



Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan  
ja biolietteen käsittely  
metsälannoitteeksi

VTT Energian raportteja 10/2001

Tuulikki Lindh  
Saara Isännäinen  
Hannu Mursunen

VTT Energia  
PL 1603, 40101 Jyväskylä  
puh. (014) 672 611, telefax (014) 672 597

Pirjo-Riitta Rantala  
Susanna Ollila

Pirkanmaan ympäristökeskus  
Rautatiekatu 21 B  
PL 297, 33101 Tampere  
puh. (03) 2420111, telefax (03) 242 0567

Seppo Kaunisto

Metsäntutkimuslaitos  
Kaironiementie 54  
39700 Parkano  
puh. (03) 44351, telefax (03) 4435200

Toukokuu 2001

ISSN 1457-3350

VTT Energian raportteja 10/2001

<b>Suorittajaorganisaatio ja osoite</b> VTT Energia PL 1603 40101 Jyväskylä  <b>Vastuunalainen johtaja / projektipäällikkö</b> Saara Isännäinen / Tuulikki Lindh e-mail: Saara.Isannainen@vtt.fi / Tuulikki.Lindh@vtt.fi <b>Asiasanat</b> Rakeistus, bioliete, tuhka, metsälannoite, metsäteollisuus	<b>Raportin numero</b> VTT Energian raportteja 10/2001  <b>VTT:n diaarinumero</b>  <b>Asiakkaan tilausnumero</b> Tekesin päätös Nro 40827/99, 62/401/99		
<b>Projektin nimi ja projektinumero</b> Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan ja biolietteen käsittely metsälannoitteeksi 23Tuhliete, N9SU00384	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="788 624 1241 768"> <b>Raportin sivumäärä</b>  57 s. + liitt. 8 s </td> <td data-bbox="1246 624 1417 768"> <b>Päiväys</b>  26.5.2001 </td> </tr> </table>	<b>Raportin sivumäärä</b> 57 s. + liitt. 8 s	<b>Päiväys</b> 26.5.2001
<b>Raportin sivumäärä</b> 57 s. + liitt. 8 s	<b>Päiväys</b> 26.5.2001		
<b>Raportin nimi ja kirjoittajat</b> Lindh, T. , Isännäinen, S., Mursunen, H., Rantala, P.-R., Ollila, S. ja Kaunisto, S. <b>Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan ja biolietteen käsittely metsälannoitteeksi</b>			
<b>Tiivistelmä</b> Tavoitteena on kehittää teknistaloudellisesti hyvä rakeistusmenetelmä puuperäisen tuhkan ja biolietteen prosessointiin lannoiterakeiksi ja toimintamalli rakeiden metsälevitykselle. Pyörittäväan rakeistukseen perustuva menetelmä oli tutkituista menetelmistä paras. Sekä pienellä että isolla betoninsekoittajalla tuotettiin lietettä runsaasti sisältäviä, tuhkalla kuorrutettuja rakeita, jotka todettiin kohtuullista käsittelyä kestäviksi. Lisäravinteiden annostelu prosessiin on myös mahdollista. Rakeita voidaan varastoida hyvin ulkoilmassa lyhytaikaisesti (muutama viikko–joitakin kuukausia), mielellään kuitenkin katetussa tilassa. Tuhkien laatu (kalsiumin määrä) vaikuttaa rakeistumiseen. Rakeiden tuotannon ja metsään toimittamisen kustannukset olivat laskelmien mukaan 110 –120 mk/t rakeita 50 km:n etäisyydelle kuljetettuna. Säästö verrattuna biolietteen tämänhetkiseen kaatopaikalle vientiin on huomattava. Kaatopaikkakustannukset tulevat vielä nousemaan lähiaikoina. Taloudelliset edut ovat vielä suuremmat, jos laskelmiin otetaan mukaan myös oletettu rakeiden lannoitusvaikutuksesta lisääntynyt puunkasvu kasvihuonekokeiden hyvien tulosten antamien viitteiden perusteella. Koko Suomen mittakaavassa metsäteollisuuden tuhkan ja biolietteen ravinteiden metsään palautuksella on huomattava kansantaloudellinen merkitys.  Sadetuskokeissa ei voitu selvästi todeta ravinteiden tai raskasmetallien haitallista huuhtoutumista. Tulokset tulee jatkossa kuitenkin varmistaa kenttäkokeilla, joissa huomioidaan myös pintavalunta. Koivuntaimien lannoittaminen rakeilla kasvihuonekokeissa oli yhtä tehokasta kuin keinolannoitteilla lannoittaminen. Sekä sadetus- että kasvatuskokeissa ilmeni, että biolietteessä oleva tyyppi liukenee melko nopeasti. Hidasliukoisesta lisätypestä voi olla hyötyä pitkäaikaisen lannoitusvaikutuksen kannalta. Rakeistustekniikan ja toimintamallin käytäntöön soveltamisessa tulee kehitystyötä jatkaa tehdasympäristössä kapasiteetiltaan tuotantokäyttöön soveltuvilla laitteistoilla. Tällöin saadaan myös riittävästi raaka-ainetta kokeisiin, joilla varmistetaan tuhka-biolietterakeiden vaikutukset metsänkasvuun ja rakeiden ravinteiden huuhtoutumiskäyttäytyminen myös käytännössä.			
<b>Jakelu:</b> VTT Energia, kirjasto, PL 1603, 40101 Jyväskylä, puh. 014 - 672556, faksi 014 – 672 597,			
<b>Raportin päävastuullinen laatija</b>  Tuulikki Lindh	<b>Tarkastanut</b>  Ryhmäpäällikkö Pentti Pirkonen		
<b>Hyväksynyt</b>  Tutkimuspäällikkö Seppo Viinikainen	<b>Julkisuus</b> julkinen		

Lindh, T., Isännäinen, S., Mursunen, H., Rantala, P.- R., Ollila, S. ja Kaunisto S. **Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan ja biolietteen käsittely metsälannoitteeksi**, VTT Energian raportteja 10/2001 - **Processing of wood ash and biosludge from pulp and paper industry for forest fertilizer**, VTT Energy Reports 10/2001 , Jyväskylä 2001, 57 s./p. + liitt./app. 8 p.

**Keywords:** Agglomeration, biosludge, ash, forest fertilization, pulp and paper industry  
**UDK-classification:**

## ABSTRACT

The aim of the project is to develop a technical and economical method for processing wood ash and biosludge of pulp and paper industry for forest fertilizer.

The rotating method was the best of agglomeration methods studied for processing different biosludge and ash mixtures to granules. Both in small and large scale concrete mill was produced granules in which were a large amount of biosludge and which were covered by self-hardened ash. It is possible to add also extra nutritions into the process. Agglomerates had quite a good handling hardness. Storing durability would be appropriate (many weeks – some months) if agglomerates would be stored outdoors under a roof in heaps or in paper sacks. The quality of ash (especially the amount of calcium in ash) effects to the agglomeration. The estimated costs of the agglomerating process and transport of granules to forest are 110 – 120 FIM/ ton when transport distance is 50 km. Savings compared to situation when the biosludge is taken to dumping place is significant. Savings are more considerable, if it is taken into account the growth of wood, too. It means also a significant economical value scale in Finland when nutrients of biosludge and ash will be returned to forest.

Leaching of nutrients and heavy metals from different types of sludge/ash granules were studied using an experimental irrigation setup. The results showed that only a minor part of the nutrients and heavy metals dissolved in the infiltrated water. Most of the dissolution took place during the first irrigation day. In this study there was no surface runoff. In green house studies fertilization effect of biosludge-ash granules to saplings of birch was in same level with fertilization effect of artificial fertilizers. It could be useful to add the slowly dissolving extra nitrogen into granules for long term forest fertilization effect.

R& D work should carried out in pulp and paper mill conditions by full scale equipments. The sufficient amount of granules could be produced for studying the effects of granules to growth of wood and to dissolving behaviour of granules in practice.

## ALKUSANAT

Raportissa on käsitelty esitutkimuksen ”Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan ja biolietteen käsittely metsälannoitteeksi” tulokset. Tutkimuksen tavoitteena on kehittää taloudellinen ja tehokas rakeistusmenetelmä tuhkan ja biolietteen prosessointiin lannoiterakeiksi ja toimintamalli rakeiden toimitukseen metsään.

Tutkimuksen johtoryhmään ovat kuuluneet DI Juhani Poukari (johtoryhmän puheenjohtaja) Kemira Agro Oy:sta, teknologia-asiantuntija Jerri Laine (vuonna 1999) ja teknologia-asiantuntija Jukka Leppälahti (vuonna 2000) Teknologian kehittämiskeskuksesta (Tekes), toimitusjohtaja Kaj Karlsson ja metsätalousinsinööri Vilho Pollari Metsämannut Oy:sta, MML Antti Korpilahti Metsäteho Oy:sta, professori Seppo Kaunisto Metsäntutkimuslaitoksesta, DI Pirjo-Riitta Rantala Pirkanmaan ympäristökeskuksesta, ryhmäpäällikkö Ari Erkkilä, tutkija Saara Isännäinen ja tutkija Tuulikki Lindh (johtoryhmän sihteeri) VTT Energiasta.

Tutkimuksen vastuunalaisena johtajana on toiminut Saara Isännäinen ja projektipäällikkönä Tuulikki Lindh. Projektiin ja sen raportointiin ovat osallistuneet VTT Energiasta Tuulikki Lindh, Saara Isännäinen, tutkimusinsinööri Hannu Mursunen (rakeistustutkimus), tutkimusinsinööri Pertti Frilander (rakeiden liukenevuustutkimus) ja apulaistutkija Pentti Pöyhönen (rakeiden varastointitutkimus) sekä tutkija Hanna Huotari.

Tutkimuksen sisältyneestä rakeiden liukenevuustutkimuksesta ovat vastanneet DI Pirjo-Riitta Rantala ja FM Susanna Ollila, molemmat Pirkanmaan ympäristökeskuksesta. Pirjo-Riitta Rantala on raportoinut tutkimusosuuden raporttiin. Hän on vastannut myös tuhkan ja biolietteen metsälevityksen lainsäädäntöosuuden raportoinnista. Lisäksi hän on osallistunut raportin Lähtökohta -luvun kirjoitukseen. Tuhka-biolietterakeilla lannoitettujen taimien kasvatustutkimuksesta kasvihuoneessa ja tutkimustulosten raportoinnista on vastannut professori Seppo Kaunisto Metsäntutkimuslaitoksesta.

Projekti on toteutettu vuosina 1999 – 2000 ja sen ovat rahoittaneet Tekes, Metsämannut Oy, Kemira Agro Oy ja VTT Energia.

## SISÄLTÖ

1	LÄHTÖKOHTA.....	9
2	TAVOITE .....	10
3	ESIKOKEET ERI RAKEISTUSTEKNIKOILLA .....	11
3.1	KOKEIDEN SUORITUS.....	11
3.2	TULOKSET ERI TEKNIKOILLA.....	12
3.3	ESIKOKEISSA SAATUJEN RAKEIDEN OMINAISUUDET.....	12
3.4	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	14
4	RAKEISTUSKOKEET BETONINSEKOITTAJALLA .....	15
4.1	KOKEIDEN SUORITUS.....	15
4.2	TULOKSET .....	15
4.2.1	Rakeistuminen .....	15
4.2.2	Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet .....	16
4.2.3	Rakeiden kemialliset ominaisuudet .....	18
4.2.4	Johtopäätökset .....	20
5	VARASTOINTIKOKEET.....	20
5.1	KOEJÄRJESTELYT.....	20
5.2	TULOKSET .....	20
5.2.1	Käsittelyominaisuudet .....	20
5.2.2	Homehtuminen .....	23
5.3	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	23
6	KÄYTÄNNÖN MITTAKAAVAN RAKEISTUSKOKEILU.....	23
6.1	TOTEUTUS JA TULOKSET .....	23
6.2	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	24
7	MENETELMÄN TEKNIS-TALOUDELLISTA ARVIOINTIA.....	25
7.1	MENETELMÄN KUVAUS .....	25
7.2	LASKENNAN LÄHTÖKOHDAT .....	26
7.3	TULOKSET .....	27
7.4	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	30

8 LIETTEIDEN JA TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖÄ KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET JA OHJEET (PIRJO-RIITTA RANTALA, PIRKANMAAN YMPÄRISTÖKESKUS).....	30
9 LIUKENEVUUSKOKEET (PIRJO-RIITTA RANTALA JA SUSANNA OLLILA, PIRKANMAAN YMPÄRISTÖKESKUS).....	32
9.1 JOHDANTO.....	32
9.1.1 Tutkimuksen lähtötiedot.....	32
9.1.2 Koejärjestelyt.....	33
9.2 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	36
9.2.1 Kiinteät näytteet.....	36
9.2.2 Vesinäytteet.....	40
9.2.3 Kokeissa ilmenneitä ongelmia.....	44
9.3 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	45
10 MÄNNYN JA KOIVUN TAIMIEN KASVATUSKOKEET KASVIHUONEESSA (SEPPÖ KAUNISTO, METLA).....	46
10.1 TAUSTAA.....	46
10.2 AINEISTO.....	46
10.2.1 Kokeen perustaminen ja koejäsenet.....	46
10.2.2 Aineiston keruu.....	47
10.2.3 Laskenta.....	48
10.3 TULOKSET.....	48
10.3.1 Humuksen pH ja typpi.....	48
10.3.2 Männyn neulasten alkuainepitoisuudet.....	49
10.3.3 Taimien kasvu.....	51
10.4 PÄÄTELMÄT.....	52
11 YHTEENVETO.....	53
12 LÄHDELUETTELO.....	55

# 1 LÄHTÖKOHTA

Metsät ovat Suomen talouden keskeisin luonnonvara. Metsätalousmaita on yhteensä 26,3 miljoonaa hehtaaria. Metsien lannoitus oli 1970- ja 1980-luvuilla vähäistä, mutta lannoituskäytäntö on lisääntynyt viime aikoina. Esimerkiksi vuonna 1993 metsiä lannoitettiin yhteensä noin 4000 ha ja vuonna 1996 jo 17 000 ha. Myös tuhkan käyttö lannoitteena on lisääntynyt viime vuosien aikana. 1930 – 40-luvuilla aloitetut tuhkalannoitustutkimukset osoittavat, että tuhkalla on ollut puuston kasvua lisäävä vaikutus etenkin runsastyyppisillä suopuustoalueilla. Kuitenkaan vähän typpeä sisältävissä kangasmetsissä tuhkalannoituksella ei yleensä ole saatu aikaan kasvunlisäystä, vaan pikemminkin päinvastoin, koska tuhka kohottaa äkillisesti maan pH-arvoa ja voi vahingoittaa mykorrhizasieniä (Mälkönen 1996).

Metsäteollisuudessa syntyy jätevedenpuhdistuksessa lietettä 400 000 – 500 000 t/a laskettuna 100 % kuiva-aineena (Rantala ym. 1998). Finergyn tietojen mukaan metsäteollisuuden tuhkia syntyy 210 000 t/a. (Tekes Teknologia katsaus 93/2000 s. 5). Puunkuori- ja muuta puuperäistä tuhkaa syntyy maamme metsäteollisuuden kattiloissa ja lämpölaitoksissa noin 100 000 tonnia. Määrällä voitaisiin lannoittaa metsää arviolta 25 000 ha (Moilanen & Korpilahti 2000). Lietteet muodostavat suurimman osan sellu- ja paperiteollisuuden kiinteistä jätteistä. Liette sisältää esiselkeytyksessä syntyvän primaarilietteen ja biologisen vaiheen ylijäämälietteen (bioliete). Metsäteollisuudessa puhdistamolietteistä hyödynnetään energiaksi yli 70 %. Siistaus- ja kuitulietteiden osalta osuus on pienempi (Lohiniva, E. *et al* 2001). Loppu sijoitetaan pääosin kaatopaikoille. Metsäteollisuuden lietteiden poltto ei useimmissa tapauksissa ole taloudellista lietteiden suuren vesipitoisuuden takia. Kaatopaikkakäsittely taas ei ole nykyisen jätelain mukaista hyötykäyttöä (Mäkelä-Kurtto 1994).

Koska varsinkin biologisen ylijäämälietteen käsittely ja loppusijoitus on ongelmallista, jätehuollon teknis-taloudellinen ja ympäristönsuojelullinen merkitys korostuu jäteveden käsittelyn tehostuessa. Tämän vuoksi on etsittävä uusia hyötykäyttömahdollisuuksia sekä lietteille että tuhkalle. Puuntuhkassa on kaikkia puiden tarvitsemia kivennäisravinteita, lukuun ottamatta typpeä. Metsäteollisuuden bioliete sisältää taas kohtalaisen runsaasti typpeä. Nykysuositusten mukainen lannoitetypen määrä, typpeä 150 kg/ha, saavutettaisiin n. 15 – 17 tonnin lietemäärällä (kuiva-ainepitoisuus noin 12 %) hehtaaria kohti.

Biolietteen ja puuntuhkan sopivilla seossuhteilla on mahdollista aikaansaada lannoitevalmiste, jonka avulla puusta peräisin olevat ravinteet voidaan palauttaa takaisin metsään. Tuhkaa on palautettu metsään sekä irtotuhkana että viime vuosina myös rakeistettuna. Tuhkan itsekovettumisominaisuuksia on hyödynnetty rakeistuksessa kostuttamalla tuhka vedellä. Rakeisessa muodossa kuljettaminen ja levitys ovat helpommin hoidettavissa kuin irtotuhkana. Ravinteet liukenevat raetuhkasta hitaammin, jolloin vältetään liian nopean liukenemisen aiheuttamilta shokkivaikutuksilta. Tuhkan kostutukseen on mahdollista käyttää veden sijasta myös biolietettä. (Isännäinen & Huotari. 1994, Isännäinen, S. 1997). Biolietteen osuus on aiemmin tehdyissä rakeistuskokeiluissa jäänyt yleensä melko pieneksi. Lietteen osuus pitäisi rakeistuksessa saada suuremmaksi, jotta sillä olisi tyypillisäyksen kannalta merkitystä. (Isännäinen *et al.* 1998, Isännäinen & Pirkonen 1999).

Nykyisin bioliete poltetaan yleensä kuoren mukana. Kun biolietteen osuus sekalietteessä kasvaa liian suureksi, vedenpoisto siitä vaikeutuu. Jos osa biolietteestä voidaan käyttää tuhkan rakeistukseen, on mahdollista pienentää biolietteen osuutta sekalietteessä, vedenerotus tehostuu ja

sekalietteen lämpösisältö kasvaa ja poltto tehostuu. Lisäksi lietteen sisältämä typpi saadaan hyödynnetyksi lannoitteena metsissä.

Tämän tutkimuksen teknisenä lähtökohtana on tuhkan ja biolietteen yksinkertainen prosessointitekniikka, jossa pyörityvällä sekoituksella tuotetaan rakeita kuorikattilan tuhkasta ja lietteestä.

Tuhkan ja biolietteen rakeistaminen ja rakeiden jatkokäsittely on suunniteltu tapahtuvan käytännössä siten, että ensin otetaan liete vedenerotuksen jälkeiseltä lietesäiliöltä pyörityvällä sekoitusyksiköllä varustettuun ajoneuvon ja aloitetaan prosessi lietteen nopealla pyörityksellä. Sen jälkeen haetaan tuhka tuhksiilolta ja pyöritystä jatketaan. Jos ajoneuvossa on irroitettava ja siirrettävä sekoitusyksikkö esimerkiksi vaihtolavalla ja lisäksi on käytettävissä kuljetuskontteja, on rakeiden lähi- tai kaukokuljetus hoidettavissa metsään joustavasti. Lyhytaikainen välivarastointi on konttien avulla myös mahdollista.

Prosessointi-ketjussa voidaan käyttää tehdasalueella jo olevia jätejakeiden varastosiiloja ja purkulaitteita apuna syötettäessä tuhkaa ja biolietettä sekoitusyksikköön

Edellä kuvatun prosessointitavan ja toimintamallin etuja ovat:

- Lannoitteen prosessointi jätejakeista on hallittua ilman välilaskuja varastokentille ja monia purkaus- ja lastausvaiheita kentillä.
- Saadaan säästöjä kahden jätejakeen kuljetus- ja käsittelymaksuissa.
- Polttoon jäävän sekalietteen lämpösisältö kasvaa, jos polton kannalta epäedullisen biolietteen määrä sekalietteessä vähenee. Rakeistukseen on siten hyvä käyttää lietettä, jossa biolietteen osuus on suuri.
- Tuhka-liete-lannoiterae sisältää myös typpeä.
- Prosessointitekniikka mahdollistaa lisäravinteiden seostuksen lannoitteeseen helposti ja hallitusti.

## 2 TAVOITE

Tämän esitutkimuksen tavoitteena on kehittää uusi, teknistaloudellisesti hyvä rakeistusmenetelmä metsäteollisuuden kuorikattiloiden puuperäisen tuhkan ja puuperäisten lietteiden prosessointiin runsaasti lietettä sisältäviksi lannoiterakeiksi sekä rakeiden toimittamiseen korkealaatuiseksi, metsäekosysteemille haitattomaksi metsälannoitteeksi, jolloin arvokkaat ravinteet palautetaan metsään. Menetelmällä saadaan myös energiahyötyä poltossa, kun energiasisällöltään heikon biolietteen osuus kuorikattilassa vähenee.

Tavoitteena on minimoida rakeistus-kuljetus -ketjun kustannukset integroimalla tuhkan ja biolietteen rakeistus lähikuljetukseen ilman erillisiä kuljetuksia ja välikäsittelyjä tehdasalueella ja varastokentillä.

Tutkimuksessa selvitetään myös rakeiden liukenevuusominaisuudet haitattoman huuhtoutumisen varmistamiseksi ja rakeiden lannoiteominaisuudet metsänkasvun kannalta.



### 3 ESIKOKEET ERI RAKEISTUSTEKNIIKOILLA

#### 3.1 KOKEIDEN SUORITUS

Periaatteeltaan erilaisia rakeistustekniikoita tutkittiin syksyllä 1999 tuhkan ja biolietteen käsittelyssä. Tavoitteena oli varmistaa oikea tekniikka, jolla laajemmat rakeistuskokeet tulisiin tekemään. Kokeiden tavoitteena oli sekoittaa tuhka ja liete toisiinsa siten, että saataisiin aikaan joko raemainen tai pellettimäinen tuote.

Koelaitteina olivat lihamylly, tasosekoitin, betoninsekoittaja ja pelletointikone. Viimeksimainittu oli täyden mittakaavan laite, muilla pystyttiin tekemään pienimittakaavaisia kokeita (kuva 1).

Raaka-aineina tuhka-bioliete-rakeiden valmistuksessa käytettiin Metsä-Serla Oyj:n Äänekosken tehtaan kuorikattilan lentotuhkaa ja lietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus oli 17 %. Lietteessä oli kuitulietteen paino-osuus 40 % ja biolietteen paino-osuus 60 %. Kaikilla kokeilla tekniikoilla seossuhteina käytettiin tuhkan ja biolietteen paino-osuuksia 1:4, 3:4 ja 1:2 ja 1:1 eli esim. 1:4 tarkoittaa, että seoksessa on 1 osa tuhkaa ja 4 osaa märkää biolietettä. Panokset kokeissa olivat laitteen koosta riippuen 2-15 kg. Tuhkan kuumentamisen vaikutusta rakeistumiseen kokeiltiin myös.



Kuva 1. Esikokeissa käytetyt koelaitteet: vasemmalta betonimylly, lihamylly ja tasosekoitin.

### 3.2 TULOKSET ERI TEKNIKOILLA

Lihamylyssä täyttösuppilon pohjasta työnnetään sekoitusruuvilla materiaali matriisin läpi tuotteeksi. Tuhka ja bioliete sekoitettiin ensin kevyesti astiassa, jonka jälkeen erä syötettiin laitteen läpi kahden kilon erissä. Kokeilun tulos oli, että matriisin eri rei'istä ulostulevat tahnamaiset, yhtenäiset nauhat olivat toisiinsa takertuvia. Tuhka ja bioliete olivat sekoittuneet toisiinsa hyvin. Matriisin rei'än halkaisija oli 6 mm ja matriisin paksuus 5 mm.

Tasosekoittimen periaatteena on sekoittaa materiaali säiliön pohjalla pyörivän lapasekoittimen avulla. Lavat pyörivät kierrosnopeudella 84 r/min. Sekoittimen tilavuus oli 50 litraa ja kokeiluissa tilavuudesta oli käytössä kolmasosa. Sekoitus oli erittäin tehokasta. Tuote oli liisterimäistä massaa.

Matador-pellettikoneella materiaali puristetaan sylinterimäisen rengasmatriisin läpi sylinterin sisällä olevien kolleripyörien avulla. Kollereiden kehänopeus oli n. 1,7 m/s. Matriisin reikien halkaisija oli 6 mm ja matriisin paksuus 30 mm. Tulos oli, että materiaalien sekoittuminen oli liian voimakasta ja syntyi taikinamaista massaa. Kollerien ja matriisin väliin muodostui liisterimäistä tuhka-biolieteseosta, joka ei läpäissyt matriisia.

Betoninsekoittajalla tehdyissä kokeissa syntyi selkeästi toisistaan irrallaan olevia, kiinteitä, tuhalla kuorutettuja rakeita. Pyörivän sekoitusrummun tilavuus oli noin 150 litraa, josta noin puolet oli kokeissa käytössä. Rummun pyörimisnopeus oli 28 r/min. Kokeissa käytetty rakeistusaika muodostui siten, että liete-erää sekoitettiin ensin kaksi minuuttia, jonka jälkeen lisättiin tuhkaerä ja sekoitusta jatkettiin vielä kolme minuuttia eli noin viiden minuutin sekoitusaika riitti tuottamaan hyviä rakeita. Tuhkan kuumentaminen 100 °C:een edisti hiukan rakeistusta.

Tuloksena kokeiluista oli, että vain betoninsekoittajalla pystyttiin tuottamaan kiinteitä rakeita, jotka eivät tarttuneet toisiinsa ja joissa oli biolieterrakeiden päälle itsekovettuneen tuhkan ansiosta kova kuori.

