



# Tekniset torjuntatoimenpiteet metsäbiomassojen käsittelyn terveysvaarojen vähentämiseksi

Matti Lehtimäki | Aimo Taipale | Tapio Kalliohaka |  
Matti Niemeläinen



# **Tekniset torjuntatoimenpiteet metsäbiomassojen käsittelyn terveysvaarojen vähentämiseksi**

---

Matti Lehtimäki, Aimo Taipale, Tapio Kalliohaka &  
Matti Niemeläinen



ISBN 978-951-38-8490-1 (nid.)  
ISBN 978-951-38-8489-5 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)

VTT Technology 280

ISSN-L 2242-1211  
ISSN 2242-1211 (Painettu)  
ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8489-5>

Copyright © VTT 2016

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy  
PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)  
02044 VTT  
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

Teknologiska forskningscentralen VTT Ab  
PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)  
FI-02044 VTT  
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd  
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)  
FI-02044 VTT, Finland  
Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

## Alkusanat

Tämä julkaisu on Työsuojelurahaston, Maatalousyrittäjien eläkelaitoksen, Valtra Oy:n ja VTT:n rahoittaman tutkimuksen ”Tekniset torjuntatoimenpiteet metsäbiomassojen käsittelyn terveysvaarojen vähentämiseksi” loppuraportti.

Tutkimuksen toteuttaja oli Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Hankkeen johtoryhmään kuuluivat Kenneth Johansson (Työsuojelurahasto), Erik Lindroos (Maatalousyrittäjien eläkelaitos), Petri Hannukainen (Valtra Oy) ja Johannes Hyrynen (VTT). Hankkeen projektipäällikkönä toimi Aimo Taipale.

Tutkimuksen toteutuksesta vastasivat VTT:llä pääosin Matti Lehtimäki, Matti Niemeläinen, Tapio Kalliohaka, Inga Mattila, Raija Ilmen ja Veli-Pekka Suikkanen. Tutkimuksen tekijät esittävät parhaimmat kiitokset johtoryhmän jäsenille sekä kaikille hankkeen toteutuksessa mukana olleille ja hankkeen etenemistä tukeneille henkilöille, mm. Seppo Anttila (Valtra), Jari Lehtola (M-Filter), Jarkko Röyttä (M-Filter), Jan Kaukopaasi (Ahlstrom), Anne Viskari (Ahlstrom), Sirpa Laitinen (Työterveyslaitos), Markku Linnainmaa (Työterveyslaitos), Raimo Kauppila (Pirkanmaan metsänhoitoyhdistys), Jarmo Ylijoki (Ylijoki kuljetus Oy), Jari Pinomäki (Tampereen kaupungin sähkölaitos) ja Pekka Ahtiainen (Tampereen kaupungin sähkölaitos).

# Sisältö

<b>Alkusanat</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Johdanto</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Tavoitteet</b> .....	<b>12</b>
<b>3. Ohjaamoilman hallinta</b> .....	<b>13</b>
3.1 Ohjaamon ominaisuudet .....	13
3.2 Ohjaamoilman suodatus .....	16
3.3 Suodattimet.....	16
<b>4. Tulokset</b> .....	<b>24</b>
4.1 Laboratoriokokeet .....	24
4.2 Mittaukset haketuspaikoilla .....	25
4.3 Mittaukset hakkeen purkupaikalla.....	33
<b>5. Johtopäätökset</b> .....	<b>43</b>
<b>6. Lähdeviitteet</b> .....	<b>45</b>

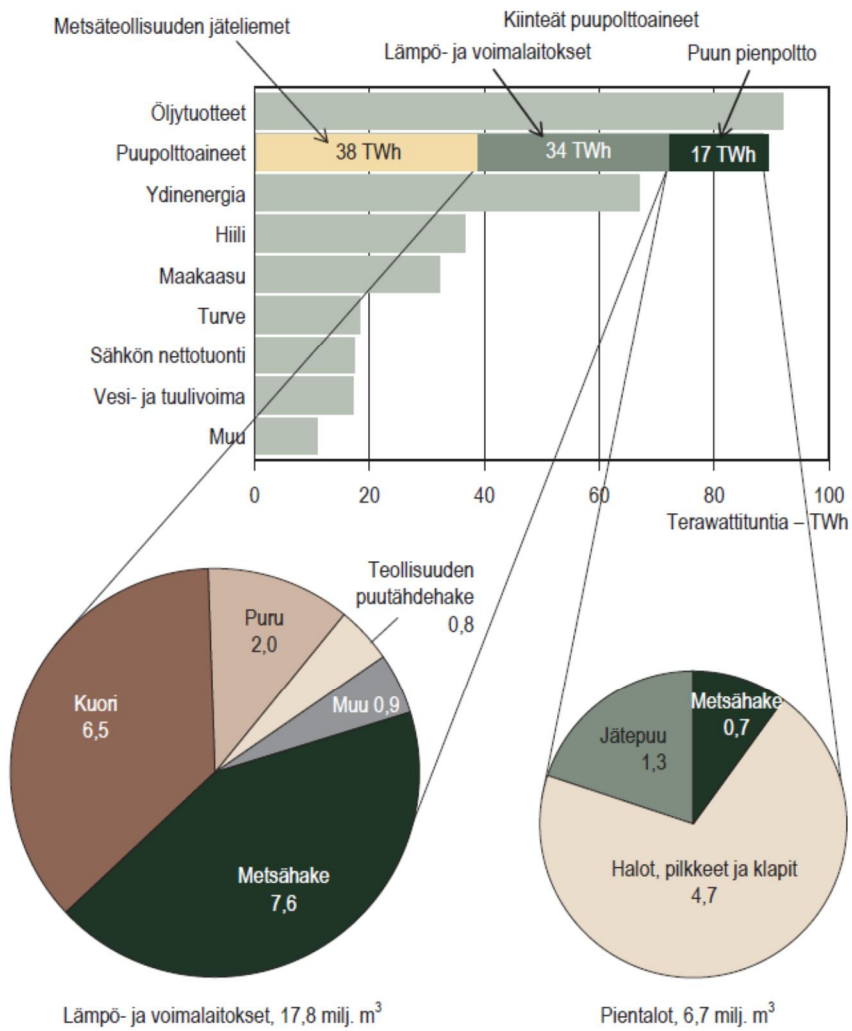
## Tiivistelmä

# 1. Johdanto

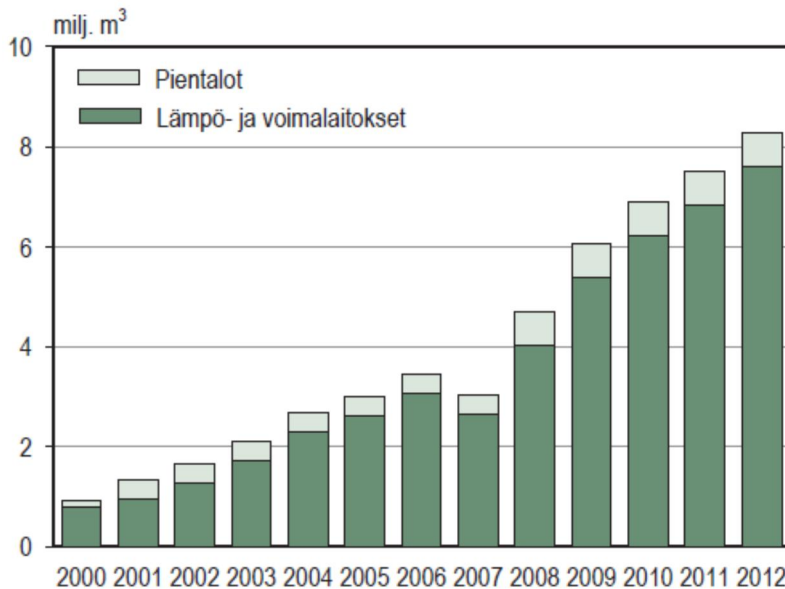
Kansainvälisten ja kansallisten energia- ja ilmasto-ohjelmien sekä velvoitteiden tavoitteena on lisätä merkittävästi uusiutuvien energialähteiden, kuten biopolttoaineiden, käyttöä. Biopolttoaineisiin luetaan tuotteet, joita saadaan soilta sekä metsissä ja pelloilla kasvavista biomassoista. Biopolttoaineisiin kuuluvat myös energian tuotantoon soveltuva yhdyskunta-, teollisuus ja maatalousjäte. Bioenergia muodostaa 80 prosenttia uusiutuvasta energiasta Suomessa, ja se kattaa noin neljänneksen koko maan energiankulutuksesta. Arvioiden mukaan bioenergian vuosikäyttö (turve mukaan lukien) on mahdollista nostaa nykyisestä 100 TWh:sta 150 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä.

Suurin osa Suomen bioenergiasta tuotetaan puuperäisillä polttoaineilla. Puuperäisiä polttoaineita ovat hakkeet, puupelletit, sahanpuru, sahanhakkeet, kutterinlastut, kuori, puuöljy, pyrolyysiöljy, mustalipeä sekä kotitalouden polttopuu pilke. Peltobiomassojen rooli tässä hankkeessa on vähäinen, koska kiinteiksi polttoaineiksi soveltuvien tuotteiden (esim. olki ja ruokohelppi) käyttö on lähes olematonta. Mainittakoon, että joitain vuosia sitten ruokohelpeä viljeltiin ja käytettiin koemielessä energiantuotannossa, mutta tulokset jäivät laihoiksi ja siksi ruokohelven käyttö on nykyisin lopetettu.

Puupolttoaineiden suhteellisia osuuksia havainnollistava kuva 1 osoittaa, että metsähakkeella on merkittävä rooli puupolttoaineen käytössä. Voidaan myös todeta, että metsähakkeen käyttö on voimakkaassa kasvussa kuten kuva 2 havainnollistaa.



Kuva 1. Puupolttoaineiden suhteelliset osuudet (Metsätilastotiedote 15/2013. Metsäntutkimuslaitos, metsätilastollinen tietopalvelu).



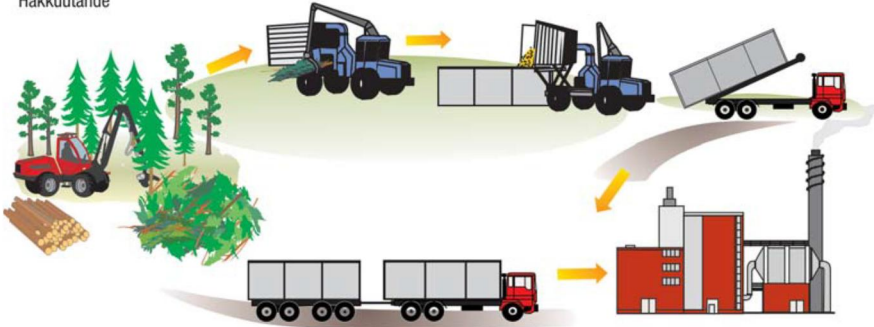
Kuva 2. Metsähakkeen käytön lisääntyminen vuoden 2000 jälkeen (Metsätilastotiedote 15/2013. Metsäntutkimuslaitos, metsätilastollinen tietopalvelu).

Energiasisällöltään parasta haketta (kokopuuhake) voidaan tuottaa hakettamalla esim. lahovikaisia pölkkyjä ja pienikokoista runkopuuta. Yleisin hakemuoto on kuitenkin risuhake, jota saadaan hakkuujätteistä eli kaadettujen puiden oksista ja latvuksista. Risuhakkeen laatua heikentävät neulaset ja lehdet pyritään varistelemaan ja jättämään metsään. Kolmas metsähakkeen muoto on kantohake, jota voidaan tuottaa hakkuualueelta nostetuista kannoista. Kantojen käyttö energian tuotantoon on jossain määrin kiistanalaista, koska ne toimivat luonnossa hiilivarastoina vuosikymmeniä, mutta poltettuna ne aiheuttavat nopeutettuja päästöjä. Kantojen korjuun vaikutuksia maaperään, vesistöihin sekä ravinteiden huuhtoutumiseen ei myöskään tunneta riittävän tarkoin.

Metsähakkeen tuotannossa on käytössä erilaisia järjestelmiä, joita havainnollistaa kuva 3. Palstahaketusjärjestelmässä haketus tehdään hakkuualueella, josta hake kuljetetaan tienvarteen polttolaitokselle tapahtuvaa kaukokuljetusta varten. Vastaavasti välivarastohaketusjärjestelmässä hakkuutähteet kuljetetaan tienvarteen, jossa haketus tehdään ennen kaukokuljetusta polttolaitokselle. Kolmantena vaihtoehtona on käyttöpaikkahaketusjärjestelmä, jossa hakkuutähteet haketetaan vasta polttolaitoksella. Kaukokuljetuksen tehostamiseksi hakkuutähteet paalataan usein risutukeiksi. (ks. <http://ammattilehti.fi/uutiset.html?a800=681>).



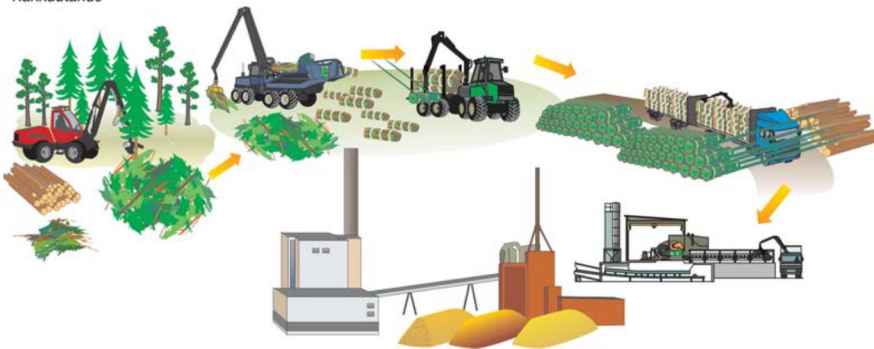
Palstahaketusjärjestelmä  
Hakkuutähde



Välivarastohaketusjärjestelmä  
Hakkuutähde, autohakkuri



Käyttöpaikkahaketusjärjestelmä  
Hakkuutähde



Kuva 3. Palstahaketus, välivarastohaketus ja käyttöpaikkahaketus.

Kasvat metsähakkeen käyttömäärät merkitsevät huomattavaa lisäresurssitarvetta tuotantoon (korjuu ja logistiikka). Samalla ne merkitsevät työntekijämäärien kasvua ja haasteita mm. kone- ja laitevalmistajille. Jo pelkästään metsähakkeen

tuotantokaluston arvioidaan nousevan yli 1100 yksikköön, ja tulevaisuudessa metsähakkeen tuotanto tulee koskettamaan hyvin suurta osaa kone- ja autoyrittäjistä.

Aiemmissa tutkimuksissa ("Uusien biopolttoaineiden käsittelyn turvallisuusriskit" ja "Ruokohelven, risutukkien ja kantojen käsittelyketjujen terveydelle haitalliset tekijät") voitiin havaita, biopolttoaineiden eri käsittelyvaiheissa esiintyi työntekijän terveydelle haitallisia tekijöitä. Näitä työvaiheita olivat etenkin kantojen kuormaminen kuorma-autoon ja purkaminen autosta voimalaitoksen vastaanottopisteeseen sekä risutukkikuormien tekeminen. Yhteistä näille työvaiheille on, että työ tehdään koneen ohjaamosta käsin ja haitallista altistusta aiheuttavat tekijät kulkeutuvat käsiteltävästä biomassasta työntekijän hengitysilmaan.

