



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Lauri Ala-Lipasti

ITSEKOVETTUVAN TUHKAN SÄKITYS  
JA KÄYTTÖ LANNOITTEENA  
METSÄTALOUESSA

Tekniikka ja liikenne  
2014

## **ALKUSANAT**

Tämä tutkimus on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan koulutusohjelman opinnäytetyönä. Työn toimeksiantajana oli Metsäliitto Osuuskunta. Yli vuoden mittaisen projektin aikana on tutkimuksen suunnittelussa, käytännön järjestelyissä ja itse mittaustulosten määrittämisessä ollut mukana iso joukko ihmisiä, joiden työpanos on ollut merkittävä. Lisäksi on paljon ihmisiä, jotka ovat ohjanneet oikeaan suuntaan itselleni uusien asioiden parissa. Koko opinnäytetyö on prosessina ollut valtavan opettava kaikin puolin.

Haluan kiittää Metsäliitto Osuuskuntaa ja erityisesti ohjausryhmääni, joka antoi mahdollisuuden tehdä opinnäytetyön. Ohjausryhmään kuuluivat kehitysinsinööri Olli Lehtovaara, ympäristöpäällikkö Janne Soimasuo, ympäristöpäällikkö Ari-Pekka Heikkilä, metsänhoitopäällikkö Juho Rantala, alueympäristöpäällikkö Johanna Harjula ja asiakaspäällikkö Matti Närhi. Haluan myös kiittää koulun puolelta ohjaajaani lehtori Riitta Niemelää ja geotekniikan laborantti Timo Riikosta, joka oli korvaamaton apu kaikissa seulonnoissa ja vesipitoisuuden määrittäyksissä. Erityiskiitos kuuluu vanhemmilleni, etenkin isälleni Tapiolle, joka on ollut auttamassa säkityksissä, näytteidenottoissa, levityskokeissa ja kaikissa muissa käytännön asioissa, joita työn varrella on tullut vastaan.

Vaasassa 28.3.2014

Lauri Ala-Lipasti

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Lauri Ala-Lipasti
Opinnäytetyön nimi	Itsekovettuvan tuhkan säkitys ja käyttö lannoitteena metsätaloudessa
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	80 + 5 liitettä
Ohjaaja	Riitta Niemelä

---

Kaskisissa sijaitseva Metsä Boardin kemihierretehdas valmistaa kemiallisesti esikäsitellystä puuhakkeesta mekaanisesti jauhettua ja valkaistua korkeasaantoista massaa. Kemihierretehtaan prosessin sivutuotteena syntyy tuhkaa puunkuoren ja lietteiden poltossa vuosittain noin 2 500 tonnia. Tuhkan hyödyntäminen on järkevää niin ekologisesti, taloudellisesti kuin tilan käytön kannalta. Kyseinen itsekovetustuhka soveltuu metsänlannoitukseen erityisesti runsastyyppisillä suometsillä. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin tutkimaan miten erilaiset tuhkalaadut käyttäytyvät erilaisissa olosuhteissa säkitettynä ja miten tämä vaikuttaa tuhkan levitettävyyteen.

Itsekovetus on yksi tuhkan rakeistamismenetelmistä. Tuhka on kuivana erittäin pölyävää, joten siihen lisätään vettä pölyämisen estämiseksi varastoinnin aikana. Samalla tapahtuu kemiallinen reaktio, jossa tuhka alkaa rakeistua. Tätä rakeistamista ja tuhkan muutoksia seurattiin rakeisuuden, vesipitoisuuden, kalsiumoksidipitoisuuden ja sääseurannan avulla. Mittauksia suoritettiin noin kuukauden välein jokaisesta säkistä ja varastoinnin päätteeksi tuhkille tehtiin levityskokeet.

Mittausten ja analyysien perusteella todettiin, että säkkien suojaus on välttämätöntä. Suojaamattomien säkkien vesipitoisuudet muuttuvat paljon, jopa kaksinkertaiset. Suojattujen säkkien vesipitoisuudet pysyivät selvästi paremmin samalla tasolla. Levityskokeissa todettiin, että suojaamattomien säkkien suuri vesipitoisuus ja pakkanen tekevät säkitetystä tuhkasta jäisen kuution. Tuhkan on oltava säkistä tullessaan riittävän pehmeää, jotta se voidaan levittää. Parhaat levitystulokset saatiin tuhkillä, joissa ei ole suuria paakkuja ja raekokojakauma on suhteellisen tasainen. Mittaustulosten ja lainsäädännön perusteella paras vaihtoehto säkitettäväksi tuhkaksi on vanha, jo pitkälle rakeistunut, suojattuna varastoitu tuhka. Raekokojakauman ja vesipitoisuuden muuttumattomuus takaa myös levitettävyyden ennustettavuuden ja pysymisen samankaltaisena.

---

Avainsanat                      Itsekovetus, tuhka, lannoitus, säkitys, metsätalous

## ABSTRACT

Author	Lauri Ala-Lipasti
Title	The Sacking of Self-hardening Ash and Its Use in Forest Fertilization
Year	2014
Language	Finnish
Pages	80 + 5 Appendices
Name of Supervisor	Riitta Niemelä

---

Metsä Board Kaskinen produces bleached high yield pulp for papers and paperboards. As a by-product the factory produces ash 2 500 t/a because of the bark and sludge combustion. Exploitation of the ash is useful ecologically, economically and in space utilization. This self-hardening ash is suitable for forest fertilization especially in peat land forests that are rich in nitrogen. This thesis focused on studying how different types of ash behave in different conditions when sacked and how it effects to the spreading of the ash.

Self-hardening is one of the granulating methods. Dry ash is very dusty and therefore it is mixed with water. This prevents dusting while storing. Water also causes chemical reactions in which the ash starts to granulate. For this thesis the granulation and other effects of the ash were monitored with the help of graininess, water content, calcium oxide content and weather follow-up. Measurements were performed from every ash sack approximately at monthly intervals and finally the evenness of the spreading was tested.

Based on the measurements and analysis it was found that covering the sacks is necessary. The water content of uncovered sacks varies a lot, it may even double. The water content of covered sacks was clearly more stable. When testing the evenness of the spreading it was found out that the high water content and frost made the uncovered sacks into an ice cube. The ash must be smooth enough for spreading when it comes out of sack. The best spreading results were accomplished with ashes that had no lumps and the particle size distribution was relatively even.

Based on the results of the measurements and within the legislation the best option to sacking is to use old ash in which the granulation process is already well advanced. The sacks must be covered during the storage. Stable particle size distribution and water content guarantees the predictability and stability of the spreading.

---

Keywords                      Self-hardening, ash, fertilization, sacking, forestry

## SISÄLLYS

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	11
	1.1 Opinnäytetyön tausta ja tarkoitus.....	11
	1.2 Aiheen rajaus .....	12
	1.3 Metsäliitto Osuuskunta ja Metsä Group lyhyesti.....	12
2	TUHKALANNOITUKSESTA .....	14
	2.1 Tuhkien ravinnesisältö ja koostumus.....	15
	2.2 Tuhkalannoituksen kohteet ja toteuttaminen .....	15
	2.3 Tuhkalannoituksen vaikutukset .....	16
3	KASKISTEN METSÄ BOARDIN TUHKA .....	18
	3.1 Tuhkan prosessivaiheet.....	18
	3.2 Itsekovetus tuhkan esikäsittelynä.....	19
	3.3 Itsekovetuksen teoria .....	19
4	TUHKALANNOITUS JA LAINSÄÄDÄNTÖ .....	21
5	SÄKITYKSET JA VARASTOINTI.....	23
	5.1 Säkkien ja varastoinnin koejärjestelyt .....	23
	5.2 Säkitys käytännössä – ensimmäinen säkitys 26.4.2013.....	24
	5.3 Toinen säkitys 22.8.2013 .....	26
6	MITTAUKSET JA TUTKIMUKSET.....	27
	6.1 Näytteenotto.....	27
	6.2 Mittausten standardit.....	28
	6.3 Mittausten toteutus käytännössä .....	28
	6.3.1 Vesipitoisuuden määrittäminen.....	29
	6.3.2 Rakeisuuden määrittäminen .....	29
	6.3.3 Kalsiumoksidimäärittäminen ja tulokset.....	29
	6.3.4 Säätietojen seuranta.....	31
	6.4 Tuhkan levityskokeet.....	31
7	MITTAUSTEN KIRJALLISET YHTEENVEDOT TUHKALAADUITTAIN JA POIMINTOJA TULOKSISTA.....	33

7.1	Säkit 1–4: Vanha tuhka.....	33
7.2	Säkit 5–8: Kasa 26 % .....	34
7.3	Säkit 9–12: Uusi tuhka.....	36
7.4	Säkit 13–16: Kasa 21 % .....	37
7.5	Säkit 17–20: Vanha tuhka.....	37
7.6	Säkit 21–24: Kuiva tuhka.....	38
7.7	Säkit 25–28: Kosteaa tuhka .....	39
7.8	Säkit 29–32: Uusi tuhka.....	40
8	TULOSTEN VERTAILUA.....	42
8.1	Huhtikuun säkityksen tuhkalaatujen vertailu keskenään .....	42
8.2	Elokuun säkityksen tuhkalaatujen vertailu keskenään.....	44
8.3	Säkit 1–16: Tuloksissa havaittuja yhtäläisyyksiä .....	45
8.4	Säkit 17–32: Tuloksissa havaittuja yhtäläisyyksiä .....	46
8.5	Varastointiaikojen ja säkitysajankohtien vertailut .....	47
8.5.1	Vanhojen tuhkien vertailu .....	47
8.5.2	Uusien tuhkien vertailu .....	48
8.5.3	Kasa 21 % ja kasa 26 % vs. kuiva ja kostea tuhka.....	49
8.6	Tulosten analysoinnin haasteet .....	52
9	LEVITYSKOKEIDEN TULOKSET .....	54
9.1	Levitystulokset sanallisesti .....	54
9.2	Levittämättömät tuhkat .....	56
9.3	Levitystulosten suhde vesipitoisuuteen ja rakeisuuteen .....	56
9.3.1	Huhtikuun tuhkasäkit .....	56
9.3.2	Elokuun tuhkasäkit.....	59
9.4	Levitystulosten yhteenveto .....	61
10	KOEJÄRJESTELYJEN JA OLOSUHTEIDEN VAIKUTUS.....	65
10.1	Säkityksen vaikutus tuhkaan.....	65
10.2	Suojausten vertailu.....	65
10.3	Sään vaikutus .....	66
10.4	Vesipitoisuuden vaikutus .....	67
11	KOKONAISVERTAILU .....	68
11.1	Vaihtoehtojen rajaus .....	68

	6
11.2 Parhaat vaihtoehdot jatkoa ajatellen .....	69
11.3 Säkitys jatkossa ja millä tavalla .....	72
11.4 Kuljetuskustannukset .....	72
11.5 Muita huomioita ja havaintoja .....	73
12 LOPPUPÄÄTELMÄT .....	74
LÄHTEET .....	78
LIITTEET	

**SANASTO**

d50-raekoko	Seulonnassa rakeiden keskiläpimitta eli rakeisuus-käyrältä luettava raekoko sillä kohdalla, jossa läpäisyprosentti on 50.
Hienoaines	Hienoaineksella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa seulonnassa 1 millimetrin seulan läpäisseiden rakeiden osuutta tai pohjan + pesutappion osuutta (katso pohja + pt).
Itsekovetus	Tuhkan rakeistusmenetelmä, jossa tuhka kostutetaan vedellä ja kasavarastoidaan.
Keskikokoiset rakeet	Lyhennettynä keskirakeet. Tarkoitetaan tässä tutkimuksessa 1–5,6 mm:n ja 5,6–22,4 mm:n tuhkarakeita.
Pohja + pt	Pohja on kuivaseulonnassa 0,063 mm seulan läpäis-syt tuhka ja pt eli pesutappio pesuseulonnassa veden mukana menneen tuhkan määrä. Yhteenlaskettuna nämä ovat pohja + pesutappio.
Tuhkalaatu	Tarkoitetaan tässä tutkimuksessa säkitettyjä erilaisia tuhkia. Tuhkalaatuja ovat esimerkiksi vanha tuhka, kostea tuhka ja kasa 26 %.



## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuvio 1.</b> Itsekovetustuhkaa kasavarastoinnissa.....	s. 19
<b>Kuvio 2.</b> Kaivinkone täyttää trukkipiikeillä olevaa säkkiä.....	s. 25
<b>Kuvio 3.</b> Levityskokeiden mittauslaatikoiden koejärjestely.....	s. 32
<b>Kuvio 4.</b> Kuva jäisestä säkki 28:sta joulukuun mittauksessa.....	s. 40
<b>Kuvio 5.</b> Tuhkanlevitystä Veljekset Knuutila Ay:n kalustolla.....	s. 54
<b>Kuvio 6.</b> Huhtikuun suojaamattomista tuhista tuli arpakuutioita (säkki 8).....	s. 57
<b>Kuvio 7.</b> Huhtikuun vanhan suojatun tuhkan levitystasaisuus.....	s. 57
<b>Kuvio 8.</b> Kasa 21 tuhkan levitystasaisuus.....	s. 58
<b>Kuvio 9.</b> Kostean tuhkan levitystasaisuus.....	s. 60
<b>Kuvio 10.</b> Elokuun suojatun uuden tuhkan levitystasaisuus.....	s. 63
<b>Kuvio 11.</b> Tuhkan hienontamista levitystä varten. ....	s. 64
<b>Kuvio 12.</b> Kuivan tuhkan (säkki 22) jättiläisrakeita marraskuun mittauksella.....	s. 70
<b>Taulukko 1.</b> Esimerkki turvemaille soveltuvien lannoitteiden alkuainesisällöstä /19/.....	s. 15
<b>Taulukko 2.</b> Haitallisten aineiden sallitut enimmäispitoisuudet metsälannoitteena käytettävässä tuhkassa (MMM asetus 24/11) /18/.....	s. 21
<b>Taulukko 3.</b> Metsässä käytettävän tuhkalannoitteen ravinteiden vähimmäispitoisuudet painoprosentteina kuiva-aineesta (MMM asetus 24/11) /18/.....	s. 22
<b>Taulukko 4.</b> Tuhkan koejärjestely yhdellä säkityskerralla.....	s. 24
<b>Taulukko 5.</b> Sakkien 1–16 varastointijärjestys ja alkuvesipitoisuudet.....	s. 25
<b>Taulukko 6.</b> Sakkien 17–32 varastointijärjestys ja alkuvesipitoisuudet.....	s. 26
<b>Taulukko 7.</b> Säkitysten ja mittausten ajankohdat.....	s. 27

<b>Taulukko 8.</b> Mittauksissa käytetyt standardit.....	s. 28
<b>Taulukko 9.</b> Tuhkien kalsiumoksidipitoisuudet alussa ja lopussa...	s. 31
<b>Taulukko 10.</b> Yhteenveto huhtikuun vanhan tuhkan vesipitoisuuksista.....	s. 34
<b>Taulukko 11.</b> Kasa 26:n d50-raekoot.....	s. 35
<b>Taulukko 12.</b> Yhteenveto uuden tuhkan vesipitoisuuksista.....	s. 36
<b>Taulukko 13.</b> Yhteenveto kasa 21:n raeosuuksista luokassa $\leq 1$ mm.....	s. 37
<b>Taulukko 14.</b> Yhteenveto elokuun vanhan tuhkan raeosuuksista luokassa $\leq 1$ mm.....	s. 38
<b>Taulukko 15.</b> Yhteenveto kuivan tuhkan vesipitoisuuksista.....	s. 39
<b>Taulukko 16.</b> Yhteenveto elokuun uuden tuhkan raeosuuksista luokassa $\leq 1$ mm.....	s. 41
<b>Taulukko 17.</b> Tuhkan tilavuuspaino eri vesipitoisuuksilla.....	s. 73

**LIITELUETTELO****LIITE 1.** Esimerkki rakeisuuskäyrästä**LIITE 2.** Mittausyhteenvedot**LIITE 3.** Yhteenvedo mittaustulosten yhtäläisyyksistä**LIITE 4.** Levityskokeiden tulokset**LIITE 5.** Sääseurannan yhteenvedot

## 1 JOHDANTO

Metsä Boardin kemihierretehtaalla Kaskisissa syntyy prosessin sivutuotteena kuorituhkaa noin 2 500 tonnia vuositasolla (2 799 t v. 2013). Tällä hetkellä osa tuhkasta hyödynnetään vanhan jätevesialtaan täyttämässä ja osa toimitetaan metsänlannoitteeksi yhteistyössä Metsäkeskuksen ja ForestVital Oy:n kanssa /1/. Jätevesialtaan täyttäminen on tuhkan hyötykäyttöä, joten siihen ei kohdistu jäteveroa. Vanhan altaan täyttämisen salliva ympäristölupa on kuitenkin päättymässä vuonna 2015. Mikäli tuhka kuljetetaan kaatopaikalle, joudutaan siitä jäteverolain mukaisesti maksamaan veroa 50 euroa tonnilta jätettä /12/.

Syntyvä tuhka on kuivana erittäin pölyävää, joten sitä ei sellaisenaan voida varastoida tai käyttää lannoitukseen. Pölyämisen estämiseksi tuhkaa kostutetaan vedellä 20–30 %:n kosteuteen, mikä saa myös aikaan kemiallisen reaktion, jossa tuhka rakeistuu. Kyseistä tuhkan esikäsittelemenetelmää, jossa kostutettu tuhka kasavarastoidaan, kutsutaan itsekovetusmenetelmäksi. /3; 19/

Samaista kuorituhkaa voidaan myös hyödyntää esimerkiksi talousmetsien lannoituksessa. Tuhkan ravinnesisältö soveltuu erityisesti turvemaille, joissa kasvua rajoittaa kaliumin ja fosforin puute /3, 19/. Tuhkan lannoituskäytöllä hyödyttäisiin sekä taloudellisesti että ekologisesti palauttamalla sen sisältämät ravinteet takaisin metsään.

Suomi on kansallisten energia- ja ilmastotavoitteiden mukaisesti sitoutunut nostamaan uusiutuvien energioiden osuuden 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä /6/. Tämä lisää biomassojen käyttöä energian lähteinä, mikä taas lisää tuhkamääriä. Näin ollen myös tuhkan hyötykäytön merkitys kasvaa edelleen.

### 1.1 Opinnäytetyön tausta ja tarkoitus

Metsä Groupilla on kokemusta ja aiempia tutkimuksia itsekovettuvasta tuhkasta, mutta niissä on tutkittu kasavarastoitua tuhkaa. Tarkoitus olikin lähteä tutkimaan säkitettyä tuhkaa ja sen varastointia. Työssä tutkittiin miten säkitys, erilaiset varastointitavat ja sääolot vaikuttavat tuhkan rakeistumiseen, vesipitoisuuteen ja lo-

pulta levitettävyyteen. Lähtökohtana on säkitetyn tuhkan parempi tuotteistettavuus asiakkaan näkökulmasta.

Opinnäytetyön aikana oli kaksi tuhkan säkityskertaa, huhtikuussa ja elokuussa, joissa molemmissa täytettiin 16 kappaletta 1 000 kg:n säkkejä. Tuhkalaatuja oli molemmilla kerroilla neljä, joten kutakin laatua tuli yhteensä neljä säkillistä. Näistä neljästä kaksi säkkiä varastoitiin suojapeitteen alle ja kaksi taivasalle. Näin ollen jokaista erilaista vaihtoehtoa oli koejärjestelyissä kaksi kappaletta.

## **1.2 Aiheen rajaus**

Aiheen rajaus oli pääpiirteittäin selvä jo siitä asti, kun aiheesta ja mahdollisuudesta opinnäytetyön tekoon keskusteltiin. Käytännön osalta työssä käsitellään tuhkan eri prosessivaiheita siitä asti, kun tuhka on ajettu kasalle varastointialueelle, jatkuen siihen asti kunnes tuhka on levityslaitteessa levityskohteessa. Rajaus sisältää tuhkan säkityksen, varastoinnin, mittaukset ja levityskokeet. Lisäksi käydään läpi tuhkan syntyä teoriassa ja sen kuljetuskustannuksia levityskohteeseen.

## **1.3 Metsäliitto Osuuskunta ja Metsä Group lyhyesti**

Metsäliitto Osuuskunta on kansainvälinen metsäteollisuuskonserni ja siihen kuuluu noin 125 000 suomalaista metsänomistajaa. Metsäliitto Osuuskunta on Metsä Groupin emoyhtiö, joka jalostaa omistajajäsenten metsistä hankittua puuta. Metsä Group taas muodostuu osuuskunnan kokonaan tai osittain omistamista tytäryhtiöistä, jotka keskittyvät puun hankintaan, sahaukseen ja jalostukseen eri muodoissa. /22/

Osuuskunnan juuret ovat 1900-luvun alussa, jolloin metsänomistajat halusivat vankemman aseman neuvotteluihin. Metsänomistajien yhteistyö kehittyi Metsäliitto Oy:ksi vuonna 1934 ja siitä edelleen Metsäliitto Osuuskunnaksi vuonna 1947. Toiminta laajeni nopeasti tulevina vuosikymmeninä kansainväliseksi metsäteollisuuskonserniksi. Nykyään Metsä Groupilla on noin 11 000 työntekijää noin 30 maassa ja liikevaihto 4,9 miljardia euroa (v. 2012). /21; 23/

Metsä Board on Euroopan johtava taivekartongin ja liner-kartongin tuottaja ja merkittävä paperin toimittaja. Tuotevalikoimaan kuuluvat ensikuituun perustuvat kuluttajapakkaukset, toimistopaperi, valupäälyllystetty erikoispaperi ja tapettipohjapaperi /20/. Suomessa Metsä Boardilla on seitsemän tuotantoyksikköä, joista Kaskisten kemihierretehdas valmistui vuonna 2005. Kaskisten tehtaalla valmistetaan kemiallisesti esikäsitellystä puuhakkeesta mekaanisesti jauhettua ja valkaistua korkeasaantoista massaa. Tehtaan tuotantokapasiteetti on 300 000 t massaa vuodessa. /16; 28/

## 2 TUHKALANNOITUKSESTA

Suomen lämpö- ja voimalaitoksissa on arvioitu syntyvän vuositasolla yhteensä noin 600 000 tonnia puu-, turve- ja sekaturhua. Puhdasta puuntuhkaa syntyy vain murto-osa, koska käytössä on lähes aina useampia polttoaineita /3/. Metsäteollisuudessa tuhkaa syntyi yhteensä 184 000 tonnia vuonna 2012. Siitä 33 000 tonnia ohjautui lannoitekäyttöön metsiin ja pelloille. Tarkoista osuuksista ei ole tietoa, mutta oletettavasti suurin osa tuhkasta on mennyt metsänlannoitukseen /2/. Tuhkaa viedään myös hyödyntämättömänä kaatopaikoille tai jätetään tehdasalueille odottamaan jatkokäyttöä /19/.

Vuonna 2010 Suomessa lannoitettiin metsiä 45 000 hehtaaria. Lannoitusalaista 26 000 hehtaaria oli valtion ja metsäteollisuuden metsiä. Näissä metsänlannoituksissa alle viidenneksessä pinta-alasta käytettiin tuhkalannoitteita. Loput 19 000 hehtaaria vuoden 2010 kokonaislannoitusalaista on yksityismetsiä ja tästä noin 10 % arvioidaan olleen tuhkalannoitusta /24, 120–121/. Vuonna 2012 Suomessa lannoitettiin metsiä kolmannes vähemmän, 32 000 hehtaaria, taloudellisen taantumana vuoksi. Tästä määrästä vajaat 14 500 hehtaaria oli yksityismetsiä, metsäteollisuuden metsiä runsaat 10 000 ha ja loput 7 500 ha valtion metsiä. /25, 104–105/

Vuonna 2010 hyväksytty kansallinen metsäohjelma KMO on asettanut tavoitteeseen nostaa energian tuotannossa käytettävän metsähakkeen määrän 8–12 milj. m<sup>3</sup>/v vuoteen 2015 mennessä, kun se vuonna 2009 oli 6,1 milj. m<sup>3</sup>/v. Lisäksi Suomea sitovat ilmastotavoitteet uusiutuvan energian käytön nostamisesta 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen saavuttamisen yhtenä suurena tekijänä on metsähakkeen käytön lisääminen voimalaitoksissa. Samalla metsänlannoitusten kokonaispinta-alaa halutaan kasvattaa 80 000 hehtaariin vuodessa. Lannoitus-suositusten mukaisella tuhka-annoksella (3–5 t/ha) tuhkaa kuluisi arviolta noin 320 000 t, mikä on 2,5-kertainen verrattuna vuoden 2012 lannoitusmäärään /17/. Tuhkan hyödyntämisen kasvulle on siten selkeät perusteet havaittavissa.

## 2.1 Tuhkien ravinnesisältö ja koostumus

Puupolttoaineiden tuhkassa on ravinteita ja hivenaineita, joita puu on ottanut maaperästä ja ilmasta /30/. Ravinteiden lisäksi tuhkaan rikastuu jonkin verran myös puun ja turpeen sekä muiden poltettavien biomassojen sisältämiä raskasmetalleja, kuten kadmiumia, kromia ja nikkeliä sekä puolimetalleista arseenia /3/.

Yleensä puutuhka sisältää 20–30 % kalsiumia, yli 3 % kaliumia ja fosforia noin 1,5 %. Lisäksi puutuhkissa on aina rautaa, joka sitoo itseensä fosforia ja luovuttaa sen hitaasti ympäristöön. Typeä tuhkassa ei ole, sillä se vapautuu savukaasujen mukana ilmakehään jo palamisprosessissa. Puutuhka on hyvin emäksistä, sen pH-arvo on 10–13, joten se saattaa aiheuttaa pH-shokin metsämaassa. /19; 4/

Muihin lannoitteisiin verrattuna tuhkat sisältävät suhteellisesti vähän ravinteita, kuten taulukosta 1 havaitaan. Tuhkan vaikutus puuston kasvuun on ensimmäisinä vuosina vähäisempi kuin kaupallisten PK-lannoitteiden (PK = fosfori, kalium). Pitkällä aikavälillä vaikutukset kuitenkin ovat yhtä hyvät ja jopa paremmat johtuen hitaasta liukenemisestä. /3/

**Taulukko 1.** Esimerkki turvemaille soveltuvien lannoitteiden alkuainesisällöstä /19/.

Ravinne	Puutuhka	Turpeentuhka	Rauta-PK -lannoite
<b>Fosfori (P), %</b>	1,5	1,1	8,0
<b>Kalium (K), %</b>	3,8	0,3	14,0
<b>Kalsium (Ca), %</b>	23,3	7,6	14,8
<b>Magnesium (Mg), %</b>	2,2	1,1	0,4
<b>Boori (B), %</b>	0,03	alle 0,01	0,3

## 2.2 Tuhkalannoituksen kohteet ja toteuttaminen

Tuhkan ravinnesisältö ja kalkitusvaikutus soveltuvat monien ravinnehäiriöiden korjaamiseen ja metsämaan pH:n nostamiseen /30/. Tuhkalannoitukseen soveltuvat erityisen hyvin runsastyyppiset ja paksuturpeiset ojitetut suometsät, joilla kasvua rajoittaa fosforin ja kaliumin puute. Myös kasvuhäiriöistä kärsiville suomet-



sille tuhka sopii lannoitteeksi. Tällaisia kohteita ovat tyypillisesti paksuturpeiset ja pitkälle maatuneet II-tyyppin puolukka- ja mustikkaturvekankaat. Niukkatyyppisillä kangasmailla tuhkan vaikutus puustoon on vähäinen, runsastyyppisillä kangasmail-la hieman parempi. Kangasmailla tuhkan parantava vaikutus onkin kohdistunut enemmän maaperään ja biologiseen aktiivisuuteen, kuin puuston kasvuun. /3/

Nykyisten lannoitussuositusten mukaan tuhkaa annostellaan noin 3 000–5 000 kg/ha. Annoksella saavutetaan lannoitussuositusten mukaiset ravinnemäärät: fosforia 40–50 kg/ha ja kaliumia 80–100 kg/ha. Tällä määrällä maan happamuus vähenee ja pintakerroksen kokonaisravinnevarat lisääntyvät merkittävästi vuosikymmenien ajaksi niin turve- kuin kangasmailla. /3/

Tuhkalannoitus voidaan tehdä joko maalevityksenä tai lentolevityksenä. Maalevityksessä käytetään yleensä metsätraktoria tai maatalouskalustoa. Raskaan levityskaluston vuoksi ajankohtana on talvi, jolloin maa on riittävän kantavaa. Maalevitys vaatii tuhkalalle myös varastopaikan, jonne päästään rekka-autolla sekä metsään hakatut ajourat. Tuhkalannoitusta ennen tehdään harvennushakkuu ja lopuksi kunnostusojitus. Lentolevitys taas tapahtuu helikopterilla, eikä se ole riippuvainen vuodenajoista tai metsänkäsittelyvaiheista. Molemmilla tavoilla lannoitus kannattaa tehdä laajempaan kokonaisuuteen, esimerkiksi useampien tilojen yhteishankkeena, koska tällöin voidaan säästää kustannuksissa. Tuhkalannoitus on terveyslannoitusta, joten siihen voi hakea valtiolta Kemera-tukea. /3/

### **2.3 Tuhkalannoituksen vaikutukset**

Tuhkalannoitus parantaa puuston ravinnetilaa pitkäaikaisesti. Vaikutus riippuu kuitenkin mm. kasvupaikan ravinteisuudesta, puulajista, levitetyn tuhkan määrästä ja laadusta sekä puuston ravinnetilasta ennen lannoitusta. Lannoituksen jälkeinen puuston kasvureaktio lähtee hitaasti liikkeelle, mutta on pitkäkestoinen ja voimakas. Runsastyyppisillä alueilla kasvua on havaittu 2–3 vuoden päästä lannoituksesta ja niukkatyyppisillä alueilla 7–8 vuoden kuluttua. Runsastyyppisillä kasvupaikoilla puuston kasvu on lisääntynyt noin 2–6 m<sup>3</sup>/ha/v ja niukkatyyppisillä noin 1–3 m<sup>3</sup>/ha/v kiertoajan kuluessa. /3/ Mitä enemmän turpeessa on typpeä, sitä enemmän lisäkasvua saadaan tuhkalannoituksella /19/. Suometsissä puuston ra-

vinnetila on pysynyt hyvänä 20–50 vuoden ajan riippuen levitetyn tuhkan määrästä /3/.

Tuhkalannoitus ei lisää merkittävästi huuhtoumia vesistöihin. Lannoituksen fosfori- ja raskasmetallihuuhtoumat ovat vähäisiä, mutta lisääntyvät merkittävästi, jos tuhkaa päätyy suoraan ojiin tai vesistöihin. Tätä varten jätetään suojakaistoja vesistöjen reunoille: purojen reunoille 10–15 m ja muiden vesistöjen rannoilla 50 m. Lisäksi I- ja II-luokan pohjavesialueilla ei suoriteta typpi- ja fosforilannoituksia. /19/

### **3 KASKISTEN METSÄ BOARDIN TUHKA**

Metsä Boardin Kaskisten tehtaalla tuhkaa syntyy vuositasolla noin 2 500 tonnia (2 799 t vuonna 2013) /1/. Vuodesta 2012 asti osa tuhkasta on hyödynnetty metsäkeskuksen ja ForestVitalin kautta lannoituskäyttöön, mutta suurin osa tuhkasta jää tehdasalueelle. Tulevaisuudessa tuhkasta myös joudutaan maksamaan jäteveeroa 50 €/t, jos se kuljetetaan kaatopaikalle /12/. Toistaiseksi tuhkalla on voitu täyttää vanhaa jätevedenpuhdistamon allasta, jonka lupa kuitenkin loppuu vuonna 2015. Täyttöpaikka on veroton, koska käyttö luetaan jätteen hyödyntämiseksi /12/. Tässä luvussa käydään läpi prosessia, jossa tuhkaa syntyy sekä miten sitä esikäsittellään varastointia ja metsänlannoitusta varten. Esikäsittelyssä pureudutaan myös itsekovettumisen teoriapuoleen.

#### **3.1 Tuhkan prosessivaiheet**

Metsä Boardin kemihierretehtaan prosessissa saadaan sivutuotteena puunkuorta. Energian talteen ottamiseksi kuori poltetaan 830 celsiusasteisessa kuorikattilassa, jonka tuottama höyry käytetään prosessilämpönä. Kattila on leijukerroskattila, jonka pohjalla olevaa hiekkakerrosta leijutetaan ilmalla, jolloin palaminen tapahtuu leijuavassa hiekkapedissä. Kuorikattilassa poltetaan myös jätevesien käsittelyssä syntyvä bioliete ja prosessiliete sekä puun- ja hakkeen käsittelyn rejekti. Poltettavasta aineksesta 90 % on puun kuorta. Puulajeina käytetään haapaa, koivua ja kuusta (tiedot v. 2013). /1; 27/

Poltossa syntyvä lentotuhka erotetaan savukaasusta sähkösuotimilla /16/. Lentotuhka varastoidaan siiloon ja puretaan säännöllisin väliajoin pois, noin vuorokauden välein. Tuhka kuljetetaan tehdasalueella sijaitsevalle ns. tuhkakentälle, jossa sillä täytetään vanhaa jätevesiallasta. Tuhka on kuivana erittäin pölyävää, joten se on kostutettava vedellä. Kostutus tapahtuu tuhkan kostutuslaitteistolla, kun tuhka puretaan siilosta. Tämä saa myös aikaan tuhkan rakeistumista, jota tässä tapauksessa kutsutaan itsekovettumiseksi. /26; 27/

### 3.2 Itsekovetus tuhkan esikäsitteilynä

Käsittelemätön tuhka on hienojakoista ja pölyävää. Lisäksi sen sisältämät reaktiiviset yhdisteet, esimerkiksi oksidit, saattavat aiheuttaa metsämaassa pH-shokin ja palamisvaurioita kasveille, kun hienojakoisen tuhkan liukeneminen on nopeaa. Sen takia tuhka esikäsitellään aina ennen lannoituskäyttöä. /4/ Tuhkan esikäsitelyssä vaihtoehtoina ovat itsekovettaminen, rakeistus ja pelletöinti. Yksinkertaisin näistä on itsekovetusmenetelmä. Itsekovetusmenetelmä perustuu tuhkan kostuttamiseen vedellä, minkä jälkeen se ajetaan kasalle kovettumaan (kuvio 1). Kovetussa tuhasta tulee vähemmän pölyävää ja siten helpommin ja turvallisemmin käsiteltävää. Itsekovetuksessa ja rakeistuksessa on sama teoria, kun taas pelletöinnissä tuhkaa puristetaan. Selvästi halvin menetelmistä on itsekovetus, toiseksi halvin on rakeistus ja kallein pelletöinti. /3/



**Kuvio 1.** Itsekovetustuhkaa kasavarastoinnissa.

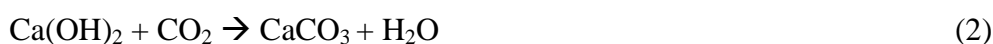
### 3.3 Itsekovetuksen teoria

Tuhkan kovettumisprosessi on sarja kemiallisia reaktioita. Kovettumiseen vaikuttavat mm. tuhkan kemiallinen koostumus, partikkelikoko, vesi/kiinteäfaasiolosuhteet ja lämpötila. /9/ Kovettumisen kannalta merkittävin tekijä on kalsiumoksidi ( $\text{CaO}$ ) eli kalkki, joka on vallitsevin oksidi puu- ja kuorituhkassa /4/.

Kyseinen kalkki tunnetaan myös nimillä poltettu tai sammuttamaton kalkki. Vedен kanssa reagoidessaan se muuttuu sammutetuksi kalkiksi ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) /5/. Kun tuhkaan lisätään vettä, kalsiumoksidi hydratoituu yhtälön 1 mukaisesti /4/.