### 3.3 ESIKOKEISSA SAATUJEN RAKEIDEN OMINAISUUDET

Käytännössä vain betoninsekoittajalla aikaansaatuisten rakeiden ominaisuuksia seurattiin, koska muilla tekniikoilla ei syntynyt varsinaisia rakeita, vaan erilaisia massoja. Betoninsekoittajan rakeita seurattiin tiiviissä varastoinnissa läpinäkyvissä, korkeissa lasiastioissa (22 vrk) ja pahvilaatikoissa (19 vrk). Tuotteiden tilavuuden ja muodon muutosta sekä yleistä säilyvyyttä seurattiin, rakeet seulottiin ja niitä liotettiin vedessä, josta mitattiin liuotuksen lopussa pH.

Seulonta tehtiin 4 mm, 2 mm ja 0,5 mm seuloilla käsin 0,5 min ajan. Seulonta-erän suuruus oli noin 500 g. Seulontatulokset on esitetty taulukossa 1. Seulonnan perusteella erästä yli 50 % oli raekooltaan yli 4 mm. Taulukossa 2 on kootut tulokset myös muista ominaisuuksista.

Taulukko 1. Betoninsekoittimella tehtyjen esikokeiden seulontatulokset.

Seulakoko	Seulalle jäänyt paino-osuus, %				
	Seossuhde	1:4	1:2	1:2 (tuhka lämm.)	3:4
4 mm		54	52	51	64
2 mm		27	33	28	16
0,5 mm		19	16	21	18
pohja					2
Yhteensä		100	100	100	100

Taulukko 2. Betoninsekoittajalla tehtyjen rakeiden ominaisuuksia.

Seossuhde Tuhka/liete	Kosteus %	Rae	Varastointi- lasiputkessa	Seulonnassa alle 0,5 mm	Liutus vedessä 6 vrk
1:4	57,7	Tiivis	Tiivistymä 9 %, eniten homeessa	-	pH 9,5 pohjalla eniten liuke- nematonta
1:2	54,3	Rakeinen	Tiivistymä 5 %, pinta homeessa	-	pH 9,6
1:2 (lämm. tuhka, 100 °C)	53,3	Rakeinen	Tiivistymä 3 %, pinta homeessa	-	pH 9,6
3:4	51,2	Hauras	Tiivistymä 0 %, hiukan hometta	2 %	pH 10,9



Kuva 2. Betoninsekoittajalla tehdyissä esikokeissa saatuja rakeita

Parhaat rakeiden ominaisuudet saatiin tuhkan ja lietteen seossuhteella 1:2 märkápainona. Lämmitetyn tuhkan seoksesta tehdyt rakeet olivat parhaita ulkomuodoltaan, niiden pinta oli kiiltävä. Seossuhteella 3:4 saatiin eniten yli 4 mm:n rakeita, toisaalta hienoainesta syntyi, mitä muilla seossuhteilla ei tapahtunut.

Rakeiden kosteus eli lietteen määrä rakeissa vaikutti varastoitavuuteen. Mitä suurempi kosteus oli sitä enemmän hometta muodostui (taulukko 2).

Varastoinnissa suljetuissa pahvilaatikoissa, jotka olivat lasiputkia huomattavasti ilmavampia, silminnähtävää hometta ei muodostunut kuin seossuhteella 1:4 tehdyissä rakeissa.

### 3.4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuhkan ja biolietteen rakeistus onnistui eri tekniikoita testattaessa vain betoninsekoittajalla. Useita eri seossuhteita testattiin kaikilla menetelmillä. Muilla kuin betoninsekoittajalla tuloksena oli tuhkan ja biolietteen hyvin homogeeninen, taikinamainen ja takertuva seos.

Sekoitusprosessin pitää olla biolietemassaa rikkova, jotta lisätty tuhka pääsee kuorruttamaan lieteainesta ja edistämään samalla rakeiden muodostusta. Betoninsekoittajassa tällainen rikkoutuminen tapahtuu riittävän ”ilmavasti”, jotta tuhka pääsee kiinnittymään lieterakeisiin. Kuorrutuksen aikana lietteessä oleva vesi reagoi tuhkan kalsiumin kanssa ja kovettuu.

Sopiva sekoitusaika on melko lyhyt – esikokeiden perusteella maksimipituus on 10 minuuttia. Sekoituksen kestäessä liian kauan, muokkaava vaikutus saattaa kasvaa liian suureksi etenkin panostyyppisessä käsittelyssä ja tuhka ja bioliete sekoittuvat liaksi toisiinsa. Tämä saattaa olla ongelma etenkin isossa mittakaavassa suurempia liete- ja tuhkaeria käsiteltäessä.

Esikokeiden hyvien tulosten perusteella päädyttiin jatkamaan kokeita betonisekoittajapohjalta ja hylättiin muut vaihtoehdot.

## 4 RAKEISTUSKOKEET BETONINSEKOITTAJALLA

### 4.1 KOKEIDEN SUORITUS

Esikokeiden perusteella parhaaksi todetulla ”kuorrutustekniikalla” tehtiin VTT Energiassa laajemmat rakeistuskokeet betonisekoittajaa käyttäen 3. - 4. 5. 2000. Rakeet tehtiin panostyyppisesti tutkimusta varten hankitulla betonisekoittajalla (tilavuus noin 150 l) käyttäen erilaisia tuhkan ja biolietteen seossuhteita. Nopeasti ominaisuuksiaan muuttava bioliete rajaa kokeisiin käytettävissä olevaa aikaa ja tasalaatuisen raaka-aineen määrää. Paljon kokeita tehtiin siten hyvin lyhyessä ajassa ja saadut rakeet toimitettiin välittömästi liukenevuuskokeisiin ja kasvatuskokeisiin. Seossuhteiden ja rakeistusajan valinnassa hyödynnettiin esikokeissa syksyllä 1999 saatuja tuloksia.

Raaka-aineina tuhka-bioliete -rakeiden valmistuksessa käytettiin aluksi Metsä-Serla Oyj:n Lielahden kemihierretehtaan toimittamia Lielahden kuorikattilan tuhkaa ja Lielahden biolietettä sekä toisessa vaiheessa Metsä-Serla Oyj:n Äänekosken tehtaiden kuorikattilan tuhkaa ja samaa Lielahden biolietettä kuin ensimmäisen vaiheen kokeissa. Tuhkan kuumentamisen vaikutusta rakeistumiseen tutkittiin.

Kokeissa tehtyjä rakeita käytettiin välittömästi niiden jälkeen aloitetuissa rakeiden liukenevuuskokeissa ja kasvihuonekokeissa. Pirkanmaan ympäristökeskus toteutti liukenevuuskokeet VTT Energian kanssa yhteistyössä VTT:n Leivonmäen tutkimustiloissa. Kasvihuonekokeet, joissa tutkittiin tuhka-biolietterakeiden vaikutusta taimien kasvuun, teki Metsäntutkimuslaitos Parkanon koasemalla.

### 4.2 TULOKSET

#### 4.2.1 Rakeistuminen

Käytetyt tuhkan ja biolietteen seossuhteet olivat 1:1 eli puolet massasta tuhkaa ja puolet biolietettä sekä 1:2 eli 1/3 tuhkaa ja 2/3 biolietettä (märkäpainona). Viimeksimainitulla saatiin paras rakeistuminen. Panoksessa oli tällöin 5 kg tuhkaa ja 10 kg biolietettä. Biolietteen kuiva-ainepitoisuus oli 12,6 % ja irtotiheys tällöin 352 g/l. Äänekosken tuhkan irtotiheys oli 870 g/l ja Lielahden tuhkan 491 g/l. Irtotiheydet määritettiin litran mitta-astiassa. Rakeet olivat suurimmillaan 10 mm:n luokkaa.

Äänekosken tuhkan ja lietteen rakeistuminen onnistui paremmin kuin Lielahden tuhkan ja lietteen rakeistuminen, kun rakeistusaika oli 5 min.

Lielahden tuhkan ja lietteen rakeistuminen parani, kun rakeistusaikaa jatkettiin 5 minuutista 10 minuuttiin.

Tuhkan kuumentaminen 100 °C:een paransi Lielahden tuhkan ja lietteen rakeistumista. Äänekosken tuhkan kuumentaminen ei vaikuttanut selvästi rakeistumiseen, sillä tyydyttävä rakeiden muoto ja koko saavutettiin ilman tuhkan kuumentamistakin.

Laboratoriossa toteutetussa pienimuotoisessa tuhkien itsekovetuskokeessa, jossa pieni määrä vettä sekoitettiin tuhkan joukkoon, todettiin Äänekosken tuhkalla selvästi voimakkaampi itsekovettumisreaktio kuin Lielahden tuhkalla.

Erot tuhkien koostumuksessa, etenkin kalsiumin määrässä, vaikuttavat rakeistumiseen. Mahdollisesti puun laatu vaikuttaa kalsiumpitoisuuteen. Lielahdessa poltetaan pääasiassa kuusen kuorta, kun taas Äänekoskella pääasiassa koivua ja jonkinverran mäntyä. Äänekosken tuhkassa on ehkä juuri suuresta koivun osuudesta johtuen hieman enemmän kalsiumia kuin Lielahden tuhkassa. Lielahden tuhkassa oli silmämääräisesti arvioituna palamatonta ainesta eli hiiltä ja nokea enemmän kuin Äänekosken tuhkassa, mistä johtui sen keveys ja tumma väri.

#### 4.2.2 Rakeiden fysikaaliset ominaisuudet

Äänekosken tuhka-Lielahden liete –rakeiden irtotiheys litran mitta-astiassa määritettynä oli 919 - 937 g/dm<sup>3</sup>, (357 - 395 g kuiva-ainetta/dm<sup>3</sup>). Rakeiden kosteus rakeistuksen jälkeen oli 58 – 62 %.

Lielahden tuhka-Lielahden liete –rakeiden irtotiheys oli 879 - 956 g/dm<sup>3</sup> (383 - 405 g kuiva-ainetta/dm<sup>3</sup>). Rakeiden kosteus tällöin oli 56 - 58 %.

Rakeiden raekokojakauma määritettiin seulomalla rakeita seulakoneella 30 s noin 100 g:n koe-erät sekä rakeistuskosteudessa (taulukko 3) että kuivattuna 30 °C: n lämmössä kolme vuorokautta tasapainokosteuteen (taulukko 4). Suurimmat rakeet rakeistuskosteudessa olivat noin 10 mm ja 80 - 85 % näyte-erästä oli kooltaan yli 2 mm. Keskimääräinen raekoko seulontaerässä oli 4 mm (taulukko 3).

Hienoaineksen määrää tarkastelemalla Äänekosken tuhkasta ja Lielahden lietteestä tehdyt rakeet rakeistuskosteana olivat parhaita (taulukko 3), sillä niissä hienoaineksen määrä oli vähäinen. Lähes yhtä hyviä olivat Lielahden tuhkasta ja lietteestä tehdyt rakeet, joissa Lielahden tuhka oli kuumennettu 100 °C:n asteeseen. Rakeet, joissa Lielahden tuhkaa ei ole kuumennettu, olivat selvästi huonoimpia. Erityisesti se näkyy kuivattujen rakeiden raekokomäärityksessä hienompien raeluokkien suurempana osuutena (Taulukko 4).

Taulukko 3. Kosteiden tuhka-biolieterakeiden raekokojakauma.

Rakeiden seulonta kosteana 0,5 min	Paino-osuus seulalla, %					Keskim. raekoko mm
	4	2	0,5	0,25	Pohja	
Äänek.tuhka – Liel.liete (Kosteus 54 %)	31	50	19	0,01	0	4
Liel.tuhka – Liel.liete (Kosteus 56 %)	37	42	19	1,4	0,1	4
Liel.tuh. 100 °C – Liel.liete, (Kosteus 56 %)	31	55	15	0,1	0	4

Taulukko 4. Kuivattujen tuhka-biolieterakeiden raekokojakauma.

Rakeiden seulonta kuivana 0,5 min	Paino-osuus seulalla, %					Keskim. raekoko mm
	4	2	0,5	0,25	Pohja	
Äänek.tuhka – Liel.liete (Kost. 8 %)	12	20	49	7	12	2
Liel.tuhka – Liel.liete (Kost. 5 %)	4	11	57	11	18	1
Liel.tuh.100 °C – Liel.liete, (Kost. 5 %)	4	30	49	6	11	2

Rakeiden käsittelykestävyyttä arvioitiin seulomalla sekä kosteita että kuivattuja rakeita 8 minuuttia vastaavalla seulasarjalla kuin millä raekokojakauma määritettiin. Tulos oli se, että rakeet tarttuivat pitkän ja muokkaavan seulonnan aikana toisiinsa ja raekoko kasvoi. Äänekosken tuhkasta ja Lielahden lietteestä valmistetuilla rakeilla muokkautumistaipumus oli suurin; rakeet liettyivät ja tarttuivat toisiinsa muodostaen suuria kokkareita (Taulukko 5). Tasapainokosteuteen 30 °C:ssa kuivattujen rakeiden tehokkaassa seulonnassa eroja eri rakeiden välillä ei enää juuri ollut (Taulukko 6).

Taulukko 5. Kosteiden tuhka-biolieterakeiden käsittelykestävyys (pitkä seulonta).

Rakeiden seulonta kosteana 8 min	Paino-osuus seulalla, %					Keskim. raekoko mm
	4	2	0,5	0,25	Pohja	
Seula, mm						
Äänek.tuhka – Liel.liete (Kosteus 54 %)	(*) Ta-	ker-	tu-	minen		
Liel.tuhka – Liel.liete (Kosteus 56 %)	(+) 41	41	17	1,6	0,1	4
Liel.tuh.100 °C –Liel.liete, (Kosteus 56 %)	30	53	17	0,1	0	4

(\*)Rakeet liettyivät 4 mm:n seulalle ja valuivat 2 mm:n seulalle, jolle muodostui kaksi 5 cm:n kokkareita  
 (+) 4 mm:n seulalla rakeet yhdistyivät ja muodostui kokkareita

Taulukko 6. Lämpökaapissa 30 °C:ssa kuivattujen tuhka-biolieterakeiden käsittelykestävyys (pitkä seulonta).

Rakeiden seulonta kuivana 8 min	Paino-osuus seulalla %					Keskim. raekoko mm
	4	2	0,5	0,25	Pohja	
Seula-aukko, mm						
Äänek.tuhka – Liel.liete (Kost. 8 %)	4	7	37	15	37	1
Liel.tuhka – Liel.liete (Kost. 5 %)	2	6	26	18	47	1
Liel.tuh.100 °C - Liel.liete,	5	8	30	13	43	1

#### 4.2.3 Rakeiden kemialliset ominaisuudet

Tuhkaeristä otettiin kerta-äyte analysointia varten. Näytteet analysoitiin GTK:lla lukuunottamatta lietteen ja rakeiden typpipitoisuuksia, jotka analysoitiin Pirkanmaan ympäristökeskuksessa. Analyysitulokset on esitetty taulukossa 7.



Taulukko 7. Tuhkabiolieterakeiden ja niiden raaka-aineiden tärkeimpien alkuaineiden määrät kuiva-aine kiloa kohden.

Alkuaine	Äänekosken tuhka	Lielahden tuhka	Lielahden liete	Äänekosken tuhka-Lielahden liete -rae	Lielahden tuhka-Lielahden liete -rae
Cd, mg/kg	17,0	11,1	0,11	14,7	9,29
Cr, mg/kg	106	13,3	2,87	79,9	12
Al, mg/kg	18100	4140	501	13300	3280
Ca, mg/kg	286000	262000	3460	220000	178000
Fe, mg/kg	12600	16000	17100	14600	17000
K, mg/kg	41700	67000	4540	35600	52900
Mg, mg/kg	22300	21300	1190	17400	15300
Mn, mg/kg	13100	16100	205	10400	11400
Na, mg/kg	12900	20200	9140	11600	18900
Ni, mg/kg	89,9	105	3,46	70,3	79,9
P, mg/kg	14200	21500	8130	12900	16900
Pb, mg/kg	37,8	27,6	<10	29,4	23,1
S, mg/kg	19800	36900	15300	18500	33700
N, g/kg			76	15	17
Zn, mg/kg	3310	3580	61,4	2590	2610

Analyysien mukaan kalsiumin määrässä ei ole suurta eroa Lielahden tuhkan (Ca 262000 mg/kg) ja Äänekosken tuhkan (Ca 286000 mg/kg) välillä. Todennäisesti vaikuttava tekijä rakeistumiseroihin on Lielahden tuhkassa oleva suurempi palamattomien määrä, jota ei analysoitu.

Äänekosken tuhkanäytteessä raskasmetallipitoisuudet olivat yleensä suurempia kuin Lielahden tuhkassa, esim. Cd-pitoisuus oli Äänekosken tuhkassa 17 mg/kg ja Lielahden tuhkassa 11,1 mg/kg. Lietteen lisäys pienentää rakeiden raskasmetallipitoisuutta ja rakeistaminen puolestaan todennäköisesti pienentää raskasmetallien huuhtoutumisvaaraa. Lielahden tuhkan alkali-, fosfori- ja rikki-pitoisuudet olivat sitä vastoin suurempia kuin Äänekosken tuhkassa.

Tuhka-lieterakeessa alkuainepitoisuudet ovat yleensä pienempiä kuin pelkässä tuhkassa lukuunottamatta typpipitoisuutta eli liete "laimentaa" tuhkan raskasmetallipitoisuuksia ja erilaisista tuhista johtuvia eroja raskasmetallipitoisuuksissa. Lietteen lisäyksellä rakeisiin saadaan ravinteena arvokasta tyyppiä, jota tuhkassa ei ole.

#### 4.2.4 Johtopäätökset

Rakeistuskokeet osoittivat että tuhkan laadulla on merkitystä rakeistumiseen. Kohtalaisia rakeita pystytään kuitenkin tekemään rakeistuksen kannalta ”huonommastakin” tuhkasta. Koska tuhkan kuumentaminen edistää joissakin tapauksissa rakeistumista, tulee tällaisessa tapauksessa pyrkiä nimenomaan kuumen tuhkan hyödyntämiseen käytännön tilanteessa tehtaalla.

Rakeistuskokeet varmistivat jo esikokeissa betonisekoittajalla saadut hyvät tulokset kahdella erilaisella tuhalla eli lietettä rikkova ja ”lietekokkareita” tuhalla kuorruttava prosessi toimii hyvin. Saadut rakeet olivat käsittelykestävyydeltään yllättävän lujia etenkin kosteina. Kuivuessaan ne alkoivat haurastua ja heiketä lujuudeltaan, jolloin käsittelyssä saattaa aiheutua pölyämistä.

## 5 VARASTOINTIKOKEET

### 5.1 KOEJÄRJESTELYT

Betoninsekoittajalla 3. – 4.5. 2000 valmistettujen rakeiden varastoitavuutta seurattiin 5.5 - 16.6. 2000 välisenä aikana eli tasan kuusi viikkoa. Rakeita säilytettiin sisällä, ulkohallissa ja ilman katetta ulkona. Säilytystapoja oli kaksi; kasa ja avoimeksi jätetty, läpinäkyvä muovipussi. Koe-erien suuruus oli n. 2 litraa ja alkupaino kaikissa erissä 1,7 kg.

Vaativaan sisävarastointiin valittiin parhaimmaksi laadultaan arvioidut Äänekosken tuhkasta ja Lielahden lietteestä valmistetut rakeet. Ulkohalli- ja ulkovarastoinnissa olivat Lielahden tuhkasta ja Lielahden lietteestä valmistetut rakeet, joissa kummassakaan tuhkaa ei ollut kuumennettu.

Varastointikokeen aikana seurattiin koe-erien massamuutoksia punnitukseen ja homehtuvuutta silmämääräisellä tarkastelulla. Koe-erät valokuvattiin seurannan aikana punnitusten yhteydessä. Kokeen päätyttyä määritettiin koe-erien loppukosteus ja tehtiin seulonnat (30 s ja 8 min) raekokojakauman määrittämiseksi ja käsittelykestävyyden arvioimiseksi.

### 5.2 TULOKSET

#### 5.2.1 Käsittelyominaisuudet

Rakeet kuivuivat kasavarastossa sekä sisällä että ulkohallissa 6 viikon varastoinnin aikana hyvin kuiviksi, 5 – 8 % kosteuteen, mikä täysin vastaa 3 vrk:n ilmakehän kuivausta 30 °C:n lämmössä. Ulkona kasan kosteus oli varastoinnin päätyttyä 28 %. Pusseissa varastoituina kuivumista tapahtui vain sisällä varastoidussa pussissa, jossa rakeiden kosteus varastoinnin loputtua oli 37 %. Ulkona ja ulkohallissa pusseja varastoitaessa kuivumista ei tapahtunut, kosteudet olivat ulkohallissa 51 % ja ulkona 56 %.

Ulkona sekä kasa että pussi olivat säälle alttiina, joten sade pääsi esteettä rummuttamaan rakeiden pintaa ja muovipussiin kertyi välillä vettä, joka pääsi suurimmaksi osaksi valumaan pussista pois pussin pohjaan tehdystä rei’ästä.

Varastointi kasassa oli haurastuttanut kaikkia eriä; hienoaineksen määrä oli suurempi kuin ennen varastointia tehdyissä raekokoanalyysissä (vrt. taulukko 3 ed. luku). Ulkohallissa varastoidut rakeet olivat heikoimmat.

Taulukko 8. Rakeiden raekokojakauma varastoinnin päätyttyä.

Seulonta-aika, 0,5 min.	Paino-osuus seulalla, %					Keskim. raekoko mm
	4	2	0,5	0,25	Pohja	
<b>Seula, mm</b>						
<b>Kasa sisällä,</b> (Ään–Liel, kost. 6 %)	5	35	47	5	8	2
<b>Kasa ulkohallissa</b> (Liel.–Liel., kost. 8 %)	12	17	42	12	17	2
<b>Kasa ulkona</b> (Liel.–Liel., kost. 28 %)	9	24	49	9	8	2
<b>Pussi sisällä</b> (Ään–Liel, kost. 37 %)	30	48	21	1	0,2	4
<b>Pussi ulkohallissa</b> (Liel.–Liel., kost. 51 %)	31	44	23	2	0,5	3
<b>Pussi ulkona</b> (Liel.–Liel., kost. 56 %)	38	53	9	0,2	0	4

Tehdyssä 8 minuutin seulonnassa kasanäytteiden rakeet pysyivät erillään ja hienonivat melkoisesti. Hienoaineksen määrä lisääntyi kaikissa tapauksissa. Pusseissa olleiden, kosteiden erien 8 minuutin seulonnassa rakeet pyrkivät yhtymään suuremmiksi rakeiksi ja kokkareiksi kaikissa tapauksissa. Kun rakeet ovat riittävän kosteita, seulontakäsittely muokkaa ja sekoittaa rakeiden pinnalla olevan tuhkan rakeiden sisälle ja rakeiden tarttuminen toisiinsa lisääntyy.

Kuvassa 3 on valokuva varastointiseurannassa olleista rae-eristä.



Kuva 3. Varastointiseurannassa toukokuussa 2000 ulkona olleet rae-erät

Taulukko 9. Rakeiden käsittelykestävyys varastoinnin päätyttyä (pitkä seulonta).

Seulonta-aika 8 min	Paino-osuus seulalla, %					Keskim. raekoko mm
	4	2	0,5	0,25	Pohja	
<b>Seula, mm</b>						
<b>Kasa sisällä</b> , (Ään–Liel, kost. 6 %)	3	6	48	13	31	1
<b>Kasa ulkohallissa</b> (Liel.–Liel., kost. 8 %)	9	11	21	18	40	1
<b>Kasa ulkona</b> Liel.-Liel., kost. 28 %)	5	13	39	20	22	1
<b>Pussi sisällä</b> (Ään–Liel, kost. 37 %)	30	48	21	0,8	0,2	4
<b>Pussi ulkohallissa</b> (Liel.–Liel., kost. 51 %)	26	45	26	3	1	3
<b>Pussi ulkona</b> (Liel.–Liel., kost. 56 %)	35	55	10	0,1	0	4

## 5.2.2 Homehtuminen

Kaikki kasavarastot säilyivät yllättävän hyvin kuuden viikon varastoinnin. Päällisin puolin missään niistä ei ollut nähtävissä hometta varastoinnin aikana. Täysin ilman näkyvää hometta olivat sekä sisällä että ulkona säilytetyt kasat. Etenkin Äänekosken tuhkasta ja Lielahden lietteestä tehdyt rakeet olivat säilyneet erittäin hyvin varastoinnin loppuun saakka ja näkyvää hometta ei ollut yhtään myöskään kasan sisäosissa 16.6. tehdyssä tutkimuksessa. Ulkohallin kasavaraston sisäosissa oli 16.6. vähän homeen alkua ja kasassa oli myös havaittavia kosteuseroja. Ulkona varastoitu kasa oli suhteellisen hyvin säilynyt. Havaittavaa hometta ei ollut. Kasan pinnalla ja sydänosassa rakeet olivat pääosin tasa-aineisia eli rakeisuus oli säilynyt. Kasan pinnalla sade oli hakannut kuitenkin osan rakeista jauhoksi.

Sisällä varastoidussa pussissa home rupesi näkymään ensimmäisenä ulospäin läpinäkyvän muovipussin läpi. Hometta näkyi 29.5. tehdyssä arvioinnissa eli reilun kolmen viikon kuluttua varastoinnin aloittamisesta. Sisäosistakin hometta löytyi 16.6. tehdyssä tarkastelussa, jolloin tarkasteltiin kaikkien pussien läpileikkaus.

Ulkohallin pussissa hometta alkoi näkyä 5.6. lähtien. Hometta oli kauttaaltaan runsaasti koko erässä 16.6. tehdyssä tarkastelussa.

Ulkona olleessa pussissa hometta ei näyttänyt muodostuvan seurannan aikana lainkaan; se paljastui vasta 16.6. tehdyssä varastojen läpileikkausten tutkimuksessa. Ulkona olleessa pussivarastossa oli lisäksi pussin pohjalla vettä, johon osa tuhkasta oli liettynyt. Pussin keskiosassa oli vihreätä limamaista ainetta, ilmeisesti hometta, ja paakkuja, jotka hajosivat rakeiksi ja tuoksuivat voimakkaasti lietteelle.