Työterveyslaitoksen tutkimuksessa (Laitinen ym. 2014) mikrobit osoittautuivat todelliseksi työturvallisuusriskiksi. Homesienet, bakteerit ja niiden endotoksiinit ovat riskitekijöitä, jotka saattavat aiheuttaa työntekijöille hengityselinsairauksia hakuuähteiden haketustyön seurauksena. Metsähakkeen tuotantoprosesseissa ilmaan vapautuu siis runsaasti pölyä, jonka koostumus voi vaihdella olosuhteista riippuen hyvin paljon. Yleisesti ottaen kyseinen pöly voi sisältää sekä orgaanisia että epäorgaanisia aineksia, joilla jo sellaisenaan voi olla haitallisia vaikutuksia ihmisen terveyteen. Erityisen haitallisina pidetään kuitenkin pölyn sisältämiä mikrobeja (bakteerit, sienet) sekä endotoksiineja<sup>1</sup>. Aiemmissa VTT:n tutkimuksissa (Ajanko ja Fagnäs 2006 sekä Ajanko-Laurikko, 2009) on esitetty tiivistelmä terveysvaikutuksista, jotka voivat aiheutua metsähakkeen käsittelyssä vapautuvista hiukkasmaisista epäpuhtauksista. Näiden tutkimusten mukaan yleisimmät haitatekijät ovat

- limakalvojen ärsytys
- bronkiitti ja krooninen obstrukttiivinen keuhkosairaus
- immunotoksiset sairaudet
- allergiset sairaudet
- systeemiset vaikutukset (mm. kuume, lihas- ja nivelkipu)

Edellä mainittujen epäpuhtauksien ohella metsähakkeen tuotannossa työskentelevät voivat altistua diesel-pakokaasulle.

VTT:n tutkimuksessa (Ajanko ja Fagnäs 2006) todetaan, että biopolttoainemateriaalien käsittelyssä pahiten altistuva työntekijä on kuorma-auton kuljettaja, joka lastaa tienvarteen kerätyt polttoainekasat ja purkaa ne voimalaitoksella. Muita mahdollisia altistujia ovat murskaustiloissa työskentelevät henkilöt.

Pölyhaittojen arvioinnissa lähdetään yleensä liikkeelle HTP-arvoista (HTP = haitalliseksi tunnettu pitoisuus), jotka ovat sosiaali- ja terveysministeriön arvioita työntekijöiden hengitysilman epäpuhtauksien pienimmistä pitoisuuksista, jotka voivat aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijöiden turvallisuudelle tai terveydelle taikka lisääntymisterveydelle. HTP-arvot ovat siis pohjana selvittäessä ja arvioi-

---

<sup>1</sup> gram-negatiivisten bakteerien ulkokalvosta vapautuvia myrkkyaaineita – endotoksiinien määrää ilmaistaan endotoksiiniyksiköissä (1 EU ≈ 0,1 ng *E. Coli lipopolysaccharidia*).

taessa työpaikan ilman puhtautta. Ilman epäpuhtauksien haitalliset vaikutukset riippuvat pitoisuuden lisäksi altistusajasta. Tämän vuoksi monille epäpuhtauksille on määritelty HTP-arvot sekä 8 tunnin että 15 minuutin keskipitoisuudelle. Orgaanisen pölyn tapauksessa nämä arvot ovat  $HTP_{8h} = 5 \text{ mg/m}^3$  ja  $HTP_{15min} = 10 \text{ mg/m}^3$ . Epäorgaaniselle pölylle on määritelty HTP-arvo vain 8 h keskipitoisuudelle,  $HTP_{8h} = 10 \text{ mg/m}^3$ .

Aiempien tutkimusten (Ajanko ja Fagernäs 2006 sekä Ajanko-Laurikko 2009) mukaan työntekijöiden hengitysvyöhykkeiltä mitatut hengittyvän pölyn pitoisuudet kantojen nostossa olivat alle  $0,3 \text{ mg/m}^3$ , ts. suhteellisen matalalla tasolla, jos vertailukohtana pidetään HTP-arvoa. Kantojen kuormauksen aikana vastaa pitoisuus oli  $1,8 \text{ mg/m}^3$ . Vastaavasti purettaessa kantoja murskaimen kuljettimelle hengittyvän pölyn pitoisuudet vaihtelivat välillä  $0,5\text{--}7,3 \text{ mg/m}^3$ .

Risutukkien kuormauksen aikana hengittyvän pölyn pitoisuus oli  $1,1 \text{ mg/m}^3$ . Kun risutukkien purku tapahtui ulkona olevalle kuljettimelle, saatiin vastaavaksi pitoisuudeksi  $<0,3\text{--}0,5 \text{ mg/m}^3$ . Hallitilassa tapahtuva risutukkien purku kuljettimelle aiheutti odotetusti korkeamman pitoisuustason ( $4,6 \text{ mg/m}^3$ ).

Edellä mainittuja mittaustuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että mittausten lukumäärät ovat olleet hyvin pieniä, joten tuloksia on syytä pitää enemmän olosuhteita havainnollistavina esimerkkeinä kuin tyypillisinä pitoisuustasoina.

Metsähakkeen käsittelyssä syntyvä pöly sisältää kuitenkin myös runsaasti mikrobeja sekä niistä syntyneitä epäpuhtauksia. Niinpä orgaaniselle ja epäorgaaniselle pölylle määritellyt HTP-arvot eivät välttämättä riitä arvioitaessa työilman laatua. Eriytyisen mielenkiinnon kohteena ovat pölyn sisältämät endotoksiinit.

Mikrobien ja endotoksiinien osalta ei ole käytettävissä HTP-arvojen kaltaisia ohjearvoja. Mikrobien tapauksessa eräs mahdollisuus on ottaa vertailukohdaksi tavanomaisessa sisäilmassa vallitsevat tasot (Lääkintöhallitus 1990):

- sieni-itiöpitoisuus  $500 \text{ cfu/m}^3$  talviaikana ja  $2\ 500 \text{ cfu/m}^3$  muina vuodenaikoina
- bakteeripitoisuus  $4\ 500 \text{ cfu/m}^3$  (kaikkina vuodenaikoina).

Suomessa ei ole toistaiseksi määritelty raja-arvoa endotoksiineille. Alankomaissa on käytössä raja-arvo  $20 \text{ ng/m}^3$  ( $200 \text{ EU/m}^3$ ) ja uusi ehdotettu ohjearvo on  $5 \text{ ng/m}^3$  (=  $50 \text{ EU/m}^3$ ). Aiempien tutkimusten (Ajanko ja Fagernäs 2006 sekä Ajanko-Laurikko 2009) mukaan endotoksiinipitoisuudet kantojen noston yhteydessä olivat hyvin pieniä ( $1,6\text{--}3,9 \text{ EU/m}^3$ ), ts. noin 1 % Alankomaiden tämänhetkisestä raja-arvosta.

Suurimmat terveysriskit biopolttoaineiden käsittelyssä sisältyvät siis työympäristön ilman epäpuhtauksiin, kuten pölyihin, sieniin ja bakteereihin. Tiettyjen tuotantoketjun alkupäähän vaikuttavien tekijöiden, kuten varastointiolosuhteiden, -ajan sekä sääolosuhteiden, huomioon ottamisella voidaan vähentää altisteiden syntymistä. Jo syntyneen terveydelle vaarallisen epäpuhtauden leviämisen torjunnassa voidaan joillakin ulkoisilla toimilla, esim. koneen sijoittamisella tuulen yläpuolelle, vähentää altistumista. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, ja siksi pääpaino tässä tutkimuksessa olikin keinoissa, joilla altisteiden kulkeutumista koneen käyttäjän hengitysvyöhykkeelle voidaan vähentää riippumatta ulkoisista olosuhteista.

Tehokkaimmat tavat vähentää työntekijöiden altistumista ovat ohjaamojen ilmanvaihdon ja suodatuksen parantaminen sekä altistavien aineosasten leviämisen eliminointi sopivilla ilmanvaihtoratkaisuilla. Tällä hetkellä suodatustekniikan hyödyntäminen on satunnaista, ja käytössä olevat ratkaisut eivät välttämättä täytä niitä vaatimuksia, joita biopolttoaineiden käsittelyssä vallitsevat olosuhteet sekä altistumista aiheuttavat epäpuhtaudet edellyttävät. Näin ollen on tärkeää kehittää koneiden ja laitteiden ilmanvaihtoa ja suodattimia sekä suunnitella päästölähteen ympärille hallittu ilmanvaihto siten, että epäpuhtauksien pääsy koneiden sisäilmaan minimoidaan.

## 2. Tavoitteet

Hankkeen päätavoitteena oli vähentää työntekijöiden altistumista metsäbiopoltto-aineiden käsittelyssä syntyville ilman epäpuhtauksille sekä tuottaa mittauksiin perustuvaa tietoa erilaisten torjuntatoimien tehokkuudesta. Tarkoituksena on siis mahdollistaa bioenergian käytön voimallinen lisääminen vaarantamatta alalla työskentelevien työntekijöiden työturvallisuutta ilman epäpuhtauksilla. Avainasemassa olivat erilaiset tekniset torjuntatoimet, joilla altistusta voidaan vähentää.

Tavoitteena oli myös laatia hankkeen tulosten pohjalta toimintasuunnitelma terveysvaarojen ja -riskien hallitsemiseksi tai, mikäli mahdollista, niiden poistamiseksi kokonaan. Tavoitteisiin kuului myös laatia torjuntatoimenpide-ehdotuksiin sekä oikeisiin työtapoihin perustuva ohjeistus kaikille alalla toimiville osapuolille.

Tavoitteena oli tuottaa tuloksia, jotka ovat välittömästi hyödynnettävissä yrityksissä jo olevien koneiden ja tilojen ylläpidossa, korjauksissa ja uusimisessa sekä uusia investointeja suunniteltaessa. Laite- ja konevalmistajille tulokset antavat selkeää tietoa, miten uusia laitteita tulee kehittää työntekijöille turvallisemmiksi. Tavoitteena oli myös parantaa työympäristön laatua ja vaikuttaa siten työpaikan imagoon ja sitä kautta osaavan ja motivoituneen työvoiman saantiin.

### **3. Ohjaamoilman hallinta**

Kuten Työterveyslaitoksen tutkimuksessa (Laitinen ym. 2014) on todettu, haketus-työn haitallisimmat työympäristötekijät ovat pölyt, melu, värinä ja lämpöolot. Hakkeen käsittelyssä ilmaan vapautuvien epäpuhtauksien hallinnassa ensisijainen ratkaisu on tehokkaasti ja luotettavasti toimiva ohjaamo. Hankalimmat ja pölyävimmät työvaiheet voidaan yleensä toteuttaa ohjaamosta käsin ilman, että työntekijä joutuisi altistumaan suoraan haketusprosessissa syntyville epäpuhtauksille.

#### **3.1 Ohjaamon ominaisuudet**

Hyvin toimivan työkoneohjaamon perusvaatimuksia ovat mm. ergonomisesti hyvät sisätilat, lämpöolosuhteiden tehokas hallinta kaikkina vuodenaikoina sekä riittävä ilmanvaihto, jonka avulla estetään ulkoilman epäpuhtauksien pääsy ohjaamoilmaan ja samalla poistetaan ohjaamon sisäisistä lähteistä syntyvät epäpuhtaudet (lähinnä CO<sub>2</sub>) sekä kosteus.

Kuvassa 4 on havainnollistettu ohjaamon olosuhteisiin vaikuttavia tekijöitä. Sisäisten tekijöiden (lämpö, kosteus, epäpuhtaudet, CO<sub>2</sub>) ohella tilanteeseen vaikuttavat ulkoiset tekijät (ilman lämpötila, tuulen nopeus ja suunta, auringon säteily sekä ilman epäpuhtaudet). Näiden tekijöiden hallintaan on käytettävissä erilaisia teknisiä ratkaisuja (ohjaamon rakenne, ilmanvaihto, jäähdytys/lämmitys, ilman suodatus), joiden avulla voidaan toteuttaa halutut työskentelyolosuhteet.

Sisäiset tekijät:

- lämpö
- kosteus
- hiilidioksidi
- sisäiset epäpuhtauspäästöt



Ulkoiset tekijät:

- lämpötila
- tuuli
- auringon säteily
- ilman epäpuhtaudet

Tekniikka:

- ohjaamon rakenne
- ilmanvaihto
- lämmitys/jäähdytys
- ilman suodatus

Kuva 4. Ohjaamon pölynhallinta – lähtökohdat.

Tarkasteltaessa haketustyössä käytettävien ohjaamojen tekniikkaa on ensiarvoisen tärkeää kohdistaa huomio ulkoilman hiukkasepäpuhtauksien torjuntaan. Tämä voidaan periaatteessa toteuttaa käyttämällä tehokasta ilman suodatusta sekä riittävän suuria raitisilmavirtoja. Epäpuhtauksien tehokas hallinta ei kuitenkaan onnistu pelkästään suodatusteknisin keinoin, ts. hyväkään suodatus ei auta, mikäli ohjaamoon virtaa suodattamatonta ilmaa vuotojen kautta. Ohjaamon tiiveys ja riittävä ylipaine ovatkin ehdottomia perusvaatimuksia tehokkaasti toimivalle ohjaamoilmanvaihdolle.

Toimittaessa ulkoilmassa ohjaamoon voi kohdistua suuria tuulennopeuksia, jolloin tuulesta aiheutuva paine-ero ulkoilman ja ohjaamoilman välillä voi aiheuttaa hallitsemattomia ilmavirtauksia rakenteissa olevien rakojen ja muiden aukkojen kautta. Lämpiminä vuodenaikoina ja erityisesti aurinkoisina päivinä ohjaamoilman lämpöolosuhteiden hallitseminen voi osoittautua hankalaksi, ja ongelman ratkaisuna voidaan joutua turvautumaan ”luonnolliseen” ilmanvaihtoon esim. avoimen ikkunan kautta. Sanomattakin on selvää, että tässä tilanteessa ei voida enää puhua tehokkaasta pölyn hallinnasta. Niinpä peruslähtökohtana hyvälle ohjaamolle on tehokkaasti toimiva jäähdytysilmastointi, jonka avulla ohjaamon lämpöolosuhteet voidaan pitää hallinnassa kaikkein kuumimpinakin päivinä. Kun lämpöolosuhteet ovat hallinnassa, voidaan ohjaamon tiiveys säilyttää riittävän hyvänä ja mahdollistaa tehokas ilman puhdistus ilmanvaihdon ja suodatuksen avulla.

