520-532.

Liiteluettelo

Liite 1. Mittausohjelma. 1 sivu.

Liite 2. Mittausjaksojen keskiarvojen koonti. 5 sivua.

Mittausohjelma

Tämä mittausohjelma soveltuu aluelähteeltä kuten jätevedenpuhdistamon ilmastusaltaalta muodostuvien (bio)aerosolien leviämisen arviointiin.

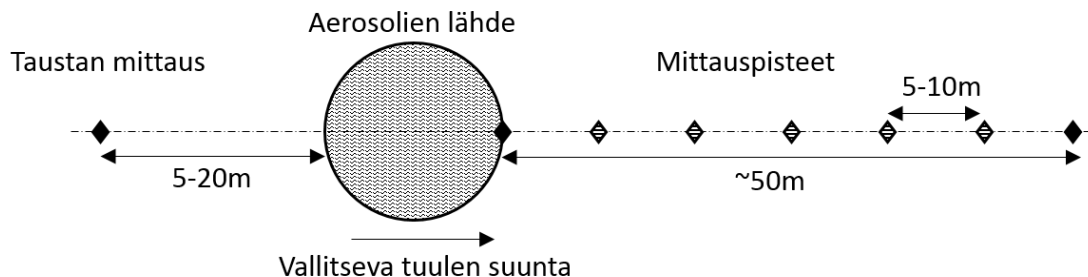
Mittausvälineet

Mittausohjelman suorittamiseen tarvitaan

- kannettava hiukkasmittari (esim. Fluke 985)
 - o Hiukkaspitoisuus [hiukkasta/m³]
 - o Bioaerosoleille kokojakaumat 0,5-10µm välillä
 - o Mittausjaksolta mielellään kuvaaja hetkellisten muutosten arviointiin
- Sääasema
 - o Tuulen nopeus ja suunta
 - o Reaaliaikainen näyttö olosuhteiden seuraamiseen sekä mittaustiedon tallennus lyhyellä aikavälillä (mielellään alle 1 min)
- Henkilönostin tai teline tarvittaessa
 - o Mittaukset tehdään aerosolien lähteen korkeustasolta

Mittauspisteiden ja -linjan valinta

- Mittauspisteet valitaan vallitsevassa tuulen linjassa lähteeltä, tuulen suuntaa tarkkaillaan sääasemalla
- Mittauspisteet valitaan lähteestä alatuuleen aivan lähteen vierestä sekä 5-10 metrin välein. Etäisin mittauspiste voisi olla noin 50m etäisyydellä riippuen miten pitkälle lähteen vaikutus näkyy kohonneina hiukkaspitoisuuksina.
- Taustan mittaus otetaan lähteestä ylätuuleen 5-20 metrin etäisyydeltä



Mittausten suoritus

- Sopiva mittausjakso on 1 min, mittauksia 2-4/piste, epäonnistuneet mittaukset hylätään (tuuli, virhelähteet), onnistuneiden mittausten keskiarvoa käytetään
- Tuulen suunnan tulisi pysyä samana mittauslinjan kaikkien mittausten ajan. Jos tuulen suunta muuttuu, täytyy odottaa kääntykö tuuli haetun mittauslinjan suuntaiseksi tai uusi mittauslinja haetaan vallitsevan tuulen suunnan mukaisesti.

Soveltuvat sääolosuhteet

- Mittauksia ei tule suorittaa sateella
- Mittaukset suoritetaan hiukkasmittarin ohjeiden mukaisessa lämpötilassa ja il-mankosteudessa
- Tuuliolosuhteiden tulisi olla lieviä ja tuulen suunnan pysyä samansuuntaisena mahdollisimman pitkään
- Tuulen nopeuden tulisi olla keskimäärin alle 5 m/s, koska tulosten tulkinta voi vaikeutua kovemmalla tuulella. Myös lähes tuulettomat olosuhteet soveltuvat huonosti

Mittausjaksojen keskiarvojen koonti

Harmaalla merkatut keskiarvot jätettiin pois mittauspisteen keskiarvopitoisuuden laskennasta, joko selkeästi poikkeavan tuloksen tai tuulen hetkittäisen muutoksen takia.