## 5.3 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sisätiloissa varastointi onnistui yllättävän hyvin vaikkakin tulokset olivat vastaavat kuin syksyllä 1999 pahvilaatikkovarastoinnissa. Sisätiloissa onnistumisen syinä oli ilmava varastointipaikka vetokaapin alla ja alhainen ilman suhteellinen kosteus. Viileässä ulkohallissa ilman suhteellinen kosteus oli korkeampi ja pysyi melko tasaisena koko varastoinnin aikana, mikä edisti homehtumista. Ulkona ilman suhteellinen kosteus vaihteli voimakkaasti ja oli aurinkoisina päivinä alhainen, mikä pääsi kuivattamaan rakeita kasassa ja estämään homeen muodostumista huolimatta ajoittaisista sateista.

Tiivis muovipussi oli hyvin huono säilytystilana. Kasavarastointi ja säilytys esimerkiksi pahvilaatikossa tai lujassa paperisäkissä onnistunevat hyvin ainakin muutamia viikkoja. Varastokasat tai säkit kannattanee sijoittaa vielä katoksen alle.

# 6 KÄYTÄNNÖN MITTAKAAVAN RAKEISTUSKOKEILU

## 6.1 TOTEUTUS JA TULOKSET

Tuhkan ja biolietteen rakeistuskokeet aikaisempaa suuremmassa kokoluokassa toteutettiin Äänekosken Metsä-Serlan tehdasalueella 27.6. 2000.

Lähtöaineina käytettiin Äänekosken tehtaan biolietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus oli 14,9 % ja Äänekosken tehtaan kuorikattilan tuhkaa, jonka kuiva-ainepitoisuus oli 99,5 %. Liete oli ollut ulkona kasaan varastoituna jokin aika. Se oli mahdollisesti välillä kuivunut, välillä sateiden vuoksi taas kastunut, mistä johtuen lietekasan pinnalla oli vesilammikoita. Siten liete ei ollut tasalaatuista kasan eri osissa.

Koelaitteena oli rakeistusta varten vuokrattu betoniauto, jossa myllyn sekoitusosa oli ruuvityyppinen. Ruuvilla betonin sekoitus saadaan tasalaatuiseksi ja valmiin betonin syöttö ulos myllystä käy helposti.

Lähtöaineiden syöttö betonimyllyyn tapahtui kauhakuormaajalla, jossa oli tynnyrimäinen kauha. Sitä oli vaikea saada täyteen, joten raaka-aineet jouduttiin syöttämään vajaina kauhallisina. Kokeita suoritettiin kaksi.

Ensimmäisessä kokeessa raaka-aineiden syöttösuhde oli 3 kauhallista lietettä ja 4 kauhallista tuhkaa. Betoniauton mylly pyöri hitaasti koko syötön ajan. Ensimmäisenä myllyyn laitettiin liete, jonka syöttö kesti 12 min. Tuhkan syöttö kesti 13 minuuttia. Tuhkan syötön jälkeen pyöritystä nopeutettiin. Nopeutettu pyöritys kesti noin 5 minuuttia. Rakeiden teko kesti kaikkiaan noin puoli tuntia, jonka jälkeen rakeet purettiin säilytysalueelle (kuva 4).

Koko massa oli rakeistunut, mutta rakeet näyttivät melko märiltä. Rakeiden kuiva-ainepitoisuudeksi saatiin 59,5 % (kosteus 40,5 %). Suurimmat rakeet olivat läpimitaltaan arviolta 10 cm.

Toisessa kokeessa raaka-aineiden syöttösuhde oli 3 kauhallista lietettä + 6 kauhallista tuhkaa + 2 lisäkauhallista tuhkaa.

Kun lietteeseen oli lisätty 6 kauhallista tuhkaa ja sitä oli sekoitettu noin 5 min, näytti seos niin märältä, että päätettiin lisätä tuhkaa vielä 2 kauhallista. Rakeiden kuiva-ainepitoisuudeksi saatiin 63,4 % (kosteus 36,6 %). Koko prosessi kesti noin 50 minuuttia, minä aikana massaa koko ajan pyöritettiin.

Kunnollisia rakeita ei saatu aikaan ja seos taikinoitui, vaikka lisätty tuhkamäärä oli kaksinkertainen edelliseen kokeeseen verrattuna. Syynä taikinoitumiseen oli liian pitkä pyöritysaika yhdistettynä vääränlaiseen sekoitustapaan.

Ensimmäisen kokeen rakeet jätettiin paikoilleen rakeistuskokeen jälkeen, jolloin ne olivat säälle alttiina. Niiden kuntoa tarkasteltiin muutaman viikon päästä, ja todettiin, että ne olivat säilyttäneet muotonsa hyvin. Tuhkan ja lietteen liiallinen muokkautuminen prosessissa aiheutti kuitenkin sen että rakeet olivat takertuneet toisiinsa. Kevyellä mekaanisella käsittelyllä rakeet saatiin kuitenkin toisistaan irti.

## 6.2 JOHTOPÄÄTÖKSET

Skaalaus suurempaan kokoluokkaan onnistui. Ongelmana näissä kokeissa oli pitkä sekoitusaika liian hitaan syötön takia ja vääränlainen, ruuvityyppinen sekoitusmenetelmä. Betoniauton sekoitin pyrkii saamaan ja myös pitämään massan homogeenisena, mihin myllyn ruuvimainen sisärakenne on tehokas. Tuhka-biolietterakeiden valmistuksessa ruuvimainen rakenne on ilmeisesti sekoitusominaisuuksiltaan liian tehokas eli tuhka muokkautuu biolietteen sekaan eikä synny kuorruttavaa vaikutusta.

Lietteen ja etenkin tuhkan lisäys tulee tapahtua nopeasti ja sekoitusaika ei saa olla kovin pitkä, korkeintaan muutamia minutteja. Sekoitin pitää suunnitella tätä tarkoitusta varten.



Kuva 4. Betoniautolla Äänekoskella kesäkuussa 2000 valmistettuja tuhka-lieterakeita.

## 7 MENETELMÄN TEKNIS-TALOUDELLISTA ARVIOINTIA

### 7.1 MENETELMÄN KUVAUS

Rakeistuksessa on tavoitteena tehdä mahdollisimman yksinkertaisella menetelmällä levitettävyydeltään hyviä rakeita, joissa lietteen osuus on mahdollisimman suuri. Liette mukana rakeisiin saadaan typpeä, jota tuhkassa ei ole. Typpeä ja muitakin ravinteita voidaan tarvittaessa lisätä rakeistuksen yhteydessä. Tällaiset typpipitoiset rakeet soveltuvat kangasmetsien lannoitteeksi ja pelkät tuhkarakeet suometsien lannoitteeksi. Menetelmälle on eduksi, mikäli samalla rakeistuslaitteistolla voitaisiin tehdä myös pelkkiä tuhkarakeita.

Rakeistusmenetelmä perustuu ajatukseen, että tehtaan lietettä ja tuhkaa rakeistetaan suhteessa 2 osaa lietettä (märkäpainona) ja 1 osa puuperäistä tuhkaa. Käytännössä rakeistus hoidetaan vaihtolavarungolle asennettavalla betonikuljetustyyppisellä pyörivällä säiliöllä. Säiliö voi olla joko sivuvirtojen tuottajan tai urakoitsijan omaisuutta. Rakeistuksen ja kuljetukset voi hoitaa paikallinen kuljetusliike tai urakoitsija. Autoon liitetään helposti irrotettava rakeistuslaitteisto ja siihen haetaan ensin liete ja sen jälkeen tuhka. Säiliötä pyöritetään koko ajan eli rakeistus hoidetaan ajon aikana. Varsinainen rakeistus kestää 5-10 min. Valmiit rakeet puretaan siirtolavakontteihin ja sen jälkeen

lähdetään tekemään uutta panosta. Rakeistus on siis panostyyppinen. Sama auto voi kuljettaa kontit metsään, jossa ne voidaan joko purkaa tai jättää odottamaan levitystä. Levitys hoidetaan erillisellä traktorivetoisella levittimellä tai jollain muulla metsään soveltuvalla kalustolla esim. Territelalevittimellä.

## 7.2 LASKENNAN LÄHTÖKOHDAT

Yksittäisen tehtaan näkökulmasta taloustarkastelussa vertailuna voidaan käyttää lietteen ja tuhkan kaatopaikalle sijoittamisen kustannuksia. Mikäli tehtaalla on oma kaatopaikka, voidaan kustannuksiksi laskea tällä hetkellä vähintäänkin 100 mk/t materiaalia ja kunnallisella kaatopaikalla noin 250 mk/t jäteveroineen. On odotettavissa, että jätteiden kaatopaikalle sijoittamisen kustannukset tulevat nousemaan ja tehtaiden omillekin kaatopaikoille tulee jätevero. Jätteiden sijoituskustannuksiksi EU-direktiivin mukaiselle kaatopaikalle voidaan laskea 450 mk/t jäteveroineen. Orgaanisen jätteen kaatopaikalle sijoittamisessa on rajoituksia ja vuoden 2005 jälkeen kaatopaikalle ei saa sijoittaa yhdyskuntajätettä tai ominaisuuksiltaan ja koostumukseltaan siihen rinnastettavaa teollisuusjätettä, josta suurinta osaa biohajoavasta materiaalista ei ole kerätty talteen erillään muusta jätteestä hyödyntämistä varten.

Tärkeä näkökohta on lannoituksesta metsänkasvulle aiheutuva hyöty. Hyödyksi voidaan laskea 150 kg:n typpilannoituksella noin 12 m<sup>3</sup>:n lisäkasvu hehtaarille (Metlalta saatu tieto). Tässä on oletettu, että kasvusto käyttää typen hyödyksi eikä tuhkan pH:ta nostavasta vaikutuksesta ole mitään haittaa puunkasvulle. Typen lisäyksen vaikutus puuston lisäkasvuun voi olla optimaalisissa olosuhteissa 20 m<sup>3</sup>/ha. Lisäkasvun arvo voidaan laskea joko paperipuun hintana noin 100 mk/m<sup>3</sup> (1200 mk/ha) tai tukkipuun hintana noin 250 mk/m<sup>3</sup> (3000 mk/ha). Metsän typpilannoituksen kustannukset keinolannoitteilla ovat tällä hetkellä noin 800-900 mk/ha.

Tehtailla, joilla liete menisi muuten polttoon saadaan tuhkan ja biolietteen rakeistuksesta hyötyä myös polton kannalta. Kun biolietteen osuutta polttoon menevässä sekalietteessä voidaan vähentää saadaan lietteen kuiva-ainepitoisuus mekaanisella käsittelyllä korkeammaksi ja polttoaineen kosteusvaihtelut seospoltossa vähenevät.

Yksi vertailukohta voisi olla rakeistuksen ja levityksen kustannus muilla menetelmillä. Tässä on kuitenkin ongelmana se, että tuhkarakeet levitetään suoperäiseen maastoon ja vaikutus perustuu suureksi osaksi pH:n nousuun. Levitysmäärät pelkällä tuhalla ovat melko pieniä verrattuna tuhka-biolieterakeisiin. Tuhka-biolieterakeet levitetään kangasmetsiin ja kasvua edistävä vaikutus aiheutuu pääosin lietteen mukana tulevasta ja mahdollisesti rakeistuksen yhteydessä lisätystä lisätypestä. Levityskustannusten voidaan ajatella olevan samaa suuruusluokkaa rakeistusmenetelmästä riippumatta.

Huolimatta siitä, että lisäravinteelle tulee kustannus, sen kuljetukselle ja levittämiselle ei tarvitse laskea hintaa, koska pienet määrät eivät lisää rakeiden kuljetus- ja levityskustannuksia.

Laskennassa käytettyjä yksikkökustannuksia ja työtehon arvoja:

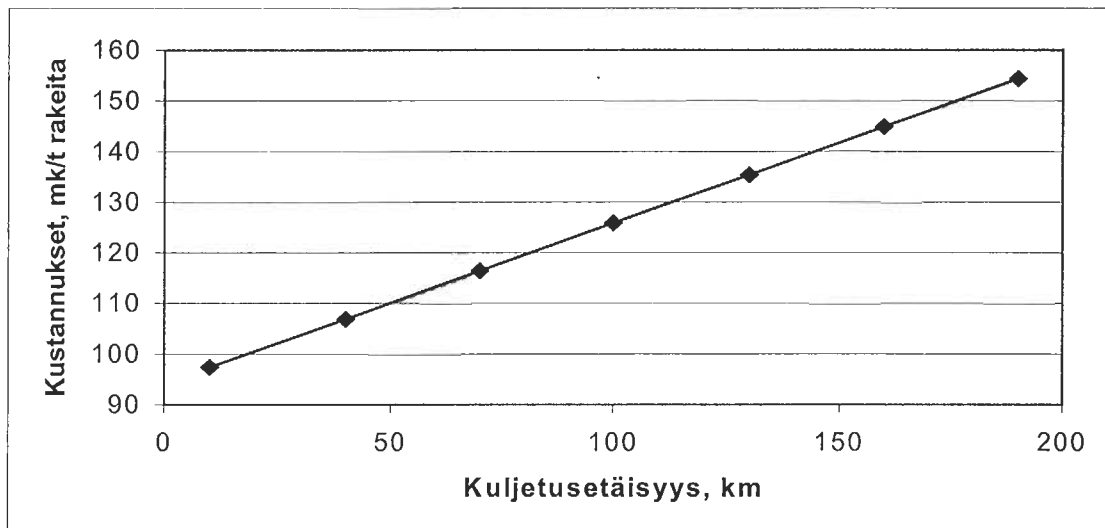
- Perävaunullisen vaihtolava-auton tuntihinta 285 mk/h (tieto kysytty KAK:sta).
- 10 m<sup>3</sup> :n kontin hankintahinta 10 000 mk (KAK)
- rakeistussäiliön hankintahinta 200 000 mk (arvio)



- täysien konttien siirto rekkaan tehtaalla ja konttien tyhjennys levityspaikalle kestää 0,25 h kumpikin eli 0,5 h yhteensä ja keskimääräinen ajonopeus 60 km/h (arvioita)
- rakeistusnopeus noin 10 m<sup>3</sup>/h, mikä merkitsisi esim. kaksi 5 m<sup>3</sup>:n panosta tunnissa, johon sisältyy lietteen ja tuhkan syöttö sekä rakeiden purku konttiin (arvio)

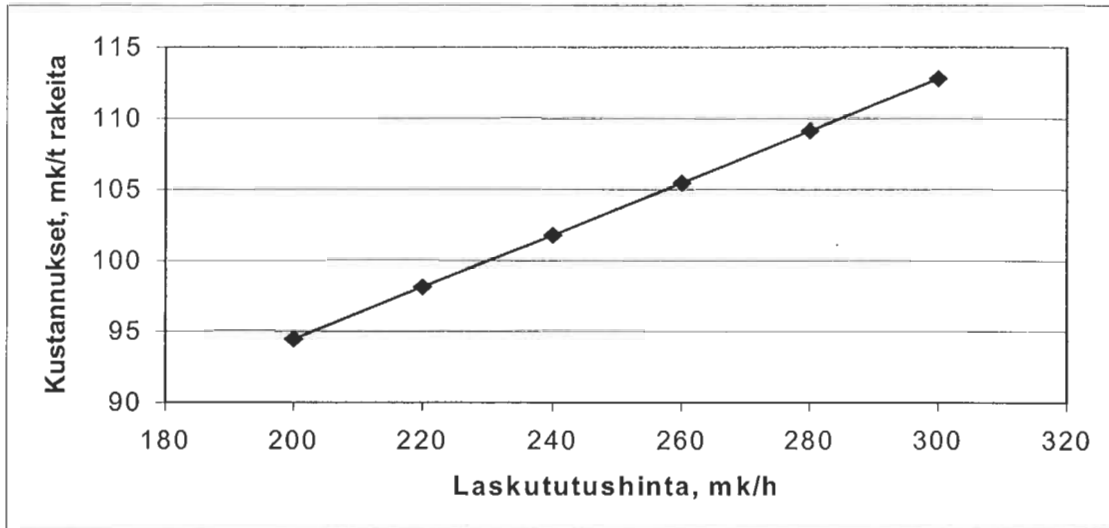
### 7.3 TULOKSET

Laskennassa käytetyillä arvoilla rakeistuksen ja levityksen hinnaksi saadaan vuotuisesta rakeistumäärästä riippuen 110-120 mk/t rakeita, kun laskelmassa on käytetty 50 km keskimääräistä kuljetusetäisyyttä yhteen suuntaan. Kuljetusetäisyyden vaikutus hintaan on merkittävä (kuva 5).



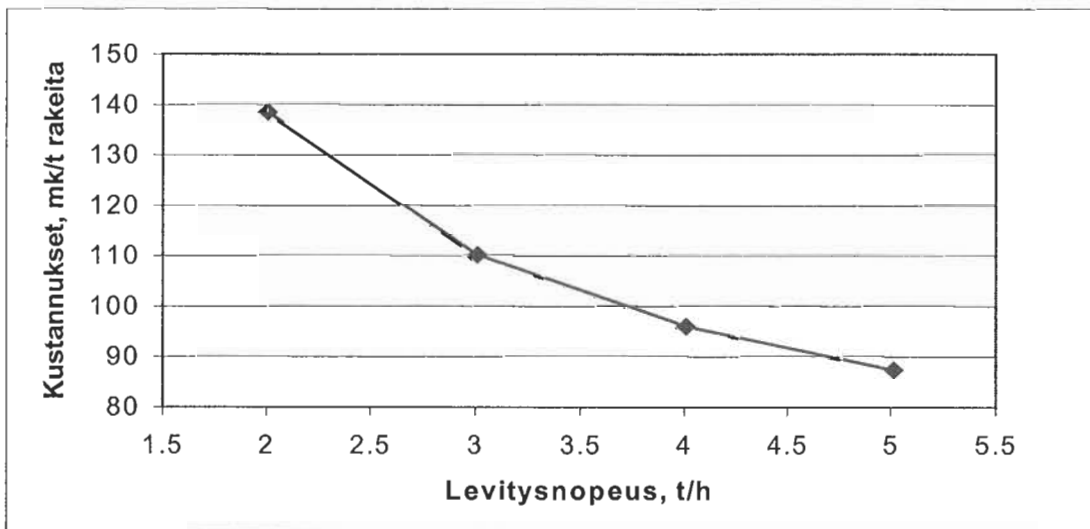
*Kuva 5. Kuljetusetäisyyden (matka yhteen suuntaan) vaikutus tuhka-lieterakeiden rakeistus- ja levityskustannuksiin.*

Mikäli rakeistus on jatkuvaa, voivat kaluston tuntihinnat jäädä alhaisemmiksi, mikä pienentää kustannuksia (kuva 6).



Kuva 6. Kuljetuskaluston tuntihinnan vaikutus tuhka-lieterakeiden rakeistus- ja levityskustannuksiin.

Eniten kustannuksiin vaikuttavat rakeiden levityskustannukset ja erityisesti levityskapasiteetti (kuva 7).



Kuva 7. Rakeiden levityskapasiteetin vaikutus tuhka-lieterakeiden rakeistus- ja levityskustannuksiin.

Liitteessä 1 on esitetty laskentamalli. Siinä on mahdollista muuttaa laskennan lähtötietoja ja laskea kustannuksia eri tapauksissa. Liitteessä 1/1 on esitetty laskelma tehtaalte x, joka edustaa

keskimääräistä metsäteollisuuslaitosta ja liitteessä 1/2 on esitetty laskelma Metsäserla Oy:n Lielahden tapauksessa.

Rakeistuksesta ja rakeiden levityksestä metsään aiheutuvat kustannukset ovat melko vähäisiä verrattuna esim. pelkän tuhkan vastaaviin rakeistus- ja levityskustannuksiin mk/t. Menetelmän huomattavana etuna tehtaan kannalta on monissa tapauksissa säästö kaatopaikkakustannuksissa, koska rakeistukseen menevä, suhteellisen kostea bioliete joudutaan useissa tapauksissa nykyisin viemään kaatopaikalle. Lietteiden kaatopaikalle vienti on vaikeutumassa ja hinta kohoamassa. Tällä hetkellä keskimääräiseksi kustannukseksi voidaan arvioida 250 mk/t, mutta se voi kohota lähitulevaisuudessa jopa arvoon 450 mk/t. Arvioitu vaikutus metsänkasvuun voisi olla laskelmien mukaan 100 - 250 mk/t rakeita, kun lisäkasvun hinnaksi lasketaan 100 (paperipuu) - 250 (tukkipuu) mk/m<sup>3</sup>. (lisätty seuraava) Tällöin on oletettu että tuhkalieterakeisiin lisätään tarvittaessa tyypeä siten, että typpimäärä metsähehtaaria kohden on 150 kg. Kaiken kaikkiaan säästöksi esimerkiksi Lielahden tehtaalla voidaan laskea 230 - 390 mk/t rakeita, mikäli liete jouduttaisiin muuten viemään kaatopaikalle ja lannoituksesta metsänkasvulle aiheutuvaksi hyödyksi lasketaan 100 - 250 mk/t rakeita.

Kun arvioidaan, että koko maassa voitaisiin vuosittain rakeistaa ja palauttaa metsään vähintään 100 000 t puuperäistä tuhkaa ja 200 000 t puuperäistä biolietettä on siitä aiheutuva vuotuinen hyöty kymmeniä tai jopa satoja miljoonia markkoja vuodessa.

Seuraavassa on arvioitu levityspinta-alaa, mille tehtaalta tulevasta tuhkasta ja biolietteestä saatavat rakeet riittävät. Tehtaan x vuosittainen tuhkasta ja biolietteestä valmistettava raemäärä on 28750 t/a (kts. liite 1/1). Levitysmäärällä 12 t/ha voitaisiin raemäärä levittää vuosittain 2400 ha:n alalle. Laskelmien mukaan tämä on 15 % sen ympyrän pinta-alasta, jonka säde on 50 km (pinta-ala on tällöin 785 000 ha) ja jonka keskipisteessä tehdas sijaitsee. Tällöin oletukseksi on valittu että lannoitus rakeilla tapahtuu joka 50 :s vuosi. Jos ympyrän säde olisi 100 km, olisi levityspinta-ala alle 4 %.

Lielahden tehtaalla tuhkasta ja lietteestä syntyvä raemäärä 3700 t/a (liite 1/2) riittää vuosittain levitykseen 308 ha:lle. Kun ympyrän säde on 50 km ja lannoitus tehdään 50 vuoden välein, on levityspinta-ala tällöin 2 % koko ympyrän alasta.

Tuhkan ja lietteen rakeistaminen "pyöritystekniikalla" on kustannuksiltaan kilpailukykyinen menetelmä. Rakeistus ja rakeiden kuljetus metsään voidaan hoitaa samalla vaihtolava-autolla. Tehtaan ei tarvitse tehdä kalliita investointeja, vaan tähän sopiva kalusto voidaan tilata ulkopuolelta. Suhteellisen edullinen vaihtolavarungolle asennettava rakeistuslaitteisto voidaan hankkia tehtaalle tai sekin voi olla jonkin urakoitsijan omistuksessa, jolloin samaa laitetta voidaan käyttää useammalla tehtaalla.

Menetelmällä on paljon kansantaloudellista merkitystä. Tärkeä seikka on ns. kompensatiolannoitus eli metsästä puiden mukana poistuvia ravinteita voidaan palauttaa puuperäisistä sivujakeista tehtynä lannoitteena, johon on tarvittaessa lisätty ravinteita. Metsätähteiden energiakäytön myötä tulee ravinteiden palauttaminen metsään entistä tärkeämmäksi. Puupolttoaineen tuhka sisältää tärkeimmät ravinteet tyypeä lukuunottamatta, jota saadaan lannoiterakeisiin lietteen mukana.

Tässä tutkimuksessa tehtyjen kasvihuonekokeiden perusteella tuhka-lieterakeilla lannoittaminen oli koivun taimien kasvun kannalta yhtä tehokasta kuin keinolannoitteilla lannoittaminen. Taimien kasvu yli kaksinkertaistui lannoituksen vaikutuksesta. Mikäli samansuuntaiset tulokset pätevät metsänkasvatuksessa eikä tuhka-lieterakeista aiheudu metsälle tai ympäristölle mitään negatiivisia vaikutuksia, on lannoituksesta metsänkasvulle aiheutuva hyöty merkittävä.

Tällaisen melko koston rakeen säilyvyys ei ole erityisen hyvä ja se pitäisikin saada mahdollisimman tuoreena käyttöön. Rakeiden levitys kangasmetsiin ympäri vuoden lienee mahdollista, jolloin pitkiä varastointiaikoja ei tarvita. Samoja levitysjankohtaa rajoittavia kantavuusongelmia kuin suolle levityksessä ei ole. Rakeita voidaan tarvittaessa säilyttää muutamia kuukausia ilmastossa paikassa mielellään katoksen alla. Tuhka-biolietelannoitteen palauttaminen metsiin ja puun korjuu olisi järkevää integroida muuhun kuljetukseen. Esimerkiksi puunkuljetusauto voisi paluukuljetuksena tuoda rakeita vaikka kauemmaksiin tehtaasta sijaitsevaan metsään. Myös esim. harvennushakkuut ja lannoiterakeiden levitys voitaisiin hoitaa samalla kalustolla.

## 7.4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuhkan ja lietteen rakeistaminen "pyöritystekniikalla" on kustannuksiltaan kilpailukykyinen menetelmä verrattuna siihen, että bioliete toimitettaisiin kaatopaikalle. Säästö verrattuna biolietteen tämänhetkiseen kaatopaikalle vientikustannukseen on huomattava. Jos rakeiden metsään viennistä on hyötyä myös puun kasvun lisääntymisenä ovat taloudelliset edut vieläkin suuremmat. Tuhkan ja biolietteen hyödyntämismenetelmällä todettiin olevan myös huomattava kansantaloudellinen merkitys. Metsätähteiden lisääntyvän energiakäytön myötä tulee ravinteiden palauttaminen metsään entistä tärkeämmäksi. Puupolttoaineen tuhka sisältää tärkeimmät ravinteet lukuunottamatta typpeä, jota saadaan lannoiterakeisiin lietteen mukana.