Erillinen ilmastointilaite ohjaamossa mahdollistaa siis ilmanvaihdon mitoittamisen niin, että se on riittävä kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden hallintaan, mutta ei ole tarpeettoman suuri vaikeuttamaan tehokasta ja taloudellisesti järkevää suoda-

tusta. Tarpeettoman suuri ilmavirta edellyttää tarpeettoman suurta suodatinta, ja samalle se aiheuttaa suodattimen tarpeetonta kuormittumista epäpuhtauksille.

Ohjaamoilman kosteuden on pysyttävä riittävän alhaalla, jotta voidaan estää vesihöyryn tiivistyminen kylmille (ikkuna)pinnoille. Kosteutta voi vapautua työntekijän hengityksen ohella myös märistä vaatteista ja kosteilta pinnoilta. Karkeana arviona voidaan pitää, että ohjaamoilmaan vapautuu 15–50 mg/s vesihöyryä. Kosteuden hallintaan vaadittava ilmavirta riippuu tietenkin ulkoilman lämpötilasta ja ikkunapintojen sisälämpötilasta, ts. ilmaan vapautuva vesihöyry pitää voida laimentaa ilmavirtaan niin, että kosteuden tiivistymistä kylmille pinnoille ei tapahdu. Suuruusluokka-arvona tälle ilmavirralla voidaan pitää 10 dm<sup>3</sup>/s. Vastaavasti hengitysilmasta vapautuvan hiilidioksidin hallinta asettaa oman vaatimuksensa tarvittavalle ilmavirralla. Olettamalla vapautuvan hiilidioksidin määräksi 20 mg/s ja asettamalla sallitun hiilidioksidipitoisuuden ylärajaksi 1000 ppm saadaan ilmavirran mitoitusarvoksi 17 dm<sup>3</sup>/s. Mainittakoon, että standardeissa EN 474-11, ISO/Wd 317-2 ja DIN 71460-2 on annettu ilmavirralla minimiarvo 12 dm<sup>3</sup>/s. Standardissa EN 15695-1 vastaava ilmavirta-arvo on 8,3 dm<sup>3</sup>/s.

Ohjaamojen ominaisuuksia on tarkasteltu mm. EN 15695-1-standardissa. Tässä standardissa on määritelty eri käyttötilanteisiin soveltuvat ohjaamoluokat. Ohjaamot luokitellaan neljään ryhmään siten, että alimpaan luokkaan (luokka 1) kuuluvat ohjaamot, jotka eivät tarjoa määriteltyä suojaustasoa haitallisille epäpuhtauksille. Varsinaista merkitystä on siis luokan 2–4 ohjaamoilla.

Luokan 2 ohjaamot tarjoavat suojaa pölyjä vastaan. Ohjaamolle on määritelty ilmavirta 8,3 dm<sup>3</sup>/s ja ohjaamon ylipaine +50 Pa (paineantureilla varustetut ohjaamot +20 Pa). Lisäksi on määritelty ohjaamoilman suodattimen massaerotusastevaatimus hienopölylle: yli 99 % (ISO 14269-4).

Standardin määrittelemän luokan 3 ohjaamot kuvataan tarjoavan suojauksen pölyjen lisäksi myös aerosoleille<sup>2</sup>. Ohjaamolle määritelty ilmavirta- ja ylipainevaatimukset ovat sama kuin luokassa 2, ts. ilmavirta 8,3 dm<sup>3</sup>/s ja ohjaamon ylipaine +50 Pa (paineantureilla varustetut ohjaamot +20 Pa). Myös suodattimen massaerotusastevaatimus on sama (> 99 %), mutta lisäksi vaaditaan nk. hiukkaserotusasteeksi 99,95 % (EN1822 tai EN 143). Omat vaatimuksensa on esitetty myös ilmanvaihtokanaviston vuodoille (<2 %) sekä ohjaamon suojaustehokkuudelle (>98 %).

Luokan 4 ohjaamoille on esitetty muuten samat vaatimukset kuin luokan 3 ohjaamoille, mutta lisävaatimuksena on suojaustehokkuusvaatimus höyrymuodossa oleville epäpuhtauksille (erotusaste sykloheksaanille > 98 %, EN14387).

Edellä mainitut ohjaamoluokitukset eivät välttämättä sovellu sellaisenaan kaikkiin niihin tarpeisiin, joita hakkeen käsittelyssä voi tulla vastaan mm. mikrobien osalta. Voidaan kuitenkin arvioida, että luokan 3 ohjaamovaatimuksia voidaan pitää lähtökohtana myös hakkeen käsittelykohteissa.

---

*2 Tämä määrittely on ilmeisesti tehty ajattelematta asiaa aivan loppuun asti – aerosoli on yleisnimitys hiukkasmuodossa oleville ilman epäpuhtauksille, ts. aerosoleihin kuuluvat myös pölyt.*



## 3.2 Ohjaamoilman suodatus

Ohjaamoilman epäpuhtauksien hallinnan yhtenä peruslähtökohtana on tehokas ilman suodatus. Suodattimen tärkein ominaisuus on luonnollisesti sen erotuskyky, jolla kuvataan suodattimen kykyä erottaa ilmasta määrätyt ilman epäpuhtaudet. Erotustehokkuutta kuvataan useimmiten erotusasteella, vaikka havainnollisempi ja kuvaavampi suure olisi läpäisyaste<sup>3</sup>. Suodatustehokkuuden ohella tärkeä on myös suodattimen kiinnityksen tiiveysominaisuus – sitä tärkeämpi, mitä tehokkaammas-ta suodattimesta on kysymys. Käytännön kannalta hyvin oleellinen ominaisuus on sen suodattimen kapasiteetti, joka määrää, miten usein suodatin on vaihdettava (tai puhdistettava). Sanomattakin on selvää, että suodattimen hinta ja suodatinhuollon helppous/vaikeus ovat käytännön kannalta tärkeitä ominaisuuksia.

Haketustyössä käytettävien ohjaamosuodattimien tapauksessa törmätään usein ohjaamoilmanvaihdolle tyypilliseen ”ongelmaan”, ts. suodattimelle varattu tila on pieni ja virtauskanavistot ovat ahtaita ja rakenteeltaan monimutkaisia. Niinpä suodatuslaitteista tulee helposti hankalia kunnossapidon kannalta ja ne aiheuttavat tarpeettoman suuren virtausvastuksen.

Työkoneohjaamon ilman suodatus on ollut pitkään vaivallisesti ratkaistu ongelma, johon on etsitty erilaisia ratkaisuja. Näistä voidaan mainita erillinen suodatinjärjestelmä, joka kehitettiin TSR:n tutkimushankkeessa ”Työkoneohjaamoiden raitisilman suodatuslaite” (Heinonen ym. 1998). Laitteistoon kuuluu puhallin, joka on integroitu syklonin ja laajapintasuodattimen muodostamaan kokonaisuuteen. Lähtökohtana on ollut, että tällä laitteella voidaan hoitaa ohjaamoilman puhdistus hyvin vaikeissa olosuhteissa, joissa tavanomaiset suodattimet tukkeutuvat nopeasti.

## 3.3 Suodattimet

Metsähakkeen tuotannossa ja käsittelyssä käytettävät suodattimet joutuvat toimimaan erittäin haastavissa olosuhteissa. Hiukkaspitoisuudet voivat olla ajoittain erittäin korkeita, joten suodattimen kuormittuminen voi olla nopeaa. Myös käyttöolosuhteet (kosteus, lumi, jää, vesipisarot jne.) asettavat tiukkoja vaatimuksia suodattimille.

Ohjaamoilman suodattimen tulisi toimia mahdollisimman pitkään niin, että sen erotuskyky säilyy riittävänä eikä sen virtausvastus kasva liian nopeasti. Lisäksi suodattimen puhdistuksen ja vaihtamisen tulisi olla mahdollisimman yksinkertaista. Ideaalitapauksessa suodatinlaitteeseen tulisi kuulua mekanismi, jonka avulla suodatin voidaan puhdistaa nopeasti ja tehokkaasti. Suodattimen puhdistuksen tulisi olla mahdollista useita kertoja ennen kuin se pitää korvata uudella suodattimella.

---

*3 Esimerkiksi erotusasteet 98 % ja 99 % mielletään helposti suurin piirtein samantasoisiksi, vaikka 98 % suodattimen läpäisy on kaksinkertainen verrattuna 99 % suodattimeen.*

Sanomattakin on selvää, että suodatuksesta aiheutuvat kustannukset pitäisi voida pitää kohtuullisina.

Ohjaamojen ilman suodattimille ei yleensä varata riittävästi tilaa, joten on todennäköistä, että tehokas ratkaisu edellyttää erillistä ohjaamon ulkopuolelle asennettavaa suodatinlaitetta. Suodattimen tulee joka tapauksessa mahtua suhteellisen pieneen tilaan, ja siksi todennäköinen suodatinratkaisu on nk. laajapintasuodatin eli ratkaisu, jossa ohut suodatinmateriaali on laskostettu siten, että suodattimeen saadaan mahdollisimman suuri keräyspinta. On myös mahdollista, että suodatuksen tulee tapahtua kahdessa vaiheessa siten, että ensimmäinen vaihe (esisuodatus) poistaa ilmasta hyvin karkeat hiukkaset ja toinen vaihe (varsinainen suodatus) varmistaa, että myös hienojakoisemmat hiukkaset saadaan erotettua.

Optimaalisen suodatinratkaisun toteuttaminen on erittäin haastava tehtävä mm. siksi, että suodatuksen tehokkuuteen ja suodattimen toimintaan vaikuttavia tekijöitä on paljon. Periaatteessa suodattimen ominaisuudet riippuvat toisaalta suodatinmateriaalista ja toisaalta ko. materiaalista valmistetun suodattimen rakenteesta. Käytännössä nämä kaksi tekijää tulisi optimoida siten, että ne tuottavat mahdollisimman hyvän lopputuloksen määrättyihin käyttöolosuhteisiin.

Koska suodatuksella on keskeinen rooli epäpuhtausongelmien torjunnassa, tässä tutkimuksessa tehtiin pääasiassa laskennallisiin menetelmiin perustuvia tarkasteluja, joiden tarkoituksena oli valottaa tärkeimpiä suodattimen ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä.

Tarkastelujen kohteena olivat siis ensisijaisesti nk. laajapintasuodattimet eli ratkaisut, joissa suhteellisen pienen tilaan on pakattu mahdollisimman paljon suodatinmateriaalia. Käytännössä materiaalin pakkaus tapahtuu laskostamalla materiaali (ks. Kuva 5) ja liimaamalla laskostettu suodatinrakenne suodattimen kehukseen.



Kuva 5. Laskostettu suodatinmateriaali ennen liimaamista suodattimen kehukseen.

Suodatinmateriaalien ominaisuuksista merkittävimpiä ovat

- materiaalin paksuus
- ilman läpäisevyys
- suodatustehokkuus
- mekaaniset ominaisuudet
- kuormitettavuus
- puhdistuvuus.

Laajapintasuodattimissa suodatinmateriaalin paksuudella on suuri merkitys mm. valmistuksen kannalta. Mitä ohuempi materiaali on, sitä suurempi suodatuspinta-ala voidaan toteuttaa määrättyyn suodatintilavuuteen. Suodatinmateriaalin paksuus vaikuttaa myös ilman läpäisevyyteen sekä suodatustehokkuuteen. Materiaalia ohentamalla voidaan lisätä ilman läpäisevyyttä mutta samalla materiaalin suodatustehokkuus pienenee. Tyypilliset materiaalipaksuudet laajapintasuodattimissa ovat suuruusluokkaa 0,3–1 mm. Suodatustehokkuuteen ja ilman läpäisevyyteen vaikuttavat luonnollisesti myös materiaalissa käytettyjen kuitujen ominaisuudet ja niiden määrä.

Suodattimien valmistuksen kannalta materiaalin mekaanisilla ominaisuuksilla on suuri merkitys, ts. materiaalin tulee sopia suodattimien valmistusprosessiin siten, että tuloksena saadaan halutun rakenteen omaava ratkaisu. Mekaanisista ominaisuuksista myös riippuu, miten hyvin suodatin säilyttää rakenteensa kuormitettuna ja altistettuna kosteus- ym. olosuhteille.

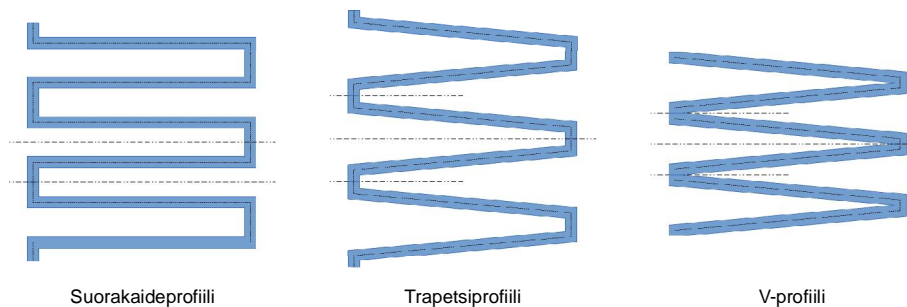
Kuormitettavuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä säilyttää mahdollisimman hyvä ilman läpäisevyys (pieni painehäviö) huolimatta materiaaliin keräytyvästä hiukkasmassasta. Kuormitettavuus on sidoksissa suodatettavan hiukkasepäpuhtauden ominaisuuksiin, ts. hiukkasten koko ja koostumus voivat vaikuttaa hyvin paljon materiaalin ”tukkeutumiseen”.

Materiaalin puhdistuvuus kuvaa puolestaan kerätyn hiukkasmassan irrottamisen helppoutta. Suodattimen käytettävyyden kannalta olisi tietenkin toivottavaa, että kerätty hiukkasmassa voitaisiin poistaa ravistelemalla, imuroimalla tai paineilmapuhalluksella mahdollisimman täydellisesti, ts. siten, että suodattimen painehäviö palautuisi mahdollisimman lähelle alkuperäistä puhtaan suodattimelle ominaista tasoa. Käytännössä tämä edellyttäisi, että hiukkaset keräytyisivät pääosin suodatinmateriaalin pinnalle, josta ne voitaisiin irrottaa yhtenäisenä hiukkaskerrostumana. Materiaalin sisältä (suodatinkuituihin kiinnittyneiden) hiukkasten irrottaminen on yleensä vaikeaa.

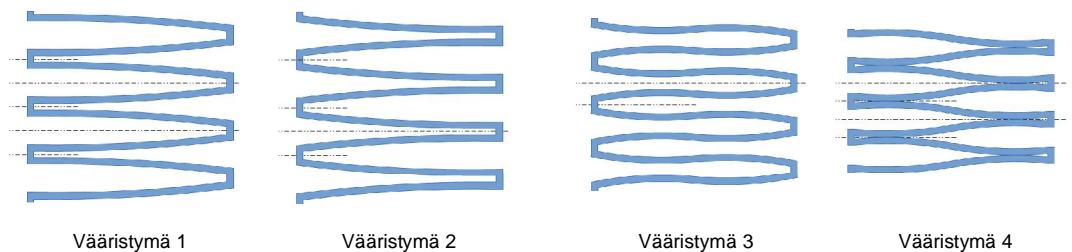
Suodattimen erotuskykyominaisuudet riippuvat ratkaisevasti materiaalin paksuuden ohella suodatinmateriaalin perusominaisuuksista, jotka ovat kuitujen läpimitta sekä kuitujen määrä suhteessa suodatinmateriaalin kokonaistilavuuteen. Yleensä suodatinkuitujen osuus materiaalin tilavuudesta on alle 1 %, ts. suodatinmateriaali on rakenteeltaan hyvin avoin. Näiden perusominaisuuksien lisäksi suodattimen erotuskykyyn vaikuttaa mm. ilman virtausnopeus materiaalin läpi.