Karbonoinnissa hydroksidi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reagoi ilman hiilidioksidin  $\text{CO}_2$  kanssa muodostaen karbonaattia  $\text{CaCO}_3$  yhtälön 2 mukaisesti. Tuhkan kovettuminen tapahtuu karbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) muodostumisen myötä. /4/



Kalsiumoksidi reagoi myös tuhkan alumiiniyhdisteiden kanssa muodostaen kalsiumaluminaattimineraalia ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) tai kun tuhkassa on myös liukoista sulfaattia, muodostuu ettringiittimineraalia ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$ ). Molemmat ovat sementtimäisiä aineita, jotka saostuessaan vesihuokosiin tiivistävät tuhkahiukkasia ja sitovat niitä yhteen tiiviiksi partikkeleiksi. /3; 9; 31/

Tuhkan kovettuminen on reaktiona nopea ja siinä vapautuu sekä lämpöä että vesihöyryä /4/. Kovettuminen kuitenkin jatkuu vähintään muutamien viikkojen tai kuukausien ajan, riippuen kovettumiseen vaikuttavista tekijöistä /3; 19; 30/.

## 4 TUHKALANNOITUS JA LAINSÄÄDÄNTÖ

Suomessa tuhkan hyötykäyttöä lannoitteena säätelee lannoitevalmistelaki (539/2006) ja sen perusteella annetut asetukset (MMM asetus 24/11). Laissa määritellään lannoitukseen käytettävän tuhkan laatuvaatimukset, tuhkalannoitteille laadittavan tuoteselosteen sisältö sekä tuottajan vastuut ja velvollisuudet. Lannoitevalmisteiden lainsäädäntöä valvoo Elintarviketurvallisuusvirasto Evira. /3; 19/

Puuntuhkaa voidaan käyttää tuhkalannoitteena, kunhan se käsitellään mahdollisimman pölyämättömäksi. Tuhkalannoitteille on asetettu myös vähimmäisravinnepitoisuudet (taulukko 3) ja haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet (taulukko 2). Fosforin (P) ja kaliumin (K) yhteispitoisuuden täytyy olla vähintään 2 % ja kalsiumin (Ca) vähintään 6 % kuivapainosta /18/. Todettakoon kuitenkin, että vähimmäisvaatimukset täyttävää tuhkaa kannattaa harvoin kuljettaa metsään, koska tuhkamäärä ja kuljetuskustannukset kasvavat suuriksi. Toisaalta tuhkan lisäainetus on sallittua.

**Taulukko 2.** Haitallisten aineiden sallitut enimmäispitoisuudet metsälannoitteena käytettävässä tuhkassa (MMM asetus 24/11) /18/.

Alkuaine	Enimmäispitoisuus mg/kg kuiva-ainetta
Arseeni (As)	40
Elohopea (Hg)	1,0
Kadmium (Cd)	25
Kromi (Cr)	300
Kupari (Cu)	700
Lyijy (Pb)	150
Nikkeli (Ni)	150
Sinkki (Zn)	4500

**Taulukko 3.** Metsässä käytettävän tuhkalannoitteen ravinteiden vähimmäispitoisuudet painoprosentteina kuiva-aineesta (MMM asetus 24/11) /18/.

Ravinne	Pitoisuus p.% ka.
Fosfori (P) + Kalium (K)	2,0 %
Kalsium (Ca)	6,0 %

Lannoitevalmisteen tuoteselosteessa täytyy olla tiedot lannoitevalmisteen tyyppi- ja kaupanimestä, ominaisuuksista, koostumuksesta, käytöstä, valmistajasta ja maahantuojasta /13/. Puutuhkan tyyppinimi on ”puun ja turpeen tuhka” /7/. Lannoitepakkauksen vetoisuus saa olla enintään 1 000 kg. Pakkaus on myös suljettava tiiviisti ja avattaessa kiinnityksen on vaurioitettava korjauskelvottomaksi. Venttiilisäkkien käyttö on sallittua. Lannoitevalmiste tulee varastoida siten, ettei sen koostumus muutu säilytyksen aikana ja että se vastaa tuoteselostetta. Epäorgaanisina lannoitteina käytettävien sivutuotteiden (tuhkan) sallituista poikkeamista on säädetty seuraavaa: neutraloiva kyky (Ca)  $\pm$  2,0 prosenttiyksikköä sekä ravinteet ja kosteus  $\pm$  20 %:n suhteellinen poikkeama /13/. Tämän opinnäytetyön puitteissa tärkein muuttujista on kosteuden sallittu suhteellinen poikkeama  $\pm$  20 %, joka lasketaan tuoteselosteessa ilmoitetusta arvosta. Jos kosteusprosentti ilmoitetaan tuoteselosteessa vaihteluvälinä, saa väli olla enintään sallitun poikkeaman suuruinen /18/.

## 5 SÄKITYKSET JA VARASTOINTI

Opinnäytetyön ensimmäisiä vaiheita oli päättää säkitykseen liittyvät asiat. Yhteistyössä ohjausryhmän kanssa päätimme minkälaisia säkkejä käytetään, miten säkitys käytännössä toteutetaan ja kuinka monta säkkiä tuhkaa säkitetään. Säkin materiaaliksi valittiin huokoinen kangas ja vetoisuudeksi lannoitevalmistelain mukainen enimmäistilavuus 1 000 kg. Säkkiin valittiin avoin kaulus sidontanaruilla, jolloin näytteidenotto sujui kätevästi. Lisäksi yläpään jokaisesta kulmasta löytyi nostolenkit esimerkiksi trukkipiikeille. Kyseiset suursäkit tilattiin lopulta Zymotec Oy:ltä Riihimäeltä. Säkityksen tekninen toteutus päätettiin suorittaa tässä tutkimuksessa ilman mitään varsinaisia kiinteitä rakenteita tai kalliimpia ratkaisuja. Säkityksiin tilattiin L. Simons Transportilta Närpiöstä kaivinkone ja trukkipiikeillä varustettu pyöräkuormaaja.

### 5.1 Sakkien ja varastoinnin koejärjestelyt

Tarkoituksena oli tutkia erilaisia tuhkia erilaisissa varastointiolosuhteissa. Tuhkiin haettiin vaihtelua eri kosteusprosentteilla ja tuhkien iällä. Alkuperäinen tarkoitus oli myös tehdä ns. talvisäkitys ja kesäsäkitys. Käytännössä talvisäkitys venyi kuitenkin keväälle, koska työtä alettiin suunnitella vasta helmikuun 2013 lopulla aloituskokouksen jälkeen. Talviolosuhteita saatiin silti mukaan kokeen loppupäässä. Varastoinnissa osa säkeistä suojattiin kevytpeitteillä ja osa jätettiin säiden armoille. Lisäksi säkityksen ajankohdilla saatiin eripituiset varastointiajat säkeille.

Koejärjestelyt pitävät sisällään jokaiselle erilaiselle vaihtoehdolle kaksi rinnakkaista säkkiä. Kummallakin säkityskerralla käytettiin neljää erilaista tuhkalaatua, joista kustakin täytettiin neljä säkkiä. Näistä neljästä säkistä kaksi laitettiin säänsuojaan ja kaksi taivasalle. Yhteensä siis säkitettiin 16 säkkiä keväällä huhtikuussa ja toiset 16 kesän lopulla elokuussa. Koejärjestelyjen yhteenvedo on esitetty taulukossa 4.



**Taulukko 4.** Tuhkan koejärjestely yhdellä säkityskerralla.

Kevät / kesä -säkitys							
Tuore tuhka 1		Tuore tuhka 2		Tuore tuhka 3		Vanha tuhka	
suoja	ei-suoja	suoja	ei-suoja	suoja	ei-suoja	suoja	ei-suoja
<b>Jokaisella vaihtoehdolla kaksi rinnakkaista säkkiä</b>							
2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Säkkejä yhteensä 16 kpl</b>							

Säkit nimettiin ensimmäisessä säkityksessä numeroilla 1–16 ja toisessa säkityksessä 17–32. Vanhana tuhkana käytettiin noin puoli vuotta vanhaa kasavarastoitua tuhkaa. Tuoreina tuhkina käytettiin edellisen viikon aikaisia tuhkaeria, joihin pyrittiin saamaan eri kosteudet. Lisäksi mukana oli erittäin tuore, yhä lämmin, tuhka.

## 5.2 Säkitys käytännössä – ensimmäinen säkitys 26.4.2013

Ensimmäinen säkityspäivä järjestettiin perjantaina 26.4.2013 Kaskisten Metsä Boardin tuhkan varastointialueella. Paikalla olivat kirjoittajan lisäksi ohjaajista Olli Lehtovaara ja Janne Soimasuo. Viikon aikana oli valmisteltu alueelle kaksi tuhkaerää, joissa oli eri kosteusprosentit. Tuhkan kostuttaminen tapahtuu käsi-venttiiliä säätämällä, joten tarkkojen kosteuksien asettaminen ei ole mahdollista. Lisäksi tuhkasiilo tyhjätyään noin kerran vuorokaudessa, joten tarkkojen ja useiden eri kosteuksien asettaminen säkityspäivänä ei onnistu.

Kosteusprosentit mitattiin Metsä Boardin henkilökunnan toimesta halogeenikosteusanalysaattorilla ja tuhkat nimettiin alustavasti kosteuksien mukaan. Koejärjestelyjen tuhkalaadut olivat noin puoli vuotta vanha tuhka sekä tuoreet tuhkat: tuhkakasa 21 %, tuhkakasa 26 % ja kyseisenä päivänä alueelle tuotu lämmin tuhka. Kaikista neljästä tuhkasta tehtiin neljä säkkiä eri vaihtoehtoja varten.

Säkitystelineenä kokeiltiin aluksi 1 000 litran maalisäkin puukehikkoa. Kehikoon oli hyvä asettaa säkki, mutta nostaminen trukkipiikeillä oli hankalaa ja säkin pohjalle jäi helposti tyhjää tilaa, kun kangas taittui kaksinkerroin. Parhaaksi ta-

vaksi säkittää osoittautui säkin asettaminen suoraan trukkipiikeille ja täytön aloittaminen täysin ilmassa (kuvio 2), jolloin säkin kangas ei jäänyt kaksinkerroin ja näin ollen säkki täyttynyt vajavaisesti.



**Kuvio 2.** Kaivinkone täyttää trukkipiikeillä olevaa säkkiä.

Säkit täytettiin ja kuljetettiin heti varastointipaikalle. Toimintaa yritettiin nopeuttaa ottamalla käyttöön puukehikko siksi aikaa, kun pyöräkuormaaja kuljetti säkkiä, mutta käytännössä tämä ei juuri auttanut. Paras ja nopein tapa oli yksinkertainen. Säkitukseen kului aikaa noin kolme tuntia, jonka jälkeen vielä suojattiin puolet säkeistä. Säkit asetettiin varastointiin taulukon 5 mukaisesti.

**Taulukko 5.** Säkkien 1–16 varastointijärjestys ja alkuvesipitoisuudet.

Tuhkalaatu	Suojatut		Suojaamattomat		Vesipitoisuus, %
<b>Vanha</b>	1.	2.	3.	4.	<b>32,9</b>
<b>Kasa 26 %</b>	5.	6.	7.	8.	<b>30,8</b>
<b>Uusi</b>	9.	10.	11.	12.	<b>34,5</b>
<b>Kasa 21 %</b>	13.	14.	15.	16.	<b>34,9</b>

Mittausnäytteitä otettiin säkkien täytön yhteydessä kustakin neljästä tuhkalaadusta 10 litran sangollinen. Siitä taas otettiin osanäyte kalsiumoksidimittauksia varten ja loput lähtivät Vaasaan Technobothnialle vesipitoisuuden ja seulonnan valmisteluun. Ensimmäisten tuhkanäytteiden vesipitoisuudet ovat taulukossa 5.

### 5.3 Toinen säkitys 22.8.2013

Toinen säkitys suoritettiin 22.8.2013 samaisella tuhkakentällä. Tuhkia oli edellisten parin viikon aikana tehty kaksi laatua eri kosteuksilla. Kuivempaa tuhkaa pyrittiin vielä pitämään kuivana suojaamalla se kovilta sateilta, joita säkitystä edeltävänä viikonloppuna oli. Mukana oli myös noin puoli vuotta vanha tuhka ja uusi lämmin tuhka.

Säkitysmenetelmä oli sama kuin ensimmäisellä kerralla. Pyöräkuormaaja piti säkkiä trukkipiikeillä ja kaivinkoneella lastattiin tuhka säkkiin. Kauha oli tällä kertaa leveää mallia. Alun kokeilujen jälkeen säkitys lähti kulkemaan sulavasti myös tällä leveällä kauhalla. Säkit varastoitettiin taulukon 6 mukaisesti. Kaikista neljästä tuhkasta otettiin näytteet sekä kosteusmittauksia että kalsiumoksidimääritystä varten. Vanhalle tuhkalle tehtiin myös seulonta. Tuhkalaatujen alkukosteusprosentit on esitetty myös taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Säkkien 17–32 varastointijärjestys ja alkuvesipitoisuudet.

<b>Tuhkalaatu</b>	<b>Suojatut</b>		<b>Suojaamattomat</b>		<b>Vesipitoisuus, %</b>
<b>Vanha</b>	17.	18.	19.	20.	<b>22,6</b>
<b>Kuiva</b>	21.	22.	23.	24.	<b>19,5</b>
<b>Kostea</b>	25.	26.	27.	28.	<b>28,6</b>
<b>Uusi</b>	29.	30.	31.	32.	<b>22,2</b>

## 6 MITTAUKSET JA TUTKIMUKSET

Tuhkan säkityksen ja varastoinnin vaikutusta tuhkaan mitattiin vesipitoisuuden, rakeisuuden, kalsiumoksidin (kalkki) eli CaO-pitoisuuden ja sääolojen seurannan avulla. Vesipitoisuus ja rakeisuus määritettiin Vaasassa Technobothnian laboratoriossa. CaO-analyysi tilattiin Eurofins Scientific Finland Oy:ltä ja sääseurannassa hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen ilmastokeskusta. Mittausten päivämäärät on esitetty taulukossa 7.

**Taulukko 7.** Säkitysten ja mittausten ajankohdat.

Päivämäärä	Säkit 1–16	Säkit 17–32
26.4.2013	<b>Säkitys ja 1. mittaukset</b>	
27.5.2013	2. välimittaus	
25.6.2013	3. välimittaus	
29.7.2013	4. välimittaus	
22.8.2013		<b>Säkitys ja 1. mittaukset</b>
11.9.2013	5. välimittaus	
24.9.2013		2. välimittaus
31.10.2013	6. välimittaus	
6.11.2013		3. välimittaus
4.12.2013	7. välimittaus	
9.12.2013		4. välimittaus
3.2.2014	8. välimittaus	5. välimittaus
4.2.2014	<b>Levityskokeet</b>	<b>Levityskokeet</b>

### 6.1 Näytteenotto

Näytteenotto toteutettiin mahdollisimman kaavamaisesti ja rutiininomaisesti. Säkityksen yhteydessä kustakin eri tuhkalaadusta otettiin 10 litran sankoon näyte, minkä jälkeen sanko suljettiin tiiviisti kannella. Välimittauksissa jokaisesta säkistä otettiin oma näytteesä 10 litran sankoon. Näytteet kuljetettiin mahdollisimman pian Vaasaan, missä ne laitettiin uuniin kuivumaan. Kalsiumoksidimäärittelyissä

näytteet otettiin Eurofinsiltä saatuihin näytepusseihin ja suljettiin nippusiteellä tiiviisti kiinni. Näytteet lähetettiin Tampereelle laboratorioon.

## 6.2 Mittausten standardit

Mittaukset toteutettiin ja tilattiin taulukon 8 standardien mukaisesti. Tuhkalle ei varsinaisia omia standardeja ollut rakeisuuden määrittämiseen. Mittaukset toteutettiin käyttäen menetelmää, joka soveltuu suurelle määrälle hienoaainesta.

**Taulukko 8.** Mittauksissa käytetyt standardit.

Mittaus	Standardi	Standardin selitys
Vesipitoisuus	CEN ISO/TS 17892-1:2004	Maanäytteen vesipitoisuuden määrittäminen
Rakeisuus	EN 933-1:2012	Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Rakeisuuden määrittäminen
Kalsiumoksidianalyysi	EN ISO 11885	Water quality. Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

## 6.3 Mittausten toteutus käytännössä

Mittaukset tehtiin noin kuukauden välein säkityksestä alkaen. Loppuvaiheessa välejä pidennettiin parilla viikolla levityskokeiden alustavan ajoituksen takia. Vesipitoisuus ja rakeisuus määritettiin jokaisella mittauskerralla lukuun ottamatta viimeistä mittausta, laboratoriona käytettiin Vaasan Technobothnian tie- ja geotekniikan laboratoriota. Kalsiumoksidimäärittäminen taas tehtiin säkityksen ja levityskokeiden yhteydessä, tavoitellen ennen ja jälkeen -tyyppistä tulosta.

### 6.3.1 Vesipitoisuuden määrittäminen

Vesipitoisuus määritettiin Vaasassa Technobothnialla geotekniikan laborantti Timo Riikosen johdolla. Tuhkaa jaettiin näytteenjakajalla kahteen eri astiaan, kunnes saatiin sopivan kokoinen näyte eli noin 1,5–2,5 kg. Näytettä kuivatettiin 105 °C lämpökaapissa noin vuorokauden. Näytteen kuivuttua täysin, se punnittiin uudelleen ja laskettiin vesipitoisuus kaavan 3 mukaisesti.

$$w = \frac{(m_{\text{märkänä}} - m_{\text{kuivana}})}{(m_{\text{kuivana}} - m_{\text{astia}})} * 100 \quad (3)$$

### 6.3.2 Rakeisuuden määrittäminen

Rakeisuuden määrittäminen suoritettiin myös Technobothnialla tie- ja geotekniikan laboratoriossa. Käytännössä vesipitoisuus ja rakeisuus määritettiin samasta näytteestä. Vesipitoisuuden mittaamisen jälkeen kuivuneelle näytteelle tehtiin pesuseulonta suuren hienoainesmäärän takia. Pesuseulonnassa käytettiin kahta seula (0,063 mm ja 1 mm), joiden läpi tuhka manuaalisesti pestiin vedellä. Seuraavaksi näytettä taas kuivatettiin 105 °C lämpökaapissa vähintään 1-2 päivää, koska märkä tuhka on hyvin tiivistä ja hitaasti kuivuvaa. Kuivuneelle tuhkanäytteelle tehtiin kuivaseulonta, jossa tärytysaika oli noin 15 minuuttia. Seulonnan jälkeen punnittiin kullekin seulalle jäänyt massa ja syötettiin tiedot Excel-ohjelmaan, joka piirsi niistä rakeisuuskäyrän.

### 6.3.3 Kalsiumoksidimääritys ja tulokset

Kalsiumoksidimääritys tehtiin tilaustyönä käyttäen Eurofins Scientific Finland Oy:tä. Näytteet otettiin Eurofinsiltä saatuihin näytepusseihin ja lähetettiin Tampereen laboratorioon jatkokäsittelyä varten. Tutkimustulokset saatiin sähköisessä muodossa parin viikon kuluessa.

Kalsiumoksidimääritys vaatii näytteiden esikäsittelyä. Esikäsittelyssä käytetään muhveliuunua, jossa tuhkanäyte hajotetaan litiummetaboraatin (BLiO<sub>2</sub>) kanssa 1050 °C:een lämpötilassa. Tämän jälkeen näyte laimennetaan suolahapolla (HCl). Saadusta liuksesta voidaan analysoida alkuaineet, tässä tapauksessa kalsium,

ICP-OES-laitteella. Tulos muunnetaan laskennallisesti kalsiumoksidiksi ja ilmoitetaan kuivaa ainetta (tuhkaa) kohti. /11/

ICP-OES-lyhenne tulee englanninkielen sanoista inductively coupled plasma optical emission spectrometry, mikä on suomennettuna induktiivisesti kytketty plasma-optinen emissiospektrometri. ICP-OES-menetelmä perustuu lämpimään plasmaan, jonka lämmössä näyteliuotin haihtuu, näyte höyrystyy ja lopulta atomisoituu sekä osin ionisoituu. Plasmassa virittyneet atomit ja ionit lähettävät kullekin alkuaineelle ominaista elektromagneettista säteilyä, jonka perusteella voidaan määrittää näytteen sisältämät alkuaineet ja niiden pitoisuudet. /14, 2–3/

Kalsiumoksidin ja kalsiumkarbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) välillä vallitsee polttosuhteissa termodynaaminen tasapaino. Jos polttolämpötila kattilassa laskee alle  $800\text{ }^\circ\text{C}$ :een, on todennäköistä, että  $\text{CaO}$  reagoi palamiskaasujen hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ) kanssa muodostaen  $\text{CaCO}_3$ :a. Samalla tuhkan itsekovettumispotentiaali alenee, sillä kalsiumoksidi on tuhkan kovettumisen kannalta merkittävin tekijä. /31/

Kalsiumoksidipitoisuudet määritettiin säkitysten ja levityskokeiden yhteydessä. Loppupitoisuudet määritettiin joka toisesta säkistä. Kaikki tulokset on koottu taulukkoon 9. Huhtikuun säkityksen tuhkissa kalsiumoksidipitoisuudet olivat noin 30 %:ssa, kun taas elokuisissa tuhkissa pitoisuudet olivat selvästi alemmat ollen joko 15 % tai 23 %. Levityskokeiden aikaiset kalsiumoksidipitoisuudet ovat varsin lähellä alkupitoisuuksia kaikissa tapauksissa.

**Taulukko 9.** Tuhkien kalsiumoksidipitoisuudet alussa ja lopussa.

<b>1. säkitys 26.4.2013</b>	<b>Kalsiumoksidi (CaO), p.-% ka.</b>	<b>Mittaus 3.2.2014</b>	<b>Kalsiumoksidi (CaO), p.-% ka.</b>
<b>Vanha tuhka</b>	27,6	<b>Säkki 1</b>	26,7
		<b>Säkki 3</b>	25,3
<b>Kasa 26 %</b>	28,2	<b>Säkki 5</b>	25,2
		<b>Säkki 7</b>	25,7
<b>Uusi tuhka</b>	30,6	<b>Säkki 9</b>	29,0
		<b>Säkki 11</b>	24,5
<b>Kasa 21 %</b>	28,0	<b>Säkki 13</b>	26,9
		<b>Säkki 15</b>	26,4
<b>2. säkitys 22.8.2013</b>	<b>Kalsiumoksidi (CaO), p.-% ka.</b>	<b>Mittaus 3.2.2014</b>	<b>Kalsiumoksidi (CaO), p.-% ka.</b>
<b>Vanha tuhka</b>	15,4	<b>Säkki 17</b>	13,7
		<b>Säkki 19</b>	14,4
<b>Kuiva tuhka</b>	15,2	<b>Säkki 21</b>	15,5
		<b>Säkki 23</b>	15,4
<b>Kostea tuhka</b>	23,6	<b>Säkki 25</b>	24,7
		<b>Säkki 27</b>	22,4
<b>Uusi tuhka</b>	23,0	<b>Säkki 29</b>	23,9
		<b>Säkki 31</b>	24,6

### 6.3.4 Säätietojen seuranta

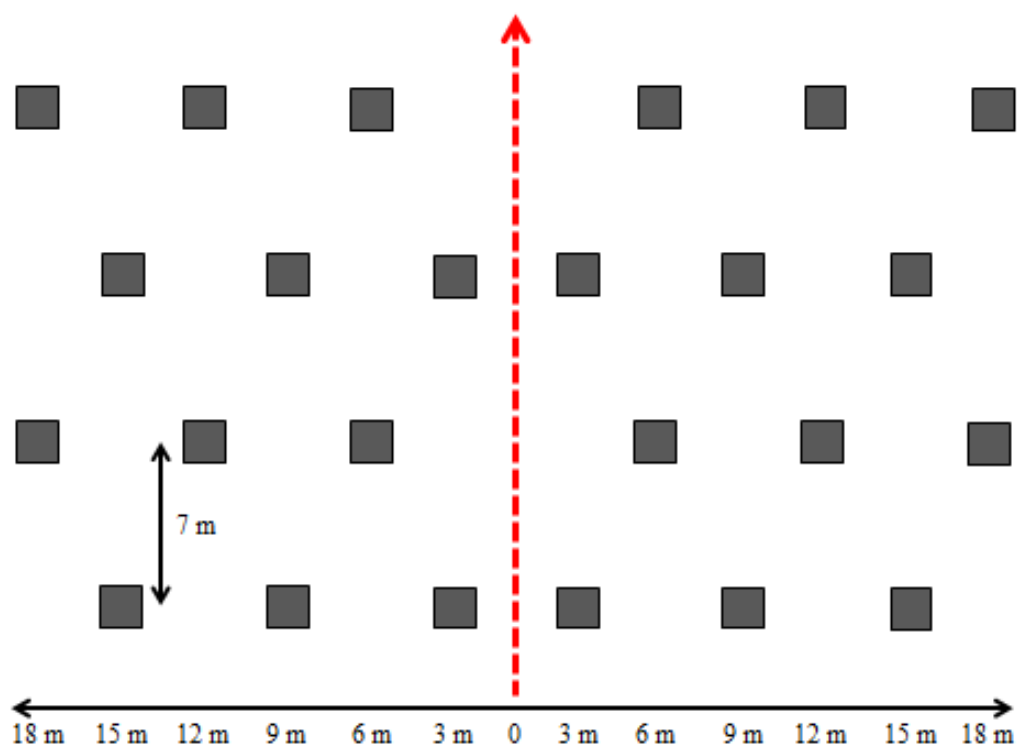
Säätiedot hankittiin Ilmatieteen laitoksen ilmastokeskukselta sähköisesti. Tiedot haluttiin mahdollisimman läheltä Metsä Boardin tehdasta, jolloin lämpötilan havaintoasemaksi valittiin Kaskisten Sälgrund ja sadeasemaksi Teuvan Kauppilankylä. Tiedot olivat vuorokausikeskiarvoja, joista voitiin laskea arvot pidemmille aikajaksoille. Pitkän aikavälin (1981–2010) keskiarvoina käytettiin Teuvan Kauppilankylän sadeaseman tietoja.

### 6.4 Tuhkan levityskokeet

Tuhkien levitettävyyttä ja levitystasaisuutta arvioitiin levityskokeella. Levityksen suoritti Veljekset Knuutila Ay tuhkanlevityslaitteistollaan. Levityksessä tehtiin yhteinen koe rinnakkaissäkeille. Kokeessa asetettiin puulaatikoita (0,5 m x 0,5 m)



tietyille etäisyyksille (3 m, 6 m, 9 m, 12 m, 15 m, 18 m) levityslaitteen ajouran keskikohdasta ja mitattiin tuhkamäärät kustakin laatikosta. Laatikkoja oli 24 ja ne aseteltiin limittäin kuvion 3 mukaisesti. Rata pyrittiin ajamaan samalla tavalla ja levitystahdilla joka kerta, tavoitellen lannoitussuosituksen mukaista noin 4 000 kg/ha tuhka-annosta.



**Kuvio 3.** Levityskokeiden mittauslaatikoiden koejärjestely

Tuhkamäärät punnittiin säänkestävällä kalavaa'alla, jonka tarkkuus testattiin Technobothnialla. Tuhka kaadettiin ämpäriin, jonka kokonaispaino punnittiin vaa'an koukun avulla. Ämpäreiden painot oli punnittu etukäteen ja huomioitiin tuloksia laskettaessa.

## **7 MITTAUSTEN KIRJALLISET YHTEENVEDOT TUHKALAADUITTAIN JA POIMINTOJA TULOKSISTA**

Laajaa mittausdataa on pyritty seulomaan ja jakamaan erilaisiin osa-alueisiin, jotta tuloksia pystyttäisiin tulkitsemaan ja muutoksista saataisiin käsitys. Varsinaisia ohjeita tulosten, kuten rakeisuuden, tulkitsemiseen ei ollut, joten olen itse luonut erilaisia menetelmiä tätä varten. Rakeisuuskäyriä on yhteensä 146 kappaletta, joten kokosin niistä tärkeimpiä tietoja mittausyhteenvetoihin, jotka löytyvät liitteistä. Niiden perusteella oli huomattavasti helpompaa käydä suurta aineistoa läpi. Liitteissä ja tässä luvussa käytetään seuraavia käsitteitä: pohja + pesutappio ja d50-raekoko. Pesutappio on pesuseulonnassa veden mukana menneen tuhkan määrä ja pohja kuivaseulonnassa kaikki seulat läpäissyt tuhka. Yhteenlaskettuna nämä ovat pohja + pesutappio (pt). D50-raekoko on rakeiden keskiläpimitta eli rakeisuuskäyrältä luettava raekoko sillä kohdalla, jossa läpäisyprosentti on 50.

Tässä luvussa on käyty tulosten analysointia sanallisesti läpi sekä otettu muutamia poimintoja tuloksista. Tulokset on käyty läpi tuhkalaaduittain. Varsinaiset mittausyhteenvedot löytyvät liitteestä 2.

### **7.1 Säkit 1–4: Vanha tuhka**

Vanhan tuhkan vesipitoisuus alussa oli 32,9 %. Suojatuissa säkeissä muutokset ovat olleet vähäisiä, mitä keskiarvot 29,1 % ja 28,8 % kuvaavat tässä tapauksessa hyvin. Trendinä on ollut kuivuminen heinäkuun mittaukseen asti ja sen jälkeen palautuminen 30 %:n paikkeille. Myös suojaamattomien säkkien kesken kosteus on muuttunut samankaltaisesti. Molempien kosteudet ovat lähteneet kesän aikana nousuun, päättyen syksyllä noin 40–60 %:iin. Loppuaikana kosteudet ovat edelleen jatkaneet kovaa nousua, säkki 3:n noustessa hurjaan 111 %:iin. Mittaustulos on lähes epäuskottavan korkea, eikä varmastikaan vastaa kuin säkin pinnan kosteutta. Todellinen kosteusprosentti lienee lähempänä rinnakkaissäkkiä. Vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 10.

Vesipitoisuuden vaihteluvälit ja keskihajonnat suojaamattomissa säkeissä ovat moninkertaisia verrattuna suojattuihin säkkeihin. Suojatuissa säkeissä kosteuslu-

kemat ovat pysyneet hyvin hallitulla tasolla, kun taas suojaamattomissa säkeissä kosteutta on yksinkertaisesti aivan liikaa.

**Taulukko 10.** Yhteenveto huhtikuun vanhan tuhkan vesipitoisuuksista.

	Vanha tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 1	Säkki 2	Säkki 3	Säkki 4
	Kosteusprosentti				
1. mittaus - 26.4.2013		32,9	32,9	32,9	32,9
2. mittaus - 27.5.2013		28,7	31,4	30,1	26,9
3. mittaus - 25.6.2013		27,2	27,2	32,9	41,7
4. mittaus - 29.7.2013		23,5	20,4	42,1	41,6
5. mittaus - 11.9.2013		31,1	31,0	44,6	53,2
6. mittaus - 31.10.2013		28,6	29,9	55,6	59,2
7. mittaus - 4.12.2013		28,2	26,8	61,1	49,4
8. mittaus - 3.2.2014		32,6	31,0	111,0	75,5
	Keskiarvo, %	29,1	28,8	51,3	47,6
	Hajonta, %-yks.	3,1	4,0	26,5	15,4
	Vaihteluväli, %-yks.	9,4	12,5	80,9	48,6

Hienoaineksen osuus suojatuissa säkeissä on pysynyt samalla tasolla noin 20 %:ssa (pohja + pesutappio) ja 50 %:ssa ( $\leq 1$  mm rakeet). Raejakaumat ovat hyvin samanlaiset, mutta säkissä 2 on noin 10 prosenttiyksikköä enemmän rakeita luokassa 5,6 mm–22,4 mm. Säkissä 1 taas on enemmän yli 22,4 mm rakeita. D50-raekoko on suojatuissa hienoisessa nousussa.

Suojaamattomissa säkeissä on tapahtunut rakeistumista kosteuden nousun mukana. Hienoaineksen osuus on vähentynyt molemmissa, samoin suurempien rakeiden osuus kasvanut. Esimerkiksi säkki 4:ssä pohjan + pesutappion osuus on vähentynyt noin 10 prosenttiyksikköä ja keskikokoisten rakeiden (1 mm–22,4 mm) osuus kasvanut yhteensä noin 10 prosenttiyksiköllä.

Erot suojauksessa vaikuttavat selvimmin kosteusprosenttiin. Kosteusprosentin nousu taas näyttää vaikuttavan raekokojakaumaan kokoa kasvattavasti. Silti  $\leq 1$  mm rakeiden osuus on kaikissa säkeissä noin 50 %:n luokkaa.

## 7.2 Säkit 5–8: Kasa 26 %

Kasa 26:n alkuväpitoisuus oli 30,8 %. Suojatuista säkeistä säkki 5 on kuivunut heinäkuun mittauksen lähes puoleen (16,8 %) verrattuna alkukosteuteen, kunnes

palannut 30 %:n luokkaan. Säkki 6 on pysynyt 30 %:n paikkeilla, kunnes syysmyrskyjen aikana kastunut runsaasti vesipitoisuuden noustessa lähes 50 %:iin.

Suojaamattomien säkkien kosteusprosentteissa on selkeää nousua heti alusta alkaen. Säkki 7 on käynyt 58,4 %:ssa päätyen joulukuun 42,5 %:iin. Säkki 8 taas on tasaisesti kaksinkertaistanut vesipitoisuutensa joulukuun 62,9 %:iin. Viimeisellä mittauksella molemmat ovat nousseet jo päälle 80 %:n. Suojaamattomat säkit ovat altistuneet kovalle sateelle ja kastuneet liikaa. Suojattuna säilyneen säkki 5:n vesipitoisuus on pysynyt varsin mukavasti omalla tasollaan.

Säkki 5:ssa pohjan + pesutappion osuus on laskenut varastoinnin aikana noin 5 prosenttiyksikköä, samoin  $\leq 1$  mm rakeiden osuus runsaat 10 prosenttiyksikköä. Keskikokoisten rakeiden (1 mm–22,4 mm) osuuksissa on muutaman prosenttiyksikön nousua. D50-raekoot ovat selvemässä kasvussa (taulukko 11). Säkki 6:ssa mielenkiintoista on selkeä raekokojakauman muutos suurempaan päin, kun kosteus on lisääntynyt. Hyvä tieto, vaikka sitä ei tarkoituksella haettukaan.

**Taulukko 11.** Kasa 26:n d50-raekoot.

	d50-raekoko	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 5	Säkki 6	Säkki 7	Säkki 8
2. mittaus - 27.5.2013		0,6	1,2	0,6	1,5
3. mittaus - 25.6.2013		1,2	2,0	1,8	0,5
4. mittaus - 29.7.2013		1,5	2,0	1,3	1,5
5. mittaus - 11.9.2013		1,2	2,5	1,8	1,5
6. mittaus - 31.10.2013		3,5	4,1	3,0	4,0
7. mittaus - 4.12.2013		2,5	5,0	3,5	0,7

Suojaamattomissa säkeissä kosteus vaikuttaa rakeistaneen tuhkaa enemmän. Hienoaineksen määrä on vaihdellut, mutta trendi on lievästi alaspäin. Yli 22,4 mm rakeiden osuudet ja d50-raekoot ovat kasvusuunnassa.

Suojaamattomien säkkien vesipitoisuudet ovat taas nousseet 40–60 %:n tienoille joulukuuhun mennessä, mikä on ihan liikaa käytännön kannalta. Molempien kosteudet olivat yli kaksinkertaistuneet helmikuuhun mennessä. Suojaus auttaa pitämään kosteuden paremmin hallittuna, mutta suojauksenkin pitää olla varsin pitävää ja kestävä tekona kuten säkki 6 todisti.

Raekokojakaumissa tasainen kosteus pitää muutoksetkin tasaisempina. Suojaamattomissa tuhissa on selvästi enemmän rakeita yli 22,4 millimetrinen luokassa, kun taas suojatuissa on enemmän 5,6–22,4 millimetrisiä rakeita. Hienoainekset ovat kaikissa neljässä säkissä hyvin samaa tasoa.