Käytännössä tuhkan ja biolietteen rakeistus ja rakeiden kuljetus metsään voidaan hoitaa samalla vaihtolava-autolla. Tehtaan ei tarvitse tehdä kalliita investointeja, vaan tähän sopiva kalusto voidaan tilata ulkopuolelta. Suhteellisen edullinen vaihtolavarungolle asennettava rakeistuslaitteisto voidaan hankkia tehtaalle tai sekin voi olla jonkin urakoitsijan omistuksessa, jolloin samaa laitetta voidaan käyttää useammalla tehtaalla.

# 8 LIETTEIDEN JA TUHKAN HYÖTYKÄYTTÖÄ KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET JA OHJEET (PIRJO-RIITTA RANTALA, PIRKANMAAN YMPÄRISTÖKESKUS)

Metsäteollisuuden lietteiden ja tuhkien hyödyntämiselle ei ole annettu erityisiä määräyksiä, eikä metsäteollisuuslietteille tai tuhkillle ole olemassa erityisiä säädöksiä. Näin ollen lietteille ja tuhkillle on sovellettava muita jätteille, lietteille, lannoitevalmisteille ym. annettuja määräyksiä.

Jätteen ja sivutuotteen käsite voidaan määrittää sellaiseksi tuotantoprosessissa tai käytössä yli jääneeksi aineeksi tai esineeksi, joka poistetaan tarpeettomana käytöstä. Tämä määrittely vastaa suhteellisen hyvin jätelain jättekäsitettä. Usein jätteenä pidetään vain sellaista ainetta tai esinettä, jota ei voida enää hyödyntää ja joka joutuu näin kaatopaikalle tai tuhoaan muulla tavoin. Tämä määrittely ei kuitenkaan ole jätelain hengen mukainen. Teollisuuden sivutuotteiksi määritellään aine tai esine, joka syntyy tarkoituksella tai vaihtoehtoisesti ilman tarkoitusta, jos sillä on arvoa. Jäte ei kuitenkaan muutu sivutuotteeksi sillä hetkellä, kun sitä hyödynnetään (Puolanne 1998).

Jätelain 1072/93 (1994) mukaan jätettä ovat aineet tai esineet, jotka niiden haltija on poistanut, aikoo poistaa tai on velvollinen poistamaan käytöstä. Näin ollen hyödyntämispotentiaalilla ei ole mitään merkitystä. Jätelaissa on myös sanottu, että jätteenä ei pidetä sellaisia jäännös- ja sivutuotteita, jotka voidaan ilman niihin kohdistuvia hyödyntämistoimia välittömästi ja

kokonaisuudessaan käyttää samassa prosessissa, jossa ne ovat syntyneet. Metsäteollisuuden lietteitä ja tuhkia voidaan näin ollen pitää jätelainsäädännön mukaisina jätteinä.

Lietteiden maanviljelykäyttöä säätelee valtioneuvoston päätös puhdistamolietteistä (Vnp 282/1994). Sitä sovelletaan myös muun vastaavanlaatuisen lietteen tai siitä valmistetun lieteseoksen käyttöön. Valtioneuvoston päätöksessä on määritelty käyttöä rajoittavat raskasmetallipitoisuudet, käyttökohteet, käyttömäärät sekä lietteen käsittely ennen levitystä. Tämän hetkinen lainsäädäntö ei ota kantaa metsälevitykseen, mutta uuteen EU:n lietedirektiiviin on tarkoitus sisällyttää myös metsäteollisuuden lietteet ja niiden käyttö metsätaloudessa. Maa- ja metsätalousministeriö ei ole myöskään säätänyt raskasmetallinormeja tuhkalannoitteille. Ruotsissa on ehdotettu (Naturvårdsverket ja Skogsstyrelsen) hyväksyttäväksi kadmium-annokseksi 50 g/ha 100 vuoden aikana (vaihteluväli 30 – 100 g). Todennäköistä on, että lähiaikoina Suomessakin tullaan antamaan ohjeet sekä tuhkan että lietteen käytölle metsissä.

Jätteen (lietteen ja tuhkan) käsittely edellyttää aina ympäristölupaa. Ympäristölupa on haettava laitosta, toimintaa tai muuta hanketta varten (ympäristölupamenettelylaki 735/91 1992). Jätteen hyödyntämiseen, käsittelyyn sekä ongelmajätteen keräämistoimintaan tarvitaan lisäksi jätelupa. Luvat myöntää joko kunnan ympäristönsuojelulautakunta tai alueellinen ympäristökeskus.

Ympäristönsuojelulain ja -asetuksen sekä jätelain lisäksi lietteiden ja tuhkien hyötykäytössä on otettava huomioon muiden lakien ja asetusten antamat ohjeet ja suositukset. Tällaisia lakeja ovat mm. vesilaki (huuhtoutumat vesistöön ja pohjavesien pilaantumisen estäminen), terveysuojelulaki (lietteen ja tuhkan levityksen työsuojelu), luonnonsuojelulaki, kemikaalilainsäädäntö ja ympäristöministeriön päätös yleisempien jätteiden ja ongelmajätteiden luettelosta (Ymp 867/96 1997).

Jos lietteestä tai tuhkasta tehdään lannoitteita, ovat ne silloin lannoitelain alaisia tuotteita (KTTK 282/93 1994) ja niiden käytöstä säädetään lannoitelaisissa. Lannoitelaki ei koske sellaisenaan käytettäviä yhdyskuntien jätevesilietteitä. Lisäksi maa- ja metsätalousministeriön päätöksessä (MMMp 46/94 1994) on määräyksiä eräistä lannoitevalmisteista. Tämä lainsäädäntö koskee kuitenkin etupäässä muuta kuin metsälevitystä, mutta esimerkiksi lannoitelakia ollaan uudistamassa lähiaikoina ja metsälevitys saatetaan sisällyttää uuteen lakiin.

Ohjeellisina voidaan pitää myös WHO:n ohjeita lietteen käsittelystä ja käytöstä (Mara & Cairncross 1987) sekä vesiensuojelun tavoiteohjelmaa vuodelle 2005. Jälkimmäisessä on otettu kantaa metsälannoitukseen: ”Metsiä lannoitetaan ensisijaisesti puuston terveyden ylläpitämiseksi sellaisilla lannoitteilla, levitysmenetelmillä ja kasvupaikoilla, että ravinnehäviöt vesistöihin ovat mahdollisimman vähäiset. Pohjavesialueilla on vältettävä uudistus- ja kunnostusojituksia, sekä raskasta maanmuokkausta. Lannoitteiden käyttöä vältetään ja huolehditaan siitä, että pohjavesien pilaantumisvaaraa ei aiheudu.” Metsiä lannoitettaessa tulisikin ensisijaisesti tarkastella lannoitustarvetta ja ympäristönsuojelullisia näkökohtia.

## 9 LIUKENEVUUSKOKEET (PIRJO-RIITTA RANTALA JA SUSANNA OLLILA, PIRKANMAAN YMPÄRISTÖKESKUS)

### 9.1 JOHDANTO

Liukenevuuskokeiden tarkoituksena oli selvittää tuhka-lieteseoksista liukenevien ravinteiden ja raskasmetallien määriä laboratoriossa tehdyissä sadetuskokeissa. Kokeen avulla selvitettiin liukenevien aineiden kokonaismäärät koejakson aikana. Tuhka-lieteseokset prosessoitiin rakeiksi betoninsekoittimella VTT Energian laboratoriossa, kuten on selostettu tämän julkaisun kohdassa 4.

#### 9.1.1 Tutkimuksen lähtötiedot

Tutkimuksessa käytettiin liete-tuhkaseoksia, Kemira Agro Oy:n typpilannoitteella täydennettyjä liete-tuhkaseoksia ja pelkkää lietettä. Liette oli Metsä-Serla Oyj:n Lielahden kemihierretehtaan jätevedenpuhdistamon biolietettä. Seostustuhkat tulivat Lielahden tehtaalta ja Metsä-Serla Oyj:n Äänekosken tehtaalta. Kokeissa käytettiin sadetuslaatikoissa seosten alustana pintamaata kangasmetsästä ja kuitukangasta.

Kemihierretehtaan jätevedenpuhdistamon lietteet käsittävät ns. primaarilietteen ja biolietteen. Lietteen muodostumiseen vaikuttavat tuotannon määrä ja puhdistamolle tuleva happea kuluttavan aineen määrä (BOD<sub>7</sub>-kuorma). Puhdistamolle tuleva BOD<sub>7</sub>-kuorma on tasolla 10 tO<sub>2</sub>/d ja COD<sub>Cr</sub>-kuorma tasolla 25 tO<sub>2</sub>/d. Lielahdessa biolietteen määrä on n. 3-4 t/d 100 % kuiva-aineena laskettuna ja tuhkaa n. 2 – 3 t/d. Bioliete pumpataan jälkiselkeytysaltaan pohjalta sakeudessa 1,1 – 1,5 % ja kuivataan lingolla n. 11 – 14 % kuiva-aineeseen. Tässä tutkimuksessa käytettiin lingolla kuivattua biolietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus oli n. 12 %.

Kemihierretehtaan biolietteessä on kivennäisravinteita painoyksikköä kohden huomattavasti vähemmän kuin puuntuhkassa (pistonäytteestä analysoituna P = n. 8 g/kg, K = n. 2,7 g/kg kuiva-ainetta, kuiva-ainepitoisuus 124 g/l). Sen sijaan se sisältää kohtalaisen runsaasti typpeä (N = n. 73 g/kg kuiva-ainetta). Nykysuosituksen mukainen lannoitetypen määrä, typpeä 150 kg/ha, saavutettaisiin näin ollen n. 16,5 tonnin lietemäärällä hehtaaria kohti. Yleensä lietteen tyypestä kuitenkin vain noin 60 % on muodossa, joka on helposti kasvien käytettävissä.

Kyseinen bioliete sisältää vain vähän raskasmetalleja verrattuna tuhkien raskasmetallipitoisuuksiin. Lielahden tuhkassa on kadmiumia n. 11 mg/kg, lyijyä n. 28 mg/kg ja elohopeaa alle 0,04 mg/kg. Äänekosken tuhkassa on kadmiumia 17 mg/kg ja lyijyä n. 40 mg/kg. Tuhkan korkeat raskasmetallipitoisuudet kohottavat seosten raskasmetallipitoisuuksia.

Jos biolietteeseen sekoitetaan puuperäistä tuhkaa n. 10 %, kuiva-ainepitoisuus kohoaa tasolle 200 g/l. Seoksen typpipitoisuus alenee tällöin tasolle 40 gN/kg kuiva-ainetta ja toisaalta fosfori- ja kaliumpitoisuudet kohoavat tasolle 15 gP/kg ja 20 gK/kg kuiva-ainetta. Käytettäessä esim. 15 ja 25 tonnin määriä, tulee alueelle typpeä 122 ja 204 kg/ha eli helppoliukoisena typpenä n. 73 ja 122 kg/ha. Näitä määriä voitaneen pitää kohtuullisina yritettäessä arvioida seoksen typpilannoitusvaikutusta. Kaliumia ei kankailla yleensä tarvita, mutta tuoreilla kankailla fosfori typen ohella saattaa lisätä puuston kasvua.

## 9.1.2 Koejärjestelyt

Liete-tuhkarakeiden liukenevuusominaisuuksia tutkittiin sadetuslaitteiston avulla VTT Energian tiloissa Leivonmäellä. Kokeet tehtiin muovilaatikoissa, joihin laitettiin muoviverkon päälle joko kuitukangas tai pintamaata. Näiden päälle laitettiin joko pelkkää lietettä tai eri liete-tuhkaseoksilla tehtyjä lannoituksia. Laatikoita sadetettiin ja näytteitä otettiin lannoituksen läpi valuneesta vedestä. Sadetusvesi oli pohjavettä, joka tuotiin koepaikalle saaveissa. Kuitukangas oli kotimainen monikäyttöliina, joka on valmistettu viskoosi-puukuidusta (70 %) ja polyesteristä (30 %). Pintamaana oli Leivonmäen kangasmetsästä kaivettu 20 cm:n korkuinen pala pintamaata. Kokeen avulla selvitettiin liukenevien aineiden kokonaismääriä koejakson aikana. Eri aineiden liukenemisnopeutta ei tällä kokeella voitu selvittää. Analyysija tehtiin myös kiinteistä näytteistä ennen seostusta sekä seostuksen ja sadetuksen jälkeen.

Kokeessa käytettiin Lielahden kemihierretehtaan lingottua biolietettä ja tuhkaa sekä Äänekosken tehtaiden tuhkaa. Osaan käsittelyistä lisättiin Kemira Agron typpilannoitetta. Kokeessa käytettiin viittä eri lannoiteseosta:

- Lielahden kemihierretehtaan bioliete (LL)
- Äänekosken tehtaiden tuhka ja Lielahden kemihierretehtaan bioliete (ÄTLL)
- Äänekosken tehtaiden tuhka, Lielahden kemihierretehtaan bioliete ja Kemiran typpilannoite (ÄTLLN)
- Lielahden kemihierretehtaan tuhka ja bioliete (LTLL)
- Lielahden kemihierretehtaan tuhka ja bioliete ja Kemiran typpilannoite (LTLLN)

Sopiva liete-tuhkaseossuhde valittiin huomioiden viranomaismääräykset ja yleiset metsälannoitusohjeet. Lannoitusmääriä laskettaessa otettiin huomioon typen, fosforin ja kaliumin suhde. Liete-tuhkaseoksessa typen määrä ei saa ylittää 150 kg/ha/a (nitraattidirektiivi). Laskennassa käytettiin niitä fosfori- ja typpimääriä, jotka ovat kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Tämä tarkoittaa fosforin osalta n. 75 % kokonaisfosforista ja typen osalta n. 60 % kokonaistypestä. VTT Energia valmisti tarvittavat määrät eri lannoiterakeita käyttäen betonimyllyä sekoittimena. Seossuhteena käytettiin tilavuussuhdetta 1:2 eli yksi osa tuhkaa ja kaksi osaa lietettä.

Pintamaata sisältävät käsittelyt koottiin siten, että 19 litran muovisen laatikon päälle sijoitettiin toinen verkkopohjainen laatikko, jonka pohjalle laitettiin ensin kuitukangas ja sitten laatikon mittoihin leikattu n. 20 cm:n korkuinen pala metsän pintamaata. Lannoitelisäys tehtiin pintamaan päälle. Pelkkää lietettä laitettiin 152 g/laatikko ja liete-tuhkarakeita 175 g/laatikko. Lietteen kuiva-ainepitoisuus oli n. 12 % ja liete-tuhkarakeiden n. 43 %.

Laatikot sijoitettiin sadetuslaitteiston alle lastauslavojen päälle satunnaiseen järjestykseen (liite 2). Laatikoita sadetettiin 4 vuorokautena joka päivä neljän tunnin ajan intensiteetillä 10 mm/h (10 litraa/m<sup>2</sup>) eli 40 l/m<sup>2</sup>/vrk. Tämä vastaa hieman yli kuukauden keskimääräistä sademäärää Jyväskylän korkeudella. Yhden laatikon pinta-ala oli 0,1 m<sup>2</sup>, joten teoriassa vettä sadetettiin n. 4,0 l laatikkoa kohden vuorokaudessa. Laatikoihin suodatuneesta vedestä otettiin n. 2 litran vesinäytteet vuorokausina 1 (1 vrk:n jälkeen) ja 4 (kokooma vuorokausilta 2 - 4). Ennen näytteenottoa vesi punnittiin ja sekoitettiin. 0,5 l näytettä suodatettiin (0,45 µm Gellman) välittömästi ja molemmat näytteet (suodatettu ja suodattamaton) pakastettiin. Ensimmäisen näytteenoton jälkeen laatikoihin

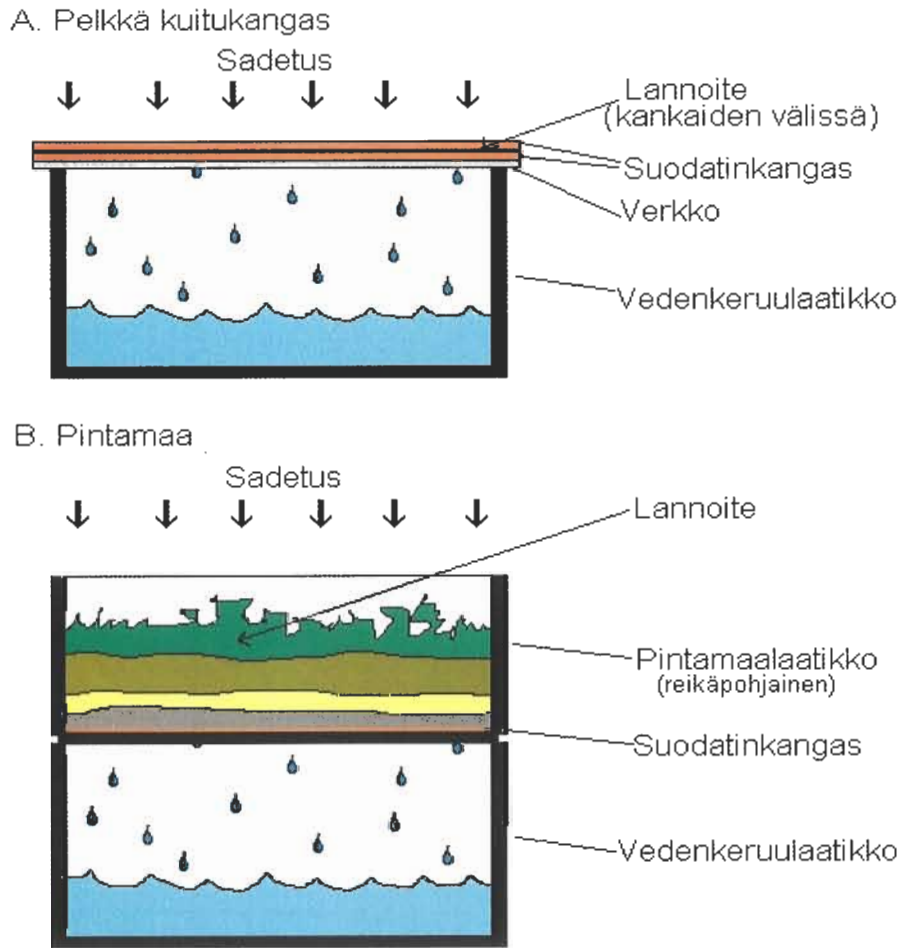
jäljelle jäänyt vesi kaadettiin pois. Näytteet kuljetettiin kokeen loputtua pakastettuina analysoitavaksi Pirkanmaan ympäristökeskuksen laboratorioon Tampereelle.

Liukenevuuskokeessa oli eri käsittelyjä yhteensä 11 kpl. Käsittelyissä 1-10 oli kaksi rinnakkaista, käsittelyä 11 tehtiin vain yksi:

1.           Kontrolli kuitukangas (kk)
2.           Pelkkä liete + kuitukangas (Lkk)
3.           Äänekosken tuhka-lieteseos + kuitukangas (ÄTLL kk)
4.           Äänekosken tuhka-liete-typpilisäseos + kuitukangas (ÄTLLN kk)
5.           Kontrolli pintamaa (pm)
6.           Pelkkä liete + pintamaa (LL pm)
7.           Äänekosken tuhka-lieteseos + pintamaa (ÄTLL pm)
8.           Äänekosken tuhka-liete-typpilisäseos + pintamaa (ÄTLLN pm)
9.           Lielahden tuhka-lieteseos + kuitukangas (LTLL kk)
10.          Lielahden tuhka-liete-typpilisäseos + kuitukangas (LTLLN kk)
11.          Sadetusvesi (pelkästään) (s)

Kuvassa 8 on kaavio koejärjestelyistä. Käsittelyt, joissa ei käytetty pintamaata, koottiin seuraavalla tavalla: n. 19 litran muovisen laatikon päälle ( $p*1*k = 36*26*20 \text{ cm}^3$ ) laitettiin kehystetty muovinen verkko, jolle leikattiin saman kokoinen pala kuitukangasta. Lannoitelisäys tehtiin kuitukankaan päälle, ja lannoitteen päälle leikattiin toinen samankokoinen pala kangasta, jotta kosteus leviäisi tasaisesti. Sadetettava vesi suotautui kuitukankaan ja lannoitteen läpi ja keräytyi alla olevaan laatikkoon, josta näyte otettiin.





Kuva 8. Kaavio koejärjestelyistä.

Käytetyistä lietteistä ja tuhista samoin kuin valmistetuista rakeista ilman typpilisäystä otettiin näytteet ennen koetta. Seoksista 2 ja 4 otettiin näytteet myös kokeen jälkeen kaapimalla lannoitetta koelaatikoista. Kiinteistä näytteistä analysoitiin pH, kuiva-ainepitoisuus, orgaanisen hiilen määrä (TOC), liukoisen orgaanisen hiilen määrä (DOC), pääravinteiden (N, P) kokonaispitoisuudet, fosfaattifosfori (PO<sub>4</sub>-P), ammoniumtyppi (NH<sub>4</sub>-N), raskasmetallit, maa-alkalimetallit (Ca, Mg), alkalimetallit (Na, K) ja rauta. Myös kokeessa käytetystä pintamaasta ja lannoiterakeiden alustana käytettävästä kuitukankaasta tehtiin samat määrytykset kuin liete-tuhka seoksista. Kiinteiden näytteiden esikäsittely (uutto) tehtiin ISO 11464 standardin mukaan ja sen jälkeen näytteet analysoitiin SFS- standardien mukaan.

Ensimmäisen ja viimeisen sadetusvuorokauden vesinäytteistä määritettiin alkaliniteetti, väri, kokonaistyyppi, liukoinen kokonaistyyppi, ammoniumtyppi (NH<sub>4</sub>-N), nitraatti-nitriittityppi (NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>-N), kokonaisfosfori, liukoinen kokonaisfosfori, fosfaattifosfori (PO<sub>4</sub>-P), liukoinen fosfaattifosfori, Ca, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, Mg, Fe, raskasmetallit, DOC, TOC ja COD. Analyysit tehtiin SFS-standardien mukaan. Sähkönjohtavuus ja pH mitattiin kokeen jokaisena vuorokautena suoraan vedestä kannettavalla mittarilla. Taulukossa 10 on esitetty näytteenottoaikataulu ja vesinäytteistä tehdyt analyysit.

Taulukko 10. Näytteenottoaikataulu ja vesinäytteistä tehtävät määritykset. (\* = sadetus alkaa; x = näytteenotto)

Määritys	Määrityksen tekijä	0 vrk	1 vrk	2 vrk	3 vrk	4 vrk
pH	PIR	*	X	X	X	X
Johtokyky	PIR		X	X	X	X
Alkaliniteetti	PIR		X			X
Väri	PIR		X			X
Kok. N	PIR		X			X
Liuk. Kok. N	PIR		X			X
NH <sub>4</sub> -N	PIR		X			X
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> -N	PIR		X			X
Kok. P	PIR		X			X
Liuk. Kok. P	PIR		X			X
PO <sub>4</sub> -P	PIR		X			X
Liuk. PO <sub>4</sub> -P	PIR		X			X
Ca	GTK		X			X
Na	GTK		X			X
K	GTK		X			X
Cl	GTK		X			X
SO <sub>4</sub>	PIR		X			X
Mg	GTK		X			X
Fe	GTK		X			X
Raskasmetallit	GTK		X			X
DOC	PIR		X			X
TOC	PIR		X			X
COD	PIR		X			X

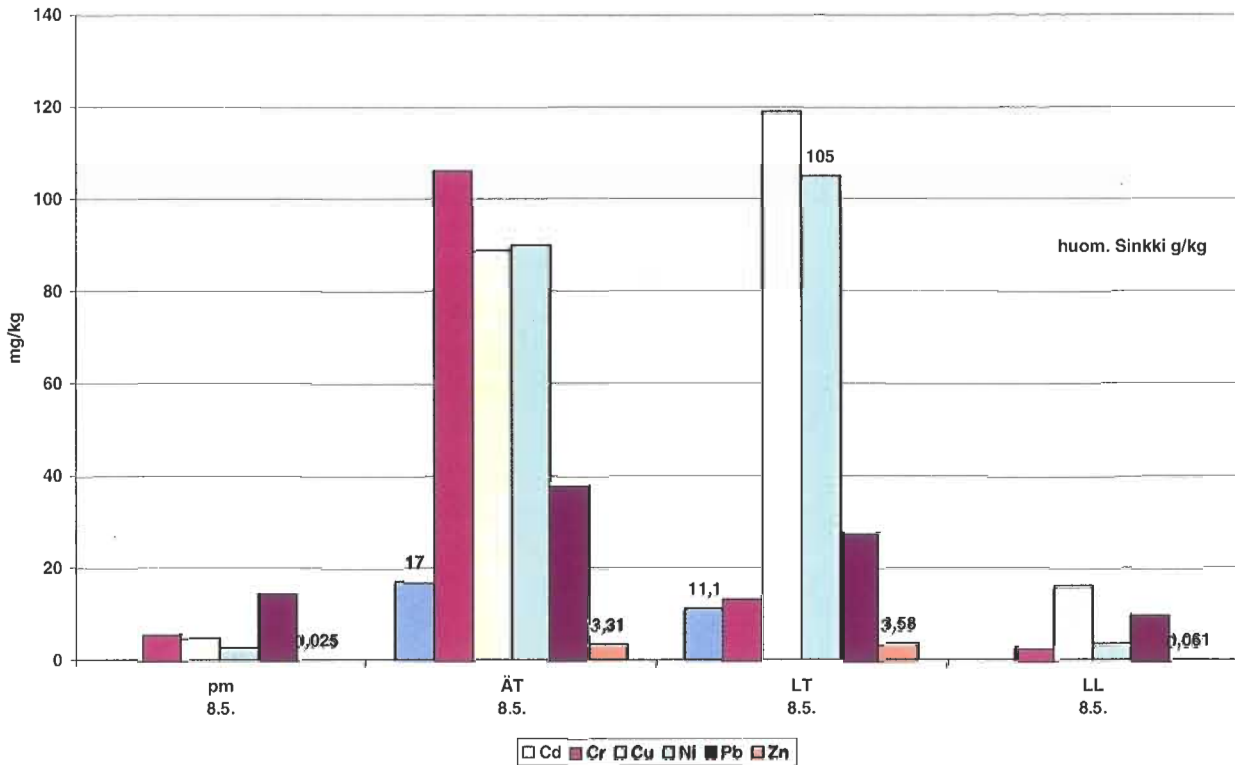
Kiinteiden näytteiden ja vesinäytteiden raskasmetallianalyysit tehtiin Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) kemian laboratoriossa. Määritykset tehtiin typpihappouutosta ICP-massaspektrometrillä. Toimitettujen näytteiden esikäsittely ja typpihappouutto tehtiin Pirkanmaan ympäristökeskuksen (PIR) laboratoriossa.