Kyrön hiukkasmittaukset 8.10.2015

Pisteissä 1-4 mittaukset a ovat otettu altaan reunan päältä ja mittaukset b kävelysillalla noin 0,5m päässä altaan reunasta

Suihkut päällä, pohjoistuulen linja

Mittauspiste	Mittaus	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1	a	10988333	1301000	545000	433333	39667	23000
	b	11077333	1102667	448333	370333	37000	34000
	ka.	11032833	1201833	496667	401833	38333	28500
2	a	15927667	1900000	1121333	3530333	2413333	960667
	b	12921667	1355000	719667	2393333	1444667	428333
	ka.	14424667	1627500	920500	2961833	1929000	694500
3	a	15032667	2225000	2200000	14471667	13037333	5282333
	b	9346667	736667	189667	124333	10333	3333
	ka.	12189667	1480833	1194833	7298000	6523833	2642833
4	a	9025000	855667	546333	2259667	1170000	211667
	b	9186667	664333	188000	117667	4333	1000
	ka.	9105833	760000	367167	1188667	587167	106333
5	a	9004000	823000	246000	154333	7667	2333
	b	9945333	938667	316667	219333	16667	6333
	ka.	9474667	880833	281333	186833	12167	4333
6	a	8859667	722333	183667	109333	7000	667
	b	8880333	681333	182000	134667	5000	2000
	ka.	8870000	701833	182833	122000	6000	1333
7	a	9071667	654333	182000	110667	4667	1000
	b	8665333	673667	183667	123333	5667	1000
	ka.	8868500	664000	182833	117000	5167	1000
8	a	8723111	672000	219556	216889	59556	44889
	b	7800667	608000	180667	123667	11333	1667
	ka.	7800667	608000	180667	123667	11333	1667
9	a	6874333	502667	167333	105333	5667	1000
	b	6990667	507000	169333	104667	6333	3667
	c	7518000	639667	174000	102333	3000	1333
	d	7423333	597000	186000	119000	4333	1333
	ka.	7201583	561583	174167	107833	4833	1833
	max	15927667	2225000	2200000	14471667	13037333	5282333

Suihkut poissa, mittaus pohjoistuulen linjassa, tuuli kääntyi etelätuuleksi kesken sarjan mittausten

Mittauspiste	Keskiarvo	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1	a	20939667	3526667	4736000	25914333	13663333	2633000
	b	15420000	1034000	281667	715333	385000	88667
	ka.	18179833	2280333	2508833	13314833	7024167	1360833
2	a	22089333	1314000	924333	6618333	4470333	1216000
	b	5878000	533667	190333	86333	4000	1333
	ka.	13983667	923833	557333	3352333	2237167	608667
3	a	15534000	1226000	954333	6294000	5145333	2028333
	b	6679000	600000	140000	100000	40000	40000
	ka.	11106500	913000	547167	3197000	2592667	1034167
4	a	9932667	976667	794667	3401000	1680667	292333
	b	6740000	663000	205667	106667	6333	5000
	ka.	8336333	819833	500167	1753833	843500	148667
5	a	6653000	497333	181333	103000	5000	667
	b	6317667	530333	169333	99333	3667	1333
	ka.	6485333	513833	175333	101167	4333	1000
6	a	6574667	599667	181333	99333	4000	333
	b	6327333	580000	187667	104000	2667	667
	ka.	6451000	589833	184500	101667	3333	500
7	a	7613000	662000	202667	104333	5333	1667
	b	7333000	625333	180000	100000	3000	0
	ka.	7473000	643667	191333	102167	4167	833
8	a	6081000	521333	168000	90000	4333	667
	b	5921000	549333	193000	94667	2000	0
	ka.	6001000	535333	180500	92333	3167	333
9	a	6562333	518333	176333	100667	3667	1333
	b	7817667	581333	171667	104000	5333	2333
	c	15361667	1086333	198667	111000	4667	2667
	ka.	7190000	549833	174000	102333	4500	1833
	max	22089333	3526667	4736000	25914333	13663333	2633000

Kyrön hiukkasmittaukset 10.11.2015**Tuulen linja lännestä**

Pisteissä 1-4 mittaukset a ja b ovat otettu altaan reunan päältä ja mittaukset c ja d kävelysillalla noin 0,5m päässä altaan reunasta.