### 7.3 Säkit 9–12: Uusi tuhka

Alkuvesipitoisuus uudessa tuhassa oli 34,5 %. Suojatuissa säkeissä vesipitoisuus on pysynyt hyvin tasolla 30–35 %. Muutokset ovat olleet pieniä ja sallittuja. Molemmat suojaamattomat säkit ovat kuivuneet alkukesän aikana hivenen ja sen jälkeen nousseet 40–70 prosentin välille, mikä on jo melko raskasta tuhkaa. Helmi-kuun mittauksella säkki 12:n kosteusprosentti oli jo 82,7. 1 000 kg:n säkissä 60 %:n kosteus painaa 240 kg enemmän kuin 30 %:n kosteus. Suojauksen vaikutus näkyy erittäin hyvin näissä säkeissä. Suojaamattomat tuhkat ovat aivan liian märkiä, kun taas suojatut ovat todella hyvin pysyneet samoissa lukemissa. Kaikkien neljän säkin vesipitoisuudet on koottu taulukkoon 12.

**Taulukko 12.** Yhteenveto uuden tuhkan vesipitoisuuksista.

	Uusi tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 9	Säkki 10	Säkki 11	Säkki 12
	Kosteusprosentti				
1. mittaus - 26.4.2013		34,5	34,5	34,5	34,5
2. mittaus - 27.5.2013		30,7	30,0	19,7	32,5
3. mittaus - 25.6.2013		32,3	31,3	34,5	31,4
4. mittaus - 29.7.2013		30,8	24,2	31,2	37,9
5. mittaus - 11.9.2013		35,1	33,3	45,8	57,8
6. mittaus - 31.10.2013		36,3	34,5	52,4	67,0
7. mittaus - 4.12.2013		33,4	37,5	43,4	61,8
8. mittaus - 3.2.2014		35,0	36,4	63,9	82,7
	Keskiarvo, %	33,5	32,7	40,7	50,7
	Hajonta, %-yks.	2,1	4,2	13,7	19,2
	Vaihteluväli, %-yks.	5,7	13,3	44,2	51,3

Suojattujen säkkien hienoaineksen määrät ovat laskeneet pohjan + pesutappion osalta vajaat 10 prosenttiyksikköä ja samalla yli 22,4 mm rakeiden osuus on kasvussa. Suojaamattomissa säkeissä on myös vähentynyt hienoaines vähintään noin 10 prosenttiyksikköä. Samalla kooltaan yli 22,4 millimetrinen rakeiden osuus on kasvanut. Rakeisuuksissa löytyy yhtäläisyyksiä yllättäen ristikkäin: säkit 9 ja 12

sekä säkit 10 ja 11 ovat hyvin samankaltaisia huolimatta erilaisista kosteusprosentteista ja olosuhteista.

#### 7.4 Säkit 13–16: Kasa 21 %

Kasa 21:n alkuvesipitoisuus oli 34,9 %. Suojatuissa säkeissä kosteusprosentit ovat erittäin hyvin pysyneet hallinnassa, molempien liikkuaessa pääsääntöisesti 30–35 %:n välillä. Säkkien kosteuksille tulikin lähes samat keskiarvot: 33,4 % ja 33,6 %. Suojaamattomissa säkeissä kosteudet ovat tasaisesti nousseet 60–70 %:n tasolle. Säkki 15:n vesipitoisuus nousi huimaan 90,3 %:iin helmikuussa.

Suojatuissa säkeissä hienoaineksen osuus on 5–10 prosenttiyksikön laskussa. Yli 22,4 millimetrisissä rakeissa on havaittavissa pientä lisäystä, mutta muutoin jakaumassa ei ole suuria muutoksia. Suojaamattomissa säkeissä hienoaines on selvästi laskussa 10–20 prosenttiyksikköä ja raekokojakauma siirtynyt kohti suurempia luokkia. Hienoaineksen muutoksia on esitetty taulukossa 13.

**Taulukko 13.** Yhteenveto kasa 21:n raosuuksista luokassa  $\leq 1$  mm.

	$\leq 1$ mm	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 13	Säkki 14	Säkki 15	Säkki 16
2. mitta - 27.5.2013		69	54	71	57
3. mitta - 25.6.2013		59	52	60	55
4. mitta - 29.7.2013		59	61	55	54
5. mitta - 11.9.2013		47	48	42	44
6. mitta - 31.10.2013		52	49	53	42
7. mitta - 4.12.2013		59	46	48	55

#### 7.5 Säkit 17–20: Vanha tuhka

Vanhan tuhkan vesipitoisuus alussa oli 22,6 %. Molemmissa suojatuissa säkeissä kosteusprosentit ovat pienentyneet tasaisesti päätyen joulukuussa noin 10 prosenttiyksikköä alempaan kosteuteen verrattuna alkuun. Helmikuusiin levityskokeisiin mennessä kosteudet ovat kuitenkin nousseet 25 %:n paikkeille.

Suojaamattomien säkkien kosteudet taas ovat vaihdelleet 20–30 %:n välillä joulukuuhun saakka. Helmikuussa vesipitoisuudeksi saatiin kuitenkin jo runsaat 40 %. Joulukuun runsaat vesisateet ovat kostuttaneet suojaamattomia säkkejä selvästi.

Hienoaineksen osuus suojatuissa on pysynyt alkumittauksen jälkeen samalla tasolla noin 15 %:ssa (pohja + pt) ja 50 %:ssa ( $\leq 1$  mm). Raekokojakauma on rinnakkaissäkeissä hyvin samanlainen, mutta säkissä 17 on selvemmin nähtävissä muutosta suurempaan raekokoon. Samalla kosteus on kuitenkin alentunut koko ajan, mikä on päinvastaista kuin säkeissä 1–16. Toisaalta itsekovettuminen sitoo vettä. Säkki 17 kohdalla alhaista hienoainemäärää joulukuussa selittää myös suuri yli 63 mm rae (448 g), mikä vie kolmanneksen koko näytteen prosenttiosuudesta.

**Taulukko 14.** Yhteenveto elokuun vanhan tuhkan raeosuuksista luokassa  $\leq 1$  mm.

	$\leq 1$ mm	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 17	Säkki 18	Säkki 19	Säkki 20
1. mittaus - 22.8.2013		71	71	71	71
2. mittaus - 24.9.2013		59	55	49	55
3. mittaus - 6.11.2013		49	49	57	50
4. mittaus - 9.12.2013		41	57	71	61

Suojaamattomissa säkeissä muutokset ovat epäselvempiä. Hienoaineksen osuus on kaiken kaikkiaan hyvin pienessä laskussa verrattuna ensimmäiseen mittaukseen. Osuudet ovat vaihdelleet kumpaankin suuntaan, kuten taulukosta 14 voi havaita. Toisaalta samalla keskikokoisten rakeiden suunta on pienessä nousussa, kun taas yli 22,4 millimetrinen rakeiden määrä vaihtelee. Kaikissa säkeissä on mukana valtaviakin paakkuja. Joulukuun mittauksessa on erittäin monessa säkissä hienoaineksen määrä noussut selvästi, mikä johtunee laadukkaan näytteenoton haastavuudesta pakkaskelillä, kun tuhkan pinta on jäänyt.

## 7.6 Säkit 21–24: Kuiva tuhka

Kuivan tuhkan kosteusprosentti oli säkityksen aikana 19,5 %. Suojatuissa säkeissä kosteusprosentin trendi on kuivumisen suuntaan, päätyen noin 15 %:iin joulukuussa. Helmikuussa kosteudet olivat kuitenkin 30 %:ssa. Suojaamattomissa säkeissä kosteus on vaihdellut noin 10 prosenttiyksikön sisällä, kunnes helmikuussa noussut noin 40 %:iin. Suojaamattomien säkkien kosteudet ovat silti muuttuneet yllättävän vähän. Suojattujen säkkien kosteudet ovat käyttäytyneet melko odotetusti. Lähes kahden kuukauden mittaustauko ja sen aikana ollut vetinen sää kuitenkin näkyvät vesipitoisuuksien nousuna, kuten taulukossa 15 on esitetty.

**Taulukko 15.** Yhteenveto kuivan tuhkan vesipitoisuuksista.

	Kuiva tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 21	Säkki 22	Säkki 23	Säkki 24
	Kosteusprosentti				
1. mitta - 22.8.2013		19,5	19,5	19,5	19,5
2. mitta - 24.9.2013		19	23	29,2	24,3
3. mitta - 6.11.2013		17,1	18,3	33,2	28,2
4. mitta - 9.12.2013		15,2	15,4	26,9	23,5
5. mitta - 3.2.2014		28,6	32,4	37,8	41,3
	Keskiarvo, %	19,9	21,7	29,3	27,4
	Hajonta, %-yks.	5,2	6,6	6,9	8,4
	Vaihteluväli, %-yks.	13,4	17,0	18,3	21,8

Hienoaineksen osuus suojatuissa tuhkissa on kaiken kaikkiaan lievässä laskussa. Samaa ilmenee keskirakeiden (1 mm–22,4 mm) osuuksissa. Suurten rakeiden määrässä taas on nousua huolimatta kosteuden laskusta.

Suojaamattomissa säkeissä muutokset ovat jälleen epäselvempiä. Hienoaines on hieman lisääntynyt. Toisaalta samalla keskikokoisten rakeiden määrä on pienessä nousussa, kun taas yli 22,4 millimetrinen rakeiden määrä vaihtelee. Suojaamattomien säkkien tulkinta on selvästi vaikeampaa johtuen jäätymisestä ja suurten paakkujen vaikutuksesta raekokojakaumaan. Kaikissa neljässä säkissä on kuitenkin yli 63 mm rakeita ja lisäksi valtavia jalkapallon kokoisia paakkuja (pois lukien säkki 21).

### 7.7 Säkit 25–28: Kosteaa tuhka

Kostealla tuhalla alkuvesipitoisuudeksi mitattiin 28,6 %. Kosteusprosentit ovat suojatuissa säkeissä lähteneet nousuun aluksi, toisessa selvästi enemmän eli noin 10 prosenttiyksikköä. Molemmat ovat silti kuivahtaneet tasaisesti kohti joulukuuta, päätyen runsaaseen 20 %:iin. Suojaamattomissa säkeissä kosteus on noussut kohti marraskuun piikkiä 50 %:n paikkeilla, minkä jälkeen taas laskeneet 30 %:iin. Kaikissa neljässä säkissä ovat kosteudet silti helmikuussa olleet 45–55 %:n tasolla.

Hienoaineksen ja keskirakeiden osuus suojatuissa säkeissä on aavistuksen nousussa. Samalla yli 22,4 millisissä on lievää laskua. Muutokset ovat kuitenkin hyvin riippuvaisia suurista rakeista, jotka vievät ison prosenttiosuuden koko näytteestä,



varsinkin verrattuna säkkien 1–16 laajempaan mittausdataan ja paakuttomampaan tuhkaan.



**Kuvio 4.** Kuva jäisestä säkki 28:sta joulukuun mittauksessa.

Suojaamattomissa säkeissä hienoaines on vähentynyt, kunnes joulukuussa on nousua. Tämä voi johtua siitä, että marraskuun mittauksissa havaitut runsaat kosteudet ovat jäätyneet joulukuun pakkasilla ja tämä on hankaloittanut edustavaa näytteenottoa joulukuussa. Samalla keskikokoisten rakeiden osuudet ovat melko lailla samaa tasoa, kun taas yli 22,4 millimetrinen rakeiden määrä vaihtelee. Suojaamattomien säkkien tulkinta on tässäkin selvästi vaikeampaa johtuen jäätymisestä (kuvio 4) ja suurten paakkujen vaikutuksesta. Kaikissa neljässä säkissä on kuitenkin yli 63 mm:n rakeita. Molemmista tuhkalaaduista löytyy myös parinsadan millin rakeita säkeistä.

### **7.8 Säkit 29–32: Uusi tuhka**

Uuden tuhkan, joka säkityshetkellä oli vielä lämmintä, alkuvesipitoisuudeksi mitattiin 22,2 %. Suojatuissa säkeissä kosteusprosentit ovat lähteneet alkukosteudesta eri suuntiin viitisen prosenttiyksikköä ja päätyneet joulukuussa runsaseen 15 %:iin. Helmikuussa kosteudet olivat tässäkin nousseet, 30–40 %:iin. Suojaamattomat säkkien vesipitoisuudet ovat nousseet heilahdellen kohti helmikuun runsasta 40:tä prosenttia.

Suojattujen säkkien raekokojakauma ei ole muuttunut mainittavasti, eikä suuria vaihteluitakaan ole. Säkissä 29 on kymmenkunta prosenttiyksikköä enemmän yli

22,4 mm rakeita, kun taas säkissä 30 on samat kymmenkunta prosenttiyksikköä enemmän 1–22,4 mm:siä rakeita. Taulukossa 16 esitetty hienoaineksen ( $\leq 1$  mm) määrä on kuitenkin musertavaa luokkaa, lähes 70 %. Säkistä 29 löytyy myös satunnainen suurempi parinsadan millin rae.

**Taulukko 16.** Yhteenveto elokuun uuden tuhkan raeosuuksista luokassa  $\leq 1$  mm.

	$\leq 1$ mm	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 29	Säkki 30	Säkki 31	Säkki 32
2. mittaus - 24.9.2013		70	69	42	64
3. mittaus - 6.11.2013		66	66	67	62
4. mittaus - 9.12.2013		67	69	72	61

Suojaamattomat rinnakkaiset säkit ovat käyttäytyneet hyvin eri lailla. Säkki 32 on pysynyt koko ajan täysin samanlaisena, kun taas säkissä 31 on hienoaineksen osuus kasvanut ja suurten rakeiden määrä pudonnut. Kosteudet ovat kuitenkin samankaltaiset.

## 8 TULOSTEN VERTAILUA

Tässä luvussa on kirjalliset yhteenvedot tuhkalaatujen välisistä yhdenmukaisuuksista ja eroista. Vertailua on tehty saman säkityskerran tuhkalaatujen välillä, eri varastointiaikojen välillä ja suojausten välillä. Lisäksi on käyty läpi analysointiin liittyviä haasteita.

### 8.1 Huhtikuun säkityksen tuhkalaatujen vertailu keskenään

Tuhkien alkukosteusprosentit olivat hyvin samalla tasolla (vanha 32,9 %, kasa 26: 30,8 %, kasa 21: 34,9 % ja uusi 34,5 %). Suojatuissa säkeissä on kaikissa, paitsi säkki 6, pysynyt kosteus 25–35 %:n paikkeilla. Kesällä (heinäkuun mittaus) on yleensä mitattu kuivimmat tulokset ja syksyä kohden hieman korkeampia. Kuitenkin kosteus on käynyt sitä alempana mitä alhaisempi alkukosteus on ollut, samoin keskiarvojen kohdalla. Erot kosteuspiikeissä ovat silti varsin pieniä, muutamia prosenttiyksikköjä, enkä usko alkukosteuksien minimaalisten erojen aiheuttavan tätä suoraviivaisesti. Kaiken kaikkiaan suojattujen säkkien kosteusprosentit ovat pysyneet erittäin hyvin pienen vaihteluvälin sisällä.

Kaikkien tuhkalaatujen suojaamattomissa säkeissä vesipitoisuus on hiljalleen noussut joulukuun 40–60 %:iin. Jokaisesta suojaamattomasta tuhkavaihtoehdosta toinen rinnakkaissäkki on suurin piirtein kaksinkertaistanut alkukosteutensa joulukuuhun mennessä. Kosteutta on alkanut kertyä säkkeihin eri vaiheissa kesää, alun 2–3 mittausta ne ovat kuitenkin pysyneet varsin maltillisissa kosteuksissa. Helmikuun mittauksessa vesipitoisuudet olivat hurjia. Syynä tähän on mahdollinen altistuminen vesisateille, mutta myös näytteenottopäivän pakkaskeli, joka hankaloittaa laadukkaan näytteen ottamista. Lisäksi säkeissä oli runsaasti lumi-/jäähilettä sisällä, mikä ylikorostaa koko säkin kosteutta.

Suojatuissa säkeissä kasa 26:ssa, kasa 21:ssä ja uudessa tuhkassa on hienoaineksisissa havaittavissa noin 5–10 prosenttiyksikön laskua, kaikkien ollessa kuitenkin samassa noin 15–25 %:n (pohja + pt) ja 40–50 %:n ( $\leq 1$ mm) tasossa. Vanhan tuhkan hienoaineksen osuus suojatuissa on pysynyt samalla tasolla noin 20 %:ssa (pohja + pesutappio) ja 50 %:ssa ( $\leq 1$  mm). Vanhassa tuhkassa suuremmat rakeet

ovat aika lailla samaa tasoa koko ajan, painottuen säkeissä eri luokkiin ja riippuen siitä onko mukaan tullut suuria paakkuja.

Suojattujen säkkien keskikokoisten rakeiden kohdalla muutokset ja vaihtelut ovat kaikissa pysyneet noin 5–10 prosenttiyksikössä. Kaikissa on noin 20 % 1–5,6 mm rakeita. 5,6–22,4 mm:n luokassa on enemmän vaihtelua rinnakkaissäkkienkin kesken. Kasa 26:ssa on jatkuvasti yli 20 % rakeita luokassa 5,6–22,4 mm, kun muissa tuhkalaaduissa luvut ovat 10–20 %.

Yli 22,4 mm rakeiden osuuksissa on kasvua kaikkien tuhkalaatujen suojatuissa tuhkissa. Pienimmät osuudet ovat kasa 26:ssa, kun muissa on tasaisemmin 20–30 %:n osuuksia. Noin suuret osuudet kertovat suuresta paakusta, esimerkiksi säkki 1:ssä on kuudennessa mittauksessa ollut 599 grammaa painava yli 63 mm:n rae. Kaikissa suojatuissa vaihtoehdoissa on ollut seulonnoissa yli 63 mm rakeita ja myös d50-raekoot (rakeiden keskiläpimitta) ovat trendinä nousussa.

Suojaamattomissa säkeissä on hyvin pitkälti kaikissa havaittavissa hienoaineksen vähenemistä. Useimmissa säkeissä vähenemistä on 5–15 prosenttiyksikköä. Kaikissa on pohjan + pesutappion osuus noin 15 %: ja  $\leq 1$  mm:n 40–50 %.

Keskikokoisissa rakeissa (1–22,4 mm) osuuksia on kasvattanut eniten vanha tuhka, noin 5–10 prosenttiyksikköä. Myös muihin tuhkiin verrattuna vanhalla on 5–10 prosenttiyksikköä enemmän rakeita luokissa 1–5,6 mm ja 5,6–22,4 mm. Muilla ne ovat pysyneet samassa tasossa tai vähentyneet. Niissä muutos on painottunut yli 22,4 mm luokkaan, jossa on havaittavissa suuria, noin 30 %:n, osuuksia viimeisissä mittauksissa.

Kaikkien tuhkalaatujen suojaamattomissa tuhkissa on ollut seulonnoissa yli 63 mm rakeita. Lisäksi säkeissä on sitäkin isompia, joskin hyvin yksittäisiä suuria paakkuja. Myös d50-raekoot ovat kaikissa noususuunnassa.

Kalsiumoksidipitoisuudet olivat kaikissa huhtikuun tuhkissa noin 30 %:n tasolla. Vanhan tuhkan pitoisuus oli 27,6 % ja uuden tuhkan 30,6 %, muiden asettuessa niiden väliin. Loppupitoisuudet olivat hyvin samaa tasoa, muutaman prosenttiyksikön vaihtelulla. Varastoinnilla ei näytä olleen vaikutusta arvoihin.

## 8.2 Elokuun säkityksen tuhkalaatujen vertailu keskenään

Alkukosteuksiin saatiin enemmän eroa elokuun säkkien kohdalla: vanha 22,6 %, kuiva 19,5 %, kostea 28,6 % ja uusi 22,2 %. Suojattujen säkkien joulukuiset kosteudet ovat kaikissa alentuneet verrattuna alkukosteuteen. Helmikuussa vesipitoisuudet olivat kuitenkin alkukosteuden yläpuolella. Eniten vaihtelua oli kostean ja uuden tuhkan säkeissä, kuivan ja vanhan tuhkalaadun kosteudet ovat liikkuneet hieman hillitymmin. Kaikissa suojaamattomissa säkeissä vesipitoisuudet ovat nousseet kohti marraskuun kosteuspiikkiä, josta joulukuun laskun kautta nousseet jälleen helmikuussa 40–50 %:n tasolle.

Suojatuissa vanhan ja kuivan tuhkalaadun säkeissä hienoaines on pysynyt samassa tai hieman vähentynyt, vaikka kosteudet ovatkin laskussa. Suuret rakeet vievät huomattavan osuuden näytteestä, eikä todellinen muutos ole niin dramaattinen. Toisaalta kosteassa tuhkassa hienoaineksessa on lisäyksen merkkejä kuivumisesta huolimatta. Ylipäättään kosteassa tuhkassa vesipitoisuudet ovat olleet kyllä muita korkeampia. Hienoaineksen määrät ovat 15–20 %:ssa (pohja + pesutappio) ja 50 %:ssa ( $\leq 1$  mm). Poikkeuksena uusi tuhka, jossa lukemat ovat 30 % ja 70 %.

Suojatuissa vanhassa ja kuivassa tuhkassa ovat keskikokoisten rakeiden määrät muutaman prosenttiyksikön laskussa, kosteassa taas saman verran nousussa. Uusi tuhka pysyttelee hyvin samoissa lukemissa. Eniten keskikokoisia rakeita on kosteassa tuhkalaadussa, 10–20 %, muissa luvut ovat 10 %:n ympärillä.

Yli 22,4 mm rakeiden osuuksissa on vaihtelua, mutta kaikissa paitsi uudessa tuhkassa on tasaisehkösti noin 30 %:n osuuksia. Puolen kilon rakeen vaikutus osuuksiin on jo suuri, joten se hankaloittaa analyysiä. Toisaalta elokuun tuhkat olivat varsin paakkuisia kauttaaltaan.

Kaikissa suojaamattomissa tuhkavaihtoehdoissa on joulukuun mittauksessa lisääntynyt hienoaines. Nousua on tapahtunut, vaikka aiemmin osuus olisi pysynyt suurin piirtein samassa tai laskenut. Uudessa tuhkassa hienoaineksen osuudet ovat tasaisesti 30 % ja 65 %, mitkä ovat muihin verrattuna vähintään noin 10 prosenttiyksikköä suuremmat.

Kaikissa suojaamattomissa tuhkissa ovat keskirakeiden osuudet hienoisessa nousussa, mutta uusi tuhka pysyy samalla tasolla. Osuudet ovat kaikissa samaa 10–20 %:n luokkaa kumpaankin raekokoon. Yli 22,4 mm rakeita löytyy 20–30 %:n osuuksilla kaikista tuhkalaaduista. Uudessa tuhkassa näin on tosin ollut vain yhdessä mittauksessa.

Lähes kaikista suojattujen ja suojaamattomien tuhkavaihtoehdoista on löytynyt yli 63 mm rakeita seulonnoissa. Poikkeuksen tekee vain uuden tuhkan suojatut säkit. Jättiläisrakeita sen sijaan on löytynyt aivan kaikista tuhkavaihtoehdoista.

Vanhan ja kuivan tuhkan kalsiumoksidipitoisuudet olivat 15 %, kun taas kostealla ja uudella tuhkalla 23 %. Loppupitoisuudet olivat erittäin lähellä alkupitoisuuksia. Varastoinnilla ja olosuhteilla ei ole ollut vaikutusta arvoihin.

### **8.3 Säkit 1–16: Tuloksissa havaittuja yhtäläisyyksiä**

Erot suojauksessa vaikuttavat selvimmin kosteusprosentteihin, jotka suojaamattomissa tuhkasäkeissä ovat poikkeuksetta vähintään 20–30 prosenttiyksikköä suuremmat, jopa kaksinkertaiset, verrattuna suojattuihin. Suojaamattomat tuhkat ovat joissain tapauksissa moninkertaistaneet alkukosteutensa. Suojatuissa säkeissä vesipitoisuuksille oli yleistä alentua kesän aikana ja taas nousta syksyllä ja talvella. Muutokset ovat kuitenkin varsin pieniä, hajonnan ollessa alle 5 prosenttiyksikköä.

Levityskokeita ennen tehty vesipitoisuusmittaus on kaikilla säkeillä antanut varsin selkeän nousun edellisiin mittauksiin verrattuna. Syynä lienevät runsaat vesisateet ja mittauspäivän olosuhteet. Tuhkat olivat jäässä ja säkkien sisällä lumi-/jäähilettä, mikä väkisinkin nostaa vesipitoisuuksia. Todellisuudessa tuhkat eivät ole kauttaaltaan noin kosteat, mikä huomattiin levityskokeissakin.

Korkea kosteusprosentti näyttää vaikuttavan raekokojakaumaan kokoa kasvattavasti. Suojaamattomilla säkeillä tämä näkyy selvimmin. Saman asian voi havaita suojatuistakin säkeistä, kuitenkin siten, että tasainen ja alempi kosteus pitää raekoon muutokset vähäisempinä. Esimerkiksi säkki 6:ssa on vesipitoisuuden kasvassa hienoaineksen määrä laskenut ja suuremmat rakeet lisääntyneet. Vaikka kyseisen säkin suojaus olisikin pettänyt, on tämä hyvää tietoa.

Kaikissa suojatuissa säkeissä pohjan + pesutappion osuus on noin 20 % ja  $\leq 1$  mm rakeiden osuus noin 50 %. 1–5,6 mm:n ja 5,6–22,4 mm luokkien osuudet ovat 10–20 %:n luokkaa kaikissa suojatuissa paitsi kasa 26:ssa, jossa niissä on jatkuvasti yli 20 %. Lisäksi suojattuihin tuhkavaihtoehtoihin verrattuna suojaamattomissa säkeissä on raekokojakauma keskimäärin enemmän painottunut suurempiin rakeisiin. Huhtikuun säkityksen tuhkissa on kaikissa selvästi elokuisia korkeammat CaO-pitoisuudet, mikä vaikuttaa olennaisesti rakeistumiseen.

#### **8.4 Säkit 17–32: Tuloksissa havaittuja yhtäläisyyksiä**

Kosteusprosentit ovat suojatuissa säkeissä paria poikkeusta lukuun ottamatta laskeneet suoraviivaisesti 10–20 %:iin joulukuuhun mennessä. Kaikki suojatut säkit ovat joulukuun mittauksessa olleet alkukosteuttaan alempana. Suojaamattomissa säkeissä on havaittavissa, että mitä suurempi alkukosteus on ollut, sitä korkeammalla myös kosteuspiikki on. Kaikkien suojaamattomien kosteudet ovat käyneet vähintään noin 40 %:ssa, enimmillään yli 50 %:ssa. Merkille pantavaa on jälleen helmikuun mittaus, jossa kaikissa 16 säkissä on selvä nousu, kaksinkertaistumisenkin monissa.

Yleisesti ottaen, vaikka suojatut säkit ovat kuivahtaneet, niin raekoko on muuttunut suuremmaksi kuivassa tuhkassa, samoin vanhassa tuhkassa raekokojakauma on pysynyt samassa tai rakeet hiukan kasvaneet. Itsekovettuminen sitoo vettä, mikä voi osaltaan vaikuttaa kosteusprosentin alenemiseen. Kosteassa tuhkassa muutos on samankaltaisempi kuin huhtikuun säkeissä, joissa korkeampi kosteus rakeisti tuhkaa. Uudessa tuhkassa muutokset ovat marginaalisia, vaikka kosteusprosentit ovat aluksi lähteneet säkeissä eri suuntiin.

Elokuun säkeistä on vaikeampi löytää samanlaisia selkeitä muutostrendejä rakeisuuden suhteen kuin huhtikuun säkeissä. Elokuun tuhkissa oli toki pienemmät CaO-pitoisuudet, minkä on todettu olevan merkittävin tekijä tuhkan kovettumisen kannalta. Suojaamattomissakaan säkeissä kosteusmuutokset eivät ole juuri saaneet aikaan selkeitä rakeistumiskaavoja. Säkkien kosteudet olivat joulukuuhun asti miltei samanlaisia kuin huhtikuun suojatuissa säkeissä, keskiarvojen liikkeessa 25–35 %:n välillä, eikä niissäkään tapahtunut valtavia muutoksia.

Pohjan + pesutappion osuus on suojatussa uudessa tuhkassa 30 %:n luokkaa, kun taas muissa suojatuissa 10–20 prosenttiyksikköä alempi. Samaan tyyliin muista tuhista löytyy selvästi enemmän yli 22,4 mm rakeita kuin uudesta tuhkasta. Keskirakeiden (1–5,6 mm ja 5,6–22,4 mm) osuudet suojatuissa säkeissä ovat pääsääntöisesti liikkuneet 10–15 %:n ympärillä.

## **8.5 Varastointiaikojen ja säkitysajankohtien vertailut**

Tässä kappaleessa on käyty läpi huhtikuun ja elokuun säkkien yhtäläisyyksiä ja eroja. Vertailussa on tarkasteltu varastointiajan vaikutusta vanhojen ja uusien tuhkalaatujen kohdalla keskenään. Muiden neljän tuhkalaadun vertailu on käyty yhteisesti läpi.

Ensimmäiset 16 säkkiä säkitettiin 26.4.2013 ja toiset 16 säkkiä 22.8.2013. Varastointiaikojen pituuteen tuli siten eroa 118 päivää eli vajaat neljä kuukautta. Levityskokeet pidettiin 4.2.2014. Varastointiajaksi huhtikuun säkeille tuli siten 284 päivää eli runsaat yhdeksän kuukautta. Elokuun säkkien varastointiaika oli 166 päivää eli noin 5 ½ kuukautta. Sääolojen puolesta koettiin monipuolisesti kaikkia vuodenaikoja. Vanhoista säkeistä on luonnollisesti saatu enemmän mittausdataa, jonka mukaan arvioida muutoksia tuhkissa.

### **8.5.1 Vanhojen tuhkien vertailu**

Alkukosteusprosentteissa oli selvä ero 1. ja 2. säkityksen välillä. Edellisessä kosteusprosentti oli 32,9 % ja jälkimmäisessä 22,6 %. Vuodenaika ja säkityssää näkyvät kosteuksissa 10 prosenttiyksikön erona. Suojattujen säkkien kosteusprosentit ovat kehittyneet tasaisesti molempien säkitysten vanhalla tuhalla. Huhtikuun suojatut säkit kuivuivat heinäkuun lopun runsaaseen 20 %:iin, josta tasaisesti 30 %:n tasolla helmikuuhun asti. Elokuun tuhkien kosteudet taas laskivat suoraviivaisesti joulukuun 10 ja 14 prosenttiin, josta nousu helmikuun 25 %:n ympärille. Elokuussa on kuitenkin ollut selvästi kuivempaa tuhkaa ja se on myös koko ajan säilynyt kuivempana.

Elokuun suojaamattomat säkit ovat olleet tasaisempia vesipitoisuuden suhteen, kun taas huhtikuun säkit ovat lisänneet kosteutta hurjasti, nousua on 20–30 pro-



senttiyksikköä alkukosteudesta joulukuuhun mennessä. Viimeisessä mittauksessa kosteudet ovat nousseet entisestään, huhtikuun säkeissä on kaksinkertainen kosteus verrattuna elokuun suojaamattomiin säkkeihin.

Suojattujen säkkien raekokojakauma on pysynyt huhtikuun säkeissä selvemmin samankaltaisena ilman suuria muutoksia, kun taas elokuun säkeissä jakauma on enemmän tai vähemmän selkeästi muuttunut isomman rakeen suuntaan. Hienoainesmäärät ovat molemmissa samankaltaisia, 15–20 % (pohja + pt) ja 50 % ( $\leq 1$  mm). Elokuun säkeissä on yli 22,4 mm rakeita 10–20 prosenttiyksikköä enemmän, mikä kompensoituu huhtikuun säkkien kaksinkertaisena määränä 1–22,4 millisissä rakeissa. Huhtikuun tuhka on silmämääräisestikin huomattavasti tasalaatuisempaa, elokuun tuhkassa on paljon suuria paakkuja. Elokuun säkeistä löytyy kaikista yli 63 mm rakeita ja ns. jättiläisrakeita, jotka ovat noin jalkapallon kokoisia. Huhtikuun säkeistä ei mistään löydy vastaavia, yli 63 mm rakeita kyllä.

Suojaamattomissa huhtikuun säkeissä on hienoaineksella aleneva trendi, määrien ollessa suurin piirtein samaa luokkaa kuin elokuun säkeissä. Keskikokoisissa rakeissa on kaikissa säkeissä lievää nousua, mutta huhtikuun säkeissä on kaksinkertaiset määrät rakeita. Suuria yli 22,4 mm rakeita taas on enemmän elokuun säkeissä. Molemmissa on yli 63 mm rakeita ja elokuun säkeissä lisäksi jättiläisrakeita.

Huhtikuun vanhan tuhkan kalsiumoksidipitoisuus oli 27,6 % ja elokuun 15,4 %. Pitoisuudet säilyivät samalla tasolla levityskokeisiin asti. Luvuissa on kuitenkin selvä ero, mihin vaikuttaa monet tekijät kuten tuhkan laatu ja poltto-olosuhteet.

### **8.5.2 Uusien tuhkien vertailu**

Alkukosteusprosentteissa oli selvä ero 1. ja 2. säkityksen välillä, huhtikuussa 34,5 % ja elokuussa 22,2 %. Vuodenaika ja säkityssää näkyvät jälleen kosteuksissa erona. Toisaalta lämmin sää vaikuttaa positiivisesti itsekovettumiseen, joka sitoo vettä. Huhtikuun suojattujen säkkien kosteudet ovat liikkuneet koko ajan noin 30–35 %:n paikkeilla. Elokuun säkeissä taas vesipitoisuudet liikkuvat alkukosteuden lähellä joulukuuhun saakka, josta nousu helmikuun runsaaseen 30 %:iin. Elokuussa on ollut selvästi kuivempaa tuhkaa: vielä joulukuussa säkkien kosteu-

det olivat kaksinkertaisia huhtikuun säkeissä verrattuna elokuun säkkeihin. Kuitenkin viimeisessä mittauksessa ainakin säkkien pintakerroksessa kosteus on noussut samalle tasolle.

Suojaamattomat huhtikuun säkit ovat kostuneet kesästä asti nousten tasaisesti 60–80 %:n kosteuteen. Myös elokuun suojaamattomien säkkien vesipitoisuudet ovat nousseet 40 %:n paikkeille. Levityskoetta edeltävällä mittauksella on kaikissa säkeissä selkeät nousut vesipitoisuuksissa.

Hienoaineksen osuus suojatuissa huhtikuun säkeissä on vaihdellut, mutta on laskusuunnassa selvästi. Keskikokoisten rakeiden osuudet ovat pysyneet samassa 15–20 %:ssa, mutta yli 22,4 mm rakeiden osuudet ovat nousussa, mistä kertoo myös d50-raekoon kasvu. Elokuun suojatuissa tuhkasäkeissä muutokset ovat marginaalisia. Erot ovat hyvin pieniä, mutta aavistuksenomaista muutosta suurirakeisempaan päin on tapahtunut. Huhtikuun suojatuissa säkeissä on kuitenkin noin 20 % vähemmän  $\leq 1$  mm:n kokoisia rakeita ja kaksinkertaiset määrät rakeita välillä 1–22,4 mm.

Huhtikuun suojaamattomissa tuhkissa on tapahtunut rakeistumista kosteuden nousun mukana, mikä on havaittavissa eritoten hienoaineksen selkeässä laskussa ja yli 22,4 mm rakeiden osuuden 10–20 prosenttiyksikön nousussa. Elokuun suojaamattomissa säkeissä hienoaineksen osuus on pysynyt samoissa 30 ja 65 prosentin lukemissa. Myös muissa raeluokissa muutokset eivät indikoineet juurikaan rakeistumista.

Huhtikuun säkeissä on vähintään 10–20 % vähemmän hienoainesta ja saman verran enemmän yli 22,4 mm rakeita. Keskirakeita on kummassakin hyvin yhtä paljon. Toisaalta elokuun laaduista löytyy myös jättiläisrakeita, joita huhtikuun säkeistä ei löydy. Huhtikuun tuhkan korkeampi alkukosteus ja suurempi CaO-pitoisuus näyttävät rakeistaneen tuhkaa selvemmin kuin elokuun säkeissä. Huhtikuun uuden tuhkan kalsiumoksidipitoisuus oli 30,6 % ja elokuisen 23,0 %.