## 9.2 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

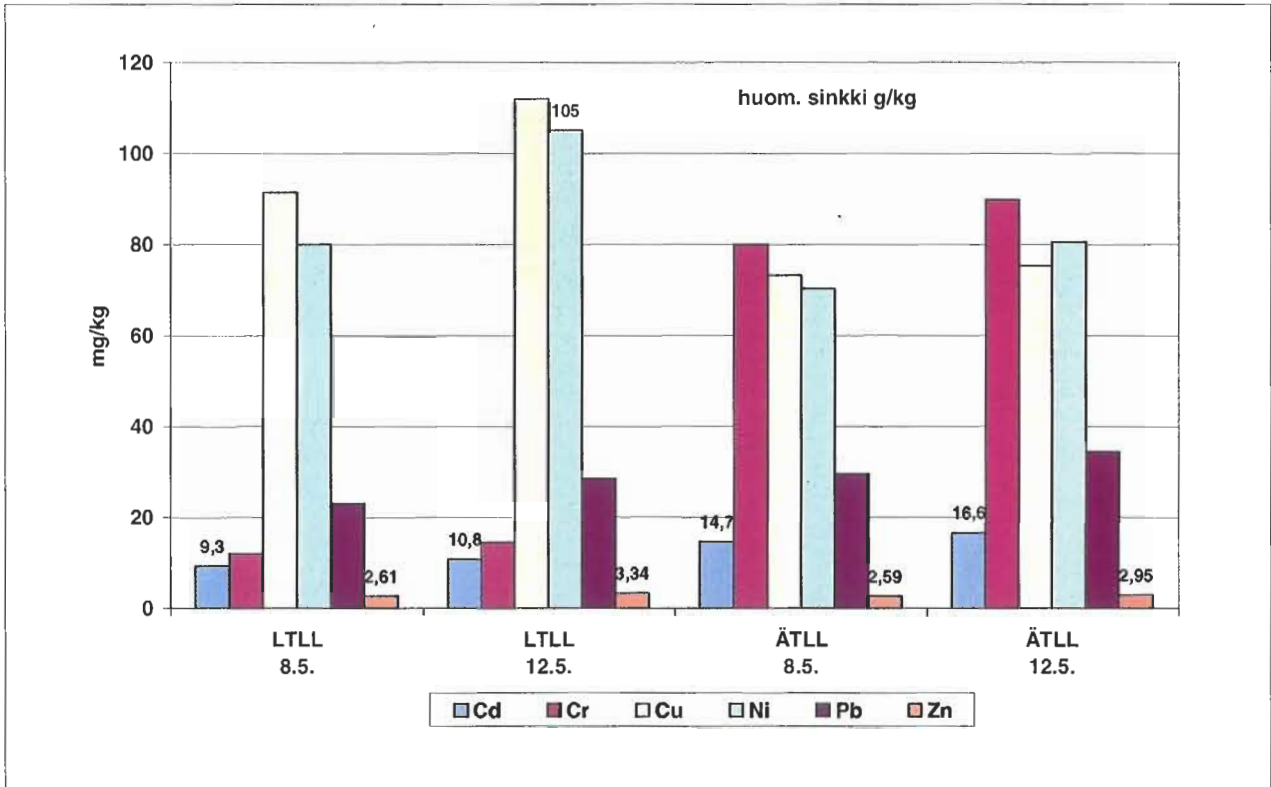
### 9.2.1 Kiinteät näytteet

Liitteessä 3 on esitetty kiinteiden näytteiden analyysitulokset ja kuvissa 9 ja 10 kiinteiden näytteiden raskasmetallipitoisuudet ennen sadetusta ja sadetuksen jälkeen. Lietteen kadmiumpitoisuudet ovat erittäin pieniä ennen tuhkan sekoitusta ja sadetusta (kuva 9). Kadmiumpitoisuus Lielahden kemihierretehtaan lietteessä oli ennen tuhkan sekoitusta 0,11 mg/kg. Lielahden tehtaan tuhkan kadmiumpitoisuus oli noin 11 mg/kg ja Äänekosken tuhkan 17 mg/kg. Tuhka-lieteseosten kadmiumpitoisuudet vaihtelivat välillä 9,3 mg/kg – 14,7 mg/kg. Käytettäessä Äänekosken tuhkaa kadmiumpitoisuudet olivat selvästi korkeampia.

Tuhkien kadmium- ja nikkelpitoisuudet ovat erittäin korkeita. Maanviljelyksessä käytettävän lietteen korkein sallittu kadmiumpitoisuus on nykyisin 1,5 mg/kg ja nikkelin suurin sallittu pitoisuus on 100 mg/kg. Kadmiumin pitoisuus saadaan tilapäisesti ylittää 20 % ja nikkelin pitoisuusrajoituksia voidaan myös ylittää tilapäisesti, mutta ylitysten merkitys on arvioitava jokaisessa tapauksessa erikseen.



Kuva 9. Kiinteiden näytteiden raskasmetallipitoisuudet ennen sadetusta ja sekoitusta. Pitoisuudet ovat mg/kg kuiva-ainetta kohti paitsi sinkki, joka on ilmoitettu g/kg. Kuvaan on merkitty näkyviin ne analyysituloksien arvot, jotka ylittävät valtioneuvoston päätöksessä (Vnp) mainitut raja-arvot maanviljelyksessä käytettävien lietteiden ja lieteseosten raskasmetallipitoisuuksista sekä sinkin pitoisuudet.



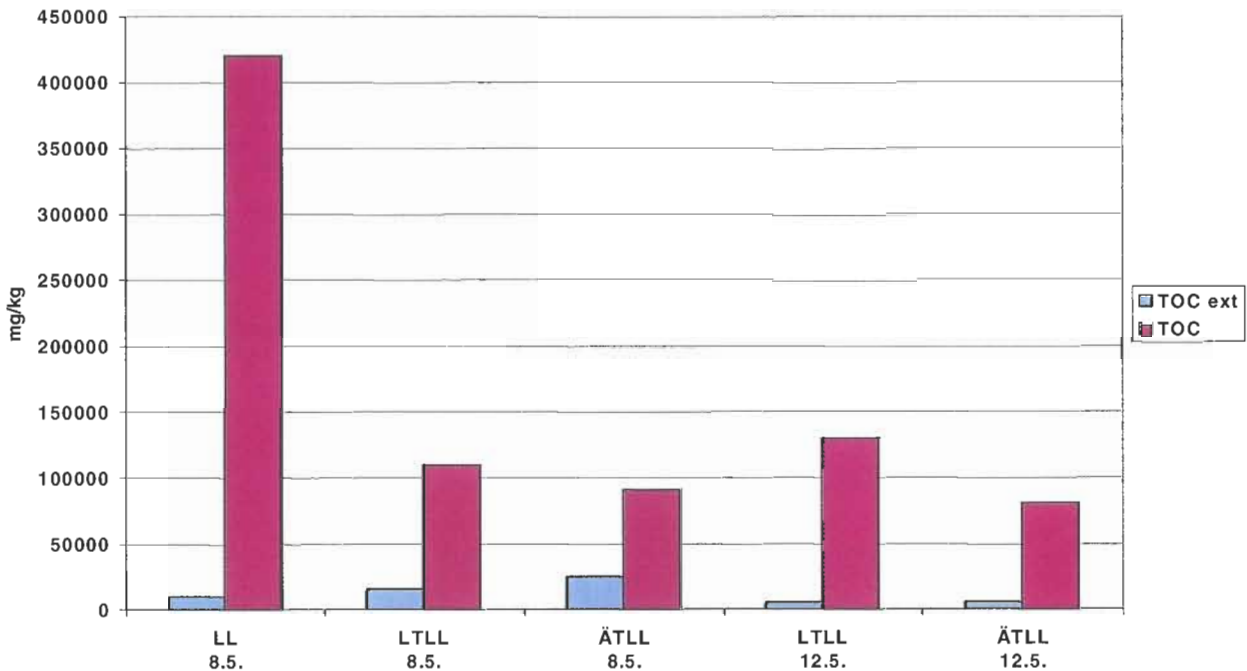
Kuva 10. Kiinteiden näytteiden raskasmetallipitoisuudet ennen sadetusta (8.5.) ja 4 vrk sadetuksen jälkeen (12.5.). Luvut ovat mg/kg kuiva-ainetta kohti paitsi sinkki, joka on ilmoitettu g/kg. Kuvaan on merkitty näkyviin ne analyysitulokset, jotka ylittävät valtioneuvoston päätöksessä (Vnp) mainitut raja-arvot maanviljelyksessä käytettävien lietteiden ja lieteseosten raskasmetallipitoisuuksista sekä lisäksi sinkin pitoisuudet. Näytteet on otettu kuitukangaslaatikoiden lannoiteseoksista.

Neljän vuorokauden sadetusjakson jälkeen raskasmetallipitoisuudet kiinteissä näytteissä lisääntyivät. Tämä saattaa johtua siitä, että yksittäisten rakeiden välillä on ollut eroja tuhkan ja lietteen määrissä. Esimerkiksi 12.5. otetuissa näytteissä on saattanut olla enemmän tuhkaa, mikä on nostanut raskasmetallipitoisuuksia näissä näytteissä.

Tuloksien epävarmuus käy myös ilmi, jos tarkastellaan kiinteiden näytteiden ja vesinäytteiden massaosuuksia. Jos lasketaan liete- ja tuhkanäytteiden raskasmetallien määrät alkuperäisistä ei-seostetuista näytteistä, niin määrät ovat 3 – 4 kertaiset verrattuna analyysitulosten mukaisiin määriin seoslannoitteissa. Tämän vuoksi raskasmetallien taseita on erittäin vaikea laskea ja voidaankin vain arvioida kuinka paljon raskasmetalleja lähti prosentuaalisesti sadeveden mukana.

Kuvassa 11 on esitetty lietteen ja liete-tuhkaseosten orgaanisen hiilen pitoisuudet (TOC = kokonaisorgaaninen hiili, DOC ext = liukoinen orgaaninen hiili). Lietteet sisältävät yleensä paljon helposti hajoavaa orgaanista ainetta. Kuvasta 11 nähdään, että liete-tuhkarakeissa on orgaanista ainetta vain n. neljäsosa alkuperäisestä pelkän lietteen sisältämästä orgaanisen aineen määrästä. Tämä johtuu siitä, että lietteisiin lisättiin tuhkaa ja osittain siitä, että osa orgaanisesta aineesta on saattanut hajota lietteen kuljetuksen ja säilytyksen tai rakeistuksen aikana. Sadetuksella ei ollut

merkittävää vaikutusta kokonaisorgaanisen hiilen vähenemisiin, mutta liukoinen hiili väheni sadetuksen aikana.



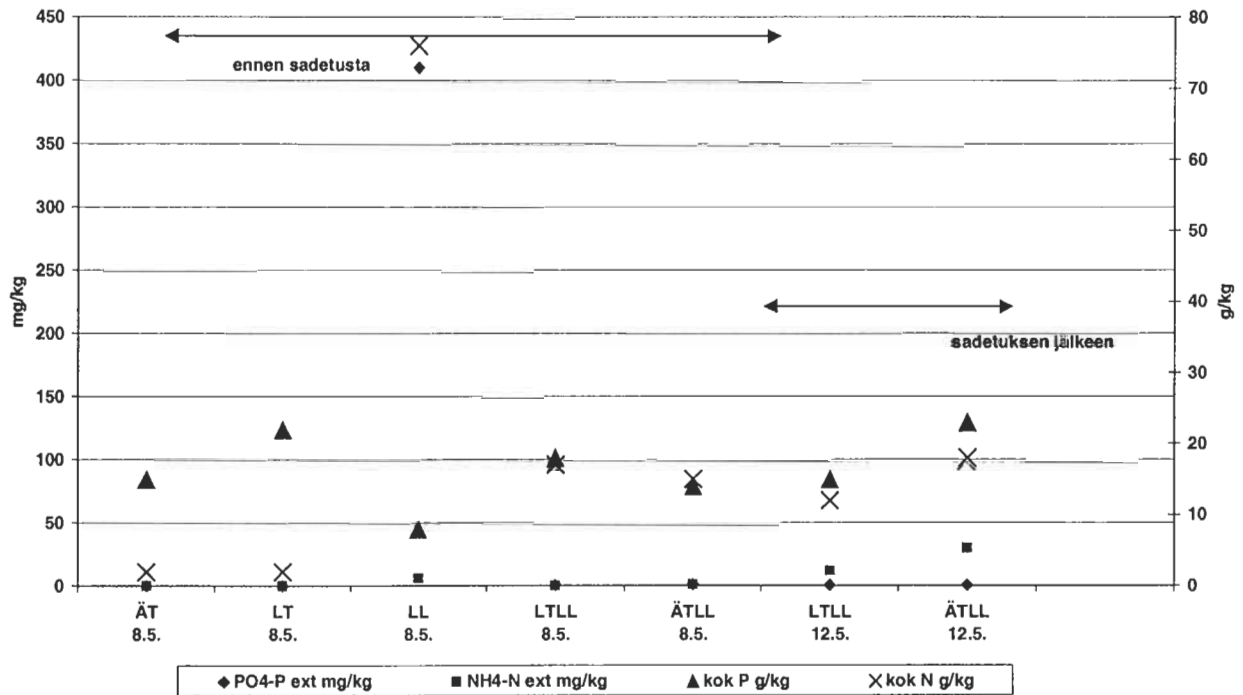
Kuva 11. Orgaanisen aineen pitoisuudet kiinteissä näytteissä ennen sadetusta (8.5.) ja sadetuksen jälkeen (12.5.). Kuvassa on lisäksi Lielahden lietteen orgaanisen hiilen pitoisuudet ennen sekoitusta (LL).

Kuvassa 12 on esitetty kiinteiden näytteiden sisältämät ravinnepitoisuudet ennen sadetusta ja sadetuksen jälkeen. Sadetuksella ei ollut suurta vaikutusta liukoisten ravinteiden (fosfaatti ja ammonium) pitoisuuksiin. Ammoniumpitoisuudet ovat Äänekosken tehtaan koe-erässä kohonneet sadetuksen jälkeen, mutta kokonaistyyppipitoisuus on pienentynyt.

Alkuperäisen lietteen tyyppipitoisuus oli 1,7-kertainen verrattuna seoslietteisiin. Pelkän lietteen tyyppipitoisuus oli erittäin korkea (76 g/kg). Osa kokonaistyyppistä haihtui tai muuttui ammonium- ja nitraattitypeksi rakeistusprosessin aikana. Tuhkan lisääminen lietteeseen nosti seosten pH-arvon kuudesta yhteentoista, minkä seurauksena osa ammoniumtyypeistä on saattanut muuttua nitraattitypeiksi. Haihtumista taas on voinut tapahtua prosessoinnin yhteydessä joko ammoniakkinä tai tyyppikaasuna. Lisäksi tyyppipitoisuus pieneni, koska lietteeseen lisättiin tuhkaa, joka sisältää tyyppiä hyvin vähän. Sadetus ei aiheuttanut suuria muutoksia kokonaistyyppipitoisuuksissa.

Todennäköisesti jäljelle jäänyt tyyppi oli suurimmaksi osaksi sitoutunut orgaaniseen aineeseen eikä sadetus enää liuottanut seoksista tyyppiä. Kokonaisfosforipitoisuudet olivat tuhka-lieteseoksissa kaksinkertaiset verrattuna pelkän lietteen pitoisuuksiin. Lietteen korkea liukoisen fosfaattifosforin pitoisuus aleni sekoituksen yhteydessä. Sadetus ei vaikuttanut fosfaattifosforin huuhtoutumiseen. Kalsiumpitoisuudet olivat seoksissa välillä 178 g/kg – 235 g/kg eikä liukenemista tapahtunut.

Kaliumia liukeni sadetuksen aikana runsaasti: pitoisuudet olivat alussa välillä 36 g/kg – 53 g/kg ja lopussa välillä 8,8 g/kg – 9,1 g/kg.

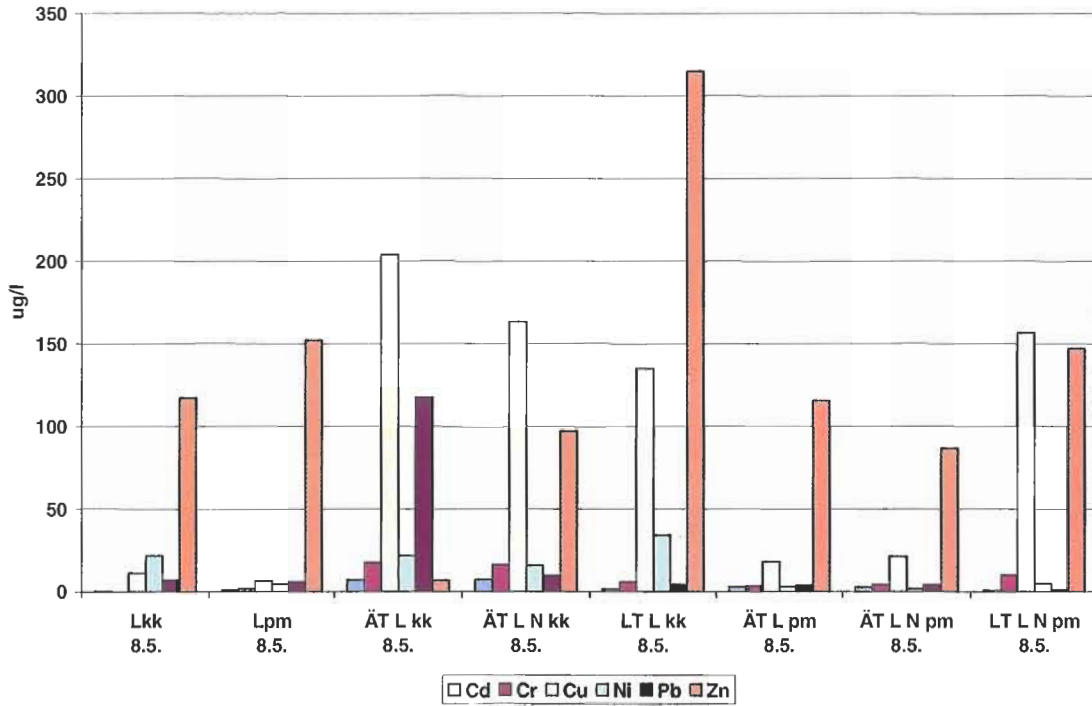


Kuva 12. Ravinnepitoisuudet kiinteissä näytteissä ennen sadetusta ja sadetuksen jälkeen.

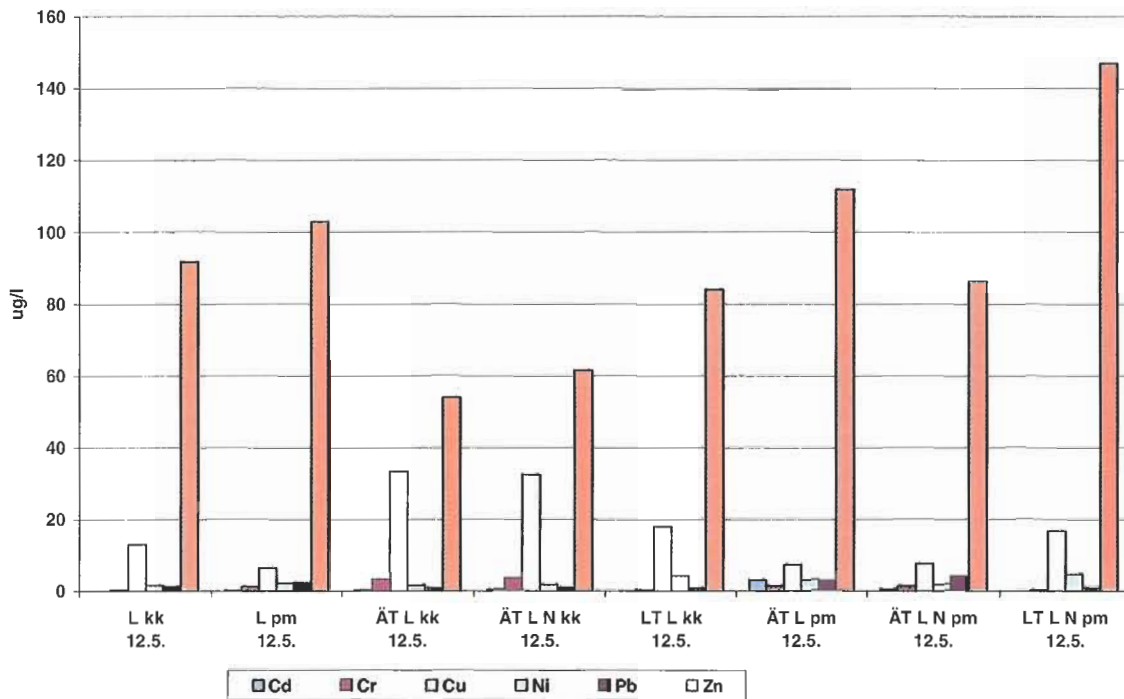
## 9.2.2 Vesinäytteet

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty vesinäytteiden raskasmetallianalyysien tulokset. Kuviin on otettu ne raskasmetallit, joille on asetettu raja-arvot valtioneuvoston päätöksessä maanviljelyksessä käytettävistä lietteistä. Liitteessä 4 on kaikki määritetyt raskasmetallipitoisuudet sekä alkali- ja maa-alkalimetallien pitoisuudet.

Kuvista 13 ja 14 nähdään, että ensimmäisen sadetuspäivän jälkeen liete-tuhkaseoksista liukenee eniten kuparia. Pintamaa pidätti paremmin raskasmetalleja kuin pelkkä kuitukangas etenkin Äänekosken tuhka-lieteseosta käytettäessä. Pelkästä lietteestä liukeni vähemmän raskasmetalleja kuin seoksista. Poikkeuksena oli kuitenkin sinkki, jota liukeni pelkästä lietteestä enemmän kuin liete-tuhkaseoksista. Neljännen sadetuspäivän jälkeen otetuissa näytteissä oli edelleen eniten sinkkiä, vaikka pitoisuudet näissä näytteissä olivat vain puolet ensimmäisen vuorokauden arvoista. Vain Lielahden liete-tuhkaseoksesta, johon oli lisätty typpeä, liukeni 2. – 4. päivänä yhtä paljon sinkkiä. Kuparin pitoisuudet olivat 1. päivän ja 2. – 4. päivän näytteissä lähes yhtä suuret. Muiden raskasmetallien liukenemista ei tapahtunut merkittävästi. Kokeen perusteella pintamaa pidättää raskasmetalleja, jolloin huutoutunut osuus oli pintamaanäytteissä pienempi kuin kuitukangasta käytettäessä. Poikkeuksena oli vain sinkki. Sadetuskokeissa mitattiin vain kuitukankaan tai pintamaan läpi mennyt vesi; tässä kokeessa pintavaluntaa ei ollut.



Kuva 13. Raskasmetallipitoisuudet (mikrogrammaa litrassa) liete-tuhkaseosten vesinäytteissä ensimmäisen sadetuspäivän jälkeen.



Kuva 14. Raskasmetallipitoisuudet (mikrogrammaa litrassa) liete-tuhkaseosten vesinäytteissä 2. – 4. päivän kokoomanäytteessä sadetuspäivän jälkeen.

Vesinäytteissä oli rinnakkaisten näytteiden välillä suuria eroja joidenkin raskasmetalli- ja maa-alkalimetallianalyyysien kohdalla. Esimerkiksi näytteessä, joka oli otettu laatikosta missä oli Äänekosken tuhkaa ja biolietettä pintamaalla 8.5. oli kahden rinnakkaisen alumiinin analyysituloksen keskihajonta 2700 µg/l keskiarvon ollessa 4900 µg/l. Samassa näytteessä magnaenin rinnakkaisten näytteiden keskiarvo oli 1800 µg/l ja keskihajonta oli 860 µg/l. Muidenkin näytteiden kohdalla oli havaittavissa samanlaista vaihtelua ja eniten vaihtelua oli maa-alkalimetallien analyysituloksissa.

Kuvassa 15 on esitetty kokonaistyyppipitoisuudet ja liukoisen typen pitoisuudet Äänekosken tuhka-lieteseoslaatikoiden läpi suotautuneessa vedessä 1. ja 2. – 4. vuorokauden sadetuksen jälkeen. Suurin osa kokonaistypestä oli liukoisessa muodossa. Pintamaa sisälsi typpeä 2 g/kg ja seoslietteissä oli typpeä välillä 15 – 17 g/kg. Pintamaan osuus koko laatikon massasta oli suuri (n. 3kg) verrattuna lannoitteen määrään (172 g), joten pintamaassa oli typpeä kaksinkertainen määrä verrattuna rakeissa olevaan typen määrään. Liette-pintamaan läpi suotautunut vesi sisälsi kuitenkin ensimmäisen sadetuspäivän jälkeen typpeä vain 2,4 mg/l ja kuitukangas-pintamaan läpi suotautuneessa vedessä oli typpeä 1,2 mg/l. Lielahden tuhka-liete kuitukangas laatikon läpi suotautuneessa vedessä oli typpeä 34 mg/l. Tämän mukaan näyttäisi, että pintamaassa oleva tyyppi on orgaanisesti sitoutunut eikä huuhtoutunut sadetuksen yhteydessä.