Mittauspiste	Mittaus	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1	a	16320333	1163333	415333	1057000	742000	377000
	b	16624667	974000	233000	152667	13333	12667
	ka.	16472500	1068667	324167	604833	377667	194833
	c	18730000	1076000	227333	140667	9333	333
	d	18771000	1196667	240000	161000	10000	3000
	ka.	18750500	1136333	233667	150833	9667	1667
2	a	12958000	2227333	2543667	20672000	21304667	10972333
	b	17485000	2053000	1903333	14403333	17906333	12402667
	ka.	15221500	2140167	2223500	17537667	19605500	11687500
	c	18818000	1522333	787000	5179333	7240667	5052333
	d	18189667	1883000	1274667	9971000	11610667	6932000
	ka.	18503833	1702667	1030833	7575167	9425667	5992167
3	a	16173333	3982667	3535333	27863000	31760667	19015333
	b	9922667	3411667	4855333	38328000	51943000	43889667
	ka.	13048000	3697167	4195333	33095500	41851833	31452500
	c	19222333	1987333	1227000	9132333	10061000	6173000
	d	16518667	2156000	2044667	15973667	18160333	11035667
	ka.	17870500	2071667	1635833	12553000	14110667	8604333
4	a	26947000	3873333	3952667	19853000	9702000	2957000
	b	21419333	1876000	1210333	6934667	4931000	1604000
	ka.	24183167	2874667	2581500	13393833	7316500	2280500
	c	21489667	1560000	280667	171667	9667	5000
	d	20694000	1505667	272667	153000	7333	1667
	ka.	21091833	1532833	276667	162333	8500	3333
5	a	14928333	925000	281667	253000	36000	20000
	b	14191333	1248000	527000	2187667	1488000	532667
	c	12945333	994333	309333	674667	383667	140333
	d	11746667	902333	311333	762000	500000	134333
	ka.	12961111	1048222	382556	1208111	790556	269111
	6	a	14736333	1044000	329333	274667	26000
b	13472000	988667	332000	256333	11333	2333	
c	14713667	1078000	299667	250000	14667	3333	
ka.	14307333	1036889	320333	260333	17333	4000	
7	a	11929333	1401333	932333	5564667	4380000	1503333
	b	13113000	1004667	271333	237667	14333	3333
	c	10949000	777667	262000	176000	7667	667
	ka.	12031000	891167	266667	206833	11000	2000
8	a	12092333	902000	248667	216667	10667	1333
	b	11589667	860667	235000	211000	11000	667
	c	11597333	862667	240667	190667	12333	667
	ka.	11759778	875111	241444	206111	11333	889
9	a	12129000	979333	225000	129667	6333	1333

b	13644667	1167333	263000	164000	11000	4000
c	12062000	858000	210667	136000	5667	0
d	13240667	958333	243000	147667	7000	333
ka.	12477222	931889	226222	137778	6333	556
max	26947000	3982667	4855333	38328000	51943000	43889667

Tuulen linja pohjoisesta

Pisteissä 1-4 mittaukset a ovat otettu altaan reunan päältä ja mittaukset b kävelysillalla noin 0,5m päässä altaan reunasta.

Pisteiden 1-4 mittauksissa tuuli lähes nollassa.