### **8.5.3 Kasa 21 % ja kasa 26 % vs. kuiva ja kostea tuhka**

Ensimmäisessä säkityksessä ei saatu selkeää eroa kostealle ja kuivalle tuhkalle. Halogeenikosteusanalysaattorilla saadut kosteudet olivat kahdessa kasassa 21 % ja

26 %, mutta säkityksessä tehdyn näytteenoton tulokset olivat päinvastaiset. Toisessa säkityksessä halogeenimittauksen tulokset olivat jälleen lähellä toisiaan, mutta näytteenotossa saatiin selvä ero kosteuksiin. Elokuussa toinen kasa oli suojattuna muutaman päivän kovien sateiden vuoksi. Tässä vertailussa tutkitaan tuhkalaatujen eroja ja yhtäläisyyksiä. Säkki 5 jätetään vertailusta pois, koska se on selkeästi kastunut.

Alkukosteusprosentteissa oli selvä ero elokuisten kuivan 19,5 %:n ja kostean 28,6 %:n välillä, huhtikuisen kasa 21:n kosteus oli 34,9 % ja kasa 26:n 30,8 %. Kasa 21 ja 26 suojattujen säkkien kosteudet ovat pysyneet koko ajan 30 %:n lähetyvillä. Kuivan tuhkan suojattujen säkkien vesipitoisuudet ovat laskeneet tasaisesti joulukuun 15 %:n paikkeille, josta nousua 30 %:iin. Kostean tuhkalaadun suojattujen tuhkien kosteudet taas ovat eläneet enemmän 20–40 %:n välillä, päätyen kuitenkin helmikuun runsaaseen 40 %:iin. Kostean tuhkan säkit ovat selvästi lähempänä kasa 26:n ja kasa 21:n kosteusprosentteja joulukuuhun ulottuvalla aikavälillä. Helmikuussa myös kuivan tuhkan kosteudet nousivat samalla tasolle noin 25 %:iin.

Suojaamattomissa kasa 21:n ja kasa 26:n säkeissä kosteus on noussut 60–90 %:n lähetyville. Kostean tuhkalaadun säkkien vesipitoisuudet ovat myös nousseet 50 %:iin ja kuivien helmikuussa 40 %:iin. Korkea alkukosteus on johdatellut suurempiin lukemiin. Säkit keräävät kosteutta, mutta luovuttavat sitä pois huonomin.

Elokuun suojaamattomissa kuivan tuhkan säkeissä kosteusprosentit ovat liikkuneet 20–30 %:n vaiheilla, kunnes helmikuussa nousseet 40 %:iin. Kosteassa tuhkassa taas vesipitoisuus on elänyt enemmän käyden jo marraskuussa 50 %:ssa ja uudestaan helmikuussa. Huhtikuisten tuhkalaatujen kosteudet taas ovat nousseet tasaisesti, eivätkä ole palanneet lähellekään alkukosteutta.

Hienoaineksen osuudet ovat kaikissa suojatuissa laskusuunnassa. Osuudet pyörivät 15–20 %:n ja 40–50 %:n paikkeilla. Kuitenkin kosteassa tuhkassa muutos on vähintään päinvastainen, tai paikallaan pysyvämpi.

Keskirakeiden osuudet suojatuisissa tuhkissa ovat pysyneet aika lailla samassa 10–20 %:ssa koko ajan. Poikkeuksena kuiva tuhka, jossa osuudet ovat alentuneet 10 %:n luokkaan. Eniten keskirakeita on kasa 26:ssa, jossa tasainen matalahko kosteus lienee vaikuttanut asiaan.

Yli 22,4 mm rakeiden määrä vaihtelee runsaasti, mutta tasaisesti niitä on löytynyt kasa 21:n, kuivan ja kostean laadun tuhkista. Kaikissa suojatuisissa tuhkavaihtoehdoissa on seulonnoissa ollut yli 63 mm rakeita. Elokuun säkeissä on myös ns. jättiläisrakeita.

Suojaamattomissa kuivan ja kostean tuhkalaadun säkeissä hienoaines on vähentynyt, kunnes joulukuussa on nousua. Tämä hankaloittaa tulosten tulkintaa, osasyynä nousuun on mittauspäivän aikaiset pakkasolosuhteet. Huhtikuun suojaamattomissa säkeissä hienoainekseen osuudet ovat laskussa. Kaikissa pohjan + pesutapion osuus on noin 15 %, joista joulukuun lukemat hieman nousevat kuivan ja kostean tuhkalaadun kohdalla.

Kosteassa ja kuivassa tuhkalaadussa keskikokoisten rakeiden osuudet ovat melko lailla samaa tasoa tai pienessä nousussa. Yli 22,4 millimetrinen rakeiden määrä taas vaihtelee, trendin ollessa lievästi ylöspäin. Kuivan tuhkan joulukuun mittaukseen ei tosin ole sattunut mukaan suuria paakkuja. Kasa 21 keskirakeiden osuuksissa on havaittavissa hyvin pientä nousua ja sama trendi jatkuu yli 22,4 mm rakeisiin. Kasa 26:ssa on myös suunta suurirakeisempaan päin. Osuuksien määrät ovat hyvin pitkälti samankaltaiset kaikissa. Kaikista suojaamattomista tuhkavaihtoehdoista on seulonnoissa löytynyt yli 63 mm rakeita ja elokuun tuhkista löytyy valtavia rakeita säkeistä.

Huhtikuisten kasa 21:n ja kasa 26:n kalsiumoksidipitoisuudet olivat noin 28 %. Elokuisen kuivan pitoisuus oli 15,2 % ja kostean 23,6 %. Kosteaa tuhkalaatua on siis lähempänä huhtikuisia CaO-pitoisuuksia. Pitoisuudet pysyivät samalla tasolla loppuun asti, mutta huhtikuisten tuhkien tuloksissa on kuitenkin muutaman prosenttiyksikön alenemista.

## 8.6 Tulosten analysoinnin haasteet

Laadukkaat mittaustulokset tarvitsevat myös laadukkaan näytteen. Säkeistä otettiin näytteitä 10 litran ämpäriin pyrkien mahdollisimman edustavaan näytteeseen. Seulontoja ja vesipitoisuutta varten tuhkamäärää on jaettu puoliksi kunnes on päästy sopivaan määrään.

Rakeisuuden määrittämisessä täytyy muistaa tärytyksen vaikutus raekokoon. Kaikista rakeista irtoaa vähintään hienoainesta pinnasta. Paljain silmin tämän näkee pyöristyneistä rakeista. Suurimpana seulana on jokaisessa seulonnassa käytetty 16 mm:n seula. Tästä johtuen alle 22,4 mm rakeet voivat hajota enemmän ja toisaalta sitä suuremmista rakeista ei irtoa hienoainesta. Rakeisuuden muutoksia tärytyksen aikana on vaikea arvioida. Voidaan vain todeta, että tärytys pienentää alle 22,4 mm rakeita. Muutoksilla on mielestäni melko pieni merkitys lopulliseen rakeisuuteen tai sen analysointiin, varsinkin kun jokainen seulonta on samanlainen. Pohjalle jäävien tai  $\leq 1$  mm rakeiden määrä on todellisuudessa pienempi, mutta en näe sen vaikuttavan olennaisesti rakeisuuden tulkitsemiseen tässä tapauksessa. Toisaalta yli 22,4 millisiin rakeisiin jää pintaan hienoainesta, joka tärytyksessä kulkeutuisi alimmille seuloille. Levitettävyyden suhteen kaikki pienet rakeet ovat hyvin pitkälti samassa roolissa, eli pöllähtävät lähimmäksi ajouraa. Oma mielipiteeni on, että rakeet ja raekokojakauma pysyvät kuitenkin varsin todellisina, eikä tärytyksen aiheuttamille muutoksille voi antaa liian suurta painoarvoa.

Haastavimmat asiat mittausten tulkitsemisessä ovat liittyneet suuriin paakkuihin, koska ne vievät väkisin ison osan prosentiosuuksista. Niiden suhdetta pienempiin rakeisiin on haastava huomioida näytteen koossa. Toisaalta myös säkeissä on ollut yli 100 mm:n kokoisia tai valtavia paakkuja, joita ei ole mielekästä saati mahdollista ottaa mukaan seulontaan. Näiden olemassaolosta on kuitenkin oltava tietoinen. Haasteena on myös tuloksissa olevat vaihtelut. Tasaisen muutoksen tunnistaminen on helppoa, mutta esimerkiksi yli 22,4 mm rakeissa yksikin suuri ja raskas paakku voi nousta esiin melko selvästi.

Haasteita toivat myös talvinäytteenotot. Kovaksi jäätyneestä tuhkasta on vaikea saada laadukasta näytettä. Viimeisellä mittauksella vesipitoisuudet olivat nousseet

joka säkissä merkittävästi. Syynä tähän on todennäköisesti runsaat sateet mittaus-  
ten välissä sekä mittauspäivän olosuhteet. Jäinen tuhka ja säkkien sisälle muodos-  
tunut lumi-/jäähile eivät voi olla vaikuttamatta kosteusprosenttiin. Pinnan kosteu-  
desta huolimatta tuhkat eivät ole kauttaaltaan, niin kosteita kuin mitä tulokset an-  
tavat ymmärtää. Tämä nähtiin levityskokeissa, kun säkit rikottiin ja tuhka levitet-  
tiin.

## 9 LEVITYSKOKEIDEN TULOKSET

Levityskokeet järjestettiin 4.2.2014 säkkien varastointipaikalla Metsä Boardin tuhkakentällä. Levityksen hoiti Veljekset Knuutila Ay tuhkanlevityslaitteistollaan (kuvio 5.). Päivän lämpötila oli nollan paikkeilla ja kentällä puhalsi sivutuuli (noin 5 m/s) koneesta katsottuna vasemmalta/takavasemmalta. Olosuhteet vastasivat vuodenajan ja sään puolesta todellista ja optimaalista levitystilannetta. Sen sijaan puuston vaikutusta ei levityskokeisiin tullut mukaan. Tuulen vaikutus näkyi selvästi kaikissa mittaustuloksissa ja niiden kuvaajissa. Käytännössä tuuli näkyi selvimmin hienon aineksen lentämisessä enimmäkseen toiselle puolelle konetta.



**Kuvio 5.** Tuhkanlevitys käynnissä Veljekset Knuutila Ay:n kalustolla.

Levitystuloksissa levitystasaisuus on suhteutettu 21 metrin ajouravälille. Yleensä metsänlannoituksessa käytetään noin 20 metrin uraväliä. Yksi lisämetri tulee mitauslaatikoiden etäisyyksien perusteella, jolloin ei jouduta interpoloimaan 20 metrin etäisyydelle omia arvoja.

### 9.1 Levitystulokset sanallisesti

Huhtikuun suojattujen tuhkasäkkien levitys onnistui parhaiten. Tuhkat olivat sopivan pehmeitä ja käytännössä valmista tavaraa nostettavaksi levityskoneen lavalle. Samasta syystä ne saivat myös kehuja levittäjältä. Ajouravälin ollessa 21 met-

riä, saatiin tasaisimmat tuhka-annokset vanhalla tuhalla ja kasa 21:n tuhalla. Vanha tuhka on koko ajan lannoitusosuustusten 3–5 t/ha välissä. Kasa 21 pysyy myös samassa välissä lukuun ottamatta ajourien kohtia, joissa määrät laskivat noin 2,6 tonniin. Uusi tuhka ja kasa 26 tekivät epätasaisemman lannoitusjäljen. Kummassakin on ajourien kohdalla selvät notkahdukset alle 3 tonniin ja urien puolivälissä piikit 5–6 tonnissa.

Elokuun suojatuuissa tuhkissa oli odotetusti enemmän suurempia paakkuja, joita piti murskata kauhalla. Mukana oli myös kovia paakkuja, joihin kauha ei pystynyt. Vanhan tuhkan levitysmäärä on ajourien puoliväliä (noin 2 t/ha) lukuun ottamatta koko ajan 3–4 t/ha tahdissa. Kostean ja kuivan tuhkalaadun määrät liikkuvat 2,5–4 t/ha välillä, korkeimpien määrien ollessa noin 5 t:ssa. Kosteaa tuhkaa on kuitenkin paremmin ja tasaisemmin 3–5 t/ha tasolla. Uuden tuhkan levitys on koko ajan 3–5 t/ha tahdissa käyden enimmillään runsaassa 5 tonnissa. Elokuun suojatujen tuhkien levitystulokset ovat myös varsin hyviä. Näissä tuhkissa oli kuitenkin paljon paakkuja, jotka lensivät kovalla vauhdilla kauas.

Elokuun suojaamattomia säkkeitä päästiin myös levittämään. Ne olivat kyllä erittäin paakkuisia ja hienontamista vaativia, mikä ei tulisi tositilanteessa kuuloonkaan. Tuhkat eivät silti olleet samalla lailla jäässä, kuin huhtikuun suojaamattomat, vaan enemmänkin rakeistuneet suuriksi paakuiksi. Kuivan tuhkan levitystulos 21 metrin ajouravälillä liikkuu 4–6 t/ha tahdissa tasaisesti. Kostean tuhkan määrät taas liikkuvat 2–4 t/ha tasolla ja ajourien kohdalla on selvät notkot. Uusi tuhka sen sijaan on tasaisesti 3–4 t/ha levitysmäärässä. Nämäkin tulokset ovat sinänsä hyviä, mutta kyseisissä tuhkissa on muita haittatekijöitä.

Vertailun vuoksi tehtiin levityskoe myös kasavarastoidulla tuhalla. Tuhka-annos on koko ajan vähintään noin 4 t/ha 21 metrin ajouravälillä. Vajaita 6 tonnin piikkejä on 6 ja 15 metrin etäisyyksillä ajourasta. Levitys on varsin tasainen ja tuhka-annos ei ainakaan vajaa. Silmämääräisesti rakeisuus oli lähempänä huhtikuun tuhkaa, joissa ei ollut suuria paakkuja.

Levityskokeissa mittauslaatikoita ei ollut ajouralla eli 0-kohdassa käytännön syistä. Ajouran keskikohdan arvo on kuitenkin laskettu kaikissa tuloksissa ja kuvaa-



jissa 3 metrin etäisyydellä olevien laatikoiden keskiarvosta, autenttisella levitystuloksella. Levityskone levittää tuhkaa myös taaksepäin, eikä 3 m laatikoiden keskiarvo ainakaan liioittele tuhkan määrää.

## **9.2 Levittämättömät tuhkat**

Kaikkia tuhkasäkkejä ei levitetty levityskokeissa. Osa tuhkista oli liian jäisiä ja osa jätettiin pois muista syistä. Huhtikuun suojaamattomia tuhkasäkkejä ei pystytty levittämään, koska ne olivat jäässä. Säkki 6 jätettiin pois yhteisestä levityskokeesta säkki 5:n kanssa, koska vesipitoisuuksissa ja rakeisuuksissa oli edellisten mittausten perusteella valtava ero ollakseen suojattuja säkkejä. Säkit 19 ja 20 eli elokuun vanhan tuhkan suojaamattomat säkit olivat samanlaisia kuin kostean ja kuivan tuhkan suojaamattomat. Ne vaativat paljon työstämistä maassa, eivätkä siltikään muuttuneet tositilanteessa järkeviksi levittää. Pitkäkestoinen murskaus ei vastaa todellista levitystilannetta ja samankaltaisia tuhkalaatuja oli jo testattu.

## **9.3 Levitystulosten suhde vesipitoisuuteen ja rakeisuuteen**

Vesipitoisuudet mitattiin joka säkistä päivää ennen levityskoetta. Tulokset olivat vähintään mielenkiintoisia. Jokaisen elokuun säkin kosteusprosentti oli noussut merkittävästi. Myös suojattujen säkkien kosteudet olivat nousseet, joten ne ovat mahdollisesti altistuneet sateelle jossain vaiheessa. Toisaalta vesipitoisuudet antavat vain osviittaa säkkien kosteudesta, koska säkin alaosista näytettä ei saada.

### **9.3.1 Huhtikuun tuhkasäkit**

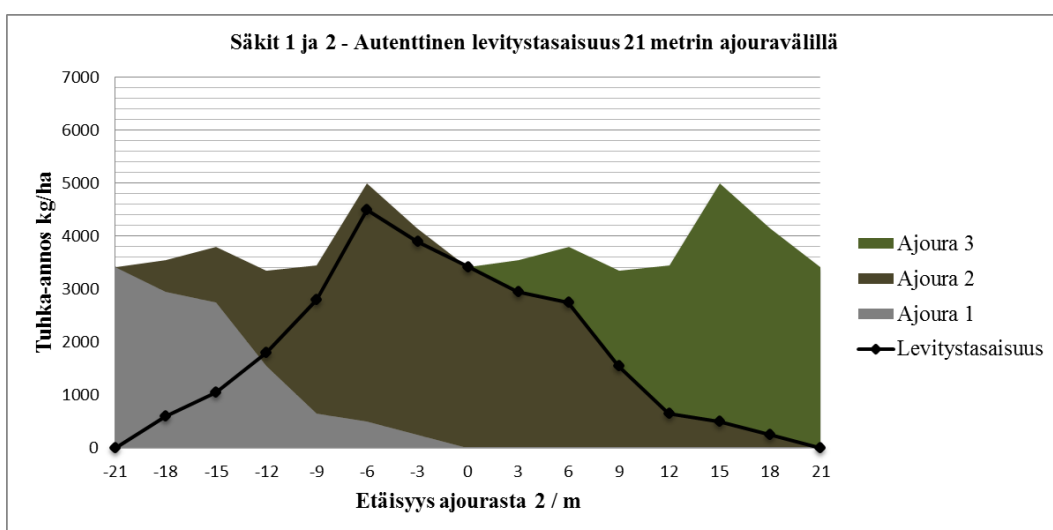
Suojaamattomilla huhtikuun säkeillä kosteuden vaikutus levitettävyyteen on varsin ilmeinen. Huhtikuun suojaamattomia ei voitu levittää, koska ne tulivat käytännössä yhtenä palana pois säkistä eli olivat ns. arpakuutioita (kuvio 6). Korkea vesipitoisuus ja pakkanen eivät ole hyvä yhdistelmä.



**Kuvio 6.** Huhtikuun suojaamattomista tuhista tuli arpakuutioita (säkki 8).

### **Vanha tuhka**

Huhtikuun suojatut vanhan tuhkan säkit olivat yksi tasaisimmin levinneistä tuhista 21 metrin uravälillä, tuhka-annoksen ollessa tasaisesti 3–5 t/ha välissä (kuvio 7). Tuhkaa on ajoradan molemmilla puolilla varsin runsaasti, laskien tasaisesti ajouran loitotessa. Näissä säkeissä oli seulontojen perusteella varsin tasaisesti rakeita joka luokassa ja hienoainesta ( $\leq 1$  mm) noin 50 %. Tasaisen raekokojauman lisäksi vesipitoisuus on ollut tasaisesti noin 20–30 %:n välillä, mitkä yhdessä selittänevät hyvän levitystuloksen.



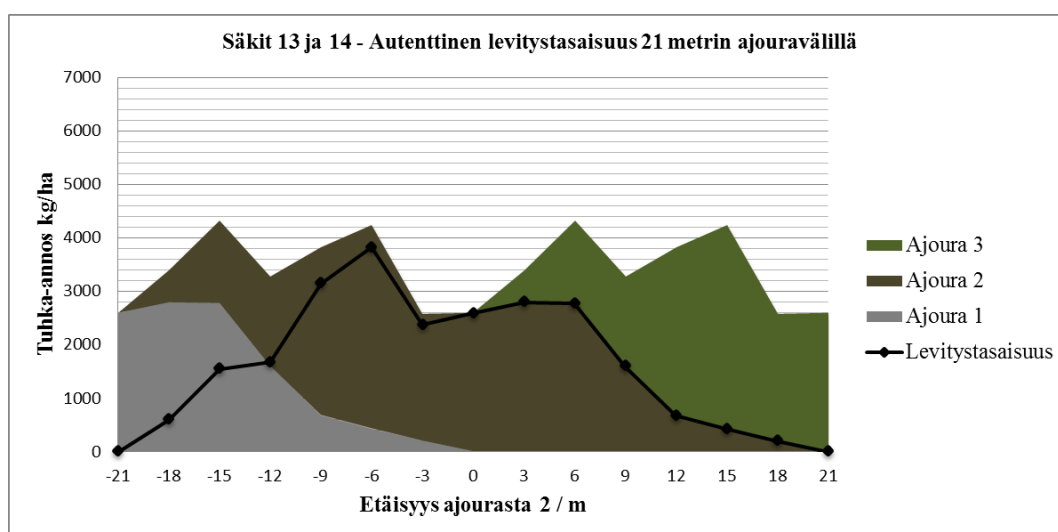
**Kuvio 7.** Huhtikuun vanhan suojatun tuhkan levitystasaisuus.

### Kasa 26 %

Kasa 26:ssa annosten ääripäät ovat aavistuksen lannoitus-suositusten ulkopuolella. Levityskuvaajassa on painottunut 6 metrin etäisyys ajourasta. Ajouraa lähimmäs (3 m) etäisyydelle on tullut vähemmän tuhkaa, mikä näkyy notkoina 21 metrin ajouravälikuvaajassa. Tämä tasoittuu, jos kuvaajassa käytetään mittauksen keskiarvoja eli toisin sanoen levitetään tuulettomammalla säällä. Kyseisessä tuhkassa on varsin sopusuhtainen raekokojakauma, sillä 1–22,4 mm:siä rakeita on yhteensä 40–50 %. Tuhkassa oli 10 % prosenttiyksikköä vähemmän hienoainesta ( $\leq 1$  mm) ja noin 10–20 prosenttiyksikköä enemmän keskirakeita kuin vanhassa tuhkassa. Keskirakeiden määrä lisää tuhka-annosta 6–15 metrin etäisyydellä ajourasta. Näissä tuhkissa vesipitoisuus on ollut tasaisesti noin 20–30 %:n välillä.

### Kasa 21 %

Kasa 21:n levityskuvaaja 21 metrin ajouravälillä liikkuu 3–4 t/ha tasolla eli varsin tasalaatuisesti koko levitysalalla. Tuhkassa oli yli 22,4 mm rakeita varsin paljon, tasaisesti enemmän kuin muissa huhtikuun suojatuissa tuhkissa. Nämä rakeet ovat herkempiä lentämään kauaskin, mikä voi selittää alhaisempia tuhkamääriä mittauspisteissä. Tuhkassa oli melko vähän keskirakeita, mikä näyttäisi vähentävän tuhkaa 9–15 metrin etäisyyksillä. Hienoainesta oli 50 % ja tasaiset määrät tuhkaa lähimmillä mittauspisteillä. Vesipitoisuus oli tasaisesti 30–40 %:n välissä.



**Kuvio 8.** Kasa 21 tuhkan levitystasaisuus.

## **Uusi tuhka**

Uuden tuhkan kuviossa (21 m uraväli) on korkeimmat pitoisuudet 6,5 t/ha ja tuhkamäärät koko ajan vähintään noin 3 t/ha. Raekokojakauma on säkeissä päinvas-tainen, mutta keskirakeita on tasaiset määrät ja molemmissa on saatu hienoainek-sen osuudeksi 50 %. Nämä seikat, yhdessä noin 30–40 %:n vesipitoisuuden kans-sa, vaikuttaisivat näkyvän suurina tuhkamäärinä aina 12 metriin asti.

### **9.3.2 Elokuun tuhkasäkit**

#### **Vanha tuhka**

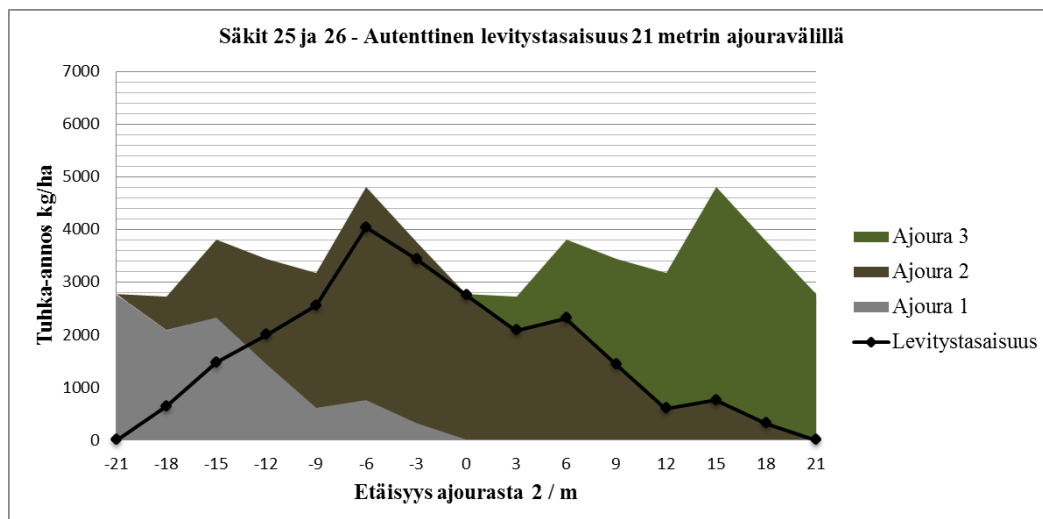
Vanha tuhkan levitys on painottunut melko lähelle ajouraa ja uloimmille mittaus-laatikoille on lentänyt vain vähän tuhkaa. Tuhkassa oli paljon hienoainesta, vähän keskirakeita ja paljon suuria rakeita, mikä lienee saanut aikaan tuloksen. Vesipi-toisuuden ollessa 15–25 %:n välissä on hienoaines painottunut lähelle ajouraa ja tuuli vienyt osan kuivasta tuhkasta. Lannoitusmäärät ovat jääneet ylipäätään pie-niksi, mutta kuvio on melko hyvä.

#### **Kuiva tuhka**

Kuivan tuhkan levityksessä on myös painottunut ajouran lähistö. Tuhka oli kui-vaa, 20–30 prosentista, ja hienoainesta melko paljon, joten tuhka on jäänyt enimmäkseen lähelle. Toiselle puolelle tuhkaa on lentänyt vain vähän, kuivan hie-noaineeksi takia. Keskirakeita ei mittauksen perusteella ole kovin paljon ollut ja suurimmat paakut ovat todennäköisesti lentäneet pitkälle. Lannoitusmäärät ovat tässäkin jääneet ylipäätään melko pieniksi. 21 metrin ajouravälin kuvaajassa on selvät piikit, mutta ne tasoittuisivat keskiarvojen mukaisella kuvaajalla.

#### **Kosteaa tuhka**

Kosteassa tuhkassa on tasainen raekokojakauma ja tasainen levitystulos 21 m ajouravälillä (kuvio 9). Tuhka on lentänyt molemmille puolille tasaisemmin kuin esimerkiksi kuivassa tuhkassa. Vesipitoisuus tässä on helmikuun mittauspäivänä ollut varsin korkea, noin 45 %. Edellisissä mittauksissa on ollut selvästi matalam-pia arvoja. Todellinen koko tuhkan kosteus lienee noin 30–40 %:ssa.



**Kuvio 9.** Kostean tuhkan levitystasaisuus.

### Uusi tuhka

Uuden tuhkan kosteus oli viimeisessä mittauksessa runsaat 30 % ja aiemmissa 20 %:n ympärillä. Uuden tuhkan kohdalla runsas hienoainesmäärä näkyy suurina tuhkamäärinä lähimmillä laatikoilla. Samoin kuivuus näkyy toispuolisuutena. Tuloksena on kuitenkin yllättävän tasainen levitys, koska hienoaines lentää noin puoleen väliin ajouria. Suuret rakeet eivät tuloksissa kovin selvästi näy, muuten kuin poissaolollaan. Niiden lentoradat pomppuineen ylittävät 18 metriä. Toisaalta uudessa tuhkassa oli elokuisista vähiten suuria paakkuja, yli 22,4 mm rakeita siinä kuitenkin oli.

### Suojaamattomat tuhkasäkit

Elokuun tuhkalaaduista levitettiin myös suojaamattomia tuhkasäkkejä. Tasaisimman tuloksen 21 metrin ajouralla sai uusi tuhka. Uuden tuhkan suojaamattomien säkkien kosteus oli runsaat 40 %, mikä yhdistettynä suureen hienoainesmäärään ja kohtalaiseen keskirakeiden määrään on painottanut levitystä ajoradan lähelle. Kuitenkin siten, että 21 metrin uravälillä tuhkaa on koko ajan vähintään 3 t/ha. Tässä tuhkassa ei myöskään ollut isoja paakkuja samassa mittakaavassa kuin muissa elokuisissa, joten sen hienontaminen maassa onnistui melko kivuttomasti eikä vienyt paljon aikaa. Suojattuun uuteen tuhkaan verrattuna tämä on levinnyt tasai-

semmin, mutta määrät ovat pienempiä. Suojaamattomissa säkeissä on keskirakeita enemmän ja suuria rakeita vähemmän kuin suojatuissa säkeissä sekä vesipitoisuus 10–20 prosenttiyksikköä suurempi.

Suojaamattomien kuivan tuhkan säkkien levityskuvaaja oli myös tasainen koko alalla. Kuivan tuhkan kosteus oli noussut helmikuuhun mennessä 40 %:n ympärille. Levityksessä on jäänyt runsaasti tuhkaa lähelle ajorataa, jonka jälkeen edelleen hyviä tuhka-annoksia kauempanakin. Kuivan tuhkan raekokojakauma on tasapaksu, minkä voisi olettaa ennakoivan tasaista levitystulosta. Seassa on myös suuria rakeita. Suojattuun tuhkaan verrattuna myös lähelle ajouraa on tullut tuhkaa paljon. Kosteampi hienoaines lienee painunut aiemmin alas, kuin erittäin kuiva.

Kostean tuhkan vesipitoisuus oli mittausta edeltävänä päivänä jo yli 50 %. Kostealla tuhkalla vain yhden mittauspisteen tuhka-annos on lannoitusosuituksen mukaisella 3–5 t/ha asteikolla. Tällainen kosteusprosentti alkaa jo selvästi vaikuttaa tuhkan levitettävyyteen. Tuhka vaatii murskausta ja hienontamista ennen levitystä ja silti siihen jää liian kovia paakkuja, jotka syöksähtävät levittimestä hallitsemattomasti pitkälle.

Kosteassa suojaamattomassa tuhkassa levitys on kohdistunut 6–12 metriin ja sillä on selvät notkot ajourien kohdilla. Kyseisen tuhkan raekokojakauma on tasapainoisesti jakautunut. Kosteaa hienoaines on levinnyt laajemmalle alalle kuin kuiva/suojattu. Suojattuun vaihtoehtoon verrattuna annokset ovat ajouralla pienempiä, mutta rakeisuudet hyvin samankaltaisia.

#### **9.4 Levitystulosten yhteenveto**

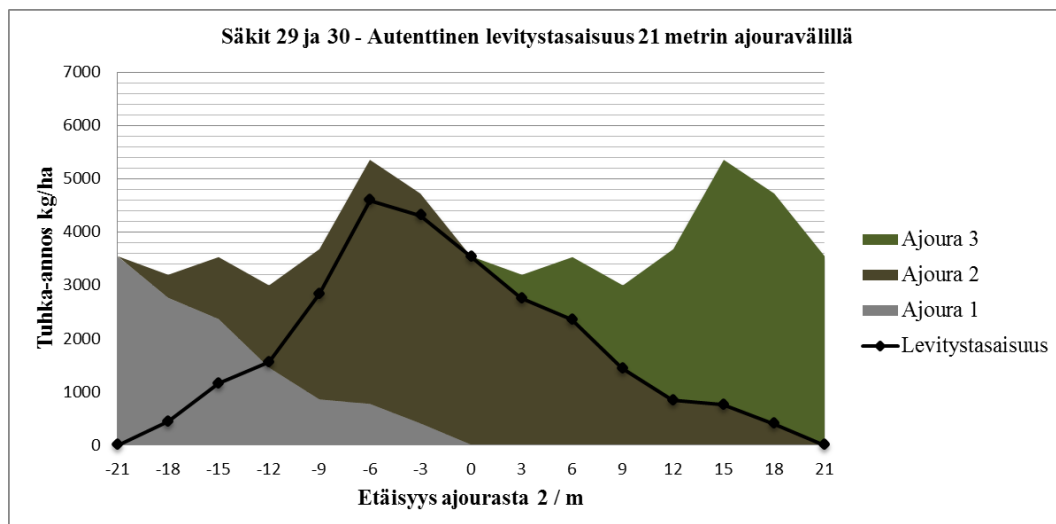
Hyvät levitystulokset 21 metrin ajouravälillä saivat oikeastaan kaikki huhtikuun tuhkalaatujen suojatut vaihtoehdot. Kaikissa neljässä ovat vesipitoisuudet kohtalaisen lähellä 30 %. Myös elokuun suojatut tuhkat ovat loppujen lopuksi levinneet kohtalaisen mukavasti. Parhaat levitystulokset 21 metrin ajouravälillä saivat uusi ja kostea tuhka. On kuitenkin vaikea huomioida tuloksissa suurten rakeiden ja paakkujen vaikutusta, joita kyseisissä elokuun tuhkissa oli paljon. Tuhkamäärät ovat jonkin verran pienempiä kuin huhtikuisissa tuhkissa, joissa suuria paakkuja

ei ollut likimainkaan samassa määrin, jos ollenkaan. Tästä voitaneen päätellä, että iso osa tuhkasta on varastoituna paakkuihin ja niiden levitystasaisuutta on vaikea havaita tai ennakoida tämän tutkimuksen puitteissa. Suuret rakeet lensivät lautaslevittimestä kovaa ja kauas. Vesipitoisuuksien osalta sanoisin, että elokuun tuhkat olivat kokonaisuudessaan kuivempia kuin huhtikuiset, vaikka kosteudet helmi-kuuhun mennessä olivatkin nousseet.

Tuhkan leviämisessä hienoaines ja keskirakeet jäivät odotetusti lähimmäs ajouraa. Kosteampi hienoaines lentää tasaisemmin molemmille puolille huolimatta tuulesta. Kuiva hienoaines voi kuitenkin lentää kauemmas tuulen mukana, yli mittausalueenkin. Suuremmat rakeet lensivät selkeästi kauimmas ja pomppivat maata pitkän vähintään uloimmille mittauslaatikoille.

Lähimpänä ajouraa oleviin (3 m) laatikoihin tuli pääsääntöisesti (7/8 suojattujen kokeissa) vähemmän tuhkaa kuin 6 m:n päässä oleviin. Tämä tapahtui siis ainakin toisella puolella ajouraa. Sen jälkeen tuhkamäärät vähenevät melko tasaisesti. Uskon tämän johtuvan hienoaineksesta, joka pöllähtää enimmäkseen lähelle ajouraa, ei kuitenkaan heti 3 metrin etäisyydelle. Lähimmät laatikot ovat käytännössä erittäin lähellä levitintä, josta tuhkan pitäisi kohdistua melko jyrkässä kulmassa alas päätyäkseen 3 metrin laatikoihin. Levittimestä sinkoutuva tuhkapilvi päättyy levittimen pyörimisnopeuden vuoksi kauemmas, ainakin 6 metrin laatikoille asti.

Tuulen vaikutus tuloksiin on ilmeinen, sillä käytännössä jokainen kuvaaja on toispuolinen, kuten kuvio 10. Erityisesti hienoaines painui myötätuuleen, mikä näkyi tuhkakentän ulkopuolellakin ruskeana lumipintana. Isommat rakeet lensivät melko lailla tasaisesti molemmille puolille, mutta niitä sinkoutui yllättävänkin pitkälle, arviolta 20–30 metriin. Epätasaisuus tai toispuolisuus ei silti haittaa, koska seuraava ajoura on periaatteessa samanlainen ja tasaa levitetyn tuhkan määrää. Toisaalta ääriarvot eli korkeimmat ja alimmat tuhkamäärät ovat tällä autenttisella mitaustuloksella (kuvio 10) kuvattuna hieman korkeammalla, kuin jos sama kuvaaja tehtäisiin molempien puolien yhteenlasketun keskiarvon mukaan. Tuulettomalla (ei sivutuulta) säällä levitystulokset ovat luonnollisesti keskimäärin tasaisemmat.