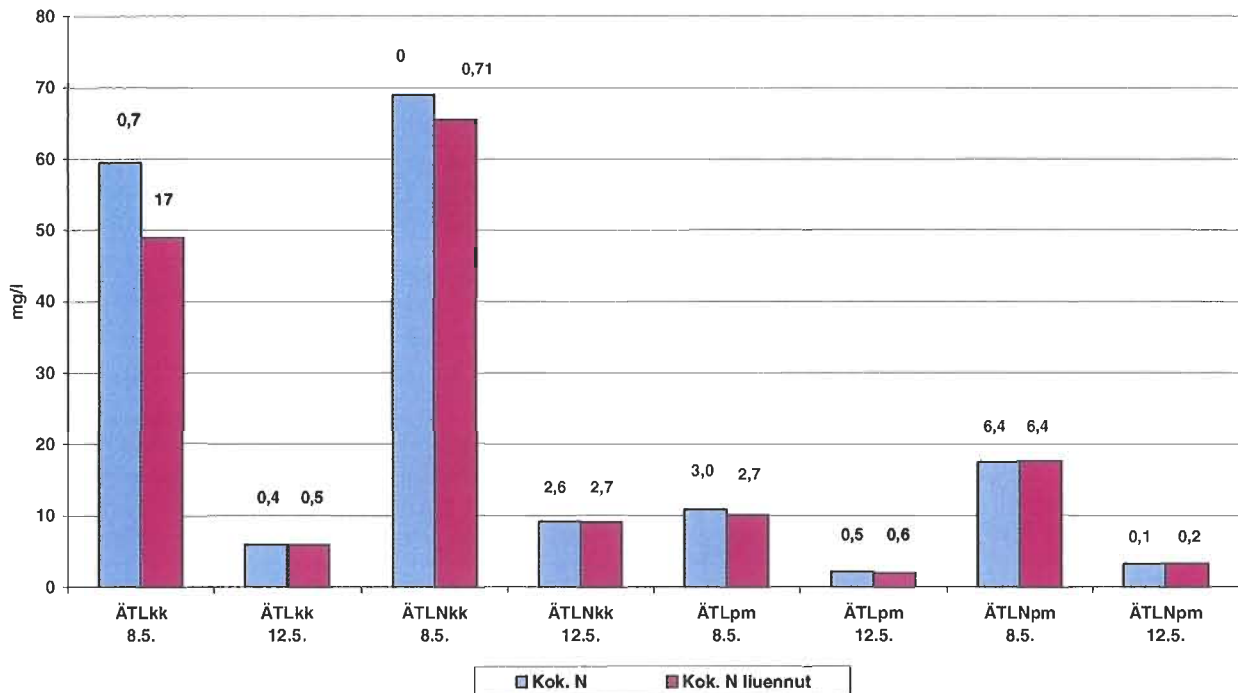
Rakeista, joihin oli lisätty Kemiran tyypilannoitetta, liukeni hieman enemmän typpeä kuin ilman tyypilisäystä olevista rakeista. Pintamaa pidätti erittäin tehokkaasti typpeä: pintamaan läpi suotautuneeseen veteen liukeni typpeä vain noin kolmannes kuitukankaan läpi suotautuneeseen veteen verrattuna.

Lielahden tuhka-lieterakeita testattiin vain kuitukankaalla. Kuvasta 16 nähdään, että myös Lielahden rakeista liukeni typpeä eniten ensimmäisen vuorokauden aikana. Pitoisuudet olivat kuitenkin Lielahden sadetetuissa tuhka-lieterakeiden vesinäytteissä puolet pienempiä kuin Äänekosken sadetetuissa tuhka-lieterakeiden vesinäytteissä. Taselaskelmien mukaan (kokonaistyyppipitoisuudet laskettu massoina sekä kiinteistä näytteistä että vesinäytteistä) Äänekosken seoksissa typen hävikki oli n. 12 % ja Lielahden seoksista n. 50%. Tämä selittää Lielahden vesinäytteen pienemmät tyypipitoisuudet. Osan hävikistä voidaan ajatella haihtuneen ilmaan, mutta varsinkin Lielahden seosten suuret tyypihävikit eivät selity pelkästään haihtumisella.

Tuhkalisäys kohotti seosten pH-arvoa voimakkaasti ja se todennäköisesti häiritsti spektrofotometrasta nitraatin määrittystä. Ensimmäisen sadetusvuorokauden jälkeen ei nitraattimäärittäystä voitu enää tehdä. Kohonnut pH on saattanut kuitenkin muuttaa tasapainoa ammoniumtyyppistä nitraattitypen suuntaan, jolloin 2. – 4. sadetusvuorokauden jälkeen nitraattitypen pitoisuudet ovat saattaneet kasvaa. Nitraattityypimuodossa tyyppi liukenee helpommin ja tämä saattaa taas lisätä typen huuhtoutumista. Kokonaistypen huuhtoutumiseen ei pH:n nousulla ollut merkitystä.

Lietteen sisältämä tyyppi tulee suurimmaksi osaksi puhdistusprosessiin lisättävästä ureasta. Vedessä urea ei hajoa automaattisesti ilman biologista prosessia, vaan pysyy kompleksisena yhdisteenä. Liukoisesta tyyppistä osa voi näin ollen olla ureaa, osa nitraatteina ja ammoniumtyyppinä ja osa orgaanisesti sitoutuneina yhdisteinä (esim. amiinit). Tämän kokeen yhteydessä ei voitu selvittää, kuinka suuri osa liukoisesta tyyppistä oli neljännen sadetusvuorokauden jälkeen nitraatteina.

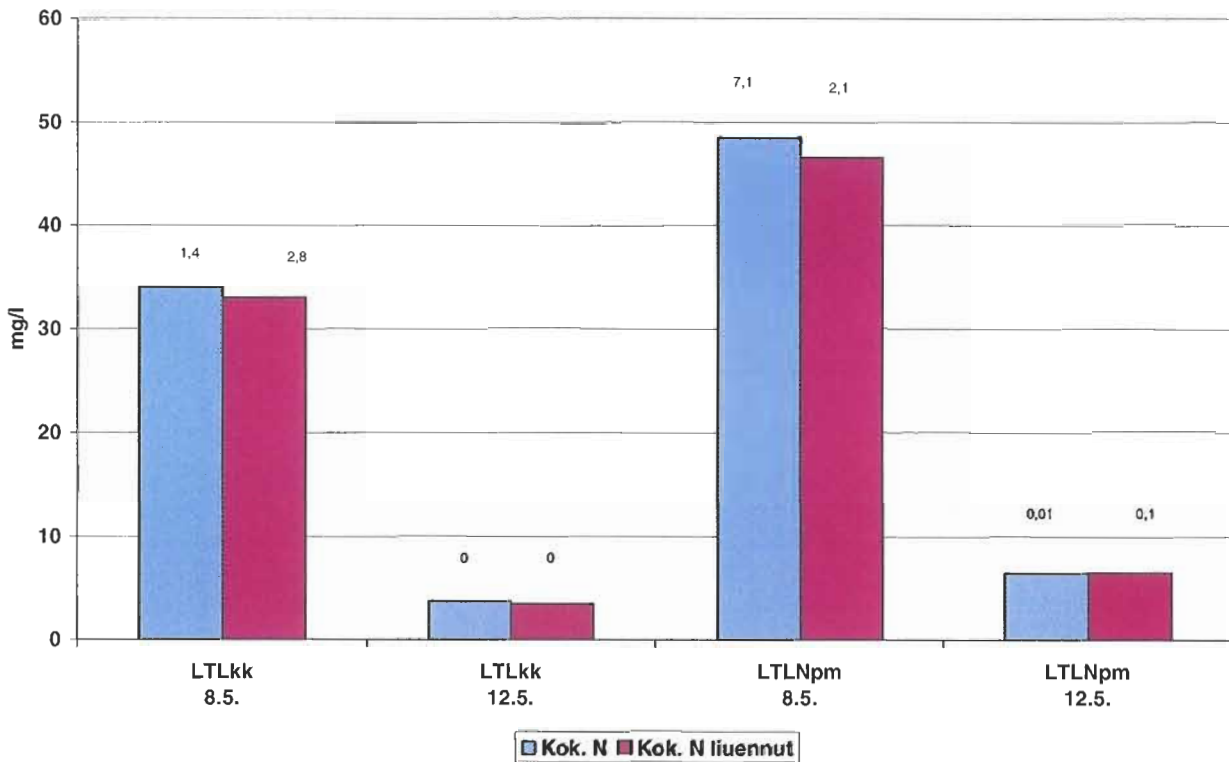




Kuva 15. Typpipitoisuudet Äänekosken tuhka-lieterakeiden vesinäytteissä ensimmäisen ja 2. – 4. päivän kokoomanäytteessä sadetuspäivän jälkeen. Kuvaan on merkitty kahden rinnakkaisen näytteen keskihajonta (mg/l).

Kokonaisfosfori oli vesinäytteissä pääosin liukoisessa muodossa. Fosforista liukeni ensimmäisenä päivänä suurin osa. Pintamaa pidatti selvästi enemmän liuenutta fosforia kuin kuitukangas. Liuenneen fosforin pitoisuudet olivat ensimmäisen sadetuspäivän jälkeen kuitukankaan läpi suotautuneessa vedessä välillä 1000 – 8300 µg/l ja pintamaan läpi suotautuneessa vedessä välillä 600 – 2400 µg/l. Äänekosken rakeista ja typpilisäyrakeista liukeni ensimmäisen vuorokauden aikana selvästi enemmän fosforia kuin Lielahden rakeista. Neljännen sadetusvuorokauden jälkeen pitoisuudet olivat kuitukankaan läpi suotautuneessa vedessä välillä 210 – 660 µg/l ja pintamaan läpi suotautuneessa vedessä välillä 47 – 210 µg/l. Neljän vuorokauden näytteissä korkeimmat liukoisen fosforin pitoisuudet olivat Lielahden rakeiden sadetusvedessä.

Ravinteiden analyysituloksissa oli havaittavissa samanlaista vaihtelua kahden rinnakkaisen analyysin välillä kuin raskasmetallianalyseissä. Varsinkin typpimääritysten (kokonaistyyppi, liukoinen kokonaistyyppi, ammoniumtyppi) hajonnat olivat suuria. Rinnakkaisten näytteiden erot eivät olleet keskittyneet johonkin tiettyyn näytteeseen, vaan hajontaa oli kaikissa näytteissä.



Kuva 16. Typpipitoisuudet Lielahden tuhka-lieterakeiden vesinäytteissä ensimmäisen ja 2. – 4. Päivänkokoomanäytteessä sadetuspäivän jälkeen. Kuvaan on merkitty rinnakkaisten näytteiden keskihajonta (mg/l).

### 9.2.3 Kokeissa ilmenneitä ongelmia

Sadetuslaitteiston ja koelaatikoiden välinen etäisyys pyrittiin saamaan sellaiseksi, että suuttimista tuleva vesisuihku olisi tasainen koko alueelle. Käytännössä ei edes laitteiston sallima suurin etäisyys riittänyt, vaan suuttimista tuleva vesisuihku jäi liian suppeaksi, jolloin koelaatikoihin tuli sijainnista riippuen eri määrä vettä (liite 2). Esimerkiksi reunimmiselle laatikkoriville tuli vettä noin kaksinkertainen määrä verrattuna muihin laatikoihin, jolloin osa siitä oli otettava talteen vedenkeräyslaatikosta kokeen kolmantena vuorokautena, jotta sadetettava vesi mahtuisi laatikkoon. Talteen otettu vesi yhdistettiin isossa saavissa vedenkeräyslaatikon veden kanssa ennen toista näytteenottoa vuorokautena 4.

Laatikoiden rakenteesta johtuen niiden ulkosivuilla oleviin ulokkeisiin jäi sadetusten jälkeen jonkin verran vettä, joka aiheutti pienen virhetekijän punnitustuloksiin.

Käsittelyissä, joissa oli päällimmäisenä pintamaalaatikko, laatikoiden rakenne aiheutti sen, että pintamaalaatikon ja alemman vedenkeräyslaatikon välisestä raosta pääsi sadetuksen aikana vettä ohi lannoituskäsittelyn suoraan vedenkeräyslaatikkoon. Sama ongelma koski niitä neljää laatikkoa, joissa verkon kehys oli tehty samanlaisen laatikon pohjasta kuin mitä pintamaalaatikat olivat.

Toisessa rinnakkaisessa pintamaan kontrollikäsittelyistä pintamaalaatikon pohjalle asetettu kuitukangas ei peittänyt koko rei'itettyä pohjaa, vaan pohjasta jäi n. 1/4 ilman kuitukangasta. Tämä on luultavasti aiheuttanut enemmän aineiden huuhtoutumista.

Sadetuslaitteisto sijaitti hallissa, jonka katosta varisi jatkuvasti jonkinlaisia maali- tms. hitusia. Näitä joutui väistämättä koelaatikoihin. Vaikka hitusten koostumusta ei tunnetakaan, niiden määrä oli niin pieni, että niillä ei oletettavasti ollut vaikutusta analyysituloksiin.

Näytteenotto sadetetuista kiinteistä näytteistä osoittautui vaikeaksi, koska laatikoista oli erittäin vaikea saada tasalaatuista näytettä, joka ei sisältänyt pintamaata. Rakeiden koostumus on myös saattanut vaihdella niin, että johonkin laatikkoon on tullut rakeita, joissa on ollut enemmän tuhkaa kuin toisissa näytelaatikoissa, koska rinnakkaisten näytteiden analyysitulosten välillä oli suuria eroja.

### 9.3 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lietteiden ja tuhkien käytölle metsälannoitteena ei ole tällä hetkellä olemassa erityisiä määräyksiä. Jätelain mukaan lietteet ja tuhkat ovat jätettä ja jätteen käsittely edellyttää ympäristölupaa. Uudessa lietedirektiiviluonnoksessa puhdistamolietteen tai vastaavan teollisuuslietteen käyttö metsissä on kielletty. Tämä johtaa siihen, että lietteet ja tuhkat on prosessoitava lannoitevalmisteeksi ennen kuin niitä voidaan käyttää metsissä.

Liukoisuuskokeissa käytetty Lielahden kemihierretehtaan bioliete sisälsi erittäin vähän raskasmetalleja. Tuhkat sen sijaan sisälsivät runsaasti kadmiumia ja nikkeliä. Tämä nosti seosten raskasmetallipitoisuudet niin korkeiksi, että esimerkiksi tällaisten rakeiden käyttö maanviljelyksessä ei ole mahdollista.

Eniten raskasmetalleja rakeista liukeni ensimmäisen sadetuspäivän jälkeen. Sinkkipitoisuudet olivat kuitenkin korkeampia 2. – 4. sadetuspäivän jälkeen kokoomanäytteessä. Kiinteiden näytteiden näytteenotossa ilmenneet ongelmat vaikeuttivat absoluuttisten massataseiden laskemista, mutta selvää on, että eniten raskasmetalleja liukeni ensimmäisen sadetusvuorokauden aikana. Ravinteita (tyypeä ja fosforia) liukeni myös eniten ensimmäisenä vuorokautena. Pintamaa pidätti ravinteita paremmin kuin kuitukangas. Typpilisäys rakeisiin lisäsi typen liukenemista. Pelkästä lietteestä liukeni raskasmetalleja suhteellisesti enemmän kuin seoksista.

Sadetuksen aikana ilmenneet ongelmat ovat saattaneet antaa tulokseksi liian pieniä ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksia. Näytteenotossa ja analysoinnissa ilmenneet ongelmat vaikeuttivat absoluuttisten massataseiden laskentaa eikä kaikkia analyysituloksia voida pitää luotettavina.

Raskasmetallien pitoisuudet vesissä olivat neljän vuorokauden sadetuksen jälkeen kuitenkin pieniä kun niitä verrataan kiinteiden näytteiden sisältämiin raskasmetallipitoisuuksiin. Sadetus vastasi noin kuukauden keskimääräistä sademäärää Jyväskylän korkeudella. Tämän sadetuskokeen aikana ei tapahtunut merkittävää liukenemista. Käytännössä pintavalunta voi huuhtoa mukaansa osan raskasmetalleista ja ravinteista. Tässä kokeessa pintavaluntaa ei tapahtunut.

## 10 MÄNNYN JA KOIVUN TAIMIEN KASVATUSKOKEET KASVIHUONEESSA (SEPPÖ KAUNISTO, METLA)

### 10.1 TAUSTAA

Vuoden 1999 alkukesällä perustettiin Metlan Parkanon tutkimusaseman kasvihuoneeseen koe, jossa tutkittiin Metsä-Serlan Lielahden kemihierretehtaan biolietteen sekä sen ja tuhkan seoksen (kuivapainosuhteessa 1/1) ja toisaalta suomensalpietarin vaikutusta männyn kylvötaimien kasvuun kivennäismaan mustikkatyyppin kuusikosta tuodulla maalla (Kaunisto & Ryyänen 1999). Männyn kylvötaimet kasvoivat biolietetuhkaseosta saaneissa koejäsenissä yhtä hyvin kuin suomensalpietarilla lannoitetuissa ja tilastollisesti merkitsevästi paremmin kuin kontrollissa.

Vuonna 2000 VTT Energiassa aloitettiin tutkimus, jossa selvitellään biolietteen käyttöä tuhkan itsekovetuksessa. Tuhkan osuus on tällöin moninkertainen em. kasvihuonekokeeseen verrattuna. Tässä tutkimuksessa haluttiin samalla tutkia biolietteen ja tuhkan vaikutuksia myös puuntaimien kasvuun ja ravinnetilaan sekä maan typpitalouteen. Tutkimus päätettiin toteuttaa kasvihuoneessa. Tutkimusta varten perustettiin uusi koe, jossa maa oli otettu samasta paikasta kuin edellisessäkin kokeessa, mutta testikasvina oli koivu. Eri vaiheiden jälkeen sovittiin, että tutkimuksessa käytetään hyväksi aikaisemmin v. 1999 perustettua männyntaimien kasvatuskoea taimien ravinnetilan ja maan typpitalouden tarkastelun osalta ja uutta koetta tässä vaiheessa pelkästään koivuntaimien kehityksen osalta.

### 10.2 AINEISTO

#### 10.2.1 Kokeen perustaminen ja koejäsenet

Uusi koe toteutettiin, samoin kuin edellinenkin, 3,5 litran vetoisissa muovisissa kukkaruukuissa. Maapaakut irroitettiin varovasti lapiolla muotoillen. Maa pyrittiin ottamaan kokonaisena paakkuna, mutta kivennäismaan osalta tässä oli jonkin verran vaikeuksia ja koeastiaan piti joissain tapauksissa lisätä kuopasta otettua kivennäismaata. Koeastiat verhottiin alumiinifoliolla maan lämpenemisen vähentämiseksi. Humus ja sammalkerros pyrittiin pitämään mahdollisimman ehjänä ja mieluummin vähän koeastian suuta isompana, jotta astia saatiin pinnasta täydeksi.

Ainemäärät laskettiin koeastian suun pinta-alan perusteella. Käsittelyt ilmenevät taulukosta 11. Koe on faktoriaalikokeen muotoinen 5x4. Toistoja oli 2 paitsi lannoittamattossa käsittelyssä, jossa lannoittamattomia koejäseniä oli yhteensä kuusi. Vuonna 1999 perustetun kokeen käsittelyt on esitetty taulukossa 12. Toistoja kokeessa oli kolme (ks. myös Kaunisto & Ryyänen 1999).

Taulukko 11. Kasvihuoneessa v. 2000 koivulla toteutetun bioliete/tuhkakokeen käsittelyt ja typen määrä eri käsittelyissä kg/ha. Lili = Lielahden liete, Litu = Lielahden tuhka, Ätu = Äänekosken tuhka

Aine ja yhdistelmät 1)	Määrä, liete+tuhka, 1000 kg/ha			
	0	6+3 = 9	12+6 = 18	15,7+7,8 = 23,5
	Typeä, kg/ha			
Lili+Ätu,	0	53	106	150
Lili+Litu	0	53	106	150
Lili+Ätu+N 2)	0	75	150	212
Lili	0	53	106	150
Suomensalpietari	0	53	106	150

1) Typpipitoisuudet eri aineissa: Liette kuivana 7,0%, märkä liete 0,882%, liete+tuhka -rae 0,588%, liete+tuhka+N -rae 0,831%. Liette kuiva-ainepitoisuus 126 g/kg.

2) N on hidassliukoista metyleeniureaa, jota lisättiin 2,92% seoksen kuivamassasta.

Taulukko 12. Kasvihuoneessa v. 1999 - 2000 männyllä toteutetun bioliete-tuhkakokeen käsittelyt ja annettujen aineiden määrät. Seoksessa lietettä ja tuhkaa yhtä paljon kuiva-aineena.

Aine ja yhdistelmät 1)	Määrä		
	Kontrolli	1	2
	0	15 t/ha	25 t/ha
Liete	0	15 t/ha	25 t/ha
Oulunsalpietari	0	350 kg/ha	550 kg/ha

1) Typpipitoisuudet eri aineissa: Liette 7,3 % kuiva-aineesta, bioliete+tuhka 4,0 % kuiva-aineesta. Bioliette kuiva-ainepitoisuus 124 g/kg

Uudessa kokeessa tarvittu maa otettiin toukokuussa 2000 ja lannoiteaineet levitettiin välittömästi koeastioihin. Liette ja lietetuhkaseos levitettiin maan pinnalle siten, että ainakin osa varmasti joutui sammalkerroksen sisälle. Koivun taimet esikasvatettiin n. 2-3 cm:n mittaisiksi ja siirrettiin koeastioihin viikolla 24 sekä harvennettiin myöhemmässä vaiheessa niin, että jokaiseen astiaan jäi viisi tainta. Kastelussa käytettiin vesijohtovettä vasteen mukaan ulkoilman sääolosuhteista riippuen. Aluksi vettä lisättiin 150 ml/koeastia kahden-kolmen päivän välein, myöhemmin 100-150 ml/päivä vasteen mukaan siten, että vettä ei pysyvästi kertynyt aluslautasille.

## 10.2.2 Aineiston keruu

Kummassakin kokeessa taimien pituudet mitattiin syyskuun puolivälissä 2000. Mäntykokeesta kerättiin neulaset ja niistä analysoitiin tyyppi Kjelldahlin menetelmällä sekä muut pääravinteet, hivenaineet ja raskasmetallit sekä muutamat ICP-laitteistolla saatavat muut alkuaineet typpihappo/mikroalouunihajotuksen jälkeen. Humuskerroksesta analysoitiin pH, kokonaistyyppi sekä ammonium- ja nitraattityppi.

### 10.2.3 Laskenta

Aineistoa testattiin tilastollisesti BMDP 2V-ohjelmalla käyttäen kaksisuuntaista varianssianalyysiä. Luokittelijoina olivat lisätty aine ja aineen määrä. Selitettävänä muuttujina olivat männyn-, ja koivuntaimien keskipituus, kahden pisimmän koivuntaimen keskipituus, männyntaimien neulasten ravinnepitoisuudet sekä mäntykokeen humuksen kokonais- ja mineraalityypipitoisuudet. Varianssianalyysin tuloksen tilastollinen merkitsevyys on ilmoitettu p-arvoina:  $p < 0,05^*$ ,  $p < 0,01^{**}$ ,  $p < 0,001^{***}$ .

## 10.3 TULOKSET

### 10.3.1 Humuksen pH ja typpi

Sekä pelkkä liete, mutta erityisesti lietteen ja tuhkan seos kohottivat humuksen pH:ta voimakkaasti, n. yhdellä pH-yksiköllä (taulukko 13). Sen sijaan suomensalpietari jopa hieman alensi pH-arvoja. Tulos on odotusten mukainen, koska lietteen pH oli 8,3 ja liete+tuhkaseoksen pH 13,2 eräiden aikaisempien selvitysten mukaan ja toisaalta suomensalpietarin sisältämä  $\text{NO}_3\text{-N}$  alentaa pH:ta.

Taulukko 13. Humuksen pH mäntykokeessa.

Lannoiteaine	Määrä			Keski-arvo
	0	1	2	
Vaihtoehdot	0	1	2	
Liete	4,9	5,0	5,3	5,1
Liete+tuhka	4,9	5,9	5,8	5,5
Suomensalpietari	4,9	4,8	4,7	4,8
Keskiarvo	4,9	5,3	5,3	
p aine = 0,001 p määrä = 0,031			Yhdys- vaikutus	0,061

Kaikki lannoiteaineet kohottivat humuksen kokonaistypipitoisuutta tilastollisesti merkitsevästi (taulukko 14). Poikkeuksena oli suomensalpietarin suurempi määrä, mikä jostakin syystä kohotti kokonaistypipitoisuutta vain vähän.

Kaikki lannoiteaineet kohottivat myös mineraalityypen ( $\text{NH}_4+\text{NO}_3$ ) kokonaispitoisuuksia humuksessa. Voimakkaimmin mineraalityypen kokonaispitoisuutta lisäsivät pelkkä liete ja suomensalpietari (taulukko 14). Liete+tuhkaseoksen vaikutus oli vähäisempi, mutta kuitenkin varsin selvä. Mineraalityypen kokonaispitoisuudet olivat kaikissa koejäsenissä verrattain korkeita, mutta sopivat lannoittamattomissa koejäsenissä kuitenkin pääosin esim. Prihan & Smolanderin (1999) VT- ja OMT-kankaille kenttäolosuhteissa esittämään vaihteluväliin 60-460  $\text{mg kg}^{-1}$  orgaanista ainetta kohden.