Suodattimessa tarvittavan materiaalin määrää voidaan arvioida helposti suodattimen ilmavirran ja materiaalille määritellyn virtausnopeuden perusteella. Asiaa havainnollistavat seuraavat suuruusluokkatarkastelut. Esimerkiksi ilmavirran ollessa  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  ja materiaalinopeuden  $0,05 \text{ m/s}$  saadaan tarvittavan suodatinmateriaalin pinta-alalle arvo  $0,1 \text{ m}^3/\text{s} / 0,05 \text{ m/s} = 2 \text{ m}^2$ . Varsin usein rajoittavaksi tekijäksi muodostuu suodattimelle varattu tilavuus. Tyypillisenä suuruusluokkana ohjaamoissa käytettävälle laajapintasuodattimelle voisi olla  $350 \times 150 \times 30 \text{ mm}$  (pituus  $\times$  leveys  $\times$  korkeus) =  $1,58 \text{ dm}^3$ . Mahtuakseen tähän tilavuuteen laskostettuna suodatinmateriaalin paksuuden on täytettävä ehto  $< 0,79 \text{ mm}$ . Tämä ehto tarkoittaisi, että suodatin on "täyteen pakattu", ts. sen virtausvastus olisi erittäin suuri eikä suodatin toimisi alkuperäisen ajatuksen mukaisesti, ts. ilman virtaus ei tapahtuisi kohtisuoraan suodatinmateriaalin pinnan suhteen. Niinpä tässä esimerkissä materiaalin pitäisi olla huomattavasti ohuempaa, että laskosten väliin jäisi riittävästi tilaa, jotta ilmavirtaus pääsee jakaantumaan kohtuullisen tasaisesti koko materiaalin pinnalle.

Oheisessa kuvassa (Kuva 6) on havainnollistettu suodatinmateriaalin laskostustapoja. Perusratkaisut ovat suorakaideprofiili ja V-profiili sekä näiden välimuoto trapetsiprofiili. Nämä profiilit edustavat siis ideaalitapauksia, eikä niitä välttämättä kyetä toteuttamaan kovin tarkoin suodattimia valmistettaessa. Käytännön suodattimissa laskokset eivät pysy halutussa muodossa, vaan ne voivat vääristyä monella eri tavalla. Laskostusprofiilien mahdollisia vääristymiä on havainnollistettu oheisessa kuvassa (Kuva 7).

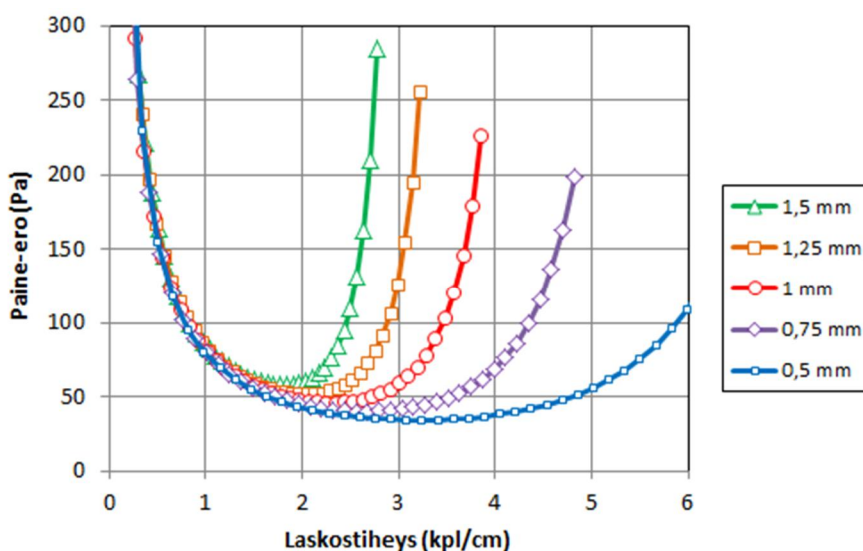


Kuva 6. Laajapintasuodattimien laskostusprofiilit.



Kuva 7. Laajapintasuodattimien laskostusprofiilien vääristymät.

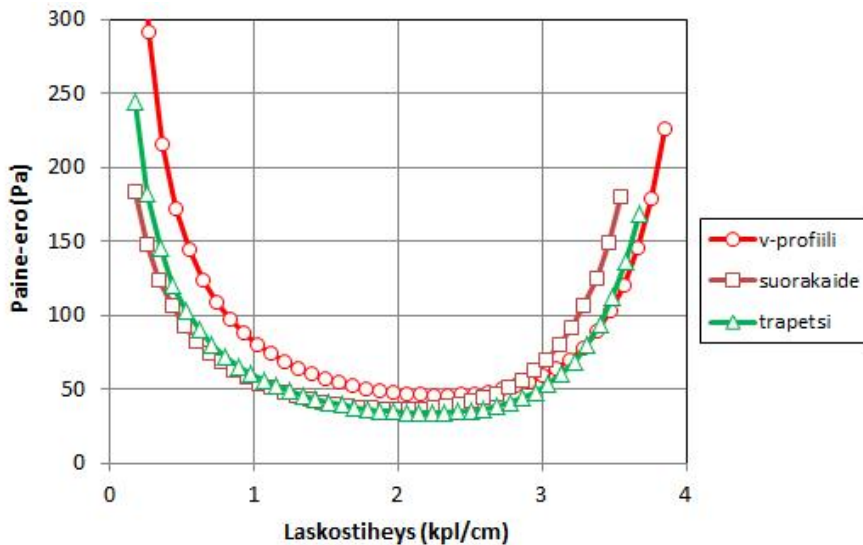
Suodatinmateriaalin laskostuksen vaikutusta suodattimen paine-eroon voidaan tarkastella laskennallisesti aiemmissa tutkimushankkeissa kehitetyllä laskentamallilla. Oheisessa kuvassa (Kuva 8) on havainnollistettu suodatinmateriaalin paksuuden vaikutusta laajapintasuodattimen paine-eroon erilaisilla laskosmäärillä<sup>4</sup>. Laskelmat on tehty olettaen vakio ilmavirta, ts. kaikissa tapauksissa suodattimen ilmavirta on samansuuruinen. Lisäksi suodatinmateriaalien virtausvastukset ovat identtiset. Laskelmien tulos havainnollistaa, miten suodattimen paine-ero laskee jyrkästi laskosmäärän (laskostiheyden) kasvaessa, ts. suodatinmateriaalin pinta-ala kasvaa ja suodattimen paine-ero vastaavasti alenee. Laskosmäärän kasvaessa paine-ero saavuttaa kuitenkin minimiarvon, ja laskosmäärää edelleen kasvatettaessa paine-ero kääntyy kasvuun. Tämä ominaisuus selittyy laskosten välien aiheuttamalla virtausvastuksella, ts. laskostiheyden kasvaessa ilma joutuu kulkemaan aina kapeammista raoista, mistä on seurauksena ylimääräinen painehäviö. Tulos havainnollistaa suodatinmateriaalin paksuuden merkitystä, ts. paksun materiaalin tapauksessa laskosten väliset virtauskanavat ahtautuvat pienemmällä laskostiheydellä. Laajapintasuodattimen mitoitus pitäisikin tehdä niin, että lopputulos edustaisi kohtuullisen hyvin paine-eron minimikohtaa.



Kuva 8. Laajapintasuodattimen paine-ero laskostiheyden funktiona. Suodatinmateriaalin paksuuden vaikutus.

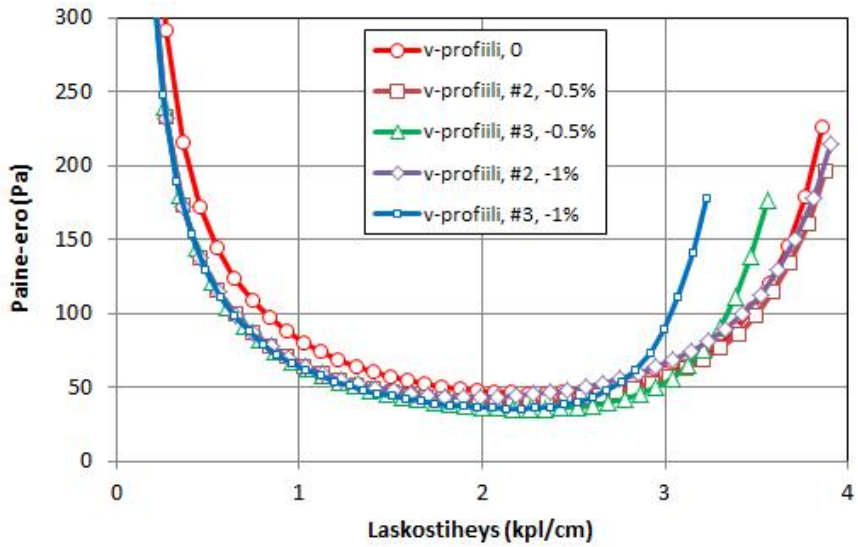
<sup>4</sup> Laskosten määrää on kuvattu nk. laskostiheydellä, joka kuvaa, kuinka monta laskosta suodattimessa on 1 cm:ä kohden.

Laskelmien mukaan laskostusprofiililla ei ole erityisen suurta merkitystä laajapintasuodattimen paine-erolle. Tulosten (Kuva 9) mukaan suurilla laskostiheyksillä V-profiili ja trapetsiprofiili mahdollistavat jonkin verran alemman paine-eron kuin suorakaideprofiili.



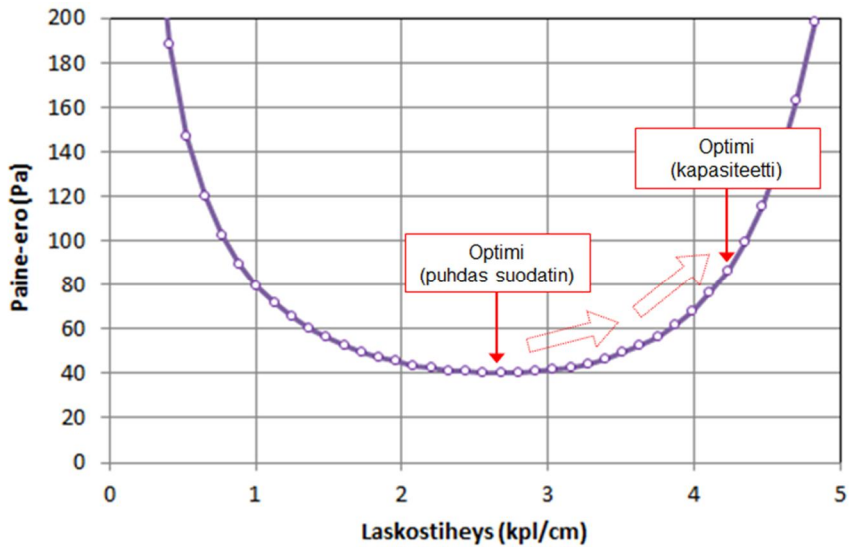
Kuva 9. Laskostusprofiilin vaikutus laajapintasuodattimen paine-eroon.

Laskelmien avulla arvioitiin myös laskosprofiilien vääristymien mahdollisia vaikutuksia laajapintasuodattimen paine-ero-ominaisuuksiin (Kuva 10). Ennako-odotusten mukaisesti vääristymillä näyttäisi olevan merkitystä ainoastaan hyvin suurilla laskostiheyksillä. Tulosten perusteella näyttäisikin ilmeiseltä, että laskosprofiilin vääristymät eivät aiheuta erityisiä ongelmia, mikäli suodatin pyritään mitoittamaan puhtaasti suodattimen paine-erominimiin.



Kuva 10. Laskosprofiilin vääristymän vaikutus laajapintasudattimen paine-eroon.

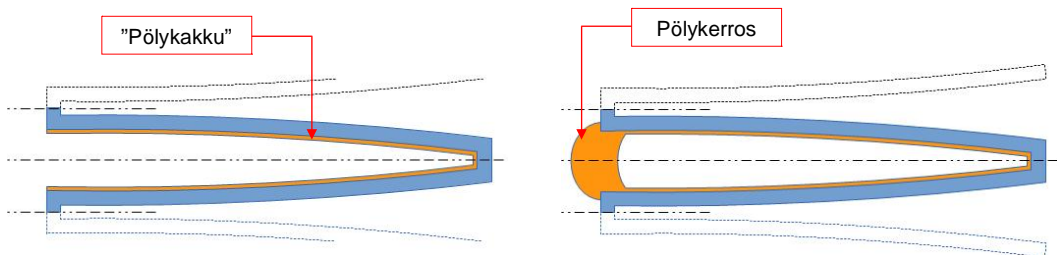
Tilanne on kuitenkin huomattavasti monimutkaisempi, mikäli suodattimen optimointia pyritään tekemään jonkin muun kuin puhtaan suodattimen paine-eron perusteella. On todennäköistä, että suodattimen kapasiteetin kannalta optimi laskostiheys on korkeampi kuin puhtaan suodattimen paine-eron minimikohtaa vastaava laskostiheys. Tällöin laskosprofiilien vääristymät voivat vaikuttaa ratkaisevasti optimoinnin onnistumiseen.



Kuva 11. Laajapintasuodattimen rakenteen optimointi (periaatekuva).

Laajapintasuodattimen rakenteen tulisi olla kohtuullisen hyvin optimoitu myös puhdistettavuuden suhteen, ts. rakenteen tulisi mahdollistaa suodattimen tehokas puhdistus mekaanisesti ravistelemalla, kopistelemalla tai paineilmapuhalluksella. Puhdistettavuus on kuitenkin ominaisuus, jonka mallintaminen on erittäin hankalaa.

Suodatinmateriaalin pinnalle muodostuva pölykerros voi vaikuttaa merkittävästi ilmavirtauksen jakautumiseen suodattimen sisällä. Ääritapauksessa (suuret laskostiheydet) on mahdollista, että suodattimen otsapinnalle muodostuu "tulppamainen" pölykerros, joka voi kasvattaa paine-eroa nopeasti. Näiden seikkojen mallintaminen vaatisi pitkälle kehitettyä mallinnusta ja sen rinnalla runsaasti kokeellista työtä mallinnuksen validoimiseksi.



Kuva 12. Laajapintasuodattimen kuormittuminen.