**Kuvio 10.** Elokuun suojatun uuden tuhkan levitystasaisuus.

Tuulen vaikutus on selvempi kuivemmalla tuhalla. Luonnollisesti kuiva hienoaines menee helpommin tuulen mukana kuin kosteampi. Esimerkiksi kuiva suojattu tuhka on levittynyt toispuoleisemmin kuin suojaamaton, jossa vesipitoisuus on 10–20 prosenttiyksikköä korkeampi. Sama ilmenee kostean tuhkan suojattujen ja suojaamattomien tuhkien välillä. Märemmällä tuhalla on tasaisempi levitystulos, kun tuulen vaikutus jää pienemmäksi. Myös elokuun uuden tuhkan kohdalla tämä on hyvin havaittavissa. Sekä suojatuissa että suojaamattomissa tuhkiissa on hyvin paljon hienoainesta, mutta kosteuksissa 10–20 prosenttiyksikön ero. Suojaamattoman, kosteamman tuhkan levitys on huomattavasti tasaisempi kuin suojatun.

Suojaamattomista tai paakkuisista tuhkiista puhuttaessa ongelmaksi muodostuu suuremman mittakaavan toiminta. Näin ajateltuna tuhkan pitäisi säkistä tullessaan olla sellaista, että se ei vaadi lisätoimenpiteitä levitystä varten. Murskaamiseen ja tuhkan levityskuntoon saamiseen (kuvio 11) menee liian paljon aikaa, jos sama prosessi joudutaan tekemään jokaisen säkin kohdalla. Jos esimerkiksi 10 hehtaarin lannoitusalueelle säkkejä olisi noin 40 kappaletta ja tuhkan hienontamiseen menee 5 minuuttia per säkki, niin puhutaan jo useampien tuntien ajankulutuksesta.





**Kuvio 11.** Tuhkan hienontamista levitystä varten.

## 10 KOEJÄRJESTELYJEN JA OLOSUHTEIDEN VAIKUTUS

Erilaisten tuhkalaatujen ohella lopputuloksiin vaikuttivat koejärjestelyt ja olosuhteet. Käytännössä näitä tekijöitä olivat säkitys, suojaus, sää ja vesipitoisuus. Tässä luvussa on käyty läpi edellä mainittujen seikkojen vaikutuksia tuhkiin ja tuloksiin.

### 10.1 Säkityksen vaikutus tuhkaan

Tavallisesti itsekovetustuhka ajetaan Metsä Boardin tehtaalla tuhkakentälle kasalle kovettumaan. Mitään jatkotoimenpiteitä sille ei varsinaisesti tehdä, vaikka välillä tuhkaa aumataan jätealtaan täytön yhteydessä. Tavanomaiseen kasavarastointiin verrattuna säkitys on hyvin erilainen varastointitapa. Säkissä tuhka on tiiviisti pakattuna ja mahdollisesti suojattuna. Myös kasavarastoinnissa tuhkaa voidaan tiivistää rakeistumisen tehostamiseksi ja samalla sekoittaa tasaisemman rakeistumisen saavuttamiseksi /29/. Tämä taas ei säkitetyn tuhkan tapauksessa ole mahdollista. Epätasaisesti tuhkassa tapahtuvat kemialliset reaktiot ja rakeistuminen saattavat johtaa siihen, että levitettäessä tuhkan korkea pH-arvo aiheuttaa vahinkoa kasveille /29/.

### 10.2 Suojausten vertailu

Selkein ero suojattujen ja suojaamattomien säkkien välillä riippumatta tuhkalaa- dusta on vesipitoisuus. Suojauksessa kosteusprosentti on pysynyt lähes poikkeuksetta lähellä alkukosteutta eli noin 30 %:ssa. Kesän aikana tuhkat ovat kuivuneet hieman, mutta syksyn ja talven tullessa kosteudet ovat taas nousseet. Suojaamattomissa säkeissä kosteudet ovat poikkeuksetta lähteneet nousuun jossain vaiheessa kesää. Kaikki ovat joulukuuhun mennessä päätyneet yli 40 %:n kosteuteen ja toinen rinnakkaissäkeistä on tutkimuksen aikana ollut yli 60 %:n kosteudessa. Vesipitoisuudet ovat tästä vielä kasvaneet helmikuuhun asti. Nämä seikat korostuvat huhtikuun säkeissä, kun taas elokuun säkeissä ei ole aivan yhtä dramaattisia nousuja kosteusprosentteissa. Helmikuun mittaukseen mennessä ovat kuitenkin elokuunkin säkit imeneet kosteutta selvästi lisää. Suojattuna varastointi on joka tapauksessa olosuhteiltaan kaiken kaikkiaan tasalaatuisempi kuin taivasalla varastointi.

### 10.3 Sään vaikutus

Vuodenaikojen ja sään vaikutus nähtiin jo säkitysten yhteydessä. Lämpötilojen vuorokausikeskiarvot olivat huhtikuun lopulla alle 5 °C ja elokuun loppupuolella noin 15 °C. Huhtikuun kosteissa keleissä tuhkan vesipitoisuudet olivat luokkaa 30 %, kun taas elokuun lämpimässä ja kuivassa säässä vesipitoisuudet olivat noin 10 prosenttiyksikköä alemmat. Alkukosteus on mahdollista säilyttää suojatuisissa säkeissä samalla tasolla tai lähellä sitä, joten säkityksen aikaisilla olosuhteilla on merkitystä.

Suurimmat sademäärät koettiin kesäkuussa, jolloin kuukauden sademäärä oli 148 mm. Heinäkuussa ja elokuussa sademäärät jäivät siitä kolmannekseen, mikä korkean lämpötilan kanssa näkyi suojatuisissa säkeissä kuivumisena. Suojaamattomat tuhkasäkit eivät kuivuneet, vaan pikemminkin kostuivat. Suojaamaton säkki kerää kosteutta varsin hyvin, mutta ei juuri anna sitä pois.

Kovien tuulien ja myrskyjen aikana suojauksen on oltava erittäin tukevasti paikoillaan. Tutkimuksen aikana todettiin, että jos tuuli pääsee puhaltamaan hiemankin suojapeitteen alle, niin vähitellen painot ja peite lähtevät paikoiltaan. Tämä koskee enemmänkin yksityishenkilöitä, jos säkkejä säilytetään esimerkiksi metsässä lannoitusta odottamassa. Jos säkitystä tehdään suuremmassa mittakaavassa, niin varastointivaihtoehdoksi voi tulla esimerkiksi pressuhalli.

Marraskuussa ja erityisesti joulukuussa olivat sademäärät selvästi pitkän aikavälin keskiarvon yläpuolella. Tämä näkyi etenkin huhtikuun suojaamattomissa säkeissä, jotka jatkoivat kastumistaan. Myös elokuun säkkien marraskuun mittausta edelsivät varsin sateiset päivät, mikä näkyi korkeina kosteusprosentteina. Joulukuun mittausta vaikeutti edeltävien viikkojen runsaat vesisateet, jotka mittauspäiväksi jäädyttivät säkit koviksi. Kahden viimeisen mittauksen välissä satoi myös paljon ja se näkyi helmikuun vesipitoisuuksissa.

Tuhkan kovettumisen kannalta on tärkeää, että ilman lämpötila on yli 0 celsiusastetta. Itsekovetus onnistuu talvellakin (< 0 °C), koska reaktio tuottaa lämpöä, mutta kovettuminen hidastuu ja pysähtyy nopeammin kuin lämpimällä säällä. Tämän

tutkimuksen aikana ensimmäinen ja yksittäinen pakkaspäivä oli marraskuun puolivälin jälkeen, seuraavat vasta joulukuun alussa. Talviset säät alkoivat toden teolla vasta vuoden 2014 puolella, kun vuorokausikeskiarvot laskivat -10 celsiusasteen paikkeille. Viimeisessä näytteenotossa jäisten tuhkasäkkien kanssa saatiinkin tehdä töitä, että tuhkaa saatiin mittauksiin. Sama ilmeni levityskokeissa säkkien ollessa jäisiä kuutioita.

#### **10.4 Vesipitoisuuden vaikutus**

Huhtikuun säkeissä korkean vesipitoisuuden vaikutus tuhkan rakeistumiseen näkyi mielestäni selkeästi, etenkin suojaamattomissa säkeissä. Samalla korkea vesipitoisuus nostaa tuhkan painoa huomattavasti. Lisäksi korkean tai korkeimman alkukosteuden omanneet säkit ovat nousseet absoluuttisesti suurimpiin vesipitoisuuksiin. Huhtikuun säkeillä alimmat kosteusprosentit olivat heinäkuussa ja korkeimmat joului- tai helmikuussa. Elokuun säkeillä taas alimmat kosteusprosentit olivat joulukuussa ja korkeimmat helmikuussa.

Alkukosteus on kaikissa suojaamattomissa huhtikuun säkeissä ollut noin 30 % ja kaikissa on vesipitoisuus käynyt vähintään 60–80 %:ssa. Suojatuissa kosteus on pysynyt enimmäkseen 25–35 %:ssa. Elokuun suojaamattomissa on suora yhteys alkukosteuden ja kosteuspiikin välillä. Erot ovat kuitenkin niin pieniä, että pidemmälle meneviä johtopäätöksiä ei voi vetää. Elokuun suojatuisissa säkeissä korkeimman alkukosteuden omanneen tuhkan vesipitoisuus on noussut selvästi korkeimmalle.

## 11 KOKONAISVERTAILU

Tässä luvussa on käyty läpi eri tuhkavaihtoehtojen rajausta ja hyviä vaihtoehtoja jatkoa ajatellen. Samalla pohditaan millä tavalla säkitys ja varastointi on parasta suorittaa. Lisäksi on käyty läpi yleisiä opinnäytetyön aikana ilmenneitä tuloksia ja asioita sekä kuljetuskustannuksia.

### 11.1 Vaihtoehtojen rajaus

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin yhteensä 16 erilaista tuhkavaihtoehtoa. Vaihtoehtojen rajaamisen tavoitteena on karsia heikoimmat tuhkalaadut pois ajatellen tulevaisuutta ja mahdollisia jatkotoimia. Samalla voidaan keskittyä oleellisimpaan tietoon niin opinnäytetyön kuin Metsä Groupin kannalta.

Suuren vesipitoisuuden ja levitysongelmien vuoksi voidaan rajata pois suojaamattomat säkit. Säkeissä tapahtuu liikaa muutoksia, jos esimerkiksi kosteusprosentti kaksinkertaistuu yli 50 %:iin varastoinnin aikana. Samalla raekokojakauma muuttuu ja tuhkan paino kasvaa merkittävästi. Veden jäätyessä talvella tuhkasta tulee käytännössä levityskelvotonta suuremmassa mittakaavassa operoitaessa.

Yleisesti hyvänä kosteutena on aiemmin (v. 2003) pidetty noin 30–35 % /9/. Nykyisin tavoitekosteus on kuitenkin alentunut noin 20 %:iin, koska turhaa kostutusta pyritään välttämään /15/. Jos sopivana kosteutena pidetään hieman alempaa, noin 20–30 %:n kosteutta, asettuvat tähän luokkaan kosteusprosentin keskiarvoltaan suojatut säkit: 1, 2, 5, 17, 18, 21, 22, 26, 29, 30. Lähes kaikki huhtikuun säkityksen tuhkat ovat jo alkukosteudesta lähtien olleet yli 30 %:ssa, kun taas elokuun tuhkat ovat alkujaan olleet runsaassa 20 %:ssa. Huhtikuun tuhkia ei silti ole kostutettu enemmän, vaan sää vaikuttaa olennaisesti kosteuksiin. Varsinkin suojatuissa säkeissä alkukosteudella on merkitystä, koska yleisesti ottaen tuhkat ovat pysyneet samassa kosteudessa tai hieman kuivahtaneet suojattuna. Helmikuun mittauksessa elokuun suojatut säkit olivat saaneet kosteutta osakseen nostoen selvästi vesipitoisuuksia, ainakin säkin pinnassa. Tällä mittauksella säkeissä oli myös paljon jäähilettä, joka voi hieman vääristää tuloksia. Huolimatta huhtikuun suojattu-

jen säkkien hieman korkeammasta vesipitoisuudesta, ovat ne mielestäni käyttäytyneet erittäin positiivisesti kosteuden tasaisuuden suhteen.

Uusi lämpöä hohkava tuhka on myös kyseenalainen vaihtoehto säkitykseen. Elokuun säkeissä on erittäin paljon hienoainesta, jopa 70 % ( $\leq 1$  mm). Huhtikuun uudessa kuumassa tuhkassa on rakeistumista tapahtunut selvästi enemmän, mutta samalla vesipitoisuus on noussut lähelle 40:tä prosenttia, mikä on kaksinkertainen verrattuna elokuun suojattuihin säkkeihin joulukuussa. Kuiva kesällä säkitetty uusi tuhka ei ole juuri rakeistunut, mikä näkyi levityskokeissa kuitenkin positiivisesti. Suuri määrä hienoa ainesta levisi sopivasti noin puoleen väliin 21 metrin ajouravälillä, jolloin levitystasaisuus koko leveydellä on hyvä. Uuden tuhkan rakeistuminen on kuitenkin ollut heikkoa, mikä voi jättää tuhkan helposti liukenevaksi ja hyvin reaktiiviseksi levitystä ja sen vaikutuksia ajatellen.

## 11.2 Parhaat vaihtoehdot jatkoa ajatellen

Vanha tuhka on käyttäytynyt aika lailla odotusten mukaisesti. Etenkin huhtikuun suojatuissa säkeissä muutokset ovat olleet vähäisiä, mikä edesauttaisi lainsäädännön ehtojen mukaista toimintaa, joiden mukaan tuhkan koostumus ei saa muuttua varastoinnin aikana. Tämä on mielestäni kaikista turvallisista vaihtoehdoista. Lisäksi rakeisuuden pysyminen hyvin pitkälti samanlaisena varastoinnin aikana antaa paremman tiedon levitettävyydestä. Vanhan tuhkan levitystulokset olivat erittäin hyviä. Elokuun säkeissä taas on paljon suuria paakkuja, mikä vaatisi seulakauhan käsittelyä levitettävyyden kannalta. Säkistä tullessaan tuhkan tulee olla käytännössä valmista levitettäväksi. Jos tuhkaa joudutaan murskaamaan kauhalla levitystä varten, ei tuhka kelpaa suuren mittakaavan käyttöön. Elokuun tuhkien etuna on luontaisesti alhaisempi kosteus, mikä näkyy mm. kuljetuskustannuksissa. Toki, jos säkitystä edeltäisivät rankat sadepäivät, niin tämä etu menetetään.

Eri vesimäärillä kostutetut tuhkalaadut tai ns. tuoreet tuhkat (1–2 viikkoa vanhat) ovat mielestäni toinen kelvollinen vaihtoehto. Kasa 26:ssa ja kasa 21:ssä ovat hienoaineksen osuudet vähentyneet 5–10 prosenttiyksikköä. Kasa 26:n säkissä on kuivempaa tuhkaa ja raekokojakauma painottunut tasaisemmin suurempiin rakeisiin kuin kasa 21:ssä. Myös kuivan tuhkan säkeissä on hienoainesta laskussa. Kos-

tea on näistä vaihtoehtoista heikoin, koska sen rakeisuus tuntuu muuttuneen enemmänkin pienempään päin ja se on raskaampaa. Elokuun tuhkista täytyy muistaa myös jättiläisrakeet (kuvio 12), joita löytyy kummastakin tuhkalaadusta. Levityskokeissa kaikki saivat melko hyvän tuloksen 21 metrin ajouravälillä. Elokuun tuhkien vaatima hienonnus on silti vankka peruste huhtikuun tuhkien paremmuudelle. Säkitystä edeltävä seulakauhakäsittely vähentäisi paakkujen mukanaoloa ja edistäisi levitettävyyttä.



**Kuvio 12.** Kuivan tuhkan (säkki 22) jättiläisrakeita marraskuun mittauksessa.

Eri lailla kosteutettujen tuoreiden tuhkien vesipitoisuus on pysynyt mielestäni erittäin hyvin alkukosteuden lähellä, eikä pieni kuivahtaminen haitanne suojatuisissa säkeissä. Elokuun suojatuisissa säkeissä pienen varjon langettavat kosteusmuutokset joulukuun ja helmikuun välillä. Muutokset eri lailla kostutetuissa tuhkissa ovat olleet loppujen lopuksi varsin pieniä ja enimmäkseen positiiviseen suuntaan, mikä tässä tarkoittaa suurempaa raetta. Hienoa jaetta on kuitenkin lähes aina 40–50 % tuhkasta.

Vanha tuhka on periaatteessa jo päätenyt lopulliseen muotoonsa, eikä suuria muutoksia rakeisuudessa enää pitäisi tapahtua. On todennäköisempää, että tuoreiden tuhkien rakeistuminen ja reaktiot eivät pääse tai ehdi tapahtumaan niin hyvin kuin vanhassa tuhkassa. Tämä korostuu pakkaskeleillä, sillä veden lisäyksen jälkeisellä varastointilämpötilalla on merkitystä kovettumiseen. Kun varastointilämpötila on yli 0 °C, tuhka kovettuu ja kovettuminen on sitä nopeampaa mitä korkeampi läm-

pötila on. Pakkasessa tuhkan kovettumista ei tapahdu tai se on hyvin hidasta. Kovettumisreaktio itsessään on kuitenkin eksoterminen, siinä vapautuu lämpöä, joten itsekovetus onnistuu myös talvella. Talvella kovettumisprosessia kuitenkin hidastaa, tai sen pysäyttää, alhainen varastointilämpötila /4/. Tuloksena saattaa olla tuhkaa, jossa on paljon reaktiivisia yhdisteitä ja liian korkea pH-arvo. Tuhkaa levitettäessä tämä voi aiheuttaa shokkivaikutuksia kasvustolle /29/.

Kesällä tuhka kuivuu luonnostaan enemmän kuin keväällä, ja säkkeihin saadaan kuivempaa, noin 20 %:sta, tuhkaa varsinkin, jos säkitysajankohtaa mukautetaan edes hieman vallitsevan sään mukaan. Elokuusiin tuhkiin tuli kuitenkin suuria paakkuja. Varsinaista syytä on vaikea sanoa ja se on todennäköisesti useamman tekijän summa. Korkea lämpötila on liitetty rakeistumisen voimakkuuteen, joten se on yksi todennäköisimmistä syistä suurien rakeiden muodostumiseen. Lisäksi itsekovetus reaktiona sitoo vettä, mikä osaltaan voi näkyä alenevana kosteusprosentina. Paakkujen tulo säkkiin voidaan silti estää ajamalla tuhka seulakauhan läpi joko omaksi kasakseen tai suoraan säkkiin, mikäli käytössä on säkitysteline.

Varminta olisi siis valmistaa itsekovetustuhkaa tuhkaa silloin, kun lämpötilat eivät laske nollan alapuolelle. Näin rakeistuminen ja reaktiot ovat todennäköisemmin edenneet halutulla tavalla /4/. Vajavaiset kemialliset reaktiot eivät muuta tuhkan pH-arvoa halutulla tavalla, mikä voi lannoitettaessa johtaa vahinkoihin kasvillisuudessa /29/. Tuoreiden tuhkien säkitys, varsinkin talvella, jättää mahdollisuuden sille, että ainakin osassa tuhkaa ovat reaktiot jääneet tapahtumatta tai jääneet vajaksi.

Säkitetyn tuhkan kanssa on pelätty sitä, että siitä tulee ns. arpakuutio talviolosuhteissa. Mittauksissa pakkasia koettiin joulukuun 9. päivä ja helmikuun 3. päivä, jolloin tuhkien pintakerrokset olivat selvästi jäässä. Joulukuussa pinnan alla oli kuitenkin pehmeääkin tuhkaa, kunhan siihen pääsi käsiksi. Helmikuussa varsinkin suojaamattomat säkit olivat jo erittäin jäisiä. Jäätymisen riskiä lisää suuri kosteus, joka antaa lisäperusteita säkkien suojaukselle. Levityskokeissa paljastui suojaamattomien säkkien todellinen tilanne, eikä se jättänyt arvailulle sijaa. Etenkin huhtikuun suojaamattomat säkit olivat jäisiä kuutioita.



### 11.3 Säkitys jatkossa ja millä tavalla

Tuhkan säkitys onnistuu kaivinkoneella, jossa on mieluiten kapea kauha. Säkkien kuljettamiseen taas tarvitaan trukkiipiikit. Kahden työkoneen lisäksi tällainen säkitystapa vaatii vähintään yhden henkilön työskentelemään säkin kanssa täytettäessä. Ilman harjoittelua tai aiempaa kokemusta täytettiin molemmilla säkityskerroilla tällä tyyllillä 16 säkkiä 3–4 tunnissa. Rutinoitumisella päästään varmasti suurempiin säkkimääriin samassa ajassa.

Säkitystelineen avulla työ helpottuisi ja nopeutuisi. Suppilon kautta täytettäessä tuhka menisi sulavasti säkkiin ja samalla voitaisiin käyttää seulakauhaa. Säkin kulmissa olevien nostolenkkien avulla säkki pysyisi asennossaan ja voitaisiin täyttää haluttuun määrään. Telineen tulisi kuitenkin olla erittäin tukeva ja kestää noin 1 000 kg tuhkasäkin paino.

Säkitystä on mahdollista jatkaa samaankin tyyliin kuin tässä tutkimuksessa tai investoimalla säkitystelineeseen. Teline olisi monipuolisempi ja helppokäyttöisempi tapa. Kummallakin menetelmällä säkitys kuitenkin onnistuu.

### 11.4 Kuljetuskustannukset

Kuljetuskustannusten suhteen merkittävin tekijä on tuhkan tilavuuspaino. Käsiteltyyn tuhkaan on sitoutunut vettä, joten se on tiivistä ja kuutiopaino nousee helposti yli 1 000 kg:n. Technobothnialla mitattiin muun työn ohella myös kuivan tuhkan tilavuuspaino. Kymmenen mittauksen keskiarvoksi saatiin 787 g/l. Kirjallisuusarvo itsekovetustuhkan tilavuuspainolle vaihtelee 783 kg/m<sup>3</sup> (/10/), 698–900 kg/m<sup>3</sup> (/8/), mikä asettuu samaan luokkaan Technobothnian mittauksen kanssa.

Yhdessä säkissä on kostutettua tuhkaa noin 800–1 000 kg. Normaaliin lannoitusmäärään (4 000 kg/ha) tarvitaan siten hehtaaria kohden 4–6 säkkiä tuhkaa. Kuivan tuhkan tilavuuspaino on luokkaa 800 kg/m<sup>3</sup>. Taulukossa 17 on vertailtu eri vesipitoisuuksien vaikutusta tuhkan painoon. Mittausten perusteella mielenkiintoisimpia tarkastelun kohteita on esimerkiksi 30 %:n ja 60 %:n kosteuksien vertailu. Tässä tapauksessa 1 000 kg:n säkissä painoeroa tulee 240 kg, mikä hehtaarin pinta-alalla

tekisi levityssuosituksen mukaisella tuhka-annoksella 960 kg painoeron. Kymmenen hehtaarin levitysalueella tästä seuraa jo lähes 10 t enemmän kuormapainoa.

**Taulukko 17.** Tuhkan tilavuuspaino eri vesipitoisuuksilla.

Tilavuuspaino kuivana kg / l	Kosteus- prosentti	Tuhkaa / kg		
		1	100	1000
0,8	10	0,88	88	880
0,8	15	0,92	92	920
0,8	20	0,96	96	960
0,8	25	1,00	100	1000
0,8	30	1,04	104	1040
0,8	35	1,08	108	1080
0,8	40	1,12	112	1120
0,8	45	1,16	116	1160
0,8	50	1,20	120	1200
0,8	55	1,24	124	1240
0,8	60	1,28	128	1280
0,8	65	1,32	132	1320

### 11.5 Muita huomioita ja havaintoja

Elokuun suojatut säkit homehtuivat hieman varastoinnin aikana. Syynä on todennäköisesti heikko ilmanvaihto ja kosteus. Uudemmat säkit asetettiin lähemmin toisiinsa ja suojattiin jonkin verran tiiviimmin, mikä myös pahentanee asiaa. Tutkimuksen kannalta tällä ei kuitenkaan ollut merkitystä.

## 12 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin itsekovettuvan tuhkan säkitystä ja käyttöä lannoitteena metsätaloudessa. Työssä oli tarkoituksena tutkia miten tuhkan säkitys, erilaiset varastointitavat ja sääolot vaikuttavat tuhkan rakeistumiseen, vesipitoisuuteen ja lopulta levitettävyyteen. Lähtökohtana oli säkitetyn tuhkan parempi tuoteistettavuus asiakkaan näkökulmasta.

Itsekovettuvan tuhkan säkitys suoritettiin tässä opinnäytetyössä kaivinkoneen ja pyöräkuormaajan avulla, siten että säkkiä pidettiin trukkipiikeillä ilmassa. Tällä tavalla saatiin säkitettyä 16 säkkiä 3–4 tunnissa. Rutiinilla säkkejä saataisiin huomattavasti enemmän samallakin tekniikalla, mutta jos toimintaa halutaan todella nopeuttaa ja kehittää, olisi säkitysteline hyvä vaihtoehto. Säkitystelineessä pitäisi olla seulakauhalle tarpeeksi iso täyttösuppilo, jonka alle säkki saataisiin nostolenkeistä roikkumaan. Telineellä säkitys nopeutuisi ja helpottuisi, sekä olisi mahdollista käyttää seulakauhaa tässä vaiheessa.

Säkitettävän tuhkan osalta parhaaksi vaihtoehdoksi muodostui mielestäni vanha tuhka. Se on ennustettavuudeltaan paras, sillä tuhkan rakeistuminen ja reaktiivisuus ovat todennäköisimmin ehtineet jo halutulle tasolle. Raekokojakauman pysyessä samanlaisena myöskään levitettävyydessä ei pitäisi tulla muutoksia, mikä takaa paremman ennustettavuuden. Eri vesimäärillä kostutettujen tuoreiden tuhkien (kasa 26, kasa 21, kuiva ja kostea) osalta on pieni varaus niiden rakeistumisen ja siten reaktiivisuuden suhteen. Kaikissa paitsi kosteassa tuhkassa on raekokojakauma varastoinnin aikana muuttunut 5–10 prosenttiyksikköä hienoaineksesta kohti suurempaa rautaa.

Säkityksen aikaisella lämpötilalla eli toisin sanoen varastointilämpötilalla on merkitystä kovettumiseen. Kun varastointilämpötila on yli 0 °C, tuhka kovettuu ja kovettuminen on sitä nopeampaa mitä korkeampi lämpötila on. Pakkasessa tuhkan kovettumista ei tapahdu tai se on hyvin hidasta. Kovettumisreaktio itsessään on kuitenkin eksoterminen, siinä vapautuu lämpöä, joten itsekovetus onnistuu myös talvella. Talvella kovettumisprosessia kuitenkin hidastaa, tai sen pysäyttää, alhainen varastointilämpötila /4/. Tuloksena saattaa olla tuhkaa, jossa on paljon reak-

tiivisia yhdisteitä ja liian korkea pH-arvo. Tuhkaa levitettäessä tämä voi aiheuttaa shokkivaikutuksia kasvustolle /29/.

Varastoinnin aikana säkit on ehdottomasti suojattava. Teollisessa mittakaavassa suojaus voidaan toteuttaa mm. pressuhallin avulla ja yksityisesti esimerkiksi kevytpeitteillä. Suojaus estää vesipitoisuuden suuret nousut. Osassa koesäkeistä kosteusprosentti kaksinkertaistui varastoinnin aikana. Kosteuden muutokset aiheuttivat myös tuhkan rakeisuudessa muutoksia, mikä vaikuttaa levitettävyyteen.

Toisena vaihtoehtona on suojata kasavarastoitua tuhkaa ja siten varmistaa, ettei vesipitoisuus kohoja liian korkeaksi. Tässä tutkimuksessa pressulla suojattu kuiva tuhkalaatu säilyi sateiden aikana lähes 10 prosenttiyksikköä kuivempuna kuin tavalla ollut kostea tuhkalaatu. Kasavarastoidun tuhkan suojaus vaatisi lisäjärjestelyjä. Periaatteessa vanhaa kasavarastoitua tuhkaa pitäisi olla valmiina tilauksia varten, mieluiten noin 20–35 %:n kosteudessa. Tämä taas edellyttäisi tuhkan suojausta, kun se on kuivaa eli viimeistään loppukesän ja alkusyksyn aikana. Vaihtoehtoisesti tuhkaa voitaisiin tuoda suojaukseen kuivumaan hyvissä ajoin, ennen normaalia levitysajankohtaa.

Käytännössä kasavarastoidun tuhkan suojaus vaatisi ison varaston tai katoksen, jotta kuiva vanha tuhka ei heti ensimmäisten tilausten tullessa loppuisi kesken. Täydennystä voitaisiin tehdä tuoreilla, muutamia viikkoja vanhoilla, tuhkillä, jotka olivat toiseksi paras vaihtoehto tutkimuksen perusteella. Toisaalta pienialaisessakin suojatussa varastoinnissa tuhkaa voitaisiin tuoda kuivumaan suojaan aina kun mahdollista ja sen jälkeen säkittää. Valmiit säkit pitää kuitenkin varastoida suojattuna. Varastoa voisi käyttää molempiin tarkoituksiin, ensin kasavarastoidun tuhkan suojaamiseen kosteudelta ja säkityksen jälkeiseen valmiiden säkkien varastointiin. Varastoinnissa olisi huomioitava kuivemman tuhkan pölyävyys ja paloturvallisuusasiat, etenkin jos suoraan siilosta tulevaa kuumaa tuhkaa tuotaisiin varastoon. Periaatteessa vanhan kasavarastoidun tuhkan käsittely seulakauhalla ja säkitys lähellä levitysajankohtaa, takaisi varmasti hyvän levitettävyyden ja tiedon tuhkan ominaisuuksista. Nykyiset puitteet huomioiden tuhkaa pitäisi kuitenkin säkittää silloin, kun sen kosteusprosentti on 20–35 %:n luokkaa.

Tuhkien levitettävyydessä tärkeää on, että tuhka on säkistä tullessaan levitysvalmista. Jos tuhkaa joudutaan murskaamaan ja hienontamaan kauan, ei se käytännössä kelpaa suuremman mittakaavan levitystyöhön. Murskaaminen vie aikaa ja tuhkaan voi silti jäädä varsin suuria paakkuja. Näin levityksestä tulee haastavampaa ja levitystasaisuus kärsii.

Parhaan levitystuloksen 21 metrin ajouravälillä sai huhtikuun vanha tuhka. Levitettävyydessä eri kosteat tuoreet tuhkat eivät juuri olleet vanhaa tuhkaa huonompia, vaan niilläkin saatiin lannoitusosuuden rajoihin melko hyvin asettuvat tulokset. Levitystulosten perusteella ei syntynyt suuria eroja eri kosteidenkaan tuhkien välillä. Voisi sanoa, että kaikilla on mahdollista päästä lannoitusosuuden mukaiseen tuhka-annokseen 21 metrin ajouravälillä. Tuhkien leviämistavassa on kuitenkin selviä eroja, koska kuivemmat tuhkat leviävät mm. tuulen mukana. Hienoaines taas jää ajouran lähistöön, mutta painottuu voimakkaasti toiselle puolelle, mikäli hienoaines on kuivaa ja tuulee. Elokuun tuhkien suurten paakkujen arviointi levityksessä on kuitenkin hankalaa. Yhtenä indikaattorina hyvälle levitystulokselle oli tasainen raekokojakauma. Toisaalta, jos levitys yltää hyvin noin 10 metriin asti, on levitystulos tasainen 21 metrin ajouravälillä. Yleisesti ottaen hienoainesta oli kaikissa tuhkissa melko samat määrät ja se leviää lähelle ajouraa. Poikkeuksellisen suuret määrät hienoainesta oli elokuun uudessa tuhkassa. Silti senkin levitystulos asettui 3–5 t/ha välille.

Näin ollen en näe syytä muuttaa tuhkan kostutusta sen tullessa siilosta. Levityksen suhteen ei erityisen merkittäviä eroja tullut ja tuhkan tavoitekosteus on melko alhainen (20–25 %), joten mielestäni nyky menetelmässä on järkevä pysyä. Alhainen kosteus korostuu myös kuljetuskustannuksissa, sillä 1 000 kg:n säkissä 20 %:n ja 40 %:n kosteuksien ero on jo 160 kg. Lannoitusosuuden mukaisella 4 t/ha tuhka-annoksella hehtaarin pinta-alalla painoeroksi tulee siten 640 kg. Pinta-alan kasvaessa 10 hehtaariin, on painoero jo 6 400 kg. Alhaisesta tavoitekosteudesta huolimatta kosteusprosentit elävät joka tapauksessa, jos tuhka varastoidaan taitavasalla. Silloin säkitettävän tuhkan kosteuteen voidaan vaikuttaa vuodenajan ja säänkin avulla.

Ottaen huomioon tuhkalannoitteiden lainsäädännön ja sen mukaisen tuhkan koostumuksen pysyvyyden, turvallisin vaihtoehto säkitykseen on vanha tuhka. Periaatteessa tuhkan kovettuminen kestää muutamia viikkoja tai kuukausia, riippuen kovettumiseen vaikuttavista tekijöistä: kalsiumoksidipitoisuus, tuhkan kemiallinen koostumus, partikkelikoko, vesi/kiinteäfaasi-olosuhteet ja lämpötila. Tässäkin opinnäytetyössä käytetty noin puoli vuotta vanha tuhka on ollut jo riittävän kauan kovettumassa, jotta sen rakeisuudessa ei tapahdu enää suuria muutoksia. Raekokojakauman ja vesipitoisuuden muuttumattomuus takaa myös levitettävyyden ennustettavuuden ja pysymisen samankaltaisena.