Lannoiteaineet vaikuttivat hyvin eri tavoin  $\text{NH}_4$ - ja  $\text{NO}_3$ -tyypin esiintymiseen humuksessa (taulukko 14). Sekä pelkkä liete että suomensalpietari kohottivat voimakkaasti  $\text{NH}_4$ -tyypipitoisuutta humuksessa, kun sitä vastoin tuhkalieteseos ei vaikuttanut käytännöllisesti katsoen lainkaan. Lannoiteaineen ja -määrän välinen yhdysvaikutus ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä. Sen

sijaan tuhkalieteseos kohotti humuksen NO<sub>3</sub>- typpipitoisuuden monikymmenkertaiseksi kontrolliin verrattuna, mutta pelkkä liete huomattavasti vähemmän. Tässä tapauksessa yhdysvaikutus aineen ja määrän välillä oli melkein merkitsevä osoittaen, että liete+tuhkan ja suomensalpietarin vaikutukset poikkesivat pelkän lietteen vaikutuksesta annettujen aineiden määrien kohotessa.

*Taulukko14. Kokonais- ja mineraalityypipitoisuudet humuksessa orgaanista ainetta kohden laskettuna. Orgaanisen aineksen osuus keskimäärin 83,6 %.*

Yhdiste	Lannoite- aine	Määrä			Keski- arvo	Yhdiste	Määrä			Keski- arvo	
		0	1	2			0	1	2		
	Vaihtoehdot	0	1	2			0	1	2		
N, %	Liete	1,62	1,86	1,96	1,81	NH <sub>4</sub> -N	392	951	1320	888	
	Liete+tuhka	1,61	1,93	1,88	1,81	mg/kg	476	482	496	485	
	Suomensalp.	1,58	1,82	1,64	1,68		311	779	764	660	
	Keskiarvo	1,60	1,87	1,83			393	779	860		
	p aine =0.246 p määrä =0.017				Yh- dys- vai- kutus	0,662	0,040 0,011			Yh- dys- vai- kutus	0,136
NO <sub>3</sub> -N mg/kg	Liete	37	57	96	63	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	428	1008	1416	951	
	Liete+tuhka	4	312	268	195	NO <sub>3</sub> -N	480	794	764	670	
	Suomensalp.	5	268	258	177		316	1172	1022	837	
	Keskiarvo	15	212	208			408	992	1068		
	p aine =0.005 p määrä =0.000				Yh- dys- vai- kutus	0,046	0,297 0,002			Yh- dys- vai- kutus	0,383

Näyttääkin siltä, että tuhka on edistänyt voimakkaasti ammoniumtyypen muuttumista nitraattitypeksi eli typen nitrifikaatiota, mikä ilmeisesti aiheutuu pH:n varsin voimakkaasta kohoamisesta. Samanlaisia tuloksia ovat esittäneet Smolander *et al.* (1994) kalkituksen vaikutuksesta. Nitraattityppi ei voi kiinnittyä maahiukkasten negatiivisille ioninvaihtopaikoille, joten tulos antaa aiheen olettaa, että tuhkan lisäys biolietteen mukana edistää typen huuhtoutumista alempiin maakerroksiin tai mahdollisesti jopa pois alueelta.

### 10.3.2 Männyn neulasten alkuainepitoisuudet

Männyn neulasista määritettiin 16 alkuaineen pitoisuudet kokeen päätyttyä. Lietteen suurin määrä samoin kuin kumpikin suomensalpietarin määrä kohottivat neulasten typpipitoisuutta huomattavasti (taulukko 15). Sen sijaan lietetuhkaseoksen vaikutus oli vähäinen. Määrän päävaikutus oli lähellä melkein merkitsevän rajaa (p 0,071). Lietteen ja tuhkan seos kohotti selvästi neulasten fosfori-, kalium- ja booripitoisuuksia, kun sitä vastoin pelkkä liete alensi kalium- ja booripitoisuuksia ja oli fosforin osalta vaikutukseltaan epämääräinen. Suomensalpietari alensi neulasten fosfori- ja kaliumpitoisuuksia. Tällainen muiden ravinteiden ohentumisilmiö typpitalouden parantumisen myötä on tunnettua myös muissa yhteyksissä.

Taulukko 15. Pääravinteiden ja tärkeimpien hivenravinteiden pitoisuudet männyn neulasissa.

Alkuaine	Lannoite- aine	Määrä			Keski- arvo	Alku- aine	Määrä			Keski- arvo
		Vaihtoehdot	0	1			2	0	1	
N, %	Liete	1,76	1,74	2,08	1,86	B	12,7	7,7	9,1	9,9
	Liete+tuhka	1,77	1,81	1,80	1,79	mg/kg	8,8	15,0	18,5	14,1
	Suomensalp.	1,70	1,80	1,97	1,82		11,2	9,3	11,8	10,8
	Keskiarvo	1,74	1,78	1,95			10,9	10,7	13,1	
	p aine = 0,766 p määrä = 0,071			Yh- dys- vai- kutus	0,531	0,000  0,035			Yh- dys- vai- kutus	0,000
P, mg/g	Liete	1,48	1,34	1,61	1,48	Cu	3,4	3,0	2,8	3,0
	Liete+tuhka	1,45	1,71	1,64	1,60	mg/kg	3,9	2,9	2,8	3,2
	Suomensalp.	1,45	1,39	1,19	1,35		3,2	3,4	2,5	3,0
	Keskiarvo	1,47	1,48	1,48			3,5	3,1	2,7	
	p aine =0,011 p määrä =0,984			Yh- dys- vai- kutus	0,037	0,898  0,047			Yh- dys- vai- kutus	0,574
K, mg/g	Liete	8,14	6,77	7,82	7,58	Zn	48,6	38,4	37,2	41,4
	Liete+tuhka	7,05	8,65	9,29	8,33	mg/kg	48,1	41,1	44,9	44,7
	Suomensalp.	8,55	6,37	6,41	7,11		52,9	36,8	41,9	43,9
	Keskiarvo	7,91	7,26	7,85			49,9	38,8	41,4	
	p aine =0,069 p määrä =0,373			Yh- dys- vai- kutus	0,015	0,685  0,027			Yh- dys- vai- kutus	0,810

Lähes kaikissa tapauksissa lannoiteaineiden lisääminen alensi neulasten kupari- sinkkipitoisuuksia (ks. myös Veijalainen 1977). Mangaania lukuunottamatta muiden analysoitujen alkuaineiden, kuten esim. raskasmetallien pitoisuuksiin lannoiteaineet eivät vaikuttaneet (taulukko16).



Taulukko 16. Muiden alkuaineiden pitoisuudet männyn neulasissa.

Lannoite ja merkitsevyys	Alkuaine									
	mg /g		mg/kg							
	Ca	Mg	Al	Cd	Cr	Fe	Ni	Mn	S	Na
Liete	1,94	0,97	210	0,26	1,32	77,4	1,35	404	1162	75,5
Liete+tuhka	2,04	1,03	249	0,24	1,27	73,9	1,41	597	1168	87,8
Suomensalpietari	2,09	0,93	243	0,22	1,20	69,8	1,29	480	1099	91,1
p aine	0,530	0,270	0,242	0,494	0,641	0,464	0,601	0,001	0,309	0,334
p määrä	0,998	0,963	0,503	0,131	0,221	0,901	0,345	0,186	0,227	0,806

### 10.3.3 Taimien kasvu

#### Männyntaimet

Kaikki käytetyt lannoiteaineet lisäsivät männyn taimien kasvua (taulukko 17). Männyn taimet olivat sitä pidempiä, mitä enemmän lietettä tai tuhkalieteseosta oli annettu. Suurin suomensalpietarin määrä (550 kg/ha lannoitetta) kuitenkin vähensi jonkin verran taimien pituuskasvua pienempään määrään ja suurimpaan lietteen tai liete+tuhkan määrään verrattuna. Toisin kuin ensimmäisessä inventoinnissa (Kaunisto & Ryyänen 1999) ero lannoittamattomaan vertailuun ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää. Myöskään eri aineiden välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. Taimissa esiintyi jonkin verran jälkikasvua. Pituuskasvujen vertailussa tulos oli samanlainen kuin koko pituuden vertailussakin.

Taulukko 17. Kaikkien männyntaimien keskipituus (mm) kolmen kasvujakson jälkeen 14.9.2000.

Lannoiteaine	Määrä			Keskiarvo
	0	1	2	
Vaihtoehdot	0	1	2	
Liete	171	179	203	184
Liete+tuhka	173	194	206	191
Suomensalpietari <sup>1)</sup>	150	208	187	182
Keskiarvo	165	194	199	186
p aine = 0,828 p määrä = 0,143			Yhdysvaikutus	0,732

1) 0, 350, 550 kg ha<sup>-1</sup>, N = 26 %

### Koivun taimet

Kaikki käytetyt lannoiteaineet lisäsivät koivun taimien kasvua tilastollisesti erittäin merkitsevästi (taulukko 18). Annettaessa pelkkää lietettä, Lili+Litu -seosta tai suomensalpietaria taimet kasvoivat parhaiten käsittelyssä, jossa tyypeä tuli 106 kg/ha. Molemmissa muissa käsittelyissä (LiLi+Ätu ja LiLi+Ätu+N) taimet kasvoivat sitä paremmin mitä enemmän seosta lisättiin. Taimien pituuserot olivat kuitenkin verraten vähäisiä kahden eniten aineita saaneiden käsittelyjen välillä eikä yhdysvaikutus lannoiteaineen ja määrän välillä ollut lähelläkään edes tilastollisesti melkein merkitsevän rajaa.. Eri aineiden välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutuseroa. Kahden ja kolmen pisimmän taimen keskiarvojen perusteella lasketut varianssianalyysien tulokset eivät sanottavasti eronneet kaikkien viiden taimen keskiarvotuloksista.

Taulukko 18. Koivun taimien pituus (mm) Lili = Lielahden liete, Litu = Lielahden tuhka, Ätu = Äänekosken tuhka, N = metyleeniurea.

Aine ja yhdistelmät	Määrä, liete+tuhka, 1000 kg/ha				Keskiarvo
	0	6+3 = 9	12+6 = 18	15,7+7,8	
Lili+Ätu,	166	287	416	441	328
Lili+Litu	223	308	445	402	344
Lili+Ätu+N	171	358	371	406	327
Lili	146	319	373	328	291
Suomensalpietari	171	359	429	402	340
Keskiarvo	175	326	407	396	
p lannoiteaine 0,453, p määrä 0,000, p yhdysvaikutus 0,800					

## 10.4 PÄÄTELMÄT

Tulosten perusteella on ilmeistä, että ainakin kasvihuoneolosuhteissa biolietteen orgaanisesta tyypestä vapautuu runsaasti mineraalityyppä kasvien käyttöön. Tuhkan lisääminen biolietteeseen kohottaa humuksen pH:ta ja lisää ammoniumtyypen nitrifikaatiota, mikä puolestaan lisää tyyppien huuhtoutumisalttiutta. Bioliete ja biolietteen ja tuhkan seos edistävät puuntaimien, etenkin koivun alkukehitystä. Tuhkan lisääminen biolietteeseen edistää ilmeisesti ainakin puuntaimien fosforin, kaliumin ja boorin ottoa.

## 11 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää uusi, teknistaloudellisesti hyvä rakeistusmenetelmä metsäteollisuuden puuperäisen tuhkan ja biolietteen prosessointiin runsaasti lietettä sisältäviksi rakeiksi ja rakeiden toimittamiseen korkealaatuiseksi, metsäekosysteemille haitattomaksi metsälannoitteeksi, jonka mukana arvokkaat ravinteet voidaan palauttaa metsään.

Rakeistamista tutkittiin useilla periaatteilla ja laitteilla käyttäen tuhkan ja biolietteen eri seossuhteita. Rakeistus onnistui testatuista menetelmistä vain pyöritysmenetyllä, joka toteutettiin betoninsekoittajalla. Prosessissa lieterakeet rikkoutuvat ja kuoruttuvat tuhalla, jolloin syntyy toisistaan irrallisia hyvälaatuisia rakeita. Kalsiumpitoisuudella on merkitystä rakeistumisen onnistumisessa, sillä kuorutuksen aikana lietteessä oleva vesi reagoi tuhkan kalsiumin kanssa ja kovettuu. Koska tuhkan kuumentaminen edisti joissakin tapauksissa rakeistumista, tulee pyrkiä kuumen tuhkan hyödyntämiseen tehtaalla. Sekoituksen kestäessä liian kauan muokkaava vaikutus saattaa kasvaa liian suureksi etenkin panostyyppisessä käsittelyssä. Pienen mittakaavan rakeistuksessa sopiva sekoitusaika on maksimissaan noin 10 minuuttia. Tasosekoittimella sekoitettaessa tai matriisin läpi puristettaessa tuhka ja bioliete sekoittuivat liiksi toisiinsa, ja tuloksena oli hyvin homogeeninen, taikinamainen ja takertuva seos.

Rakeistuksen skaalaus suurempaan kokoluokkaan onnistui. Ongelmana betoniatolla tehdyissä kokeissa oli kuitenkin pitkä sekoitusaika liian hitaan materiaalien syötön takia ja vääränlainen, ruuvityyppinen sekoitusmenetelmä. Betoniaton sekoitin pyrkii aikaansaamaan tasaisen seoksen, mihin myllyn ruuvimainen sisärakenne on sopiva. Tuhka muokkautui liiksi biolietteen sekaan. Lietteen ja etenkin tuhkan lisäys tulee tapahtua nopeasti ja sekoitusaika ei saa olla pitkä, vaan korkeintaan muutamia minuutteja. Suuren mittakaavan sekoitin syöttöratkaisuihin tulee siten suunnitella erityisesti tuhkan ja biolietteen rakeistusta varten.

Menetelmässä itse rakeistus ja rakeiden kuljetus metsään voitaneen hoitaa samalla vaihtolava-autolla. Tehtaan ei tarvitse tehdä kalliita investointeja, vaan tähän sopiva kuljetuskalusto voidaan tilata ulkopuolelta. Suhteellisen edullinen vaihtolavarungolle asennettava rakeistuslaitteisto voidaan hankkia tehtaalle tai sekin voi olla jonkin urakoitsijan omistuksessa, jolloin samaa laitetta voidaan käyttää useammalla tehtaalla. Puun kuljetukset tehtaalle ja lannoitteen palauttaminen metsiin voidaan integroida samoihin kuljetuksiin. Esimerkiksi vaihtolavakuljetukseen sopiva puunkuljetusauto voisi paluukuljetuksena tuoda rakeita vaikka kauemmaksikin tehtaasta sijaitsevaan metsään

Tuhka-biolietterakeiden varastointikokeissa osoittautui, että tiivis muovipussi oli huono säilytystilana. Sisätiloissakin varastointi onnistui kohtuullisesti, mutta edellytyksenä oli ilmava varastointipaikka vetokaapin alla ja matala ilman suhteellinen kosteus. Viileässä ulkohallissa korkeampi ilman suhteellinen kosteus ja sen tasaisuus edisti homeutumista. Ulkona ilman suhteellinen kosteus vaihteli voimakkaasti. Aurinkoiset päivät kuivattivat rakeita kasassa ja estivät homeen muodostumista huolimatta ajoittaisista sateista. Johtopäätös oli, että kasavarastointi ulkona ja säilytys esimerkiksi pahvilaatikossa tai lujassa paperisäkissä mielellään katetussa tilassa onnistunevat vähintään muutaman viikon ajan, hyvissä olosuhteissa jopa joitakin kuukausia. Tämä sallii tarvittaessa lyhyehkön varastoinnin ennen metsälevitystä. Kangasmetsiin rakeiden levitys onnistuneekin teknisesti ympäri vuoden.

Tutkimuksessa tehdyn taloudellisuustarkastelun perusteella tuhkan ja lietteen rakeistaminen "pyöritystekniikalla" on kustannuksiltaan kilpailukykyinen menetelmä verrattuna tilanteeseen, että bioliete toimitettaisiin kaatopaikalle. Rakeiden tuotannon ja toimituksen kustannukset olivat laskelmien mukaan 110–120 mk/t rakeita 50 km:n etäisyydelle kuljetettuna, joten säästö biolietteen tämänhetkiseen kaatopaikalle vientikustannukseen verrattuna on huomattava. Tällä hetkellä keskimääräiseksi kustannukseksi voidaan arvioida 250 mk/t, mutta se voi kohota lähitulevaisuudessa jopa kustannukseen 450 mk/t. Jos laskelmiin otetaan mukaan myös rakeiden mahdollinen lannoitusvaikutus lisääntyneenä puunkasvuna, ovat taloudelliset edut vieläkin huomattavammat. Oletuksena on, että tuhkalieterakeisiin lisätään tarvittaessa typpeä siten, että typpimäärä metsähehtaaria kohden on 150 kg/ha. Tuhkan ja biolietteen hyödyntämismenetelmällä ravinteiden metsään palauttamiseksi todettiin olevan myös huomattava kansantaloudellinen merkitys. Metsätähteiden lisääntyvän energiakäytön myötä tulee ravinteiden palauttaminen metsään olemaan entistä tärkeämpää.

Tutkimuksessa selvitettiin kasvihuonekokeiden avulla lannoiterakeiden vaikutuksia puuntaimien kasvuun. Tuhka-lieterakeilla lannoittaminen oli koivun taimien kasvun kannalta yhtä tehokasta kuin keinolannoitteilla lannoittaminen. Biolietteen orgaanisesta tyyppistä vapautui runsaasti mineraalityyppä kasvien käyttöön. Tuhkan lisääminen biolietteeseen kohotti humuksen pH:ta ja lisäsi ammoniumtyypen nitrifikaatiota, mikä puolestaan lisääntyy typen huuhtoutumisalttiutta. Bioliete ja biolietteen ja tuhkan seos edistivät puuntaimien, etenkin koivun alkukehitystä. Tuhkan lisääminen biolietteeseen edistää ilmeisesti ainakin puuntaimien fosforin, kaliumin ja boorin ottoa. Taimien kasvu yli kaksinkertaistui lannoituksen vaikutuksesta.

Tutkimuksessa selvitettiin myös tuhka-biolierterakeiden liukenevuutta sadettamalla rakeita voimakkaasti neljän päivän ajan. Rakeet olivat pohjastaan veden läpäisevissä tutkimuslaatikoissa maakerroksen tai kuitukankaan päällä. Sadetuskokeissa ei voitu selvästi todeta ravinteiden ja raskasmetallien haitallista huuhtoutumista. Liukoisuustutkimuksessa käytetty Lielahden kemihierretehtaan bioliete sisälsi erittäin vähän raskasmetalleja. Tuhkat sen sijaan sisälsivät runsaasti kadmiumia ja nikkeliä. Tämä nosti seosten raskasmetallipitoisuudet korkeiksi. Raskasmetallien pitoisuudet vesissä olivat neljän vuorokauden sadetuksen jälkeen pieniä, kun niitä verrataan kiinteiden näytteiden sisältämiin raskasmetallipitoisuuksiin. Sadetuksen aikana ilmenneet ongelmat ovat saattaneet antaa tulokseksi kuitenkin liian pieniä ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksia. Käytännössä pintavalunta voi huuhtoa mukaansa osan raskasmetalleista ja ravinteista. Tässä kokeessa pintavaluntaa ei tapahtunut.

Tutkimuksessa selvitettiin myös tämänhetkinen lietteiden ja tuhkien hyötykäyttöä koskeva lainsäädäntö. Lietteiden ja tuhkien käytölle metsälannoitteena ei ole olemassa erityisiä määräyksiä. Jätelain mukaan lietteet ja tuhkat ovat jätettä ja jätteen käsittely edellyttää ympäristölupaa. Uudessa lietedirektiiviluonnoksessa puhdistamolietteen tai vastaavan teollisuuslietteen käyttö metsissä on kielletty. Tutkimuksessa on kehitetty tekninen menetelmä, jolla tuhka ja bioliete voidaan prosessoida raemaiseksi, puun kasvua oletettavasti lisääväksi lannoitevalmisteeksi ja jolla tuhkan ja biolietteen arvokkaat ravinteet on taloudellisesti järkevää palauttaa metsään. Teknitaloudellisesti erittäin lupaavan, uuden rakeistusmenetelmän kehittämistä käytännön kokoluokassa kapasiteeteiltaan tuotantokäyttöön soveltuvilla laitteilla on tärkeää jatkaa. Tärkeää on varmistaa vielä käytännön metsäkokein ja huuhtoutumistutkimuksin edut puun kasvussa ja haitattomuus huuhtoutumisessa. Esi- ja jatkotutkimuksissa saatu tieto on ensiarvoisen tärkeää saada käyttöön ennenkuin luonnosvaiheessa oleva lietedirektiiviehdotus on hyväksytty lopullisesti.

## 12 LÄHDELUETTELO

*Isännäinen, S. & Huotari, H. 1994.* Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi lannoitekäyttöön soveltuvaksi. Esiselvitys. Jyväskylä. 70 s. + liitt.

*Isännäinen, S., 1997.* Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi lannoitekäyttöön soveltuvaksi. Teoksessa: Korhonen, M. & Thun, R. SIHTI 2. Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Projektiesittelyt. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. s. 259-268. (VTT Symposium 170.) ISBN 951-38-4561-3

*Isännäinen, S., Aho, M., Pirkonen, P. & Mursunen, H., 1998.* Metsäteollisuuden kiinteiden jätteiden prosessointi lannoitteeksi, Vuosiraportti 1998. Tutkimusselostus. Luottamuksellinen. VTT Energia. 44 s. + liitt.

*Isännäinen, S., Pirkonen, P., 1999.* Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi hyötykäyttöön soveltuvaksi. Teoksessa: Thun, R. & Korhonen, M. SIHTI 2. Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1998. Projektiesittelyt. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. s. 411-432. (VTT Symposium 191.) ISBN 951-38-5265-2.

Jätelaki 1072/93. 1994. Julk.: Suomen säädöskokoelma vuodelta 1994. Painatuskeskus, Helsinki.

*Kaunisto, S. 1987.* Lannoituksen ja muokkauksen vaikutus männyn ja rauduskoivun istutustaimien kasvuun suonpohjilla. Summary: Effect of fertilization and soil preparation on the development of Scots pine and silver birch plantations on peat cutover areas. Folia Forestalia 681. 23 s.

*Kaunisto, S. & Ryyänen, A. 2000.* Metsä-serlan Lielahden tehtaan biolietteen vaikutus männyn kylvötaimien alkukehitykseen. Kasvihuonekoe Metlan Parkanon tutkimusasemalla. Moniste Metlan Parkanon tutkimusasemalla ja Metsämannut Oy:ssä. 4 s.

*Lohiniva, E., Mäkinen, T. ja Sipilä, K. 2001.* Lietteiden käsittely: uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Tiedotteita 2081. Espoo. 146 s. + liitt. 4.

KTTK 282/93. 1994. Lannoitelaki. Julk.: Suomen säädöskokoelma. Painatuskeskus, Helsinki.

*Mara, D. and Cairncross, S. 1987.* Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. World Health Organization Publications.

*Moilanen, M. & Korpilahti, A. 2000.* Tuhkan käyttö suometsien lannoituksessa. Työtehoseuran metsätiedote 14 (627). 4 s.

MMMp 46/94. 1994. Maa- ja metsätalousministeriön päätös eräistä lannoitevalmisteista. Julk.: Suomen säädöskokoelma vuodelta 1994. Painatuskeskus, Helsinki.

*Mäkelä-Kurtto, R. 1994.* Lietteen käyttö maanviljelyssä. Julk.: Jätevesilietteen käsittely ja sijoitus. Vesi- ja ympäristöhallinnon monistesarja 550. Kuopion vesi- ja ympäristöpiiri, Kuopio.

*Mälkönen, E. 1996.* Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään. Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari, 14.3.1996, Jyväskylä.

*Priha, O. & Smolander A. 1999.* Nitrogen transformations in soil under Pinus sylvestris, Picea abies and Betula pendula at two forest sites. Soil Biology and Biochemistry 31: 965-977.

*Puolanne, J. 1988.* Viranomaisohjeet lietteiden ja tuhkan hyötykäytössä ja loppusijoituksessa. Julk.: Metsäteollisuuden lietteiden ja tuhkan käsittely ja lopputuotteen hyötykäyttömahdollisuudet. 18.-19.11.1998. Kiinteistöalan Koulutuskeskus. Helsinki.

*Rantala, P.-R. 2000.* Metsäteollisuuden lietteiden määrät, ominaisuudet, nykyiset käsittelytavat ja hyötykäyttötapoja. Metsäteollisuuden lietteiden ja tuhkan käsittely ja lopputuotteen hyötykäyttömahdollisuudet – tulevien direktiivien esittely. Seminaari 29.3.2000. Järvenpää. 12 s

*Rantala, P.-R., Nevalainen, J. & Jokela, P. 1998.* Metsäteollisuuslietteiden kuivausmenetelmiä. *Suomen Ympäristö* 228. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja. Pirkanmaan ympäristökeskus, Tampere.

*Smolander, A., Mälkönen, E., Helmisaari, H-S., Kitunen, V., Kukkola, M., Martikainen, P. & Oriha, O. 1994.* Typen sitoutuminen ja mineralisaatio typellä kuormitetussa kuusikossa. Teoksessa Suomen metsien kunto. Toim. Mälkönen, E. & Sivula, H. s. 224-232.

*Veijalainen, H. 1977.* Use of needle analysis for diagnosing micronutrient deficiencies of Scots pine on drained peatlands. Seloste: Neulasanalyysi männyn mikroravinnetilanteen määrittämisessä turvemaidilla. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 92(4). 32 s.

*Veijalainen, H., Silfverberg, K. & Hytönen, J. 1993.* Metsäteollisuuden bioliete ja kivihiilen tuhka rauduskoivun taimien ravinnelähteenä. Summary: Pulp biosludge and coal ash as nutrient sources for silver birch seedlings. *Suo* 44(3): 63-73.

Vesien suojelun tavoiteohjelma 2005. Valtioneuvoston periaatepäätös vesien suojelun tavoitteista vuoteen 2005. Ympäristöministeriö, Helsinki, 1995.

Vnp 282/1994. 1994. Valtioneuvoston päätös puhdistamolietteen käytöstä maanviljelyksessä. Julk.: Suomen säädöskokoelma vuodelta 1994. Painatuskeskus, Helsinki.

Ympäristölupamenettelylaki 735/1991 1994. Julk.: Suomen säädöskokoelma, Painatuskeskus, Helsinki.

Ymp 867/1996. 1997. Ympäristöministeriön päätös yleisempien jätteiden sekä ongelmajätteiden luettelosta Julk.: Suomen säädöskokoelma. Edita, Helsinki.