## 4. Tulokset

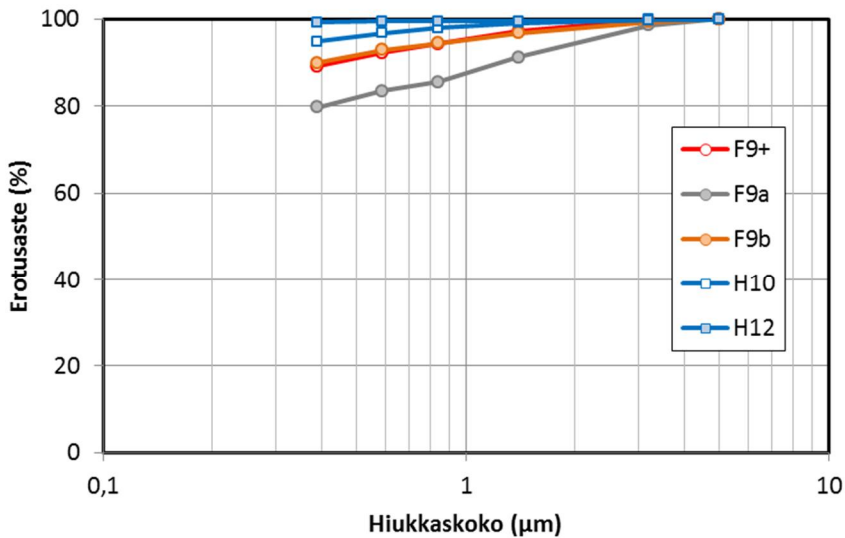
### 4.1 Laboratoriokokeet

Tutkimuksen laboratoriokokeet keskittyivät pääosin suodatinmateriaaleihin. Niinpä myös käytetyt tutkimusmenetelmät määräytyivät tämän painotuksen perusteella. Koska haketustyö on suodatuksen kannalta haastava kohde, valittiin tutkimukseen mukaan materiaaleja, jotka edustavat tämänhetkisiä korkealuokkaisia ohjaamosuodatinmateriaaleja, kuva 13. Kokeissa ei siis ollut mukana vaatimattoman erotusasteen omaavia sellupaperipohjaisia materiaaleja, jotka ovat edelleen yleisiä vähemmän kriittisissä sovelluskohteissa.

Suodatinmateriaalien mittauksissa käytettiin aiemmissa hankkeissa kehitettyjä menetelmiä ja laitteistoja, joista ehkä tärkeimmät olivat materiaalien paine-erojen ja erotusasteiden mittauslaitteistot. Suodatinmateriaalien paine-erot määritettiin laitteistolla, jossa suodatinmateriaalinäytteen läpi virtaavan ilman nopeus voitiin asettaa haluttuun arvoon ja mitata samanaikaisesti materiaalin yli muodostuva paine-ero. Tällä laitteistolla mitattiin sekä puhtaiden suodatinmateriaalien että kenttäkokeessa kuormitettujen materiaalien paine-erot.

Suodatinmateriaalien erotuskykyominaisuudet määritettiin laitteistolla, jossa materiaali voitiin altistaa hallitulle ilmavirralle sekä testihiukkaspitoisuudelle. Testiaerosoli generoitiin paineilmatoisella hiukkasgeneraattorilla ja hiukkasten pitoisuus säädettiin halutulle tasolle. Hiukkasten kokojakauma määritettiin optisella hiukkaskokoanalyysaattorilla suodatinmateriaalin molemmilta puolin ja saatujen tulosten perusteella määritettiin suodatinmateriaalin erotusaste hiukkaskoon funktiona, ts. erotusastekäyrä.

Näiden mittausten lisäksi laboratoriossa suoritettiin materiaalinäytteiden massamäärityksiä ennen kenttäkoekuormitusta sekä kuormitusvaiheiden jälkeen. Massamäärityksiä tehtiin myös hiukkasnäytteille, joita kerättiin kenttäkohteista kalvosuodattimille sekä kaskadi-impaktoreihin.



Kuva 13. Suodatinmateriaalien erotusastekäyrät.

## 4.2 Mittaukset haketuspaikoilla

Koska altistusta aiheuttava biomateriaali on ominaisuuksiltaan erittäin vaihtelevaa, riippuen mm. korjuu- ja käsittelyketjun aikaisemmista vaiheista, sitä ei voitu tuottaa ja käsitellä kontrolloidusti laboratorio-olosuhteissa. Siksi altisteiden leviämisketjun kartoittamiseen liittyvä tutkimus oli toteutettava suurelta osin kenttäolosuhteissa. Laboratoriotutkimukset rajoittuivatkin lähinnä suodatinmateriaalien perusominaisuuksien selvittämiseen.

Kenttämittauksia tehtiin kohteissa, joissa tapahtui tienvarsihaketusta. Haketuspaikat ja -ajat vaihtelivat nopeasti, joten mittauslaitteistoilta edellytettiin joustavaa sopeutumista nopeasti muuttuviin tilanteisiin. Mittauksia varten rakennettiin laitteisto (Kuva 14), johon voitiin asentaa tarvittavat näytteenottolaitteet sekä mittarit. Laitteistoon kuului myös generaattori, jolla varmistettiin, että sähkövirtaa oli käytettävissä haketuspaikasta riippumatta. Haketuksen aikana ilmassa liikkuu varsinaisen pölyn lisäksi hyvin karkeajakoista tavaraa, jonka pääsyä kaskadi-impaktoriin jouduttiin rajoittamaan. Tämä toteutettiin kanavaosalla, jossa oleva kansi suojaasi impaktoria kaikkein raskaimmilta palasilta, mutta ei estänyt varsinaisen pölyn pääsyä näytteenottoon.

Haketustyömaalta tulleiden puhelinsoittojen perusteella laitteisto kuljetettiin koekohteisiin, joissa se asennettiin haketusajoneuvon rungon päälle (Kuva 15) siten, että näytteenottolaitteiston voidaan olettaa kohtuudella sijainneen paikassa, jonka pölypitoisuus ja kokojakauma vastaavat tyypillistä tilannetta myös ohjaamon kannalta.



Kuva 14. Koelaitteisto haketuspaikkamittauksissa.



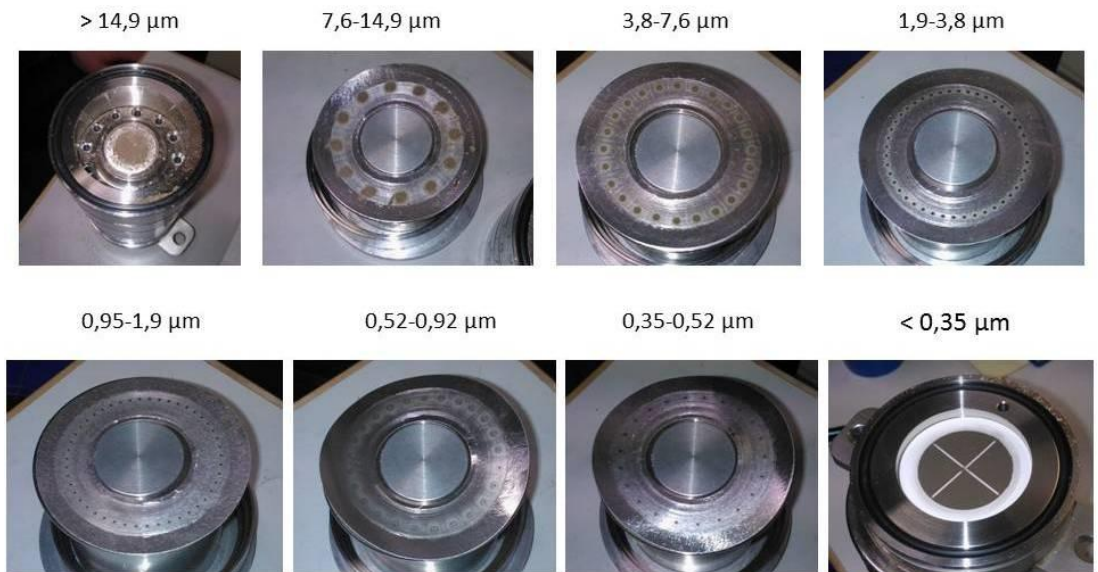
Kuva 15. Koelaitteisto asennettuna haketusajoneuvon rungon päälle.

Mittaustilanteiden hallinta tutkimusmielessä ei ollut aivan helppoa, koska osaavat haketustyöntekijät saivat ajoneuvot sellaisiin asemiin, että tuuli kuljetti pölypilven poispäin ohjaamosta (Kuva 16). Niinpä pahimmat pölypilvet eivät osuneet koelaitteistoon, ja siksi myös keskimääräiset hiukkaspitoisuudet eivät nousseet kovin korkeiksi.



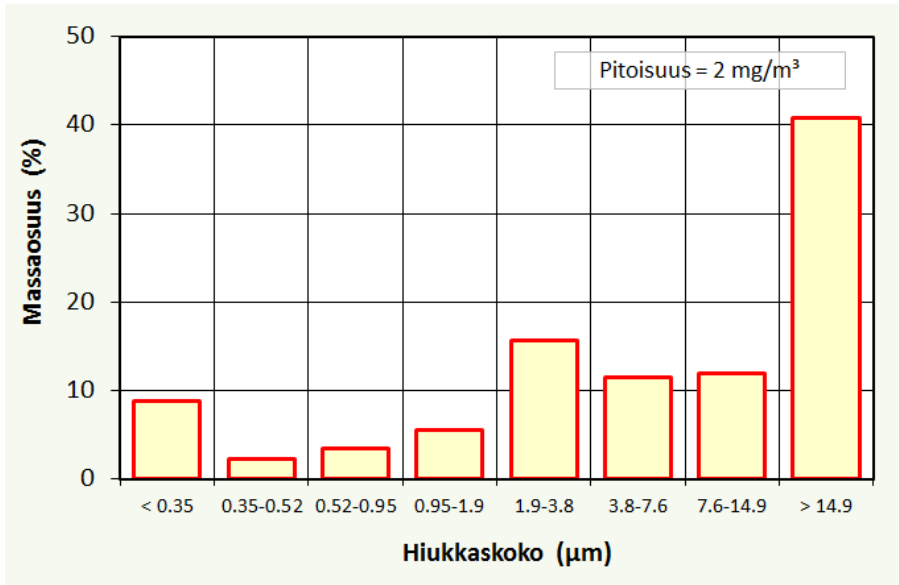
Kuva 16. Tienvarsihaketus.

Eräs oleellinen suure, jota kenttämittauksilla pyrittiin selvittämään, oli haketuksessa syntyvän pölyn kokojakauma. Näitä mittauksia tehtiin kaskadi-impaktorilla, ts. näytteenottolaitteella, jolla saadaan kerättyä hiukkaskokoselektiivinen näyte tutkittavasta kohteesta. Käytetyssä impaktorissa näyte jakaantuu kahdeksaan jakeeseen. Impaktioasteilta saatuja pölynäytteitä on havainnollistettu oheisessa kuvassa (Kuva 17).

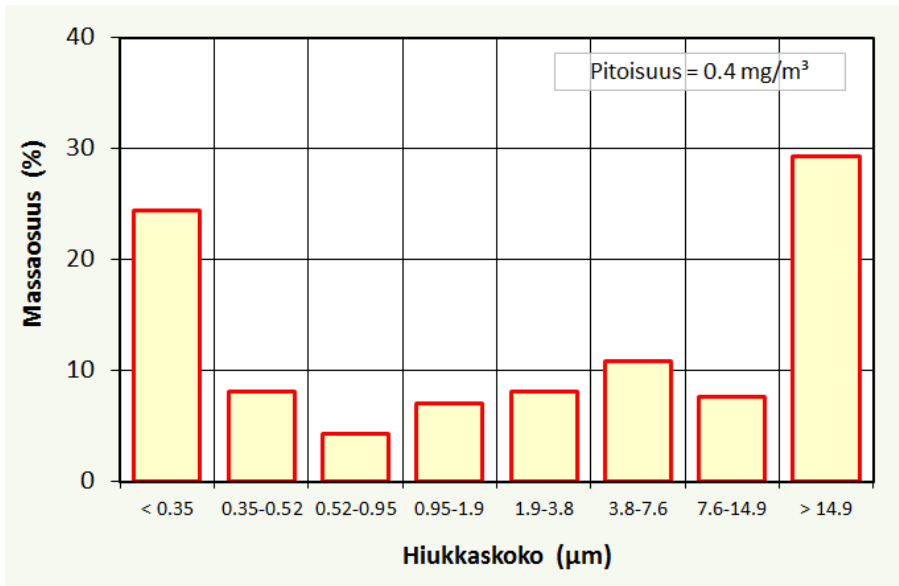


Kuva 17. Kaskadi-impaktorin keräysalustat.

Kenttäkohteista saadut jakaumatulokset (Kuva 18 ja Kuva 19) osoittavat, että pöly on suurelta osin karkeajakoista. Jakaumassa näkyy kuitenkin myös hienojakoisempaa pölyä, jonka suhteellinen osuus erityisesti toisen koekohteen tapauksessa on merkittävä. Tässä kohteessa keskimääräinen pölypitoisuus jäi kovin pieneksi, ja siksi on mahdollista, että esim. diesel-moottorin pakokaasut ovat päässeet vaikuttamaan impaktorin hienoimpaan kokofraktioon.



Kuva 18. Hiukkaskokojakaumat – tienvarsi (Nuutajärvi).



Kuva 19. Hiukkaskokojakaumat – tienvarsi (Kelkkanen).

Koekohteissa kriittisin kohde pölyn kannalta on ohjaamo, joka haketuksen aikana on muutaman metrin korkeudessa. Koekohteessa käytetty ohjaamo oli varustettu



suhteellisen edistyksellisellä tekniikalla, ts. siinä oli erillinen ilmastointilaitte, jolla voitiin hallita ohjaamon lämpöolosuhteista. Varsinainen ilmanvaihto oli toteutettu erillisellä koneella, joka ottaa raitisilman ohjaamon kyljessä olevan suodattimen kautta ja puhaltaa puhdistetun ilman puhallussuuttimien kautta ohjaamoon.



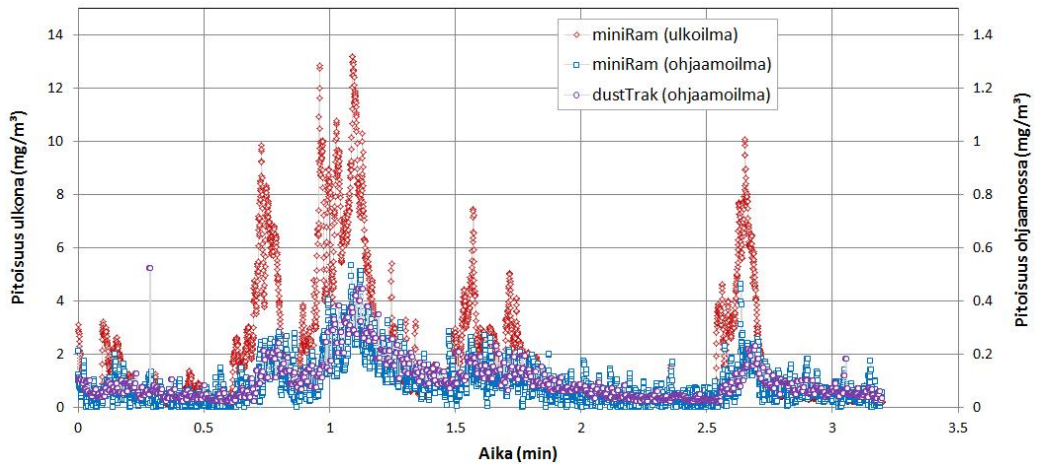
Kuva 20. Haketuskoneen ohjaamo.