## LÄHTEET

- /1/ Harjula, J. 2013. Alueympäristöpäällikkö. Metsä Board. Haastattelut 23.10.2013 ja 19.2.2014.
- /2/ Heikkinen, M. 2014. Metsäteollisuuden tuhkien hyötykäyttö. Metsäteollisuus ry. Sähköposti maija.heikkinen@forestindustries.fi. Viitattu 20.1.2014.
- /3/ Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. Vammalan kirjapaino Oy. Metsäntutkimuslaitos. Viitattu 14.10.2013. Saatavissa <http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-951-40-2371-2/tuhkan-kaytto-metsalannoitteena.pdf>
- /4/ Isännäinen, S. Huotari, H. & Mursunen, H. 1997. Metsätehon raportti 030. Lentotuhkan itsekovetus. Viitattu 23.10.2013.
- /5/ Kalkki. 2013. Wikipedia. Viitattu 5.3.2014. <http://fi.wikipedia.org/wiki/kalkki>
- /6/ Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. 2013. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20.3.2013 VNS 2/2013. Työ- ja elinkeinoministeriö. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 8/2013. Viitattu 14.10.2013. [http://www.motiva.fi/files/7315/Kansallinen\\_energia-\\_ja\\_ilmastostrategia\\_Valtioneuvoston\\_selonteko\\_eduskunnalle\\_20.3.2013.pdf](http://www.motiva.fi/files/7315/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_Valtioneuvoston_selonteko_eduskunnalle_20.3.2013.pdf)
- /7/ Kansallinen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. 2013. Viitattu 24.10.2013. [http://www.evira.fi/files/attachments/fi/kasvit/lannoitevalmisteet/raportit/kansallinen\\_lannoitevalmisteiden\\_tyyppinimiluettelo\\_id316528.pdf](http://www.evira.fi/files/attachments/fi/kasvit/lannoitevalmisteet/raportit/kansallinen_lannoitevalmisteiden_tyyppinimiluettelo_id316528.pdf)
- /8/ Korpilahti, A.2004. Puu- ja turvetuhkan analysointi ja analyysi-tuloksia. Metsätehon raportti 172. Viitattu 28.10.2013
- /9/ Korpilahti, A. 2003. Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. Metsätehon raportti 143. Viitattu 23.10.2013
- /10/ Korpilahti, A.2004. Tuhkan kuljetus ja levitys metsään. Metsätehon raportti 173. Viitattu 28.10.2013
- /11/ Kurri, A-K. 2013. Analyysipalvelupäällikkö, kemisti. Eurofins Scientific Finland Oy. Kalsiumoksidianalyysin menetelmäkuvaus. Sähköposti 6.11.2013. Viitattu 12.11.2013
- /12/ L 17.12.2010/1126. Jäteverolaki. Säädos säädöstietopankki Finlexin sivuilla. Viitattu 14.10.2013. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101126>

- /13/ L 29.6.2006/539. Lannoitevalmistelaki. Säädos säädöstietopankki Finlexin sivuilla. Viitattu 24.10.2013. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060539>
- /14/ Lahti, M. 2009. Arseenin ja lyijyn määritys fruktoosista ja ksylitolista ICP-OES-tekniikalla – menetelmän optimointi ja validointi. Sivut 2–3. Opin näytetyö Metropolia. Viitattu 12.11.2013. [http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2277/Opinnaytetyo\\_Maiju\\_Lahti.pdf?sequence=1](http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2277/Opinnaytetyo_Maiju_Lahti.pdf?sequence=1)
- /15/ Lehtovaara, O. 2014. Kehitysinsinööri. Metsä Group, kestävä kehitys ja edunvalvonta. Haastattelu 2.1.2014. Viitattu 6.1.2014.
- /16/ Länsi-Suomen ympäristölupavirasto. 2004. Lupapäätös 76/2004/1. M-real Oyj:n kemihierretehtaan ympäristölupahakemus, Kaskinen. Viitattu 23.10.2013.
- /17/ Maa- ja metsätalousministeriö. 2011. Kansallinen metsäohjelma 2015. Metsäalasta biotalouden vastuullinen edelläkävijä. Valtioneuvoston periaatepäätös 16.12.2010. Viitattu 19.10.2013. [http://www.mmm.fi/attachments/metsat/kmo/5ywLDJ2Uy/Kansallinen\\_metsaohjelma\\_2015\\_Valtioneuvoston\\_periaatepaatos\\_16.12.2010.pdf](http://www.mmm.fi/attachments/metsat/kmo/5ywLDJ2Uy/Kansallinen_metsaohjelma_2015_Valtioneuvoston_periaatepaatos_16.12.2010.pdf)
- /18/ Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 24/11. Viitattu 24.10.2013.
- /19/ Makkonen, T. (toim.), Hynönen, T., Moilanen, M., Äijälä, O., Häggman, B. 2008. Tuhkalannoitus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Porvoo: Painotalo tt-urex Oy. Viitattu 14.10.2013. [http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Metsatietostandardi/tuhkalannoitusopas\\_fin.pdf](http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Metsatietostandardi/tuhkalannoitusopas_fin.pdf)
- /20/ Metsä Boardin esittely. 2014. Metsä Groupin liiketoiminta-alueet. Viitattu 6.1.2014. <http://www.metsagroup.fi/liiketoimintaalueet/Pages/Metsaboard.aspx>
- /21/ Metsä Groupin historia. 2013. Metsä Groupin verkkosivut. Viitattu 14.10.2013. <http://www.metsagroup.fi/Metsagroup/historia/Pages/Default.aspx>
- /22/ Metsä Groupin konsernin rakenne ja omistus. 2013. Metsä Groupin verkkosivut. Viitattu 14.10.2013. <http://www.metsagroup.fi/Metsagroup/rakennejaomistus/Pages/Default.aspx>
- /23/ Metsäliitto Osuuskunnan esittely. 2013. Metsäliitto Osuuskunnan verkkosivut. Viitattu 14.10.2013. <http://www.metsaforest.fi/Osuuskunta/Pages/Default.aspx>



- /24/ Metsätilastollinen vuosikirja 2011. 2011. Metsäntutkimuslaitos. Vammalan kirjapaino Oy. Sivut 120–121. Viitattu 19.10.2013.  
[http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2011/vsk11\\_03.pdf](http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2011/vsk11_03.pdf)
- /25/ Metsätilastollinen vuosikirja 2013. 2013. Metsäntutkimuslaitos. Vammalan kirjapaino Oy. Sivut 104–105. Viitattu 13.1.2014. [http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2011/vsk11\\_03.pdf](http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2011/vsk11_03.pdf)
- /26/ M-real Oyj Kaskinen, kuorituhkan lannoitevalmistelain mukainen toiminnanharjoittajan omavalvontasuunnitelma. 2011. Viitattu 14.10.2013.
- /27/ M-real Oyj:n Kaskisten tehtaiden kuorituhkan tuotantoprosessi. 2011. Viitattu 14.10.2013.
- /28/ Pulp mill Metsä Board Kaskinen. 2014. Metsä Board web page. Viitattu 6.1.2014. <http://www.metsaboard.com/company/productionunits/kaskinen/Pages/Default.aspx>
- /29/ Rasmusson, H. Sarenbo, S. & Claesson, T. 2013. The Open Waste Management Journal. Ash Products and Their Economic Profitability. Viitattu 15.1.2014. <http://benthamscience.com/open/townmj/articles/V006/1TOWMJ.pdf>
- /30/ Tuhkan käyttö metsälannoitevalmisteenä. 2006. EU-Life -ohjelman RecAsh -hanke. Viitattu 21.10.2013.
- /31/ Österbacka, J. 2001. Esikäsittelyn vaikutuksesta puu- ja turvetuhkien ominaisuuksiin ja ravinteiden liukenemiseen. Metsätehon raportti 109. Viitattu 30.10.2013.

# LIITE 1 Esimerkki rakeisuuskäyrästä

1(1)

TUTKIMUSYHTEENVETO			
Tie- ja geotekniikan laboratorio			12.02.2014
<b>Näyte:</b>	Säkki 2	Vanha tuhka (n. 6 kk)	
<b>Näytteenottopvm:</b>	11.09.2013	Suojattu	
<b>Näyte</b>			
		<b>Seula Ø</b>	<b>Seulalle jäi</b>
<b>#</b>			<b>g</b>
			<b>%</b>
90	100	90	0
63	100	63	0
45	100	45	0
31,5	96	31,5	57
22,4	96	22,4	0
16	93	16	31
11,2	88	11,2	67
8	82	8	72
5,6	75	5,6	93
4	69	4	82
2	61	2	106
1	54	1	81
0,5	48	0,5	87
0,25	35	0,25	156
0,125	24	0,125	147
0,063	17	0,063	91
		Pohja+pt	218
		Yht.	1288
			100
<b>Pohjan ja pesutappion osuus näytteestä % 17</b>			<b>Kosteusprosentit:</b>
<b>Raekokojakauma:</b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	
	≤ 1	54	Mittaus 1. - 26.4.2013 32,9 %
	1 < x ≤ 5,6	21	Mittaus 2. - 27.5.2013 31,4 %
	5,6 < x ≤ 22,4	20	Mittaus 3. - 25.6.2013 27,2 %
	22,4 <	4	Mittaus 4. - 29.7.2013 20,4 %
			Mittaus 5. - 11.9.2013 31,0 %
	<0,25	35	
	Seulat 8-45	18	
<b>Raekoko d50 mm:</b>	<b>0,6</b>		Keskiarvo 28,6 %
			Keskihajonta 5,03
			Kost. %:n vaihteluväli 12,5 %

Huhtikuun säkitys	Säkit 1–16 Vanha tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 1	Säkki 2	Säkki 3	Säkki 4
Kosteusprosentti					
1. mittaus - 26.4.2013		32,9	32,9	32,9	32,9
2. mittaus - 27.5.2013		28,7	31,4	30,1	26,9
3. mittaus - 25.6.2013		27,2	27,2	32,9	41,7
4. mittaus - 29.7.2013		23,5	20,4	42,1	41,6
5. mittaus - 11.9.2013		31,1	31,0	44,6	53,2
6. mittaus - 31.10.2013		28,6	29,9	55,6	59,2
7. mittaus - 4.12.2013		28,2	26,8	61,1	49,4
8. mittaus - 3.2.2014		32,6	31,0	111,0	75,5
Keskiarvo, %		29,1	28,8	51,3	47,6
Hajonta, %-yks.		3,1	4,0	26,5	15,4
Vaihteluväli, %-yks.		9,4	12,5	80,9	48,6
<b>Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:</b>					
Pohja + pesutappio		Säkki 1	Säkki 2	Säkki 3	Säkki 4
1. mittaus - 26.4.2013		34	34	34	34
2. mittaus - 27.5.2013		21	20	22	21
3. mittaus - 25.6.2013		20	19	19	14
4. mittaus - 29.7.2013		22	21	14	13
5. mittaus - 11.9.2013		15	17	13	10
6. mittaus - 31.10.2013		17	7	12	9
7. mittaus - 4.12.2013		21	17	16	12
$\leq 1 \text{ mm}$					
1. mittaus - 26.4.2013		75	75	75	75
2. mittaus - 27.5.2013		56	57	64	53
3. mittaus - 25.6.2013		54	54	57	50
4. mittaus - 29.7.2013		58	57	52	52
5. mittaus - 11.9.2013		48	54	52	50
6. mittaus - 31.10.2013		35	41	51	43
7. mittaus - 4.12.2013		50	52	54	45
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$					
1. mittaus - 26.4.2013		15	15	15	15
2. mittaus - 27.5.2013		20	17	22	15
3. mittaus - 25.6.2013		20	21	23	21
4. mittaus - 29.7.2013		22	23	22	22
5. mittaus - 11.9.2013		20	21	25	24
6. mittaus - 31.10.2013		12	22	25	22
7. mittaus - 4.12.2013		21	21	25	20
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$					
1. mittaus - 26.4.2013		10	10	10	10
2. mittaus - 27.5.2013		15	15	14	15
3. mittaus - 25.6.2013		12	20	14	16
4. mittaus - 29.7.2013		12	19	14	19
5. mittaus - 11.9.2013		11	20	18	19
6. mittaus - 31.10.2013		9	17	20	18
7. mittaus - 4.12.2013		12	20	21	16

22,4 mm <				
1. mittaus - 26.4.2013	0	0	0	0
2. mittaus - 27.5.2013	8	11	0	16
3. mittaus - 25.6.2013	15	6	6	14
4. mittaus - 29.7.2013	9	1	12	6
5. mittaus - 11.9.2013	20	4	4	7
6. mittaus - 31.10.2013	44	20	4	17
7. mittaus - 4.12.2013	16	8	1	19
d50-raekoko				
1. mittaus - 26.4.2013	0,2	0,2	0,2	0,2
2. mittaus - 27.5.2013	0,5	0,5	0,4	0,7
3. mittaus - 25.6.2013	0,6	0,6	0,5	1,0
4. mittaus - 29.7.2013	0,5	0,5	0,8	8,0
5. mittaus - 11.9.2013	1,5	0,6	0,8	1,0
6. mittaus - 31.10.2013	7,0	3,0	1,0	2,0
7. mittaus - 4.12.2013	0,9	0,8	0,6	1,6
yli 63 mm rakeita	kyllä	kyllä	ei	kyllä

Kasa 26 %	Suojattu		Suojaamaton	
	Säkki 5	Säkki 6	Säkki 7	Säkki 8
Kosteusprosentti				
1. mittaus - 26.4.2013	30,8	30,8	30,8	30,8
2. mittaus - 27.5.2013	28,7	38,4	35,0	32,0
3. mittaus - 25.6.2013	25,1	31,3	43,5	35,2
4. mittaus - 29.7.2013	16,8	26,4	45,2	42,8
5. mittaus - 11.9.2013	31,7	37,3	58,4	49,2
6. mittaus - 31.10.2013	29,7	45,1	41,5	53,8
7. mittaus - 4.12.2013	25,4	47,6	42,5	62,9
8. mittaus - 3.2.2014	30,6	48,7	81,6	86,8
Keskiarvo, %	27,4	38,2	47,3	49,2
Hajonta, %-yks.	4,9	8,4	16,0	18,9
Vaihteluväli, %-yks.	14,9	22,3	50,8	56,0

Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:				
Pohja + pesutappio	Säkki 5	Säkki 6	Säkki 7	Säkki 8
2. mittaus - 27.5.2013	21	16	19	20
3. mittaus - 25.6.2013	19	18	15	16
4. mittaus - 29.7.2013	20	18	15	13
5. mittaus - 11.9.2013	15	11	8	12
6. mittaus - 31.10.2013	14	12	18	11
7. mittaus - 4.12.2013	15	10	17	14

$\leq 1 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	53	48	56	48
3. mittaus - 25.6.2013	48	43	45	57
4. mittaus - 29.7.2013	47	43	48	46
5. mittaus - 11.9.2013	48	39	43	46
6. mittaus - 31.10.2013	38	34	41	39
7. mittaus - 4.12.2013	42	32	38	54
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	18	24	22	12
3. mittaus - 25.6.2013	20	24	21	21
4. mittaus - 29.7.2013	22	27	23	20
5. mittaus - 11.9.2013	22	23	26	19
6. mittaus - 31.10.2013	21	21	17	16
7. mittaus - 4.12.2013	24	21	18	25
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	24	22	17	7
3. mittaus - 25.6.2013	19	25	14	13
4. mittaus - 29.7.2013	25	28	19	14
5. mittaus - 11.9.2013	23	26	17	10
6. mittaus - 31.10.2013	23	24	12	9
7. mittaus - 4.12.2013	28	38	10	17
$22,4 \text{ mm} <$				
2. mittaus - 27.5.2013	4	6	6	33
3. mittaus - 25.6.2013	12	8	21	8
4. mittaus - 29.7.2013	6	2	10	20
5. mittaus - 11.9.2013	6	12	13	25
6. mittaus - 31.10.2013	17	22	31	36
7. mittaus - 4.12.2013	5	9	34	3
d50-raekoko				
2. mittaus - 27.5.2013	0,6	1,2	0,6	1,5
3. mittaus - 25.6.2013	1,2	2,0	1,8	0,5
4. mittaus - 29.7.2013	1,5	2,0	1,3	1,5
5. mittaus - 11.9.2013	1,2	2,5	1,8	1,5
6. mittaus - 31.10.2013	3,5	4,1	3,0	4,0
7. mittaus - 4.12.2013	2,5	5,0	3,5	0,7
	yli 63 mm rakeita		kyllä	ei
			kyllä	kyllä

Uusi tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
	Säkki 9	Säkki 10	Säkki 11	Säkki 12
Kosteusprosentti				
1. mittaus - 26.4.2013	34,5	34,5	34,5	34,5
2. mittaus - 27.5.2013	30,7	30,0	19,7	32,5
3. mittaus - 25.6.2013	32,3	31,3	34,5	31,4
4. mittaus - 29.7.2013	30,8	24,2	31,2	37,9
5. mittaus - 11.9.2013	35,1	33,3	45,8	57,8
6. mittaus - 31.10.2013	36,3	34,5	52,4	67,0
7. mittaus - 4.12.2013	33,4	37,5	43,4	61,8
8. mittaus - 3.2.2014	35,0	36,4	63,9	82,7
Keskiarvo, %	33,5	32,7	40,7	50,7
Hajonta, %-yks.	2,1	4,2	13,7	19,2
Vaihteluväli, %-yks.	5,7	13,3	44,2	51,3
<b>Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:</b>				
Pohja + pesutappio	<b>Säkki 9</b>	<b>Säkki 10</b>	<b>Säkki 11</b>	<b>Säkki 12</b>
2. mittaus - 27.5.2013	30	19	31	28
3. mittaus - 25.6.2013	25	22	17	29
4. mittaus - 29.7.2013	29	14	18	28
5. mittaus - 11.9.2013	25	17	11	22
6. mittaus - 31.10.2013	21	21	15	18
7. mittaus - 4.12.2013	22	13	13	22
$\leq 1 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	66	47	60	65
3. mittaus - 25.6.2013	56	50	48	62
4. mittaus - 29.7.2013	63	36	48	63
5. mittaus - 11.9.2013	60	43	39	60
6. mittaus - 31.10.2013	52	50	43	47
7. mittaus - 4.12.2013	52	31	36	54
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	17	15	17	18
3. mittaus - 25.6.2013	19	17	21	16
4. mittaus - 29.7.2013	20	13	18	18
5. mittaus - 11.9.2013	20	15	17	21
6. mittaus - 31.10.2013	19	19	17	17
7. mittaus - 4.12.2013	19	14	17	19
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	12	16	16	11
3. mittaus - 25.6.2013	15	17	20	9
4. mittaus - 29.7.2013	14	12	20	14
5. mittaus - 11.9.2013	15	15	17	11
6. mittaus - 31.10.2013	16	19	15	11
7. mittaus - 4.12.2013	16	16	14	12

22,4 mm <				
2. mittaus - 27.5.2013	5	23	5	5
3. mittaus - 25.6.2013	10	16	11	12
4. mittaus - 29.7.2013	3	40	14	5
5. mittaus - 11.9.2013	5	26	27	8
6. mittaus - 31.10.2013	13	12	24	25
7. mittaus - 4.12.2013	13	40	32	15
d50-raekoko				
2. mittaus - 27.5.2013	0,25	1,8	0,3	0,25
3. mittaus - 25.6.2013	0,5	1,0	1,5	0,3
4. mittaus - 29.7.2013	0,3	6,0	1,5	0,3
5. mittaus - 11.9.2013	0,3	3,0	3,5	0,4
6. mittaus - 31.10.2013	0,8	1,0	2,5	1,5
7. mittaus - 4.12.2013	0,8	8,0	4,5	0,6
yli 63 mm rakeita	ei	kyllä	kyllä	kyllä

Kasa 21 %	Suojattu		Suojaamaton	
	Säkki 13	Säkki 14	Säkki 15	Säkki 16
Kosteusprosentti				
1. mittaus - 26.4.2013	34,9	34,9	34,9	34,9
2. mittaus - 27.5.2013	27,3	34,2	20,6	19,9
3. mittaus - 25.6.2013	33,6	30,3	38,0	47,6
4. mittaus - 29.7.2013	30,6	32,1	52,2	41,7
5. mittaus - 11.9.2013	34,4	31,5	54,4	48,9
6. mittaus - 31.10.2013	35,4	35,6	64,2	45,0
7. mittaus - 4.12.2013	38,0	35,7	68,8	58,1
8. mittaus - 3.2.2014	32,6	34,7	90,3	66,2
Keskiarvo, %	33,4	33,6	52,9	45,3
Hajonta, %-yks.	3,2	2,0	21,9	14,1
Vaihteluväli, %-yks.	10,6	5,5	69,7	46,3

## Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:

Pohja + pesutappio	Säkki 13	Säkki 14	Säkki 15	Säkki 16
2. mittaus - 27.5.2013	32	24	38	30
3. mittaus - 25.6.2013	26	23	25	21
4. mittaus - 29.7.2013	25	27	20	20
5. mittaus - 11.9.2013	20	20	15	13
6. mittaus - 31.10.2013	22	22	19	20
7. mittaus - 4.12.2013	24	20	15	18
≤ 1 mm				
2. mittaus - 27.5.2013	69	54	71	57
3. mittaus - 25.6.2013	59	52	60	55
4. mittaus - 29.7.2013	59	61	55	54
5. mittaus - 11.9.2013	47	48	42	44
6. mittaus - 31.10.2013	52	49	53	42
7. mittaus - 4.12.2013	59	46	48	55

$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	19	14	16	14
3. mittaus - 25.6.2013	20	16	18	22
4. mittaus - 29.7.2013	18	19	18	19
5. mittaus - 11.9.2013	13	14	14	18
6. mittaus - 31.10.2013	18	16	19	13
7. mittaus - 4.12.2013	19	15	19	23
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$				
2. mittaus - 27.5.2013	8	12	11	8
3. mittaus - 25.6.2013	10	11	12	14
4. mittaus - 29.7.2013	9	17	15	13
5. mittaus - 11.9.2013	6	11	8	10
6. mittaus - 31.10.2013	8	14	13	9
7. mittaus - 4.12.2013	9	15	12	17
$22,4 \text{ mm} <$				
2. mittaus - 27.5.2013	3	20	2	21
3. mittaus - 25.6.2013	11	21	10	9
4. mittaus - 29.7.2013	14	3	13	14
5. mittaus - 11.9.2013	33	27	36	28
6. mittaus - 31.10.2013	22	21	15	36
7. mittaus - 4.12.2013	14	24	21	6
d50-raekoko				
2. mittaus - 27.5.2013	0,2	0,6	0,2	0,4
3. mittaus - 25.6.2013	0,4	0,7	0,4	0,5
4. mittaus - 29.7.2013	0,4	0,3	0,6	0,6
5. mittaus - 11.9.2013	1,5	1,5	3,0	2,0
6. mittaus - 31.10.2013	0,8	1,2	0,7	3,5
7. mittaus - 4.12.2013	0,4	2,0	6,0	0,6
yli 63 mm rakeita				
	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä



Elokuun säkitys	Säkit 17–32 Vanha tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
		Säkki 17	Säkki 18	Säkki 19	Säkki 20
Kosteusprosentti					
1. mittaus - 22.8.2013		22,6	22,6	22,6	22,6
2. mittaus - 24.9.2013		16,5	16,8	22,5	27,1
3. mittaus - 6.11.2013		15,7	15,9	26,0	32,2
4. mittaus - 9.12.2013		10,6	14,1	24,1	25,7
5. mittaus - 3.2.2014		24,9	28,6	41,6	47,2
Keskiarvo, %		18,1	19,6	27,4	31,0
Hajonta, %-yks.		5,7	6,0	8,1	9,7
Vaihteluväli, %-yks.		14,3	14,5	19,1	24,6
<b>Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:</b>					
Pohja + pesutappio		Säkki 17	Säkki 18	Säkki 19	Säkki 20
1. mittaus - 22.8.2013		23	23	23	23
2. mittaus - 24.9.2013		12	12	10	12
3. mittaus - 6.11.2013		10	13	13	13
4. mittaus - 9.12.2013		13	16	20	21
$\leq 1 \text{ mm}$					
1. mittaus - 22.8.2013		71	71	71	71
2. mittaus - 24.9.2013		59	55	49	55
3. mittaus - 6.11.2013		49	49	57	50
4. mittaus - 9.12.2013		41	57	71	61
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$					
1. mittaus - 22.8.2013		11	11	11	11
2. mittaus - 24.9.2013		9	10	11	13
3. mittaus - 6.11.2013		7	10	13	11
4. mittaus - 9.12.2013		6	11	17	14
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$					
1. mittaus - 22.8.2013		8	8	8	8
2. mittaus - 24.9.2013		5	6	6	10
3. mittaus - 6.11.2013		4	5	9	8
4. mittaus - 9.12.2013		3	8	9	12
$22,4 \text{ mm} <$					
1. mittaus - 22.8.2013		9	9	9	9
2. mittaus - 24.9.2013		27	29	34	23
3. mittaus - 6.11.2013		39	36	21	31
4. mittaus - 9.12.2013		50	25	3	13
d50-raekoko					
1. mittaus - 22.8.2013		0,2	0,2	0,2	0,2
2. mittaus - 24.9.2013		0,4	0,5	1,0	0,5
3. mittaus - 6.11.2013		1,0	1,5	0,4	1,0
4. mittaus - 9.12.2013		20,0	0,4	0,25	3,0
yli 63 mm rakeita		kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
jättiläisrakeita		kyllä	kyllä	kyllä	kyllä

Kuiva tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
	Säkki 21	Säkki 22	Säkki 23	Säkki 24
Kosteusprosentti				
1. mittaus - 22.8.2013	19,5	19,5	19,5	19,5
2. mittaus - 24.9.2013	19	23	29,2	24,3
3. mittaus - 6.11.2013	17,1	18,3	33,2	28,2
4. mittaus - 9.12.2013	15,2	15,4	26,9	23,5
5. mittaus - 3.2.2014	28,6	32,4	37,8	41,3
Keskiarvo, %	19,9	21,7	29,3	27,4
Hajonta, %-yks.	5,2	6,6	6,9	8,4
Vaihteluväli, %-yks.	13,4	17,0	18,3	21,8
<b>Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:</b>				
Pohja + pesutappio	Säkki 21	Säkki 22	Säkki 23	Säkki 24
2. mittaus - 24.9.2013	19	13	11	15
3. mittaus - 6.11.2013	16	13	12	14
4. mittaus - 9.12.2013	17	15	20	21
$\leq 1$ mm				
2. mittaus - 24.9.2013	69	49	44	58
3. mittaus - 6.11.2013	50	43	42	45
4. mittaus - 9.12.2013	50	36	57	60
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	16	15	14	16
3. mittaus - 6.11.2013	14	13	14	13
4. mittaus - 9.12.2013	12	10	18	16
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	12	11	14	13
3. mittaus - 6.11.2013	9	10	14	11
4. mittaus - 9.12.2013	8	9	21	17
$22,4 \text{ mm} <$				
2. mittaus - 24.9.2013	3	25	29	12
3. mittaus - 6.11.2013	27	34	30	30
4. mittaus - 9.12.2013	30	45	3	7
d50-raekoko				
2. mittaus - 24.9.2013	0,22	1,2	3,0	0,4
3. mittaus - 6.11.2013	1,0	3,0	3,5	2,0
4. mittaus - 9.12.2013	1,0	8,0	0,4	3,0
yli 63 mm rakeita				
	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
jättiläisrakeita				
	ei	kyllä	kyllä	kyllä

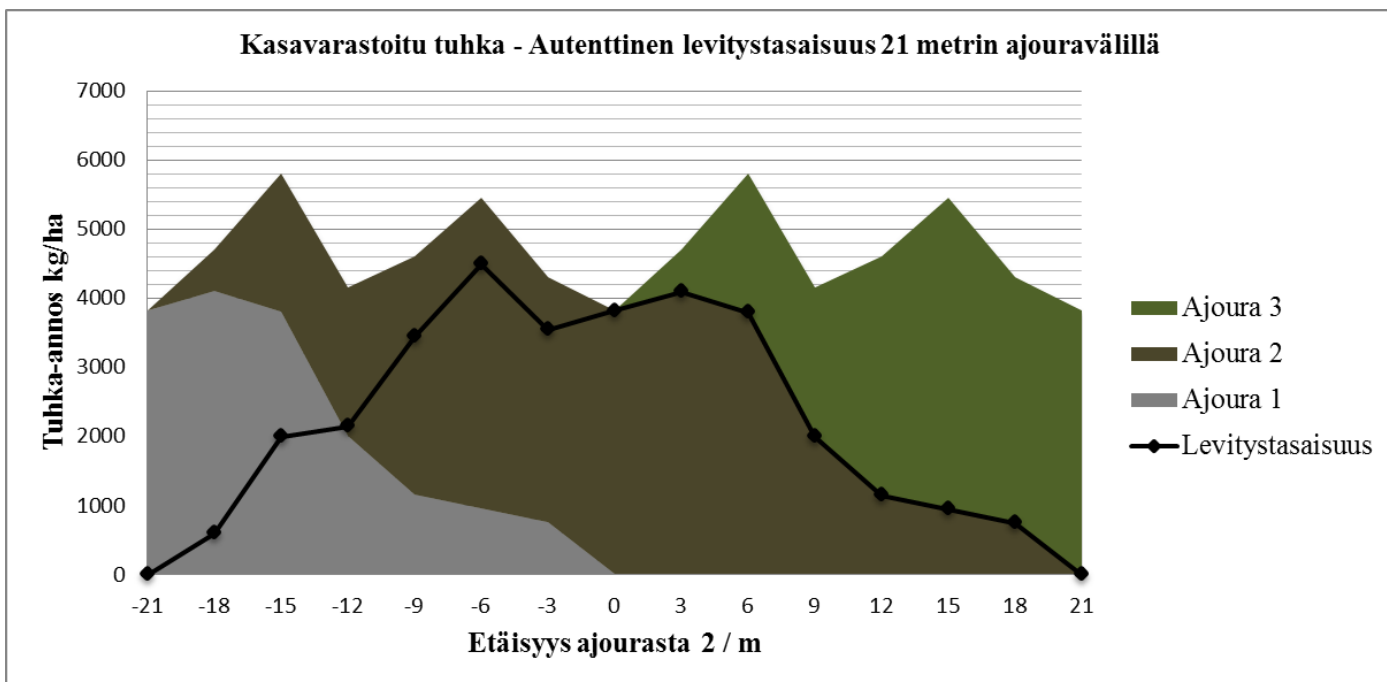
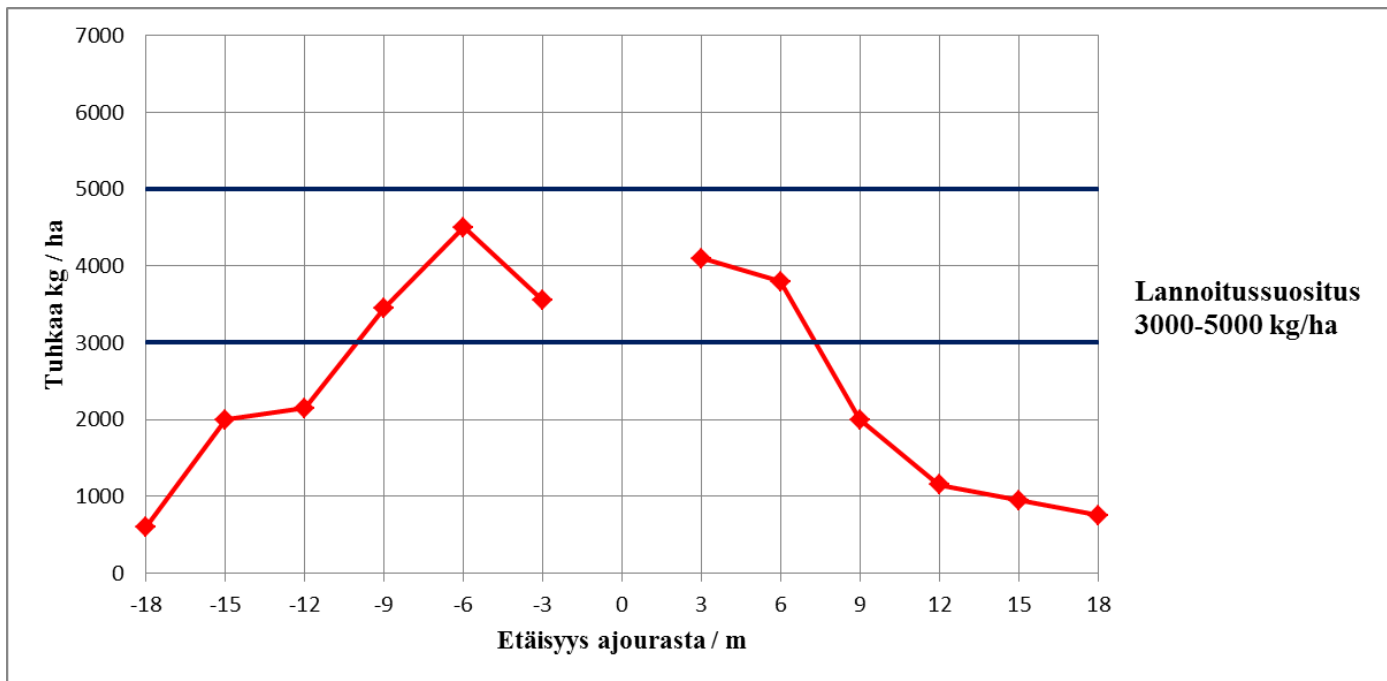
Kosteaa tuhkua	Suojattu		Suojaamaton	
	Säkki 25	Säkki 26	Säkki 27	Säkki 28
Kosteusprosentti				
1. mittaus - 22.8.2013	28,6	28,6	28,6	28,6
2. mittaus - 24.9.2013	39,4	31,3	31,3	32,4
3. mittaus - 6.11.2013	32,8	25,5	51,9	48,5
4. mittaus - 9.12.2013	24,3	21,4	30,2	30,3
5. mittaus - 3.2.2014	46,1	44,2	52,3	54,7
Keskiarvo, %	34,2	30,2	38,9	38,9
Hajonta, %-yks.	8,7	8,7	12,1	11,9
Vaihteluväli, %-yks.	21,8	22,8	23,7	26,1
<b>Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:</b>				
Pohja + pesutappio	Säkki 25	Säkki 26	Säkki 27	Säkki 28
2. mittaus - 24.9.2013	13	13	19	17
3. mittaus - 6.11.2013	13	22	11	15
4. mittaus - 9.12.2013	26	27	26	28
$\leq 1 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	43	41	55	51
3. mittaus - 6.11.2013	38	57	42	44
4. mittaus - 9.12.2013	57	59	53	59
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	16	14	14	17
3. mittaus - 6.11.2013	13	19	15	16
4. mittaus - 9.12.2013	16	20	15	19
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	12	8	16	13
3. mittaus - 6.11.2013	7	12	20	11
4. mittaus - 9.12.2013	14	13	11	17
$22,4 \text{ mm} <$				
2. mittaus - 24.9.2013	28	37	15	19
3. mittaus - 6.11.2013	42	12	22	29
4. mittaus - 9.12.2013	14	8	22	5
d50-raekoko				
2. mittaus - 24.9.2013	2,5	3,5	0,5	0,8
3. mittaus - 6.11.2013	5,0	0,45	3,0	2,0
4. mittaus - 9.12.2013	0,4	0,4	0,6	0,35
yli 63 mm rakeita jättiläisrakeita	kyllä kyllä	kyllä ei	kyllä kyllä	kyllä ei

Uusi tuhka	Suojattu		Suojaamaton	
	Säkki 29	Säkki 30	Säkki 31	Säkki 32
Kosteusprosentti				
1. mittaus - 22.8.2013	22,2	22,2	22,2	22,2
2. mittaus - 24.9.2013	19,9	26,5	25,4	27,8
3. mittaus - 6.11.2013	17,5	27,0	39,3	41,5
4. mittaus - 9.12.2013	15,5	18,3	29,5	32,1
5. mittaus - 3.2.2014	30,1	38,2	41,1	47,4
Keskiarvo, %	21,0	26,4	31,5	34,2
Hajonta, %-yks.	5,7	7,5	8,4	10,2
Vaihteluväli, %-yks.	14,6	19,9	18,9	25,2
<b>Raekokojakauman osuudet eri luokissa, %:</b>				
Pohja + pesutappio	Säkki 29	Säkki 30	Säkki 31	Säkki 32
2. mittaus - 24.9.2013	29	28	15	26
3. mittaus - 6.11.2013	28	23	29	26
4. mittaus - 9.12.2013	31	31	30	29
$\leq 1$ mm				
2. mittaus - 24.9.2013	70	69	42	64
3. mittaus - 6.11.2013	66	66	67	62
4. mittaus - 9.12.2013	67	69	72	61
$1 \text{ mm} < x \leq 5,6 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	10	14	14	19
3. mittaus - 6.11.2013	12	17	15	20
4. mittaus - 9.12.2013	12	16	19	20
$5,6 \text{ mm} < x \leq 22,4 \text{ mm}$				
2. mittaus - 24.9.2013	6	9	8	17
3. mittaus - 6.11.2013	6	12	8	17
4. mittaus - 9.12.2013	7	10	9	17
$22,4 \text{ mm} <$				
2. mittaus - 24.9.2013	15	8	36	1
3. mittaus - 6.11.2013	16	5	10	1
4. mittaus - 9.12.2013	15	5	1	2
d50-raekoko				
2. mittaus - 24.9.2013	0,2	0,24	3,5	0,25
3. mittaus - 6.11.2013	0,25	0,3	0,25	0,3
4. mittaus - 9.12.2013	0,25	0,225	0,2	0,3
yli 63 mm rakeita				
	ei	ei	kyllä	ei
jättiläisrakeita				
	kyllä	ei	kyllä	ei