## LÄHTÖTIEDOT

Tehdas x	Määrä tonKA/a	KA-pitoisuus %	Määrä ton/a	Vettä lietteessä ton/a
liettä synlyy	10 000	25 %	40000	30000
liettä polttoon	7000	35 %	20000	13000
rakeistukseen biolietettä	3000	16 %	18750	15750
tuhkaa rakeistukseen	10000	100 %	10000	
<b>Yhteensä sekoitusta</b>	<b>13000</b>	<b>45 %</b>	<b>28750</b>	<b>15750</b>
Käyttöaika	h/a	h/vrk	vrk/a	
	3194	18.25	175	
	tonKA/h		ton/h	m3/h
Sekoitus- ja levityskapasiteetti	4.1		9.0	10.0
	kg/m3			
Sekoituksen tiheys?	900			
	kg/m3			
Lietteen tiheys	600			
	kg/m3			
Tuhkan tiheys	490			

ton/ha

12

Levitystiheys

	määrä, kpl	aika, h/d	määrä, ton/d	á hinta mk	laskutus, mk/h	kuol.aika+korko	käyttökust. mk/t	inv.kust. mk/t	Yht. mk/t
Jakeiden keräily ja rakeistus		18.25	164.3		285		31.67		31.67
Konttien investointikustannus	3			10000		10 a, 7 %		0.15	0.15
Rakeistuslaitteiston hinta	1			200000		10 a, 7 %		0.99	0.99
	Kuljetusetäisyys, km	Ajonopeus km/h	Aika, h/kerta	Kuormakoko, m3	Laskutus, mk/h				
Rekan lastaus			0.25						
Konttien kuljetus	50	60		30	285		20.58		20.58
Rekan purkuaika			0.25						
					Laskutus, mk/h	Levitysnop. l/h			
Rakeiden levitys metsään					170	3	56.67		56.67
<b>Yhteensä</b>							<b>108.92</b>	<b>1.14</b>	<b>110.06</b>

## Tuhkan ja lietteen vienti kaatopaikalle

## Puun kasvu

	Oma kaatopaikka mk/t	Kunnallinen kp mk/t	Tulevaisuudessa mk/t	Puun lisäkasvu m3/ha	Lisäkasvu mk/ha	Yhteensä mk/ha	Hyöty metsänkasvulle mk/ha
Kaatopaikalle vienti nyt	100	250	450				1200-5400
Hyöty metsänkasvulle				12	1200-3000		1200-3000
Keinolanhoitus							800-900
				Puun lisäkasvun hintaa mk/m3	Lisäkasvu metsässä	Yhteensä hyöty mk/ha	
Laskentasuureet	Levitysmäärä t/ha 12.00	kaatopaikkakust. 250	175	12		<b>3779.33</b>	

## Esimerkkejä:

	Rakeistus+levitys kustannus	Kaatopaikkamaksu säästö	Metsänkasvu hyöty	Yhteensä hyöty mk/ha	Yhteensä hyöty mk/t rakeita	300 000 t rakeita Hyöty milj.mk/a	25 000 ha/a
Kokonaiskustannukset mk/ha	1320.67	1200.00	1200.00	1079.33	89.94	26983240	
	1320.67	5400.00	3000.00	7079.33	589.94	176983240	
	1320.67	3300.00	2100.00	4079.33	339.94	101983240	



## LÄHTÖTIEDOT

Lielahdi	Määrä tonKA/a	KA-pitoisuus %	Määrä ton/a	Vettä lietteessä lon/a
lietettä syntyy	4 000	21 %	19048	15048
lietettä polttoon	3675	23 %	15978	12303
rakeistukseen biolietettä	325	13 %	2500	2175
tuhkaa rakeistukseen	1200	100 %	1200	
<b>Yhteensä sekoitusta</b>	<b>1525</b>	<b>41 %</b>	<b>3700</b>	<b>2175</b>
Käyttöaika	h/a	h/vrk	vrk/a	
	411	2.35	175	
Sekoitus- ja levityskapasiteetti	tonKA/h		lon/h	m3/h
	3.7		9.0	10.0
Sekoituksen tiheys?	kg/m3			
	900			
Lietteen tiheys	kg/m3			
	600			
Tuhkan tiheys	kg/m3			
	490			

Levitystiheys ton/ha  
12

	Määrä, kpl	Aika, h/d	Määrä, ton/d	á hinta mk	Laskutus, mk/h	Kuol.aika+korko	Käyttökust. mk/t	Inv.kust. mk/t	Yht. mk/t
Jakeiden keräily ja rakeistus		2.35	21.1		285		31.67		31.67
Konttien investointikustannus	3			10000		10 a, 7 %		1.15	1.15
Rakeistuslaitteiston hinta	1			200000		10 a, 7 %		7.70	7.70
	Kuljetusetäisyys, km.	Ajonopeus km/h	Aika, h/kerta	Kuormakoko, m3	Laskutus, mk/h				
Rekan lastaus			0.25						
Konttien kuljetus	50	60		30	285		20.58		20.58
Rekan purkuaika			0.25						
					Laskutus, mk/h	Levitysnop. t/h			
Rakeiden levitys metsään					170	3	56.67		56.67
<b>Yhteensä</b>							<b>108.92</b>	<b>8.85</b>	<b>117.77</b>

## Tuhkan ja lietteen vienti kaatopaikalle

## Puun kasvu

	Oma kaatopaikka mk/t	Kunnallinen kp mk/t	Tulevaisuudessa mk/t	Puun lisäkasvu m3/ha	mk/ha	mk/t rakeita	mk/ha
Kaatopaikalle vienti nyt	100	250	450				1200-5400
Hyöty metsänkasvulle				12	1200-3000		1200-3000
Keinolanointus							800-900

Laskentasuureet	Levitysmäärä t/ha	kaatopaikkakust.	Puun lisäkasvun hinta mk/m3	Lisäkasvu metsässä	Yhteensä hyöty mk/ha
	12.00	250	175	12	<b>3686.78</b>

## Esimerkkejä:

	Rakeistus+levitys kustannus	Kaatopaikkamaksu säästö	Metsänkasvu hyöty	Yhteensä hyöty mk/ha	Yhteensä hyöty mk/t rakeita	300 000 t rakeita 25 000 ha/a
Kokonaiskustannukset mk/ha	1413.22	1200.00	1200.00	986.78	82.23	24,6 milj.mk/a
	1413.22	5400.00	3000.00	6986.78	582.23	175 milj.mk/a
	1413.22	3300.00	2100.00	3986.78	332.23	

LIITE 2. LAATIKOIHIN TULLEET VESIMÄÄRÄT (g). YLEMPI LUKU ON ALUSLAATIKKOON TULLUT VESIMÄÄRÄ JA ALEMPI LUKU ON KANTEEN JÄÄNYT VESIMÄÄRÄ. TODELLISESSA JÄRJESTYKSESSÄ

VRK 1 9.5.2000

L + pm	3565	1880
--------	------	------

LT + L + kk	4275	250
-------------	------	-----

K kk	4302	161
------	------	-----

ÄT + L + N + kk	4235	196
-----------------	------	-----

L + kk	4275	331
--------	------	-----

ÄT + L + pm	3769	1600
-------------	------	------

ÄT + L + kk	3976	216
-------------	------	-----

LT + L + N + kk	4182	221
-----------------	------	-----

L + pm	3717	1600
--------	------	------

ÄT + L + kk	4181	229
-------------	------	-----

LT + L + kk	4066	246
-------------	------	-----

K pm	4148	1420
------	------	------

L + kk	4493	373
--------	------	-----

ÄT + L + N + kk	4733	255
-----------------	------	-----

K pm	4393	1440
------	------	------

LT + L + N + kk	4513	209
-----------------	------	-----

K kk	7095	173
------	------	-----

ÄT + L + N + pm	7156	1300
-----------------	------	------

Sadetusvesi	7296	-
-------------	------	---

ÄT + L + pm	7157	1460
-------------	------	------

ÄT + L + N + pm	6935	1760
-----------------	------	------

VRK 4 12.5.2000

L + pm	14895	2400
--------	-------	------

LT + L + kk	13096	284
-------------	-------	-----

K kk	12376	200
------	-------	-----

ÄT + L + N + kk	13197	194
-----------------	-------	-----

L + kk	12955	356
--------	-------	-----

ÄT + L + pm	14637	2060
-------------	-------	------

ÄT + L + kk	12476	247
-------------	-------	-----

LT + L + N + kk	13415	285
-----------------	-------	-----

L + pm	11956	5580
--------	-------	------

ÄT + L + kk	11238	258
-------------	-------	-----

LT + L + kk	13696	255
-------------	-------	-----

K pm	16956	1860
------	-------	------

L + kk	13955	382
--------	-------	-----

ÄT + L + N + kk	15655	295
-----------------	-------	-----

K pm	11296	7560
------	-------	------

LT + L + N + kk	14555	249
-----------------	-------	-----

K kk	14515	183
------	-------	-----

ÄT + L + N + pm	18196	1760
-----------------	-------	------

Sadetusvesi	15536	-
-------------	-------	---

ÄT + L + pm	17697	1960
-------------	-------	------

ÄT + L + N + pm	15315	2140
-----------------	-------	------

### LIITE 3. KIINTEIDEN NÄYTTEIDEN ANALYYSITULOKSET

		8.5.	8.5.	8.5.	8.5.	8.5.	8.5.	12.5.	12.5.	8.5.
		Pintamaa	ÄT	LT	LL	LTLL	ÄTLL	LTLL	ÄTLL	Kar
Analyysi	yksikkö									gas
Kosteus	%	39	0,31	0,47	88	57	57	74	69	
pH		4,3	12,8	12	6	9,5	11,4	9,5	11,1	
kok P	g/kg	0,36	15	22	7,5	18	14	23	15	L 0,
kok N	g/kg	2	L 2	L 2	76	17	15	18	12	L 0,
NO <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	mg/kg	0,16								
NH <sub>4</sub> -N ext	mg/kg	2,2	0,31	L 0,1	6,1	L 0,1	1,3	30	12	
PO <sub>4</sub> -P ext	mg/kg	1,4	0,01	0,12	410	0,6	1,2	0,6	0,66	
TOC	g/kg	72	3	6,3	420	110	91	130	81	
TOC ext	mg/kg	1000	49	L 10	28000	16000	25000	5700	3000	
Cd	mg/kg	0,07	17	11,1	0,11	9,29	14,7	10,8	16,6	
Cr	mg/kg	5,64	106	13,3	2,87	12	79,9	14,5	89,8	
Al	mg/kg	5500	18100	4140	501	3280	13300	4010	15300	
As	mg/kg	L 3	6,56	5,38	L 3	4,37	4,56	4,1	3,55	
B	mg/kg	L 5	247	380	38	287	203	309	219	
Ba	mg/kg	20,9	1770	1880	80,2	3220	1500	4260	1680	
Ca	mg/kg	1450	286000	262000	3460	178000	220000	222000	235000	
Co	mg/kg	2,25	2401	20,6	2,39	14,3	18,9	19	19,5	
Cu	mg/kg	4,73	88,9	119	16	91,4	73,2	112	75,3	
Fe	mg/kg	6430	12600	16000	17100	17000	14600	20800	16400	
K	mg/kg	551	41700	67000	4540	52900	35600	8870	9140	
Mg	mg/kg	918	22300	21300	1190	15300	17400	19500	20400	
Mn	mg/kg	108	13100	16100	205	11400	10400	15100	11900	
Mo	mg/kg	L 1	6,11	1,89	1,55	1,96	4,45	L 1	2,93	
Na	mg/kg	163	12900	20200	9140	18900	11600	5890	4290	
Ni	mg/kg	2,64	89,9	105	3,46	79,9	70,3	105	80,5	
P	mg/kg	371	14200	21500	8130	16900	12900	21900	14200	
Pb	mg/kg	14,3	37,8	27,6	L 10	23,1	29,4	28,5	34,3	
S	mg/kg	238	19800	36900	15300	33700	18500	7650	13400	
Sb	mg/kg	L 20	L 20	L 20	L 20	L 20	L 20	L 20	L 20	
Sr	mg/kg	11,7	970	1240	19,5	855	741	1070	806	
Ti	mg/kg	514	601	240	148	215	477	264	537	
V	mg/kg	12,2	54,1	47,3	1,61	35,8	40,1	46,9	46,4	
Zn	mg/kg	25,1	3310	3580	61,4	2610	2590	3440	2950	

Liite 4/1 Vesinäytteen analyysitulokset 8.5.																				
analyysi	yksikkö	8.5. sad.vesi				kesk haj	8.5. L kk	kesk haj	8.5. L kk	kesk haj	8.5. L kk	kesk haj	8.5. L kk	kesk haj	8.5. L kk	kesk haj	8.5. L kk	kesk haj	8.5. L kk	kesk haj
		K kk	K kk	K kk	K kk															
Sähkönjohtavuus	ms/m	4.5	4.5	4.6	4.6	0.1	15.9	15.9	16	0	223	196	210	19	220	208	214	8.5	haj	
Alkaliniteetti	mmol/l	0.28	0.27	0.28	0.3	0	0.41	0.42	0.4	0								8.5	haj	
Alkal. 4.5	mmol/l										5.41	4.63	5	0.6	6.15	5.62	5.9	0.4	haj	
pH		7.3	7.3	7.3	7.3	0	7.4	7.4	7.4	0	10.9	10.7	10.8	0.1	11.4	11.2	11	0.1	haj	
Väriuku	pt mg/l	5	5	5	5	0	40	50	45	7.1	120	100	110	14	100	100	100	0	haj	
COD-Mn	mg/l	0.6	0.9	1.3	1.1	0.3	17	18	18	0.7	160	150	155	7.1	150	150	150	0	haj	
Kok. N	ug/l	150	140	230	185	64	4700	5000	4850	212	60000	59000	59500	707	69000	69000	69000	0	haj	
Kok. N liuennut	ug/l	150	130	250	190	85	4200	4400	4300	141	61000	37000	49000	16971	65000	66000	65500	707	haj	
NO2-NO3-N	ug/l	5	14	25	20	7.8	57	43	50	10	52	45	49	4.9	45	47	46	1.4	haj	
NH4-N	ug/l	85	83	150	117	47	2800	3000	2900	141	650	610	630	28	1500	1400	1450	71	haj	
Kok. P	ug/l	9	6	8	7	1.4	180	200	190	14	8400	7700	8050	495	6700	6700	6700	0	haj	
Kok. P liuennut	ug/l	7	5	5	5	0	110	120	115	7.1	8300	7600	7950	495	6700	6500	6600	141	haj	
PO4-P	ug/l	3	4	7	5.5	2.1	26	34	30	5.7	34	40	37	4.2	39	41	40	1.4	haj	
PO4-P liuennut	ug/l	1	2	4	3	1.4	12	16	14	2.8	16	19	18	2.1	13	12	13	0.7	haj	
Sulfaatti	mg/l	5.2	4.3	5.8	5.1	1.1	42	40	41	1.4	370	370	370	0	310	320	315	7.1	haj	
TOC	mg/l	L 3.5	3.5	4	3.8	0.4	18	20	19	1.4	300	260	280	28	240	250	245	7.1	haj	
TOC suod.	mg/l	L 3.5	3.5	4	3.8	0.4	16	18	17	1.4	270	240	255	21	240	230	235	7.1	haj	
Ag	ug/l	0.3	0.01	0.05	0	0	0.06	0.04	0.1	0.0	4.08	6.93	5.5	2.0	0.16	1.57	0.9	1.0	haj	
Al	ug/l	6.71	6.65	19.3	13	8.9	19.4	25.4	22	4.2	1220	978	1099	171	1400	1450	1425	35	haj	
As	ug/l	0.44	1.34	3.91	2.6	1.8	1.35	3.17	2.3	1.3	1.14	0.7	0.9	0.3	0.64	0.4	0.5	0.2	haj	
B	ug/l	5.4	12.2	72.2	42	42	28.4	70.8	50	30	114	66.3	90	34	23.3	25.7	25	1.7	haj	
Ba	ug/l	2.89	4.21	4.64	4.4		3.46	3.66	3.6	0.1	144	106	125	27	208	119	164	63	haj	
Cd	ug/l	0.05	0.04	0.03	0	0	0.2	0.1	0.2	0.1	7.03	5.75	6.4	0.9	7.05	6.78	6.9	0.2	haj	
Cl	ug/l	0.95	1.02	3.47	2.2	1.7	2.47	3.25	2.9	0.6	247	201	224	33	189	185	187	2.8	haj	
Cr	ug/l	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.61	0.42	0.5	0.1	17.5	20.6	19	2.2	16.4	14.4	15	1.4	haj	
Cu	ug/l	27.5	8.7	9.31	9.0	0.4	11.1	11.1	11	0.0	204	179	192	18	163	157	160	4.2	haj	
Fe	ug/l	64.3	48.3	46.2	47	1.5	347	396	372	35	206	198	202	5.7	202	209	206	4.9	haj	
K	mg/l	0.8	0.58	0.61	0.6	0	2.9	3.28	3.1	0.3	596	526	561	49	491	490	491	0.7	haj	
Mn	ug/l	7.94	4.07	2.83	3.5	0.9	17.3	18.8	18	1.1	51.4	40.7	46	7.6	50.4	50.6	51	0.1	haj	
Mo	ug/l	0.22	0.21	0.2	0.2	0	0.14	0.12	0.1	0.0	65.4	87	76	15	37	44.2	41	5.1	haj	
Ni	ug/l	0.99	0.94	0.87	0.9	0	5.76	6.05	5.9	0.2	21.8	19	20	2.0	15.8	15.8	16	0	haj	
Pb	ug/l	1.37	1.1	1.13	1.1	0	4.47	3.1	3.8	1.0	6.82	6.65	6.7	0.1	9.48	8.02	8.8	1.0	haj	
Sb	ug/l	0.05	0.25	0.51	0.4	0.2	0.36	0.53	0.4	0.1	0.65	0.7	0.7	0	0.4	0.41	0.4	0	haj	
Se	ug/l	0.05	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0	10	10	10	0	10	10	10	0	haj	
Zn	ug/l	207	174	148	161	18	120	106	113	9.9	117	125	121	5.7	96.9	96	96	0.6	haj	
Ca	mg/l	4.61	4.19	4.03	4.1	0.1	2.07	1.42	1.7	0.5	22.9	17.2	20	4.0	35.5	17.3	26.4	13	haj	
Fe	mg/l	0.06	0.05	0.05	0.1	0	0.36	0.66	0.5	0.2	0.18	0.15	0.2	0	0.18	0.18	0.2	0	haj	
Mg	mg/l	0.53	0.68	0.8	0.7	0	0.34	0.32	0.3	0.0	0.32	0.38	0.4	0	0.27	0.28	0.3	0	haj	
Na	mg/l	2.06	2.11	2.18	2.1	0	21.9	22	22	0.1	132	119	126	9.2	113	116	115	2.1	haj	
P	mg/l	0.05	0.05	0.05	0.1	0	0.11	0.12	0.1	0.0	8.16	7.55	7.9	0.4	6.75	6.47	6.6	0.2	haj	
S	mg/l	1.85	1.76	1.76	1.8	0	14.4	14.6	15	0.1	134	123	129	7.8	101	103	102	1.4	haj	



Liite 5/1. Vesinäytteiden analyysitulokset 12.5.

Analyysi	12.5.		12.5.		12.5.		12.5.		12.5.		12.5.		12.5.		12.5.		12.5.		12.5.	
	yksikkö	sad.vesi	K kk	K kk	L kk	L kk	L kk	L kk	ka	ka	kesk	haj	kesk	haj	kesk	haj	kesk	haj	kesk	haj
Sähköjohtavuus	ms/m	4.3	4.5	4.3	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	0	0	0	0	22.3	20	21	22	23.2	22	2.3
Alkaliniteetti	mmol/l	0.27	0.27	0.26	0.3	0.37	0.38	0.4	0.4	0	0	0	0	1.55	1.59	1.6	1.4	1.36	1.4	0
Alkal. 4.5	mmol/l																			
pH		7.4	7.8	7.5	7.7	7.3	7.3	7.3	7.3	0	0	0	0	10.3	10.2	10	10	10.4	10.1	0.2
Värituku	pt mg/l	5	5	5	5	25	25	25	25	0	0	0	0	20	25	23	20	20	20	0
COD-Mn	mg/l	0.4	0.5	0.5	0.5	6.6	7.2	6.9	6.9	0.4	0.4	0.4	0.4	17	15	16	15	15	25	7.1
Kok. N liuennut	ug/l	56	77	76	77	1700	2200	1950	1950	354	354	354	354	6200	5700	5950	5950	7200	11000	2616
Kok. N liuennut	ug/l	93	110	110	102	1400	1800	1600	1600	283	283	283	283	6300	5600	5950	5950	7200	11000	2687
NH4-N	ug/l	29	25	35	30	1200	1300	1250	1250	71	71	71	71	74	77	76	75	81	81	8.5
Kok. P	ug/l	3	2	2	2	92	97	95	95	3.5	3.5	3.5	3.5	660	590	625	49	540	200	240
Kok. P liuennut	ug/l	2	2	2	1	41	52	47	47	7.8	7.8	7.8	7.8	660	590	625	49	530	210	226
PO4-P	ug/l	1	1	1	1	15	20	18	18	3.5	3.5	3.5	3.5	16	28	22	17	15	17	1.4
PO4-P liuennut	ug/l	1	1	1	1	8	14	11	11	4.2	4.2	4.2	4.2	14	26	20	16	13	16	2.1
Sulfaatti	mg/l	4.6	4.3	4.3	4.3	7.4	8	7.7	7.7	0.4	0.4	0.4	0.4	17	17	17	20	25	20	7.8
TOC	mg/l	3.5	3.5	3.5	3.5	7.4	9	8.2	8.2	1.1	1.1	1.1	1.1	34	29	32	35	25	70	32
TOC suod.	mg/l	3.5	3.5	3.5	3.5	7	9.3	8.2	8.2	1.6	1.6	1.6	1.6	35	28	32	4.9	25	46	15
Ag	ug/l	0.01	0.01	0.01	0	0.02	0.06	0.0	0.0	0	0	0	0	0.05	0.04	0	0	0.04	0.13	0.1
Al	ug/l	14	23.1	20.6	22	1.8	22.3	15	19	5.2	5.2	5.2	5.2	158	149	154	6.4	302	214	62
As	ug/l	0.94	0.53	0.27	0.4	0.2	0.31	0.17	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.22	0.2	0.2	0	0.18	0.24	0
B	ug/l	28.7	9.66	6.77	8.2	2.0	9.45	5.49	7.5	2.8	2.8	2.8	2.8	83.1	77.7	80	3.8	59.5	75.7	68
Ba	ug/l	1.88	2.47	2.75	2.6	0.2	3.14	3.01	3.1	0.1	0.1	0.1	0.1	64.1	61.2	63	2.1	75.8	63	9.1
Cd	ug/l	0.04	0.05	0.12	0.1	0	0.18	0.06	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.48	0.4	0.4	0.1	0.41	0.94	0.4
Cl	ug/l	1.25	7.29	8.24	7.8	0.7	3.01	1.49	2.3	1.1	1.1	1.1	1.1	4.5	3.96	4.2	0.4	3.63	8.14	5.9
Cr	ug/l	0.22	0.2	0.2	0.2	0	0.39	0.35	0.4	0	0	0	0	3.48	3.09	3.3	0.3	2.88	3.96	3.4
Cu	ug/l	27	13	12.5	13	0.4	13.3	12.8	13	0.4	0.4	0.4	0.4	31.3	35.2	33	2.8	27	37.8	7.6
Fe	ug/l	59	38.6	41.4	40	2.0	184	181	183	2.1	2.1	2.1	2.1	65	59.7	62	3.7	63.8	73.7	7.0
K	mg/l	0.73	0.68	0.71	0.7	0	1.84	1.42	1.6	0.3	0.3	0.3	0.3	23.6	18.9	21	3.3	13.1	30.3	12
Mn	ug/l	5.09	4.83	3.58	4.2	0.9	18.2	15.5	17	1.9	1.9	1.9	1.9	4.45	3.77	4.1	0.5	4.69	6.77	1.5
Mo	ug/l	0.21	0.18	0.17	0.2	0	0.09	0.08	0.1	0	0	0	0	2.12	1.81	2.0	0.2	1.68	3.2	1.1
Ni	ug/l	0.96	0.95	1.01	1.0	0	1.67	1.69	1.7	0	0	0	0	1.83	1.67	1.8	0.1	1.37	2.42	1.9
Pb	ug/l	0.8	0.64	0.95	0.8	0.2	1.45	1.04	1.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.94	1.03	1.0	0.1	0.99	1.3	0.2
Sb	ug/l	0.06	0.18	0.13	0.2	0	0.12	0.1	0.1	0	0	0	0	0.17	0.16	0.2	0	0.14	0.12	0
Se	ug/l	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0
Zn	ug/l	182	197	200	199	2.1	93.9	89.3	92	3.3	3.3	3.3	3.3	53.7	54.7	54	0.7	57	65.9	6.3
Ca	mg/l	4.25	4.5	4.26	4.4	0.2	1.63	1.74	1.7	0.1	0.1	0.1	0.1	25.2	26.3	26	0.8	27.6	25.5	1.5
Fe	mg/l	0.06	0.04	0.04	0	0	0.19	0.2	0.2	0	0	0	0	0.06	0.06	0.1	0	0.06	0.07	0
Mg	mg/l	0.56	0.57	0.58	0.6	0	0.32	0.32	0.3	0	0	0	0	0.43	0.46	0.4	0	0.43	0.44	0
Na	mg/l	2.01	2	1.99	2.0	0	6.49	6.63	6.6	0.1	0.1	0.1	0.1	9.18	7.94	8.6	0.9	6.1	10.8	8.5
P	mg/l	0.05	0.05	0.05	0.1	0	0.5	0.06	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.66	0.61	0.6	0	0.54	0.84	0.2
S	mg/l	1.79	1.71	1.71	1.7	0	2.3	2.35	2.3	0	0	0	0	7.83	7.16	7.5	0.5	6.1	10.4	8.3