Mittauspiste	Keskiarvo	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1	a	13862667	1125333	312000	253000	37000	16667
	b	12512333	961333	258667	200000	21000	6333
2	a	10652667	963333	354667	1044667	846333	337667
	b	13623000	1114333	278000	255667	24667	12000
3	a	10920000	1085667	393000	786333	267000	82667
	b	15615667	1456333	290667	282667	26000	4667
4	a	6360000	5380000	8080000	57060000	44180000	12360000
	b	13499667	1127667	325667	262667	41333	22000
5	a	10344667	824000	275333	210667	11000	8667
	b	12928000	967667	320333	323667	65333	17333
	ka.	12928000	967667	320333	323667	65333	17333
6	a	10511525	822034	272881	198305	10847	2712
	b	10962000	936667	353000	284000	22000	6333
	ka.	10962000	936667	353000	284000	22000	6333
7	a	10814667	838000	300667	207000	14000	5000
	b	12663000	853667	264333	171000	12000	667
	ka.	11738833	845833	282500	189000	13000	2833
8	a	11443667	859667	255000	200000	9333	2667
	b	13631429	1146786	300357	325357	17143	2500
	ka.	11443667	859667	255000	200000	9333	2667
9	a	10136333	756667	251000	161667	9000	333
	b	10784667	812333	235000	167000	7667	0
	ka.	10460500	784500	243000	164333	8333	167
	max	15615667	5380000	8080000	57060000	44180000	12360000

Volskodin hiukkasmittaukset 18.11.2015**Luukku auki, ei kateverkkoa**

Mittauspiste	Mittaus	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1 (0,2m)	a	9813333	3885333	4656333	31607667	32336000	10427667
	b	6958333	3824333	5421000	44205333	41947000	11839333
	ka.	8385833	3854833	5038667	37906500	37141500	11133500
1 (1,1m)	a	9702000	1545333	585667	673000	77667	9000
	b	9352333	1798333	1123000	5575667	4752667	1161667
	ka.	9527167	1671833	854333	3124333	2415167	585333
2	a	14982667	2074333	686333	1543333	356667	52000
	b	10860000	1600000	600000	440000	0	0
	ka.	12921333	1837167	643167	991667	178333	26000
3	a	11283000	1553000	613000	639667	28667	1000
	b	10903000	1607000	682333	734667	35000	667
	ka.	11093000	1580000	647667	687167	31833	833
4	a	13869667	2013000	630667	964667	61333	4000
	b	20186333	2946667	702667	1237333	98333	6333
	ka.	17028000	2479833	666667	1101000	79833	5167

Luukku auki, kateverkko aukon päällä

Mittauspiste	Mittaus	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1 (0,2m)	a	14502667	1980667	679000	1080000	187000	19333
	b	14164333	1950333	624333	1153667	237000	25333
	ka.	14333500	1965500	651667	1116833	212000	22333
1 (1,1m)	a	14272333	2018667	802333	3149667	2151667	434000
	b	10001667	1501667	661333	968000	343667	86333
	ka.	12137000	1760167	731833	2058833	1247667	260167
2	a	17586000	2305000	680000	1148000	180667	38000
	b	20171667	2840333	834667	2422667	908667	169333
	ka.	18878833	2572667	757333	1785333	544667	103667
3	a	11555333	1581000	633000	662000	33000	2667
	b	12178333	1608333	596667	620000	38333	3333
	ka.	11866833	1594667	614833	641000	35667	3000

Luukut kiinni

Mittauspiste	Keskiarvo	0,3-0,5µm	0,5-1µm	1-2µm	2-5µm	5-10µm	10- µm
1 (0,2m)	a	7240333	5580333	6950333	55686667	52001667	15877000
	b	6453000	6277333	8316000	63263000	60056000	19339333
	ka.	6846667	5928833	7633167	59474833	56028833	17608167
1 (1,1m)	a	9988000	1545667	598000	862333	111667	18333
	b	10580667	1610000	602000	699333	51333	7333
	ka.	10284333	1577833	600000	780833	81500	12833
2	a	15170667	2171000	639333	1142667	124000	20000
	b	15534000	2198000	676333	1104000	107000	13333
	ka.	15352333	2184500	657833	1123333	115500	16667
3	a	12469333	1973667	638667	829000	62667	6000
	b	11307333	1741667	627000	698000	46333	4000
	ka.	11307333	1741667	627000	698000	46333	4000
4	a	20954667	3335333	724667	1141333	90667	11000
	b	23657000	3701000	800333	1108667	76333	7667
	ka.	22305833	3518167	762500	1125000	83500	9333