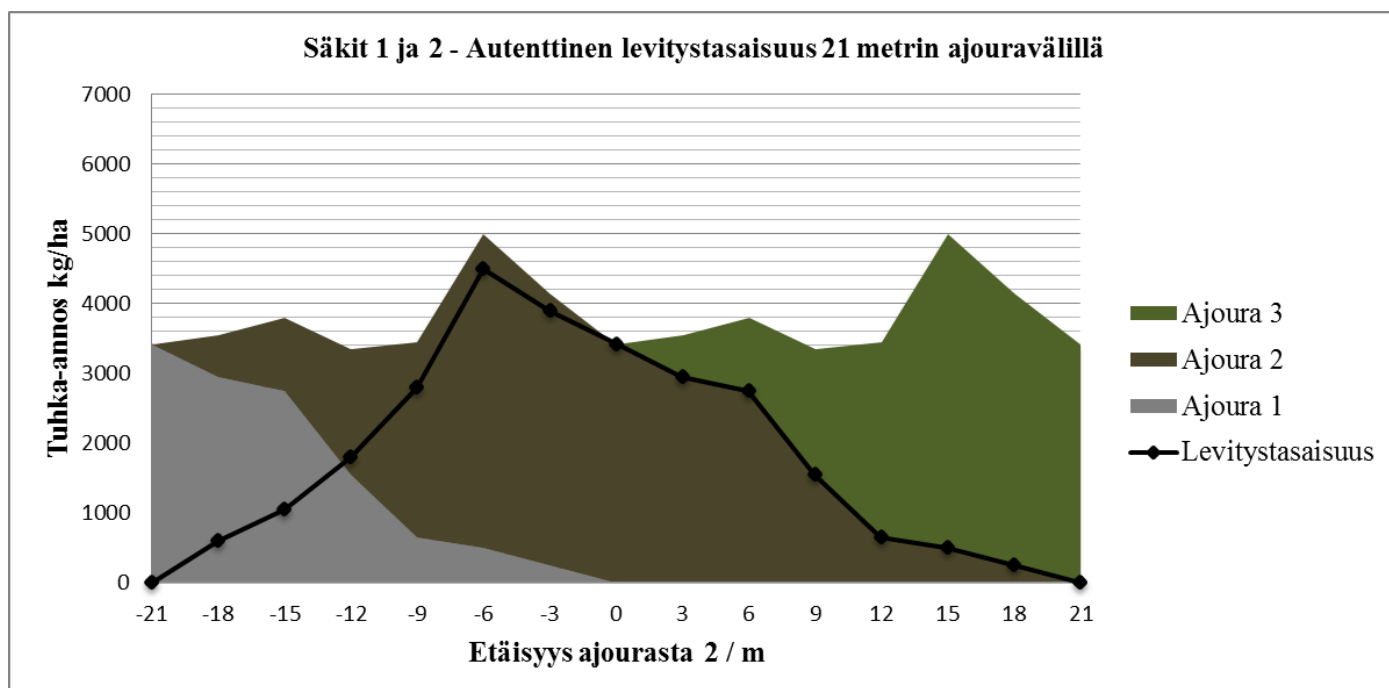
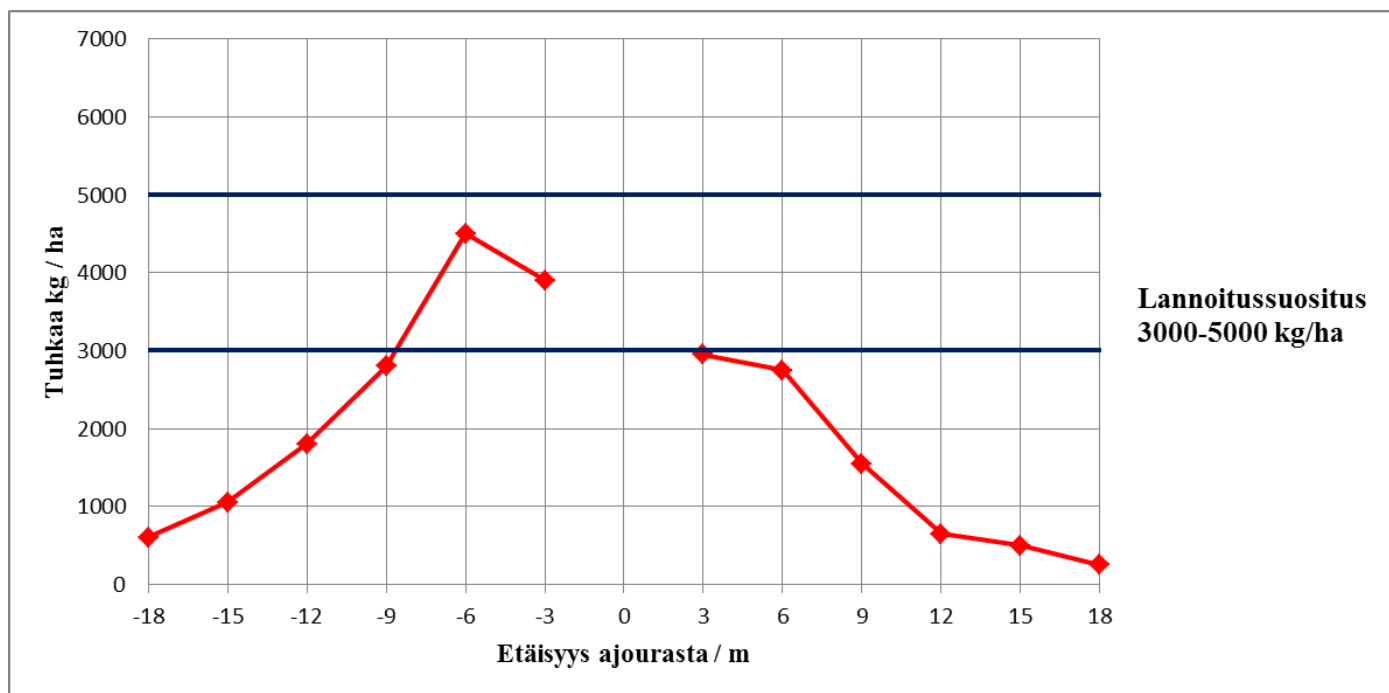
Tuhkalaatu	Säkki	yli 63 mm:n rakeita seulonnassa	jättiläis- tai >100 mm:n rakeita	pohja + pt vähintään n. 20 %	≤ 1 mm:n rakeita väh. n. 50 %	Kosteus-% ollut n. 40 %:ssa
Vanha	1	X	X	X	X	
	2	X	X		X	
	3				X	X
	4	X	X			X
Kasa 26 %	5	X	X			
	6					X
	7	X	X			X
	8	X			X	X
Uusi	9		X	X	X	
	10	X	X			
	11	X	X			X
	12	X		X	X	X
Kasa 21 %	13	X	X	X	X	
	14	X		X	X	
	15	X	X		X	X
	16	X	X	X	X	X
Vanha	17	X	X			
	18	X	X		X	
	19	X	X	X	X	X*
	20	X	X	X	X	X*
Kuiva	21	X		X	X	
	22	X	X			
	23	X	X	X	X	
	24	X	X	X	X	X*
Kostea	25	X	X	X	X	X
	26	X		X	X	
	27	X	X	X	X	X
	28	X		X	X	X
Uusi	29		X	X	X	
	30			X	X	
	31	X	X	X	X	X
	32			X	X	X

\*Vain helmikuun mittaus.

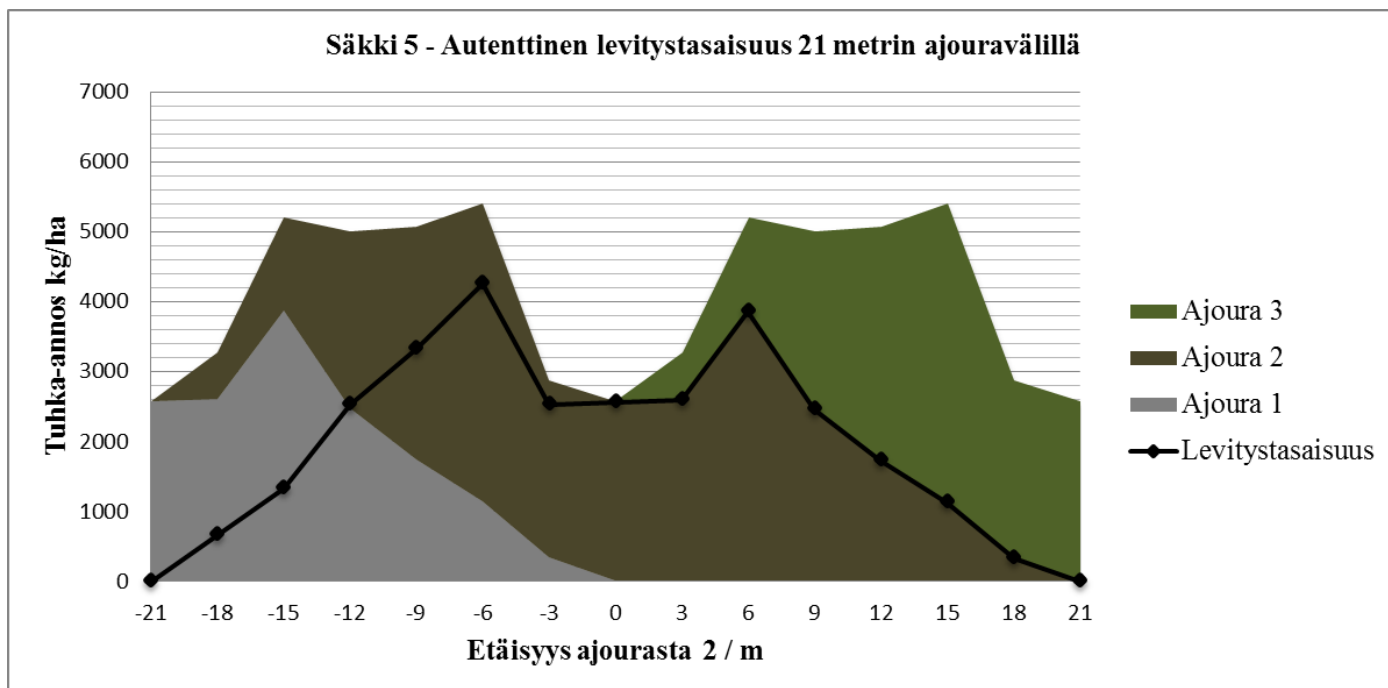
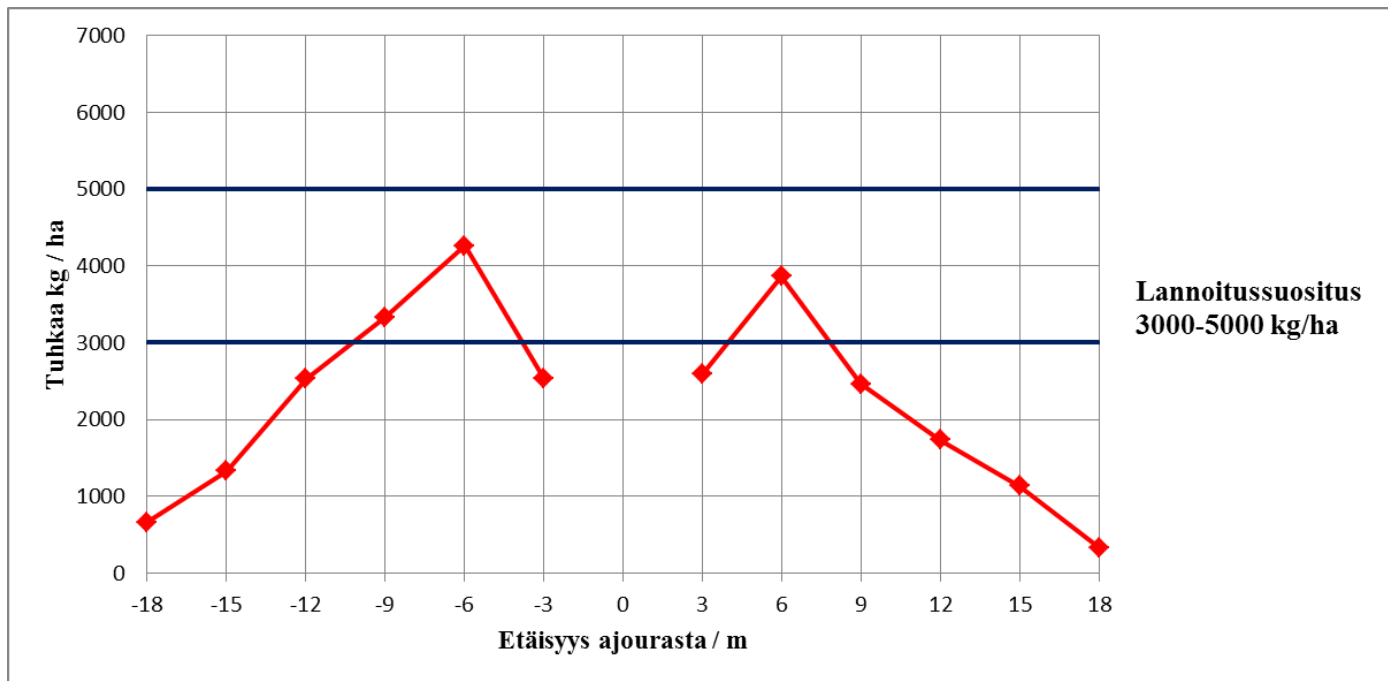
**Kasvarastoitu tuhka**



Säkit 1 ja 2 – Huhtikuun suojattu vanha tuhka

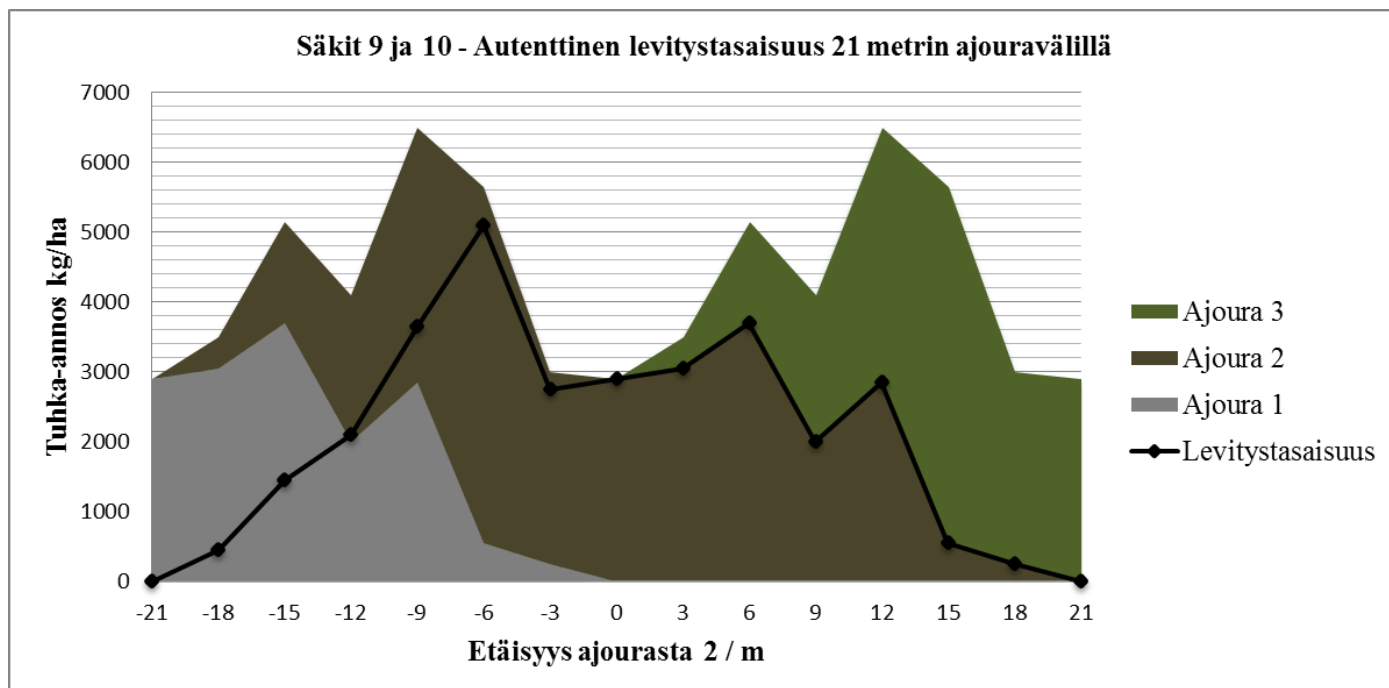
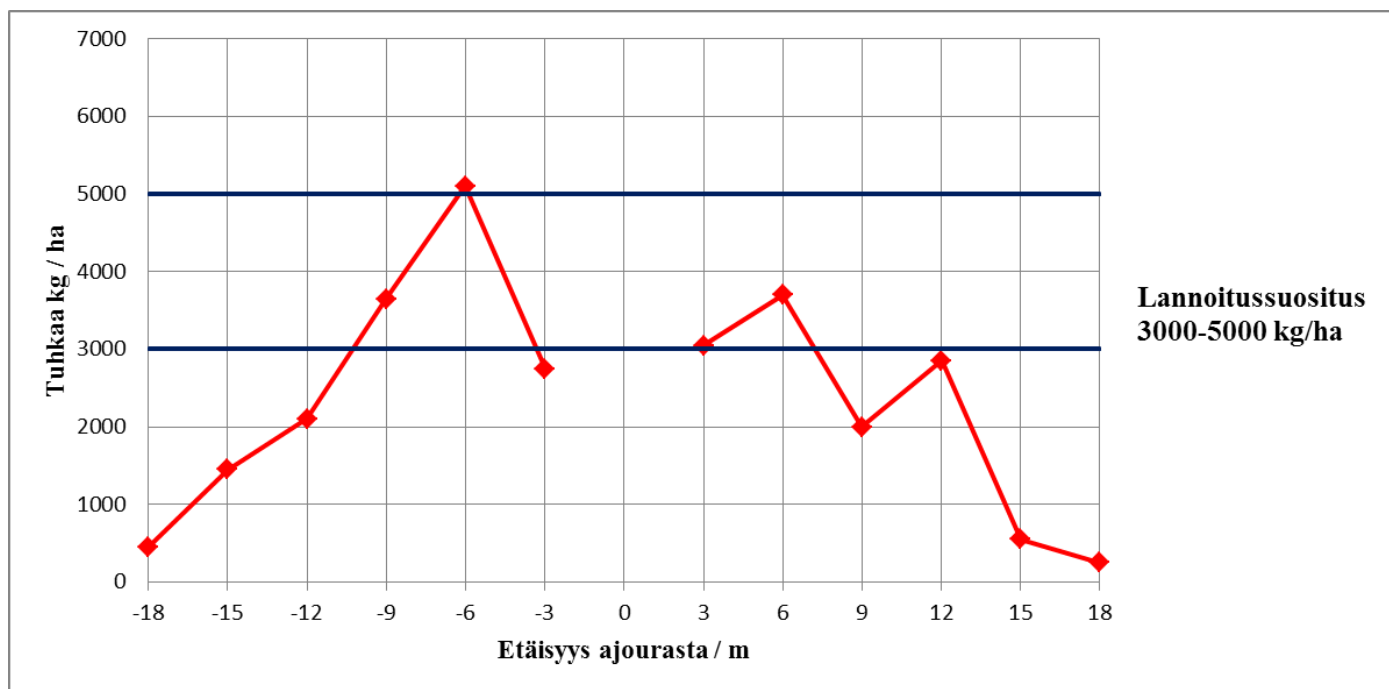


Säkki 5 – Huhtikuun suojattu kasa 26:n tuhka

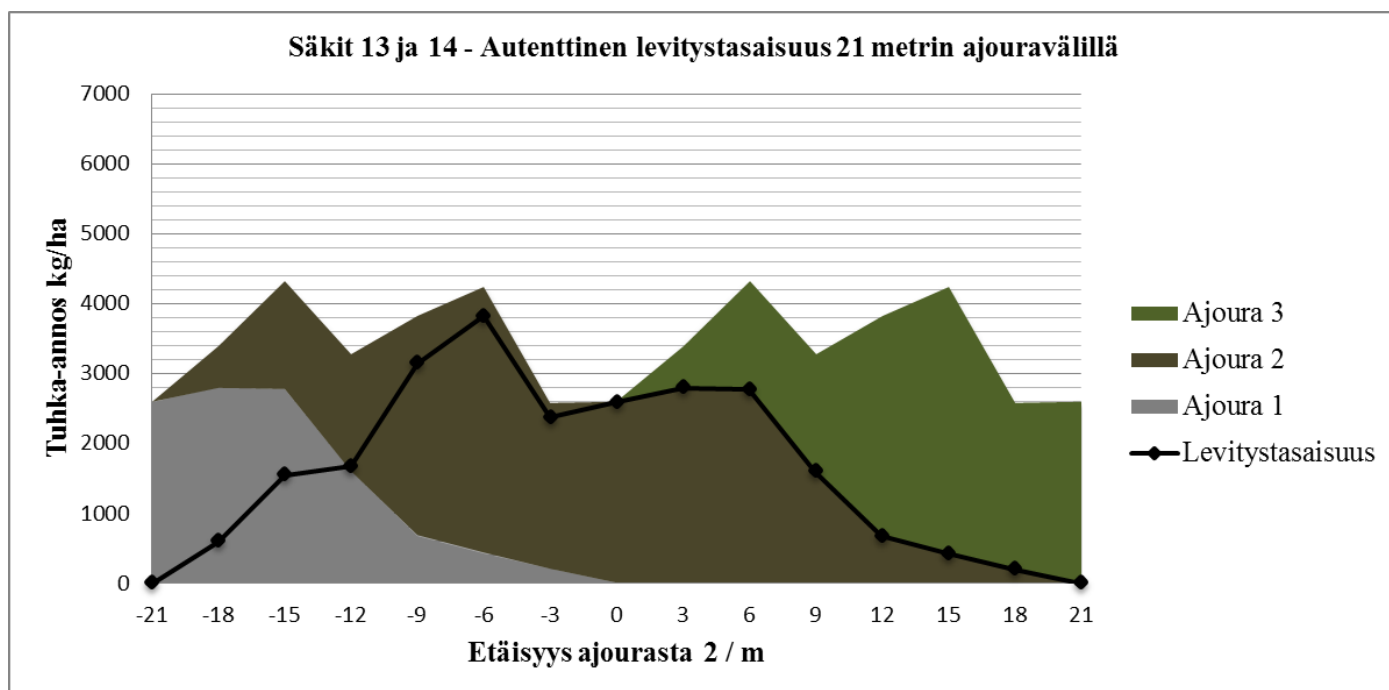
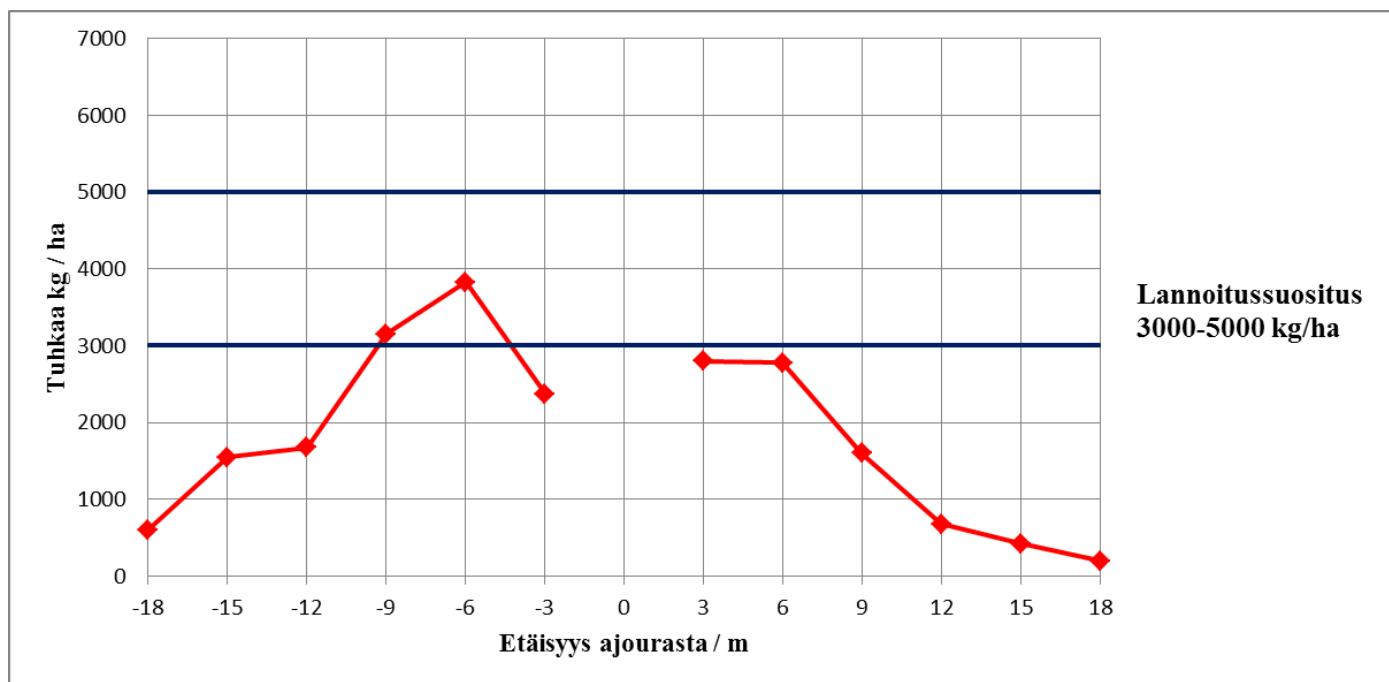




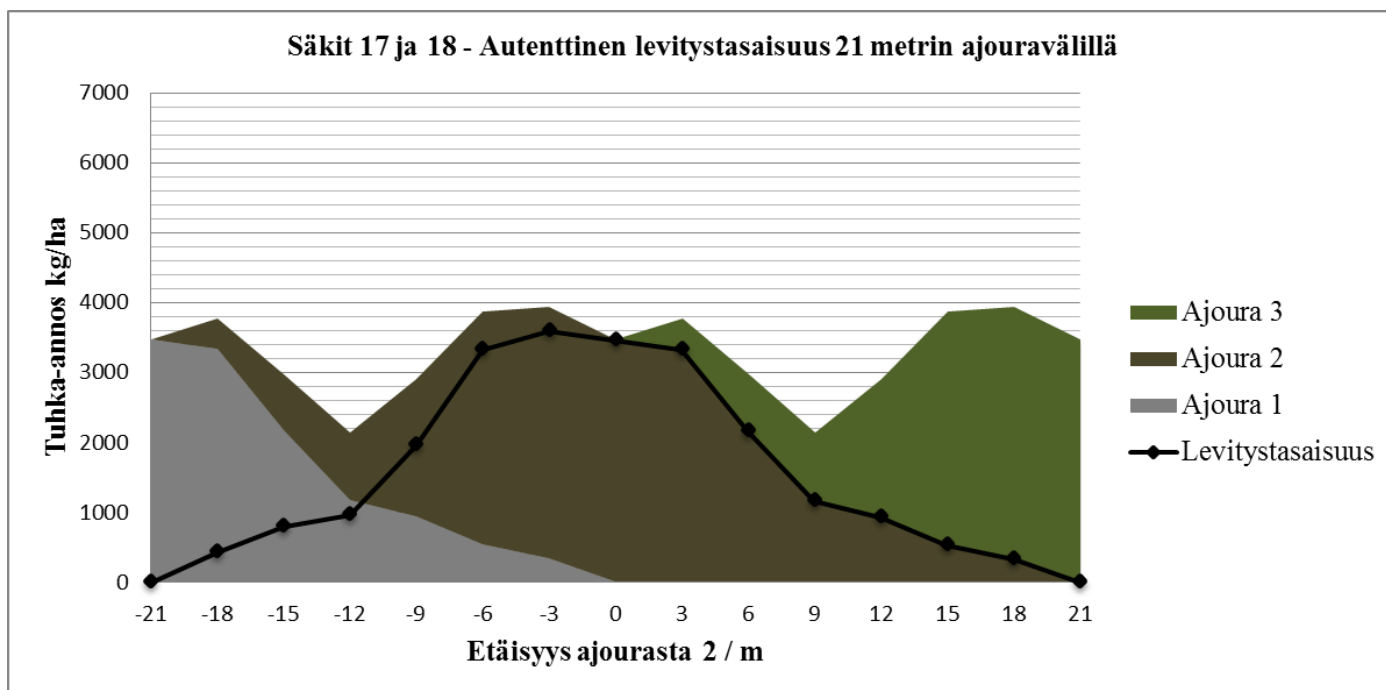
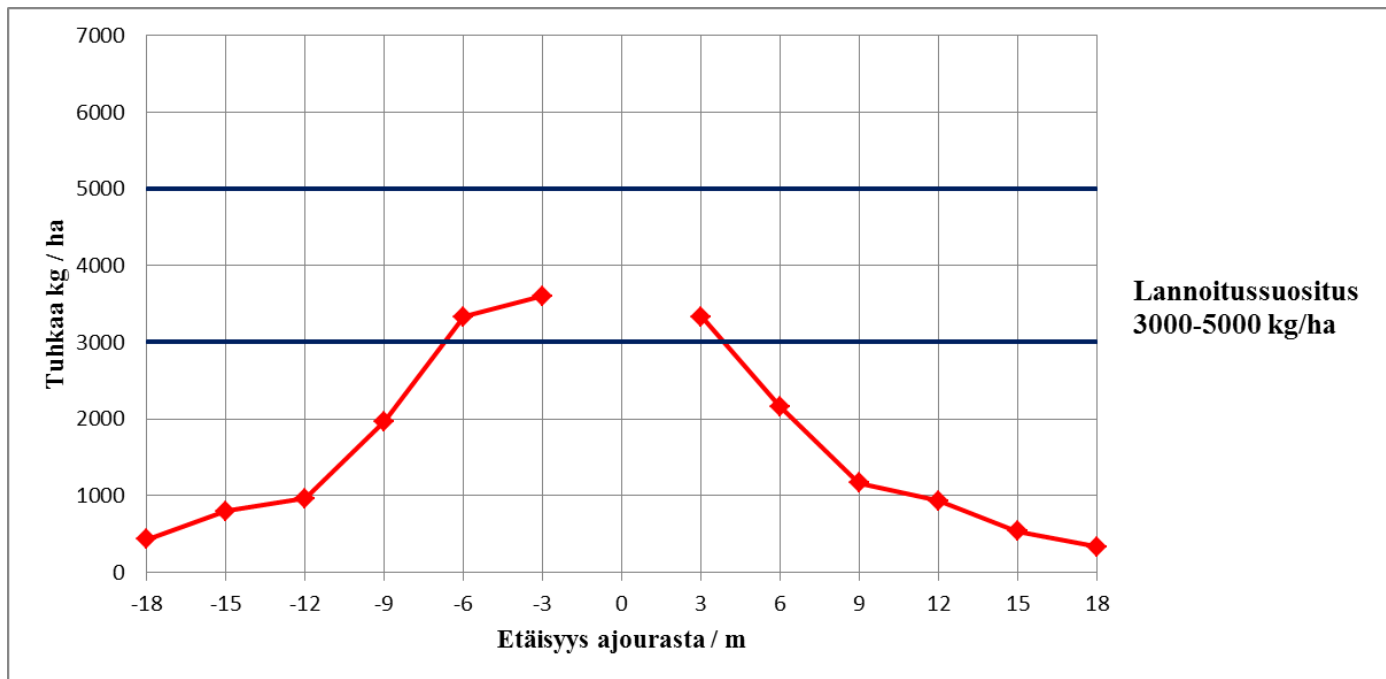
Säkit 9 ja 10 – Huhtikuun suojattu uusi tuhka



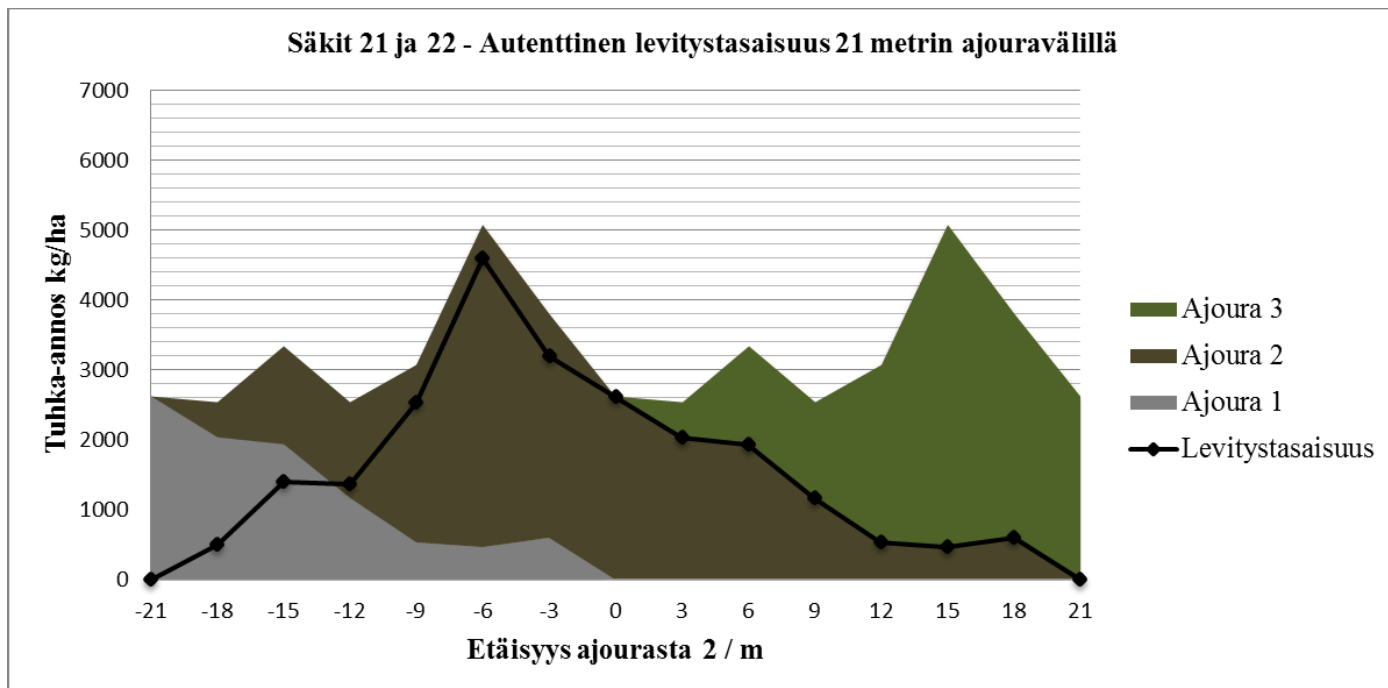
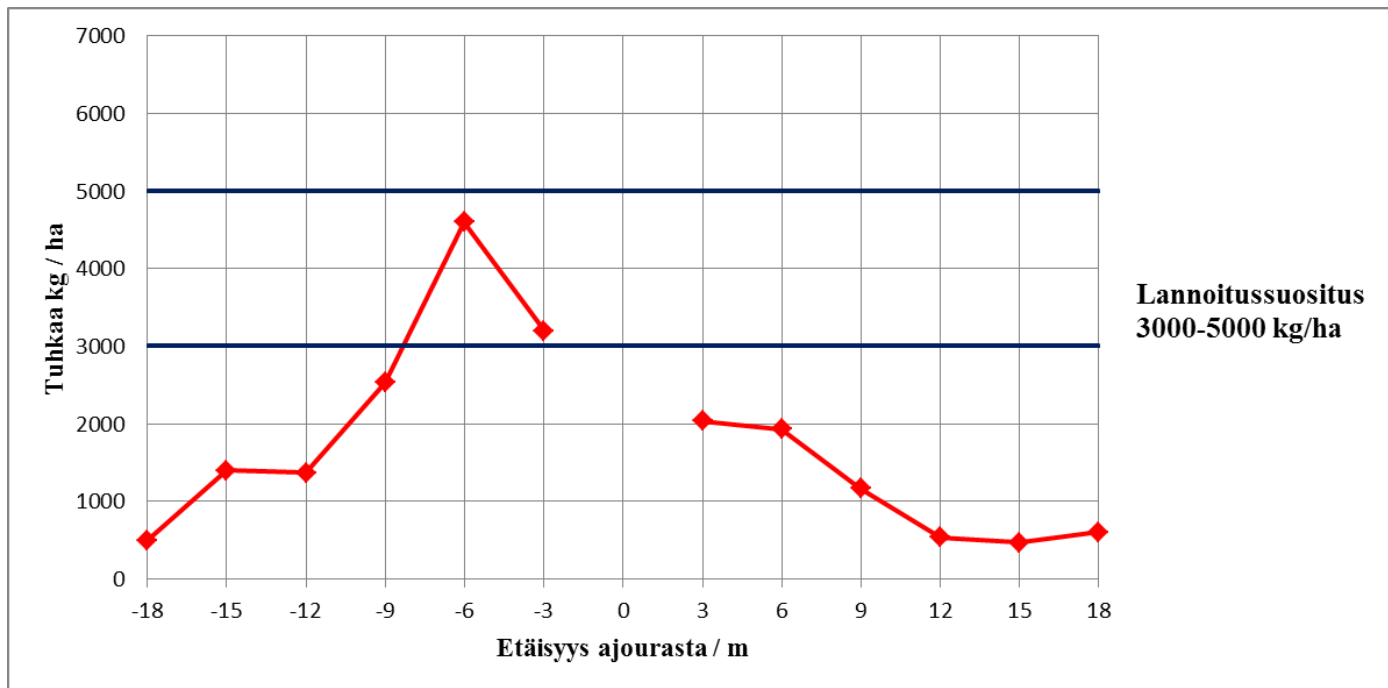
Säkit 13 ja 14 – Huhtikuun suojattu kasa 21:n tuhka