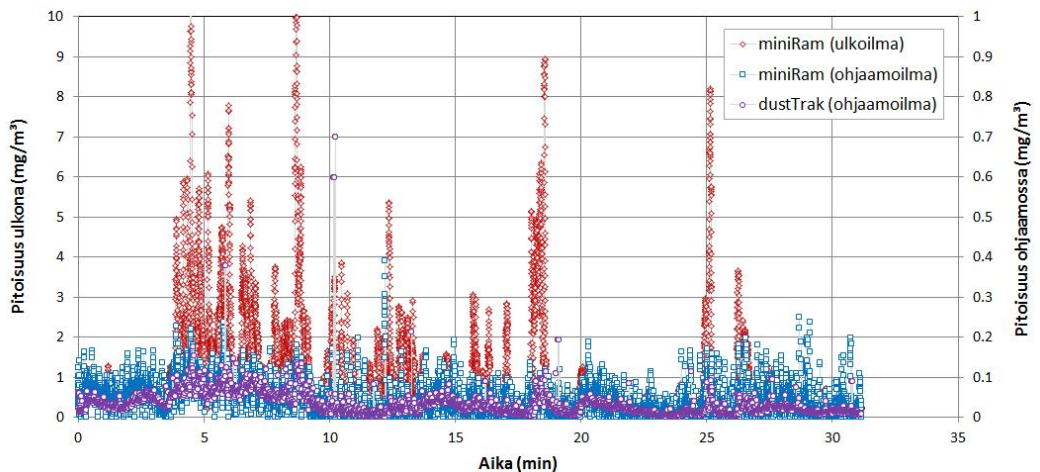
Kuva 21. Ilman sisäänotto ja sisäänpuhallus. Haketuskoneen ohjaamo.

Ohjaamon ilmanvaihdon vaikutusta hiukkaspitoisuuksiin tutkittiin optisilla hiukkasmonitoreilla, joita oli kaikkiaan kolme kappaletta. Ohjaamon ulkopuolella vallitsevaa hiukkaspitoisuutta mitattiin MinRam-hiukkasmonitorilla ja ohjaamon sisällä vallitsevaa pitoisuutta mitattiin toisella samanlaisella MiniRam-monitorilla sekä DuistTrak-monitorilla. DustTrak-monitori oli varmistamassa mittausten onnistumista, koska MiniRam-laitteen mittausherkkyyden riittävydestä ei oltu varmoja ennen kokeiden aloittamista. Oheisissa kuvissa (Kuva 22 ja Kuva 23) esitetyt mittaustulokset osoittavat, että ohjaamoilman hiukkaspitoisuus oli vähemmän kuin 5 %

vastaavasta pitoisuudesta ohjaamon ulkopuolella. Tämän perusteella voitiin arvioida, että ohjaamon suojauskerroin kyseisissä olosuhteissa oli yli 20.



Kuva 22. Hiukkaspitoisuudet ulkona/ohjaamossa. (Huom. ohjaamoilman pitoisuutta koskeva asteikko kuvan oikeassa reunassa.)



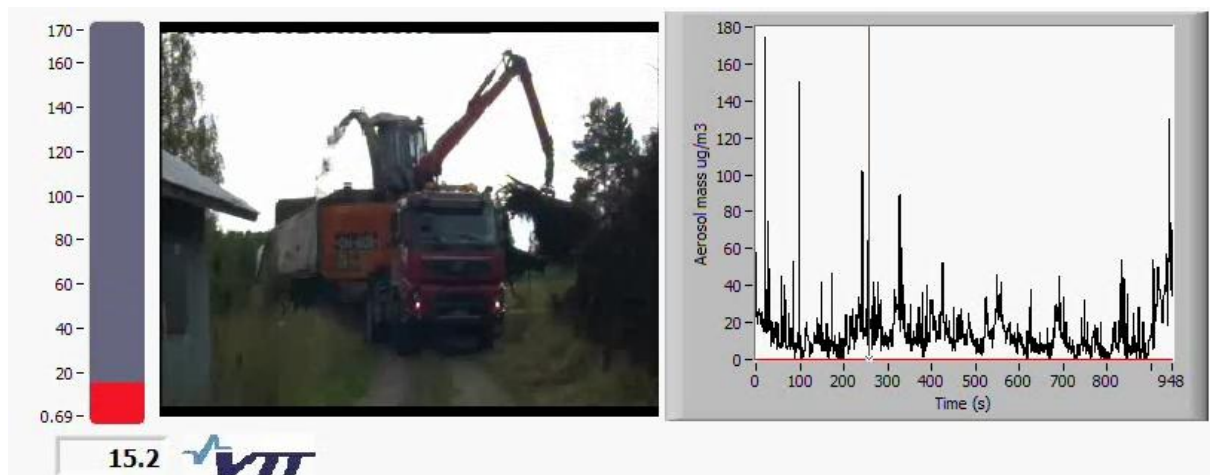
Kuva 23. Hiukkaspitoisuudet ulkona/ohjaamossa. (Huom. ohjaamoilman pitoisuutta koskeva asteikko kuvan oikeassa reunassa.)

Mittaustulosten perusteella saatua suojauskerrointa voitaneen pitää tyydyttävänä ja tasona, johon käytössä olleella tekniikalla on mahdollista päästä. Oma kysymyksensä on, riittääkö tämä suojaustaso varmistamaan turvalliset olosuhteet myös mikrobien osalta. On hyvin todennäköistä, että olosuhteet voivat vaihdella

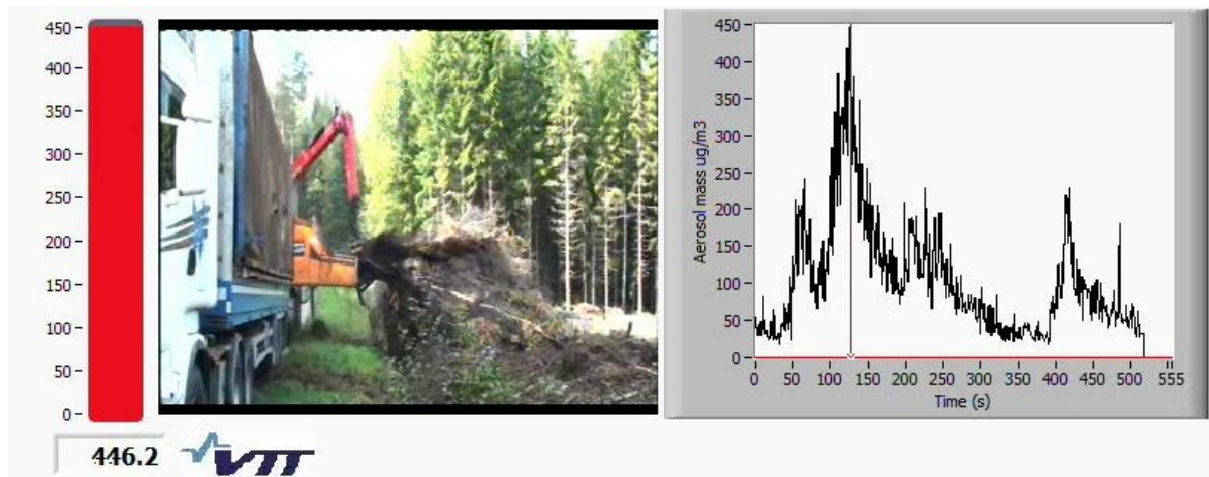


suuresti eri haketuspaikkojen ja hakettavan raaka-aineen osalta. Niinpä turvallinen lähestymistapa on olettaa, että suojaustehokkuus ei välttämättä aina riitä. Toisaalta ohjaamon suojaustehokkuuden oleellinen parantaminen ei ole välttämättä aivan helppoa. Varteenotettava vaihtoehto voisikin olla puhaltimella ja suodattimella varustettu kasvosuojain, jonka työntekijä voisi ottaa käyttöön haketuksen ajaksi. Suojaimen avulla olisi mahdollista aikaansaada suojaus, jonka suojauskerroin olisi helposti vähintään samaa tasoa kuin ohjaamon suojaustehokkuus. Tällöin kokonaissuojaustehokkuus saataisiin tasolle  $>400$ .

Kenttämittauksissa käytettiin myös hiukkasmittausdataa ja videokuvan yhdistävää PC-Pimex-mittausmenetelmää. Menetelmässä yhdistetään PC:lle tallentuva mittausdata (DustTrak) ja videokuva. Videokuva tallentuu pakattuna suoraan tietokoneen kovalevylle ja mittausdata tallentuu erilliseen tekstitiedostoon. Tallenteesta saadaan helposti selville eri toimintojen ja mitatun signaalin riippuvuus. Mittausmenetelmää käytetään yleisesti henkilöiden altistumismittauksissa. Seuraavissa kuvissa (Kuva 24 ja Kuva 25) on esitetty kuvankaappaukset tehdyistä PC-Pimex-tallenteista. Kuvien datanäytössä on esitetty hiukkaspitoisuus ohjaamon sisältä.



Kuva 24. Haketusmittaus kohteessa Kelkkanen.



Kuva 25. Haketusmittaus kohteessa Nuutajärvi.

### 4.3 Mittaukset hakkeen purkupaikalla

Metsähakkeen käsittelyssä pölyongelmia syntyy varsinaisen haketuksen lisäksi myös purkupaikoilla. Purkupaikan pölyongelmia tutkittiin Naistenlahden voimalassa Tampereella. Metsähakkeen purkupaikkana oli halli, johon hake tuotiin rekka-autoilla ja jossa hake purettiin kaatosuppiloon. Kaatosuppilosta hake siirrettiin sitten kuljettimella varastosäiliöön, josta haketta syötettiin kattilaan. Purkupaikan rakennetta ja olosuhteita on havainnollistettu oheisissa valokuivissa (Kuva 26 ja Kuva 27).

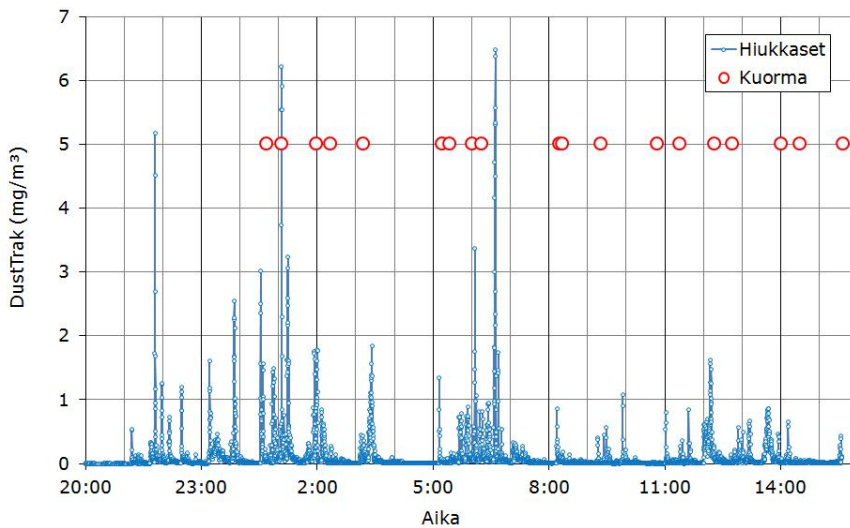


Kuva 26. Hakkeen purkupaikka Naistenlahden voimalaitoksella.



Kuva 27. Hakkeen purkupaikka Naistenlahden voimalaitoksella.

Metsähakekuorman purku tapahtuu nopeasti, ja sen aikana ilmaan vapautuu luonnollisesti suuria määriä pölyä. Purkutilassa vallitsevaa hiukkaspitoisuutta mitattiin optisella hiukkasmittorilla (DustTrak), jonka näyttämä kuvaa karkeasti hiukkasten massapitoisuutta. Laitetta ei tosin ollut kalibroitu kyseiselle pölylle, joten pitoisuusarvoja on pidettävä ainoastaan suuntaa-antavina. Oheisen kuvan (Kuva 28) mittaustuloksista voidaan havaita odotettu tulos: pitoisuudessa esiintyy voimakkaita piikkejä, jotka ajoittuvat yleensä hakekuorman saapumisiin. Mittaustuloksesta voi päätellä, että keskimääräinen pitoisuus on vain pieni murto-osa huippupitoisuuksista.



Kuva 28. Hiukkaspitoisuus purkupaikalla.

Purkupaikan purkutila on toteutettu siten, että henkilöstön altistuminen on voitu minimoida, ts. toimintoja ohjataan erillisestä ohjaamosta, jolloin välitön altistuminen purkuvaiheessa ilmaan vapautuvalle pölylle voidaan estää.

Metsähakkeen purkupaikka tarjosi erinomaiset olosuhteet tutkia hakkeen käsittelyssä ilmaan vapautuvan pölyn vaikutuksia ilman suodatustekniikan kannalta: käytettävissä oli tila, jossa esiintyi pääasiassa hakkeesta vapautuvaa pölyä. Lähistöllä olevalta liikenneväylältä ilmaan vapautui myös pakokaasua sekä tiepölyä, mutta niiden vaikutus oletettiin mitättömäksi, koska purkutilanteissa ilmaan vapautuneet hiukkasmäärät olivat hyvin suuria. Purkusuppilon välittömään läheisyyteen "siivottiin" alue koelaitteistoja varten (Kuva 29 ja Kuva 30). Kyseinen paikka sijaitsi purkutilan poistoilma-aukon välittömässä läheisyydessä, joten laitteisto voitiin asentaa muodostuvan pölyn todennäköisen kulkureitin välittömään läheisyyteen.



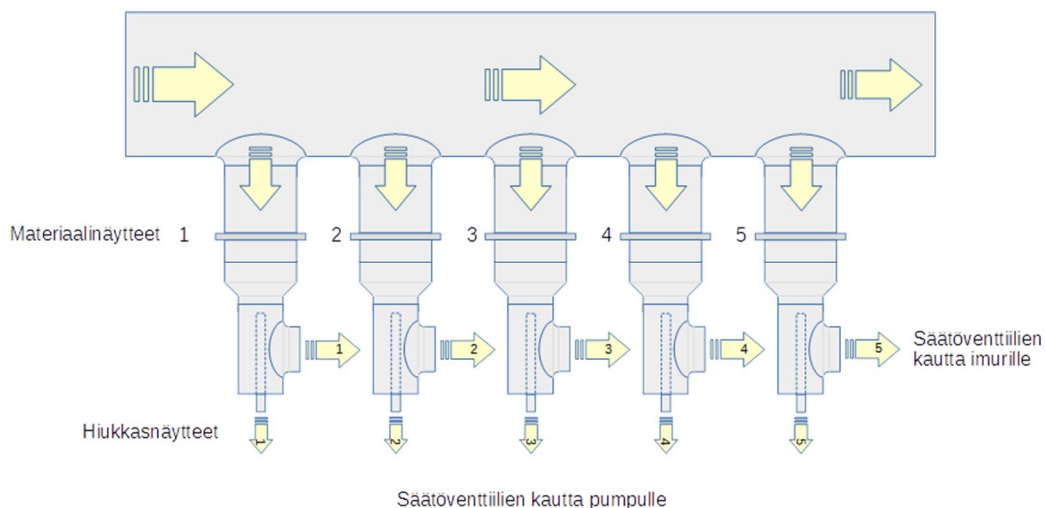
Kuva 29. Mittauslaitteiston asennus Naistenlahden voimalaitokselle.



Kuva 30. Mittauslaitteiston asennus Naistenlahden voimalaitokselle.

Metsähakkeen purkupaikan välittömään läheisyyteen asennettiin suodatinmateriaalien mittauslaitteisto (ks. Kuva 31). Tämä laitteisto oli periaatteeltaan samanlainen eräissä aiemmissa suodatintutkimuksissa käytettyjen laitteiden kanssa. Lait-

teistoon kuului virtauskanava, jonka läpi järjestettiin haluttu ilmavirtaus ja johon oli kiinnitetty viisi näytteenottolinjaa siten, että kuhunkin linjaan voitiin asentaa halkaisijaltaan 160 mm suodatinnäyte. Suodatinmateriaalit oli kiinnitetty kahden laipan väliin siten, että näytteiden kuljetukset koepaikalle ja takaisin, kiinnitys koelaitteistoon sekä kiinnitys laboratorion mittausteistoihin voitiin tehdä luotettavasti. Laitteiston perusideana oli, että virtauskanavan ilmavirta oli huomattavasti suurempi kuin näytteenottolinjoihin menevien virtausten yhteismäärä. Tällä järjestelyllä varmistettiin se, että kuhunkin näytteenottolinjaan saatiin mahdollisimman tarkoin samanlaiset olosuhteet. Näytteenottolinjojen ilmavirrat säädettiin venttiilien avulla haluttuihin arvoihin.



Kuva 31. Suodatinmateriaalin mittausteistön periaate.

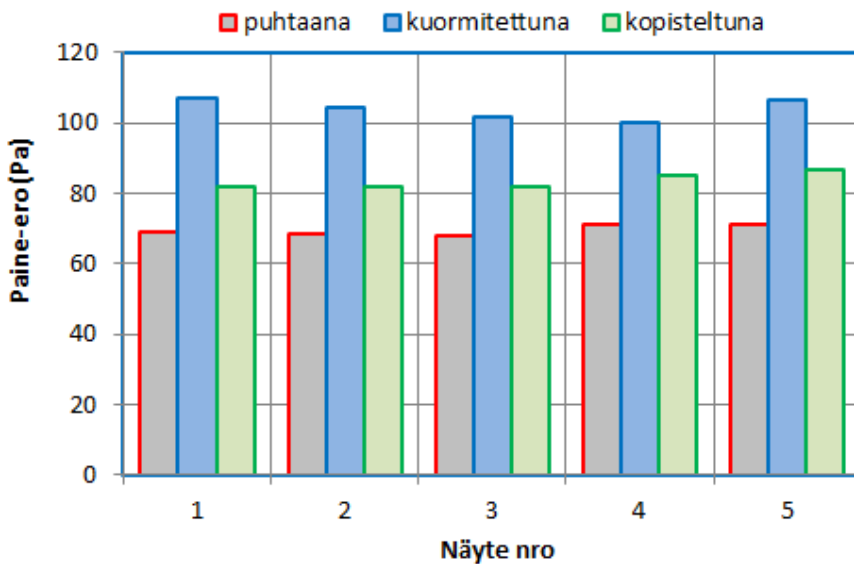
Materiaalinäytteet kiinnitettiin kiinnityslaippojen väliin ja tällä tavoin muodostetut suodatinyksiköt kiinnitettiin sitten koelaitteistoon, jossa niitä käytettiin niin pitkään, että materiaalien voitiin olettaa kuormittuneen riittävästi. Kuormitusjakson jälkeen suodatinyksiköt (Kuva 32) kuljetettiin laboratorioon punnitus- ja puhdistuvuusmittauksiin. Näissä mittauksissa määritettiin kuormituksesta aiheutunut suodatinmateriaalin paine-eron kasvu, minkä jälkeen suodattimien puhdistuvuutta testattiin kopistamalla kertynyt pöly mekaanisesti. Tämän jälkeen suodattimien paine-erot määritettiin uudelleen, jolloin saatiin tietoa suodatinmateriaalin puhdistuvuudesta.





Kuva 32. Materiaalinäytteet kuormitusjakson jälkeen.

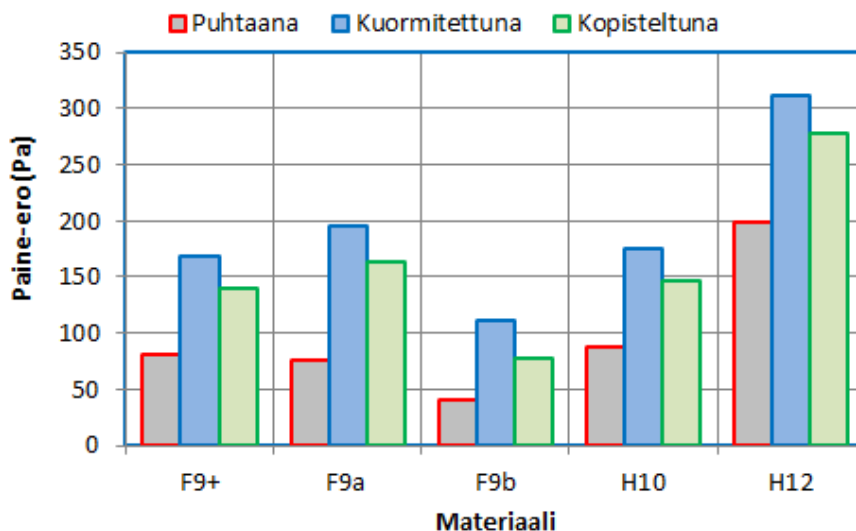
Ennen varsinaisia kuormituskokeita laitteiston toimivuus varmistettiin kokeella, jossa kaikkiin viiteen suodatinyksikköön asennettiin samanlainen suodatinmateriaali. Tästä kokeesta saadut tulokset (Kuva 33) osoittivat, että laitteisto toimi odotetusti, ts. kaikki suodatinyksiköt kuormittuivat käytännössä samalla tavalla. Tästä kokeesta saatu tulos havainnollistaa tilanteelle tyypillistä käyttäytymistä, ts. suodatinmateriaalin paine-ero (virtausvastus) ei palaudu kopistelemalla lähtötasolle, mikä kertoo, että suodatinmateriaaliin on kiinnittynyt hiukkasia niin tiukasti, että siihen on muodostunut käytännössä pysyvä paine-eron kasvu.



Kuva 33. Materiaalien kuormitus (toistettavuus).

Tutkimuksen kohteina olleet suodatinmateriaalit poikkesivat ominaisuuksiltaan kuten oheinen kuva (Kuva 34) osoittaa. Kuormituksen aiheuttama paine-eron

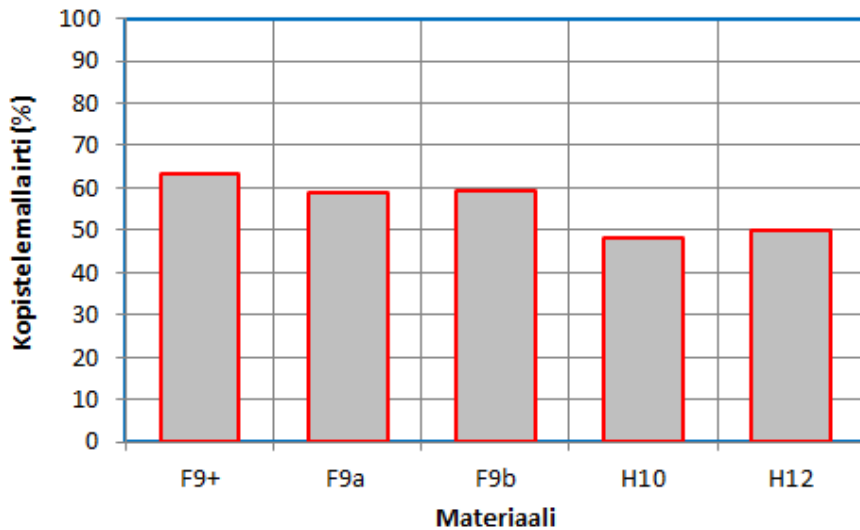
kasvu näyttää noudattavan selkeää trendiä, ts. pieni alkupainehäviö ”ennustaa” alemmaa loppupainehäviötä. Oleellisin seikka näissä tuloksissa on kuitenkin se, että kaikkien suodatinmateriaalien puhdistuvuus on vaatimattomalla tasolla.



Kuva 34. Suodatinmateriaalien paine-erot.

Suodattimien punnitustulokset kertoivat, että F9-merkinnällä varustetuista materiaaleista irtosi noin 60 % kertyneestä pölystä, kun taas H10- ja H12-merkinnöillä varustetuista suodattimista pölyä irtosi noin 50 % (Kuva 35). Tämä oli jossain määrin yllättävä tulos, koska irtoavan pölyn määrä ennakoitiin suuremmaksi johtuen metsähakkeen käsittelyssä syntyvän pölyn karkeajakaisuudesta.

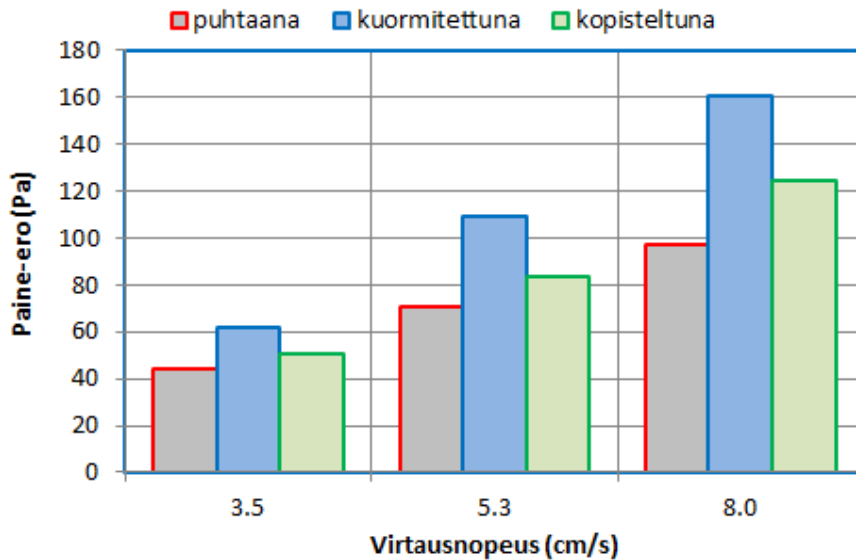
Huomattavaa on myös se, että puhdistettaessa suodatinmateriaalien paine-ero aleni suhteessa vähemmän kuin suodatinmateriaalilla kerätyn pölyn massa. Tämä havainto vahvistaa sitä olettamusta, että suodatinmateriaalin sisään jäävä pöly on vaikea poistaa ja että juuri suodatinmateriaalin sisään kertyvä hienojakoinen pöly nostaa merkittävästi suodattimen painehäviötä.



Kuva 35. Kopistelemalla irronneen pölyn osuus.

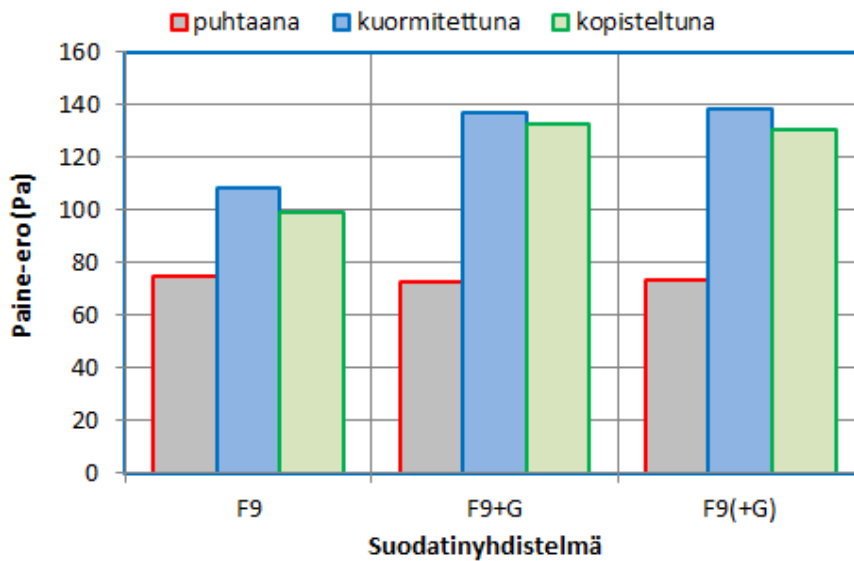
Suodatinmateriaalin läpi virtaavan ilman nopeuden (otsapintanopeuden) vaikutusta tutkittiin kokeessa, jossa käytettiin kolmea samanlaista materiaalinäytettä, mutta siten, että virtausnopeudet olivat 3,5, 5,3 ja 8,0 cm/s. Tulokset (Kuva 36) osoittivat odotetusti, että lähtöpainehäviöt ovat sidoksissa virtausnopeuksiin, ts. suuri nopeus merkitsee myös suurta alkupainehäviötä. Tulokset havainnollistavat myös sen, että suurempi virtausnopeus merkitsee nopeampaa suhteellista paine-eron kasvua, mutta tämän ilmiön vaikutus oli ehkä odotettua vähäisempi. Kopistelukoikeiden tulosten perusteella ei voitu tehdä johtopäätöksiä virtausnopeuden mahdollisesta vaikutuksesta suodattimen puhdistuvuuteen.





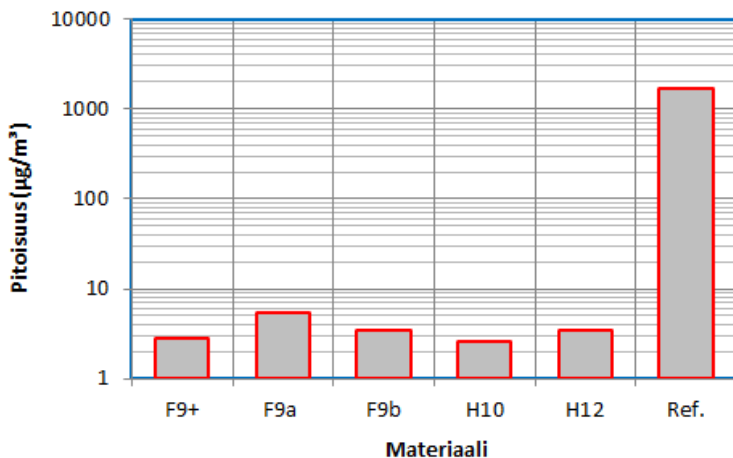
Kuva 36. Virtausnopeuden vaikutus.

Mittauksilla pyrittiin selvittämään myös mahdollisen esisuodatuksen vaikutusta suodatinmateriaalin paine-eron kasvuun ja puhdistuvuuteen. Mittaustulokset (Kuva 37) eivät vastanneet ennakko-odotuksia, ts. esisuodattimen käyttö ei suojannut varsinaista suodatinmateriaalia paine-eron kasvulta. Itse asiassa tulokset osoittivat aivan vastakkaista käyttäytymistä, ts. esisuodattimen kanssa suodatinmateriaalin paine-ero kasvoi nopeammin kuin pelkän suodatinmateriaalin tapauksessa. Tämän ilmiön selittäminen ei ole aivan helppoa, mutta todennäköinen syy on se, että suodatinmateriaalin pinnalle syntyvä karkean pölyn kerros toimii edullisemmin kuin esisuodatinmateriaali. Esisuodatinmateriaali poistaa virtauksesta karkean pölyn, jolloin suodatinmateriaali altistuu ”hienojakoisemmalle” pölylle, mistä aiheutuu nopeampi paine-eron kasvu. Tämän tuloksen perusteella esisuodatuksen käytöstä ei ole välttämättä apua pyrittäessä lisäämään suodattimen tehokasta käyttöaikaa.



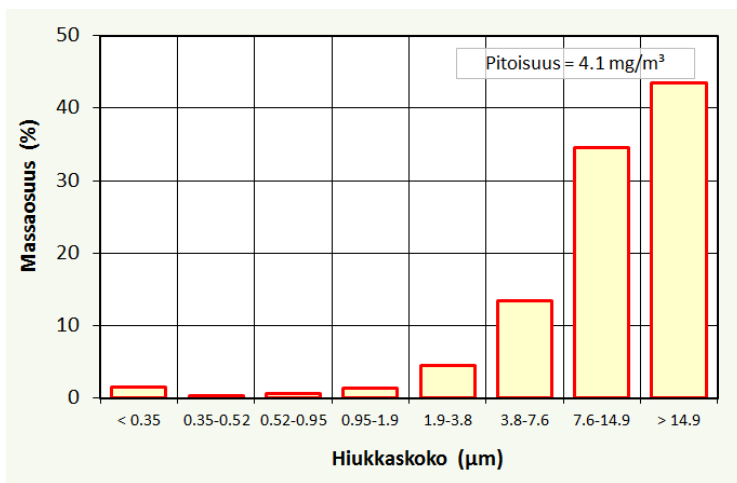
Kuva 37. Esisuodatuksen vaikutus suodatinmateriaalin paine-eron kasvuun.

Metsähakkeen purkukohteessa tehdyissä mittauksissa määritettiin myös suodatinmateriaalien tehokkuus kohteessa vallitsevalle pölylle. Tulokset (Kuva 38) osoittavat, että suodatetun ilman hiukkaspitoisuudet massan suhteen ovat yli kaksi kertaluokkaa alempi kuin suodattamattoman ilman hiukkaspitoisuus. Kyseisten materiaalien erotuskyky on riittävä täyttämään standardin EN 15695 massaerostusastevaatimuksen 99 %.



Kuva 38. Hiukkaspitoisuudet materiaalinäytteiden jälkeen (Ref.=suodattamaton ilma).

Hakkeen purkupaikalta mitattu hiukkaskokojakauma (Kuva 39) osoittaa, että pöly koostuu suurelta osin hyvin karkeajakoisesta pölystä. Tässä jakaumassa eivät todennäköisesti ole vaikuttamassa muut hiukkasepäpuhtaudet (esim. diesel-pakokaasu), ja on mahdollista, että kuormasta otetun hakkeen pölyävyysominaisuudet eivät enää ole samanlaiset kuin haketusvaiheessa. On oletettavaa, että ainakin osa hienojakoisemmasta pölystä ei päädy kuormaan ja että kuorman purku on huomattavasti hienovaraisempi prosessi kuin haketus. Niinpä ilmaan vapautuva pöly on karkeajakoisempaa.



Kuva 39. Hiukkaskokojakaumat – purkupaikka (Naistenlahti).

## 5. Johtopäätökset

Biopolttoaineiden eri käsittelyvaiheissa esiintyy työntekijän terveydelle haitallisia ilman epäpuhtauksia, jotka kulkeutuvat käsiteltävästä biomassasta työntekijän hengitysilmaan. Hakkeen käsittelyssä ilmaan vapautuvien epäpuhtauksien hallinnassa ensisijainen ratkaisu on tehokkaasti ja luotettavasti toimiva ohjaamo. Hankalimmat ja pölyävimmät työvaiheet voidaan yleensä toteuttaa ohjaamosta käsin ilman, että työntekijä joutuisi altistumaan suoraan haketusprosessissa syntyville epäpuhtauksille.

Haketettavan puuaineksen kosteus ja vallitsevat sääolot, kuten tuulen suunta haketus koneen ja muiden ajoneuvojen sijoitteluun nähden, vaikuttavat merkittävästi pölypitoisuuteen. Hakkeen valmistamisen ja käsittelyn yhteydessä esiintyvä pöly on pääosin karkeaa ja näin ollen suodatuksen kannalta suhteellisen helppoa erottaa ohjaamon tuloilmasta.

Tehokkaan suodatuksen lisäksi työntekijän suojauksen kannalta oleellisia seikkoja ovat ohjaamon ylipaine ja tiiveys, joihin vaikuttaa ratkaisevasti lämpöolosuhteiden hallinta. Ohjaamon ikkunat tulisi pitää aina suljettuina ylipaineen ja vuotojen eliminoimiseksi. Tämä edellyttää koneellisen jäähdytyksen hyödyntämistä lämpimissä sääolosuhteissa. Sisälähteiden eliminoimiseksi ohjaamon puhtaanapito on tärkeää, sillä työntekijän mukana ohjaamoon voi kulkeutua mm. mikrobiologisia epäpuhtauksia.

Käytännössä haketustyötä tekevät henkilöt osaavat asemoida työkoneet pölyn leviämisen kannalta edullisesti. Kaikissa tilanteissa tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, ja niinpä erityisesti tuulen alapuolelle sijoittuvan (kuljetusauton) ohjaamon tulisi täyttää tiukat suojausvaatimukset.

Hankkeen kokemusten perusteella niissä kohteissa, joissa käytetään ajanmukaista kalustoa, tilanne pölypitoisuuden suhteen on kohtalaisen hyvä. Vaikka ohjaamo toimii normaalisti, sen suojauskerroin ei kuitenkaan välttämättä ole riittävä suojaamaan työntekijää biologisilta altisteilta. Lisäsuojausta on mahdollista toteuttaa kierrättävän ilmanpuhdistinlaitteen tai hengityssuojainmaskin/kohdepuhalluksen avulla. Ohjaamoissa olisi myös hyvä olla ylipaineen seurantalaitte, joka kertoo, onko ohjaamo ilmanvaihde teknisesti kunnossa.

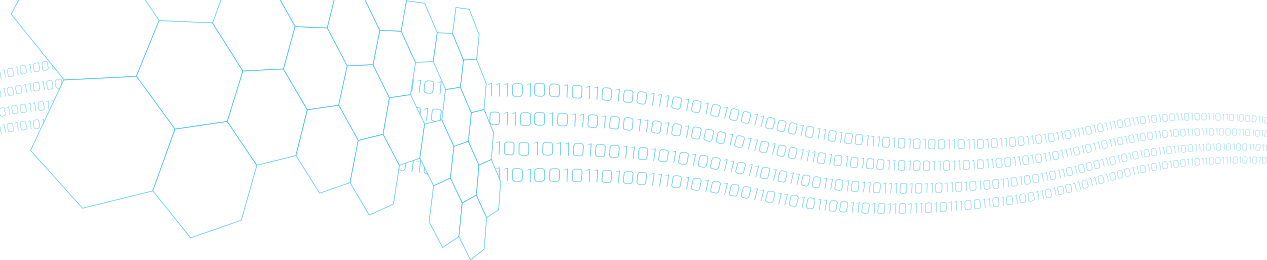
Tehokkaiden suodattimien valmistamiseen soveltuvia materiaaleja on nykyään tarjolla. Käytännössä merkittävämpi ongelma on suodattimen riittävä pölykapasiteetti. Suodatin tulisikin mitoittaa siten, että siinä on riittävästi pinta-alaa, jolloin

myös puhdistus/vaihtoväli on riittävän pitkä. Suodattimen helppo huollettavuus koneissa on erittäin tärkeää samoin kuin koneen käyttäjien aktiivisuus suodattimen huollossa.

## 6. Lähdeviitteet

- Ajanko S. ja Fagnäs L. 2006. Uusien biopolttoaineiden käsittelyn työhygieeniset riskit. Tutkimusraportti Nro VTT-R-00358-06. Teknologian tutkimuskeskus VTT, Espoo. 46 s.
- Ajanko-Laurikko S. 2009. Ruokohelven, kantojen ja risutukkien käsittelyketjujen terveysriskit ja torjuntatoimet. Tutkimusraportti Nro VTT-R-08773-08. Teknologian tutkimuskeskus VTT, Espoo. 34 s.
- EN 15695. 2009. Agricultural tractors and self-propelled sprayers – Protection of the operator (driver) against hazardous substances.
- Heinonen K., Taipale A. ja Niemeläinen M. 1998. Työkoneohjaamoiden raitisilman suodatuslaite. VTT Raportti VALB354. VTT, Espoo.
- Laitinen S., Rytönen E., Jumppanen M. ja Ojanen K. 2014. Työympäristöriskien hallinta tienvarsihaketuksessa. Työterveyslaitos, Helsinki. 40 s.
- Lääkintöhallitus. 1990. Asuntojen kuntoa ja hoitoa koskeva opas. Lääkintöhallitus, Rauma.

Nimeke	<b>Tekniset torjuntatoimenpiteet metsäbiomassojen käsittelyn terveysvaarojen vähentämiseksi</b>
Tekijä(t)	Matti Lehtimäki, Aimo Taipale, Tapio Kalliohaka & Matti Niemeläinen
Tiivistelmä	<p>Biopolttoaineiden eri käsittelyvaiheissa esiintyy työntekijän terveydelle haitallisia ilman epäpuhtauksia, jotka kulkeutuvat käsiteltävästä biomassasta työntekijän hengitysilmaan. Kun käsitellään haketta, ensisijainen ratkaisu ilmaan vapautuvien epäpuhtauksien hallinnassa on tehokkaasti ja luotettavasti toimiva ohjaamo.</p> <p>Tehokkaan suodatuksen lisäksi työntekijän suojauksen kannalta oleellisia seikkoja ovat ohjaamon ylipaine ja tiiveys, joihin vaikuttaa ratkaisevasti lämpöolosuhteiden hallinta. Ohjaamon ikkunat tulisi pitää aina suljettuina ylipaineen ja vuotojen eliminoimiseksi. Ohjaamon puhtaanapito on tärkeää sisälähteiden eliminoimiseksi, sillä työntekijän mukana ohjaamoon voi kulkeutua mm. mikrobiologisia epäpuhtauksia.</p> <p>Työkoneiden asemoinnin suhteen on tärkeää, että erityisesti tuulen alapuolelle sijoittuvan (kuljetusauton) ohjaamo täyttää tiukat suojausvaatimukset. Vaikka ohjaamo toimii normaalisti, sen suojauskerroin ei kuitenkaan välttämättä ole riittävä suojaamaan työntekijää biologisilta altisteilta. Lisäsuojausta on mahdollista toteuttaa kierrättävän ilmanpuhdistinlaitteen, hengityssuojainmaskin tai kohdepuhalluksen avulla. Ohjaamoissa olisi myös hyvä olla ylipaineen seurantalaitte, joka osoittaa, onko ohjaamo ilmanvaihtoteknisesti kunnossa. Käytännössä merkittävä ongelma on suodattimen riittämätön pölykapasiteetti. Suodatin tulisi mitoitaa siten, että siinä on riittävästi pinta-alaa, jolloin myös puhdistus- tai vaihtoväli on riittävän pitkä. Suodattimen helppo huollettavuus koneissa on erittäin tärkeää samoin kuin koneen käyttäjien aktiivisuus suodattimen huollossa.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8490-1 (nid.) ISBN 978-951-38-8489-5 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/julkaisut">http://www.vtt.fi/julkaisut</a> ) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (Painettu) ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu) <a href="http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8489-5">http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8489-5</a>
Julkaisu-aika	Joulukuu 2016
Kieli	Suomi
Sivumäärä	45 s.
Projektin nimi	Risutukki
Rahoittajat	Työsuojelurahasto, MELA, Valtra ja VTT
Avainsanat	Bioenergia, työturvallisuus, ilmansuodatus
Julkaisija	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111



## **Tekniset torjuntatoimenpiteet metsäbiomassojen käsittelyn terveysvaarojen vähentämiseksi**

Biopolttoaineiden eri käsittelyvaiheissa esiintyy työntekijän terveydelle haitallisia ilman epäpuhtauksia, jotka kulkeutuvat käsiteltävästä biomassasta työntekijän hengitysilmaan. Kun käsitellään haketta, ensisijainen ratkaisu ilmaan vapautuvien epäpuhtauksien hallinnassa on tehokkaasti ja luotettavasti toimiva ohjaamo.

Tehokkaan suodatuksen lisäksi työntekijän suojauksen kannalta oleellisia seikkoja ovat ohjaamon ylipaine ja tiiveys, joihin vaikuttaa ratkaisevasti lämpöolosuhteiden hallinta. Ohjaamon ikkunat tulisi pitää aina suljettuina ylipaineen ja vuotojen eliminoimiseksi. Ohjaamon puhtaanapito on tärkeää sisälähteiden eliminoimiseksi, sillä työntekijän mukana ohjaamoon voi kulkeutua mm. mikrobiologisia epäpuhtauksia.

Työkoneiden asemoinnin suhteen on tärkeää, että erityisesti tulen alapuolelle sijoittuvan (kuljetusauton) ohjaamo täyttää tiukat suojausvaatimukset. Vaikka ohjaamo toimii normaalisti, sen suojauskerroin ei kuitenkaan välttämättä ole riittävä suojaamaan työntekijää biologisilta altisteilta. Lisäsuojausta on mahdollista toteuttaa kierrättävän ilmanpuhdistinlaitteen, hengityssuojainmaskin tai kohdepuhalluksen avulla. Ohjaamoissa olisi myös hyvä olla ylipaineen seurantalaitte, joka osoittaa, onko ohjaamo ilmanvaihtoteknisesti kunnossa.

Käytännössä merkittävä ongelma on suodattimen riittämätön pölykapasiteetti. Suodatin tulisikin mitoittaa siten, että siinä on riittävästi pinta-alaa, jolloin myös puhdistus- tai vaihtoväli on riittävän pitkä. Suodattimen helppo huollettavuus koneissa on erittäin tärkeää samoin kuin koneen käyttäjien aktiivisuus suodattimen huollossa.

ISBN 978-951-38-8490-1 (nid.)  
ISBN 978-951-38-8489-5 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)  
ISSN-L 2242-1211  
ISSN 2242-1211 (Painettu)  
ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8489-5>