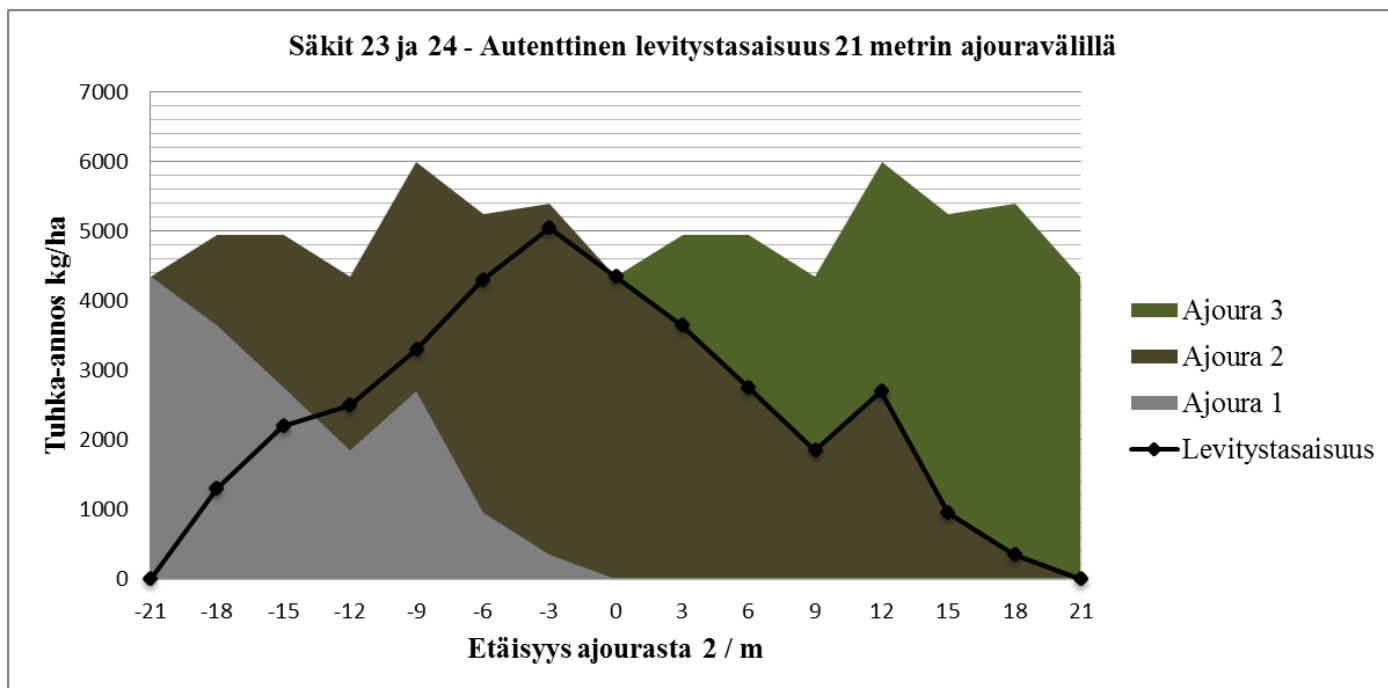
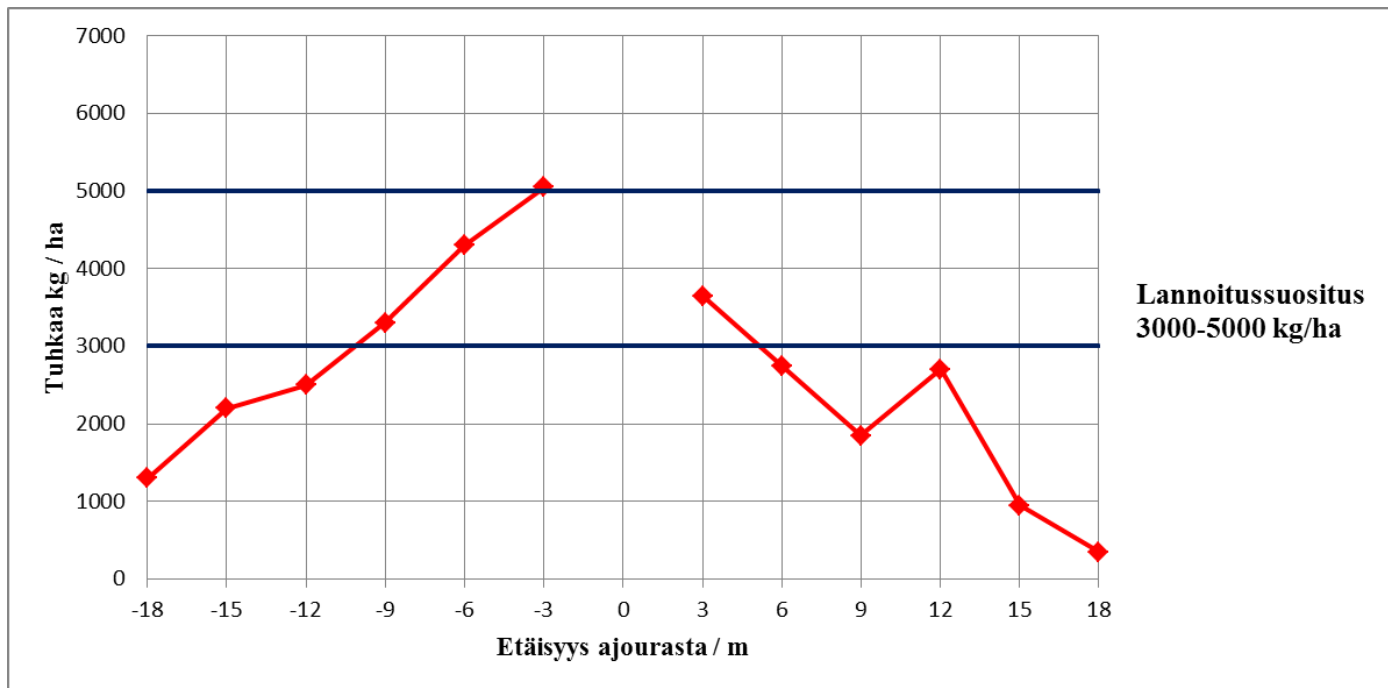
Säkit 17 ja 18 – Elokuun suojattu vanha tuhka



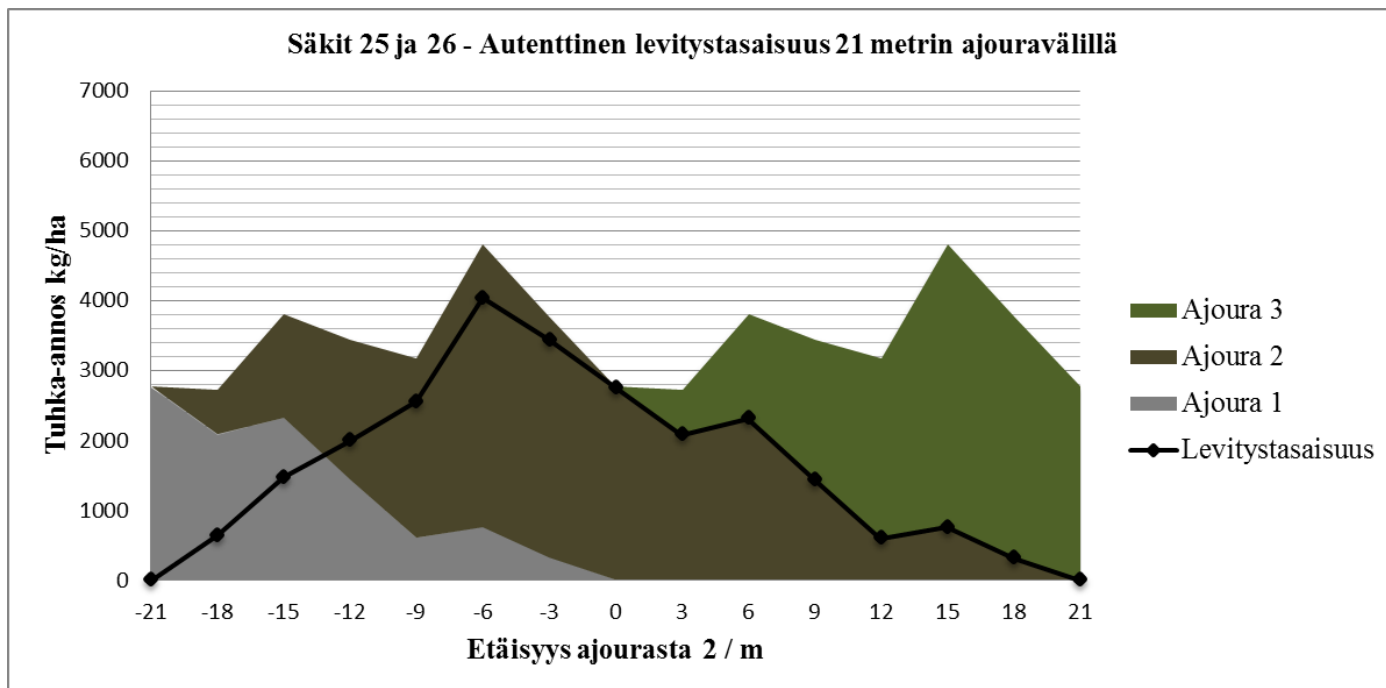
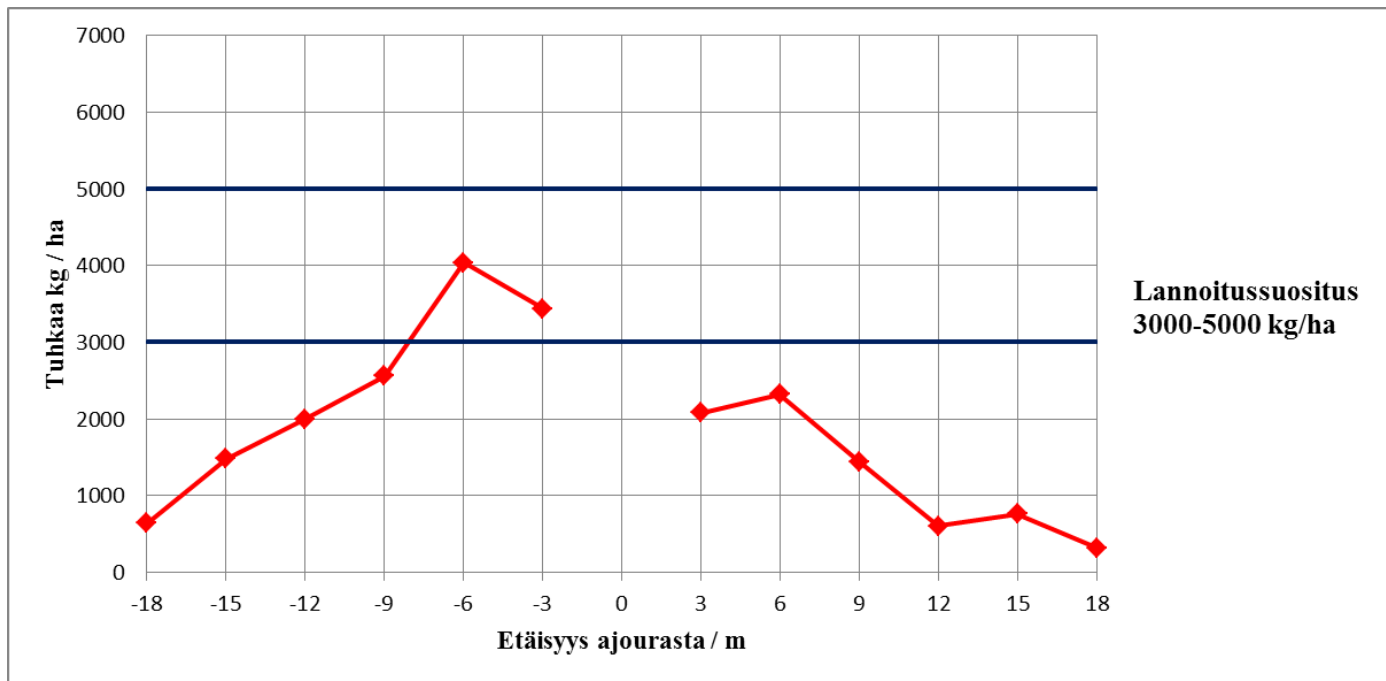
Säkit 21 ja 22 – Elokuun suojattu kuiva tuhka



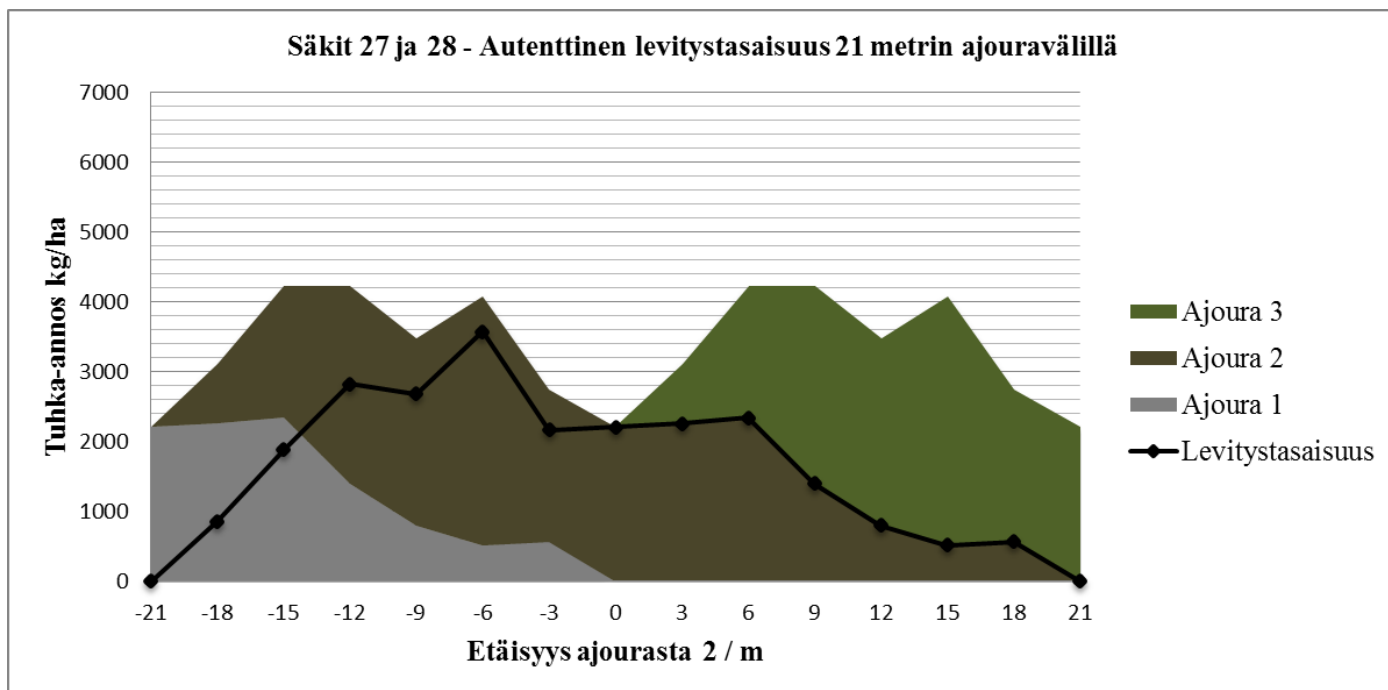
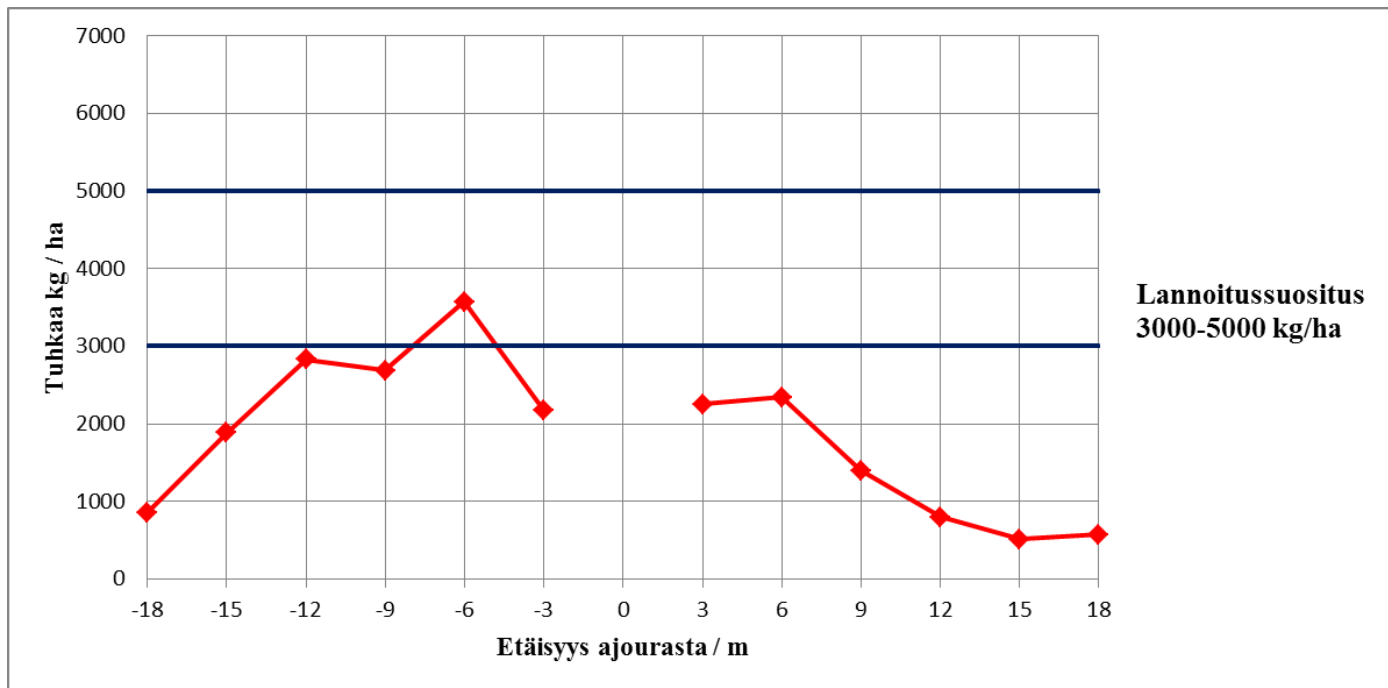
Säkit 23 ja 24 – Elokuun suojaamaton kuiva tuhka



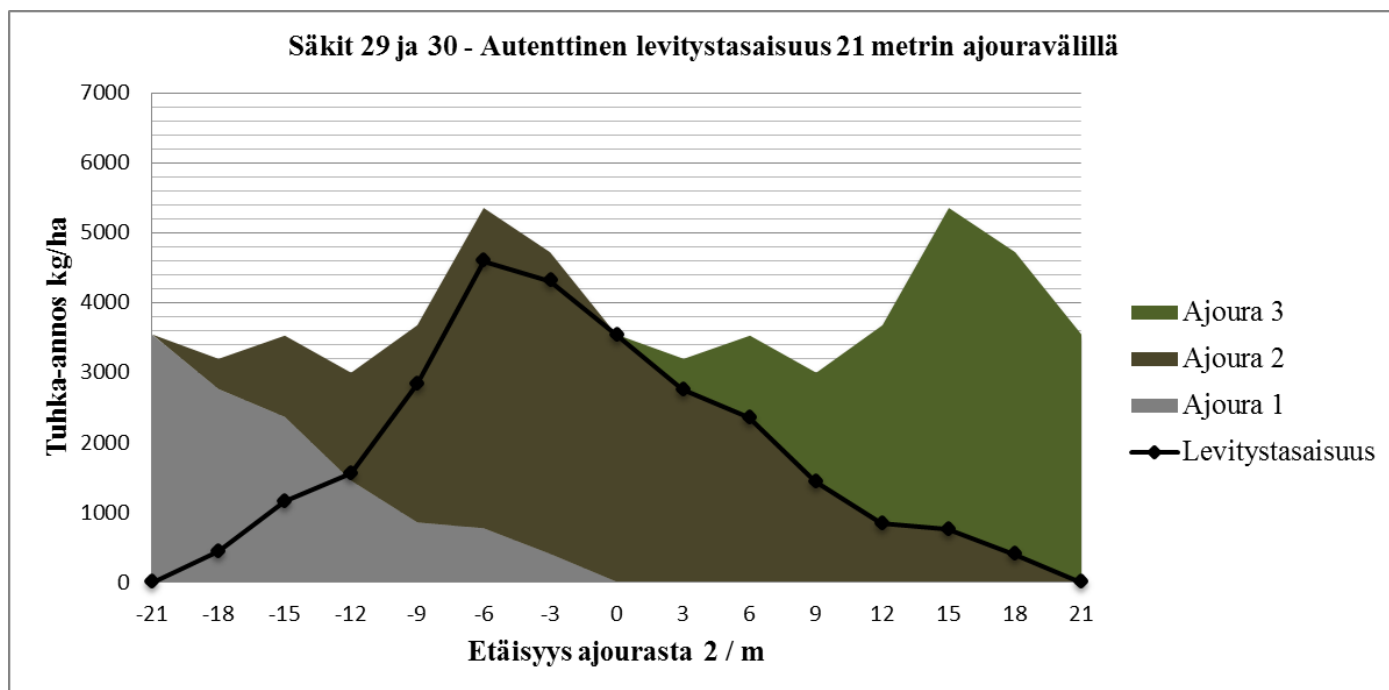
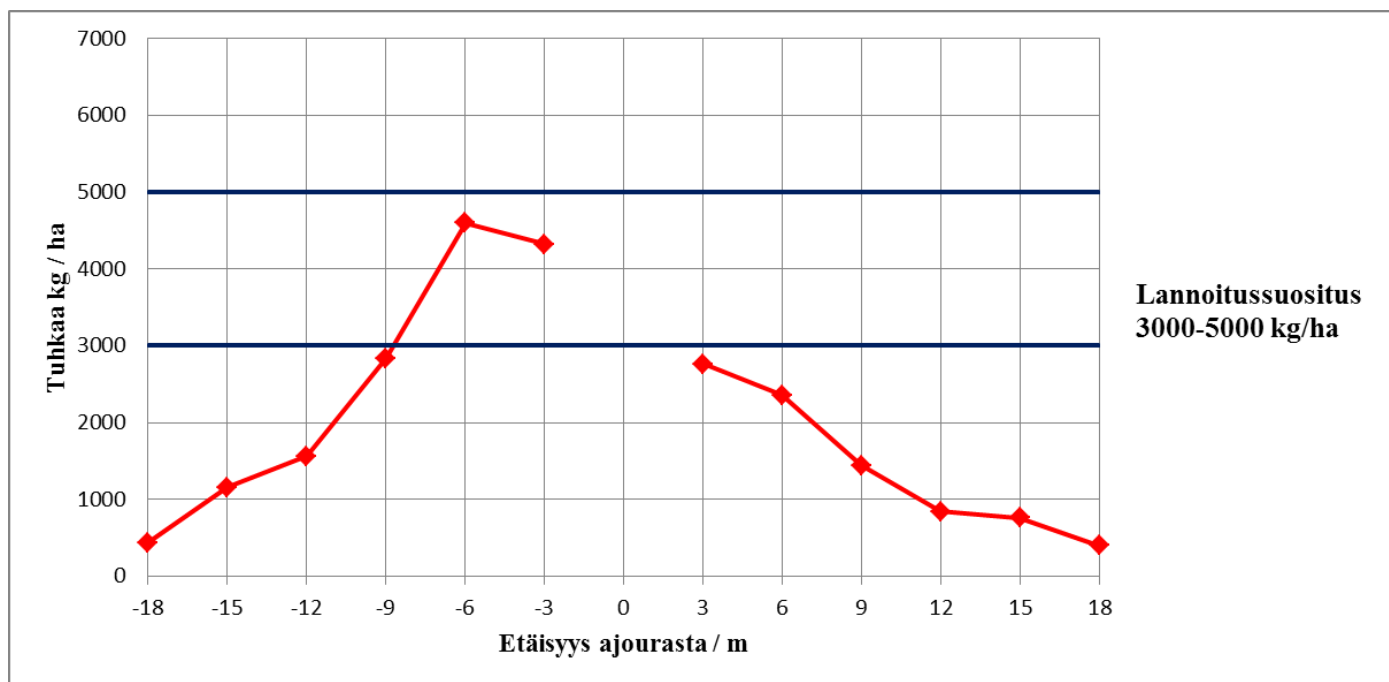
Säkit 25 ja 26 – Elokuun suojaattu kostea tuhka



Säkit 27 ja 28 – Elokuun suojaamaton kostea tuhka

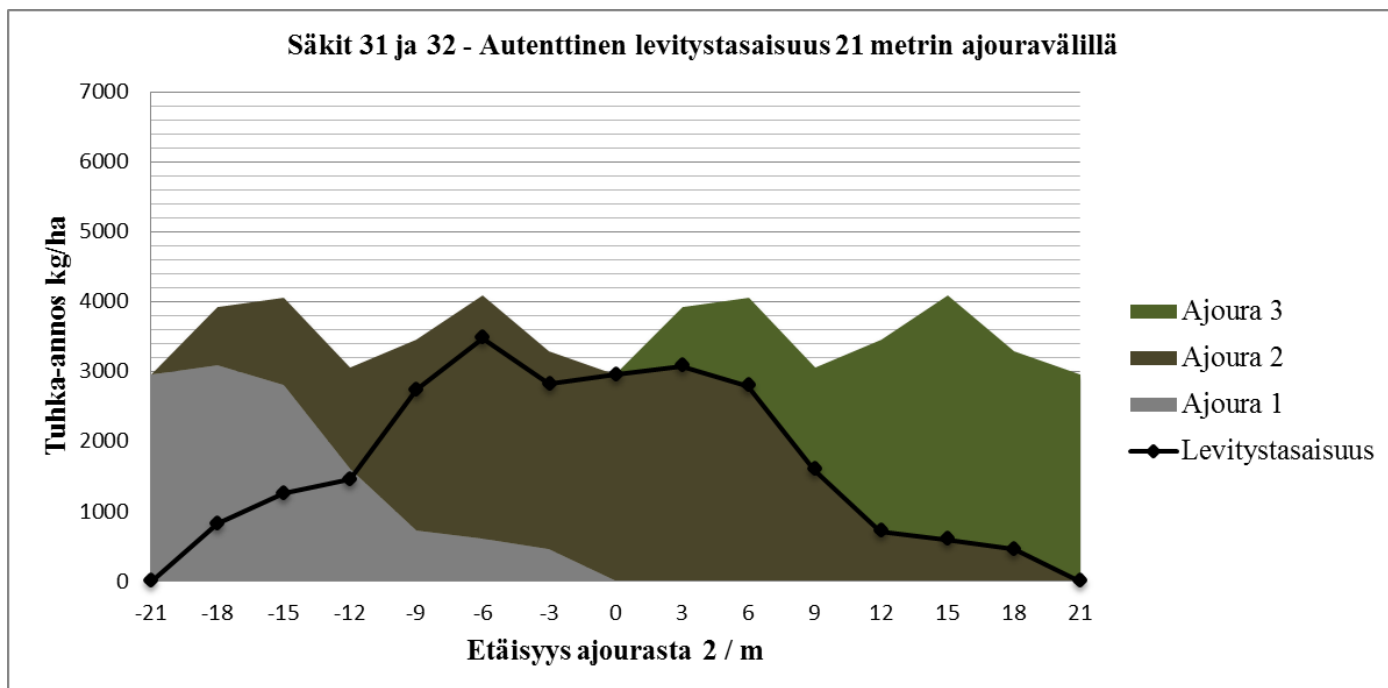
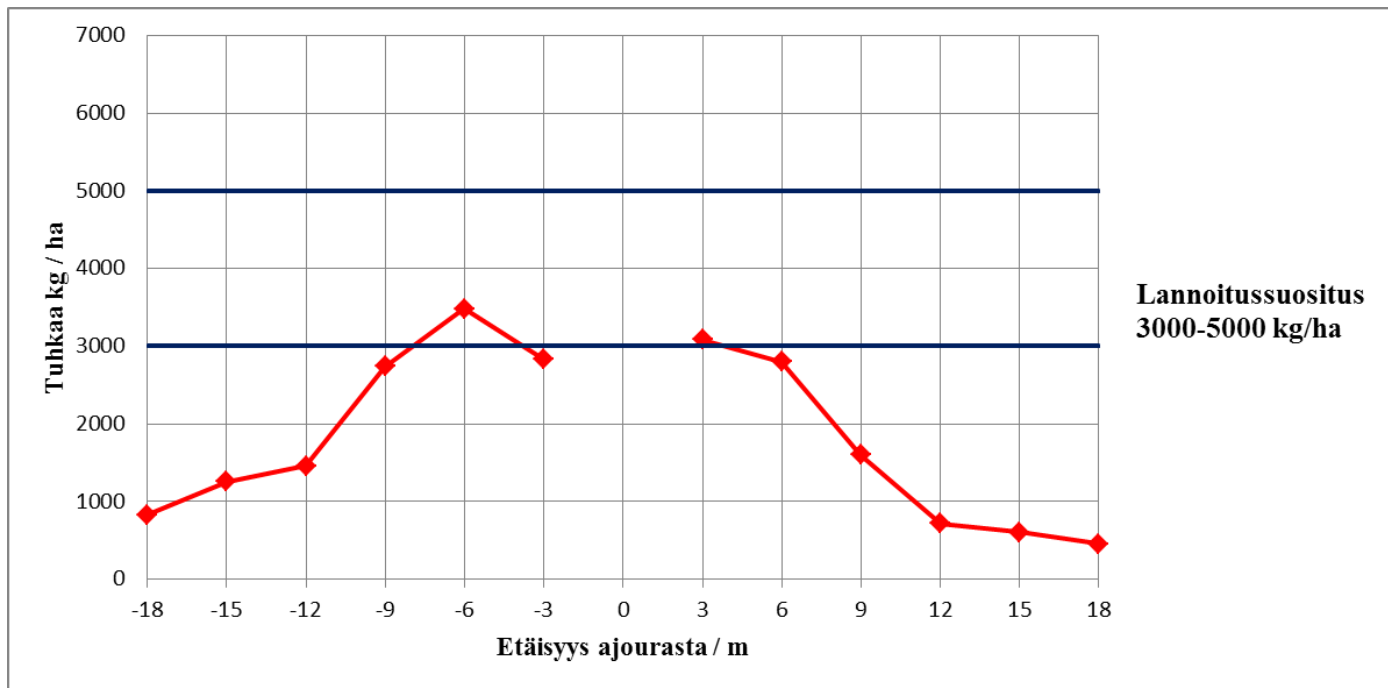


Säkit 29 ja 30 – Elokuun suojattu uusi tuhka





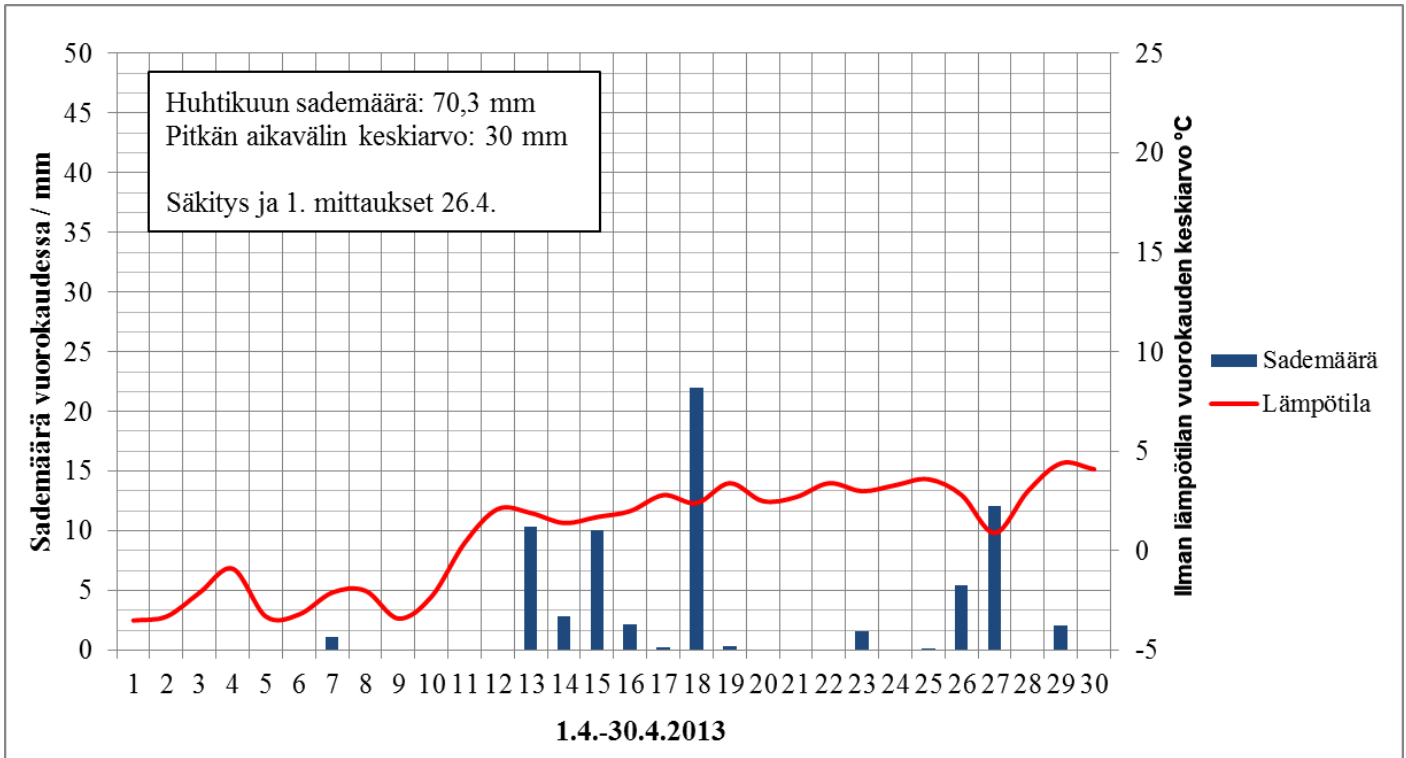
Säkit 31 ja 32 – Elokuun suojaamaton uusi tuhka



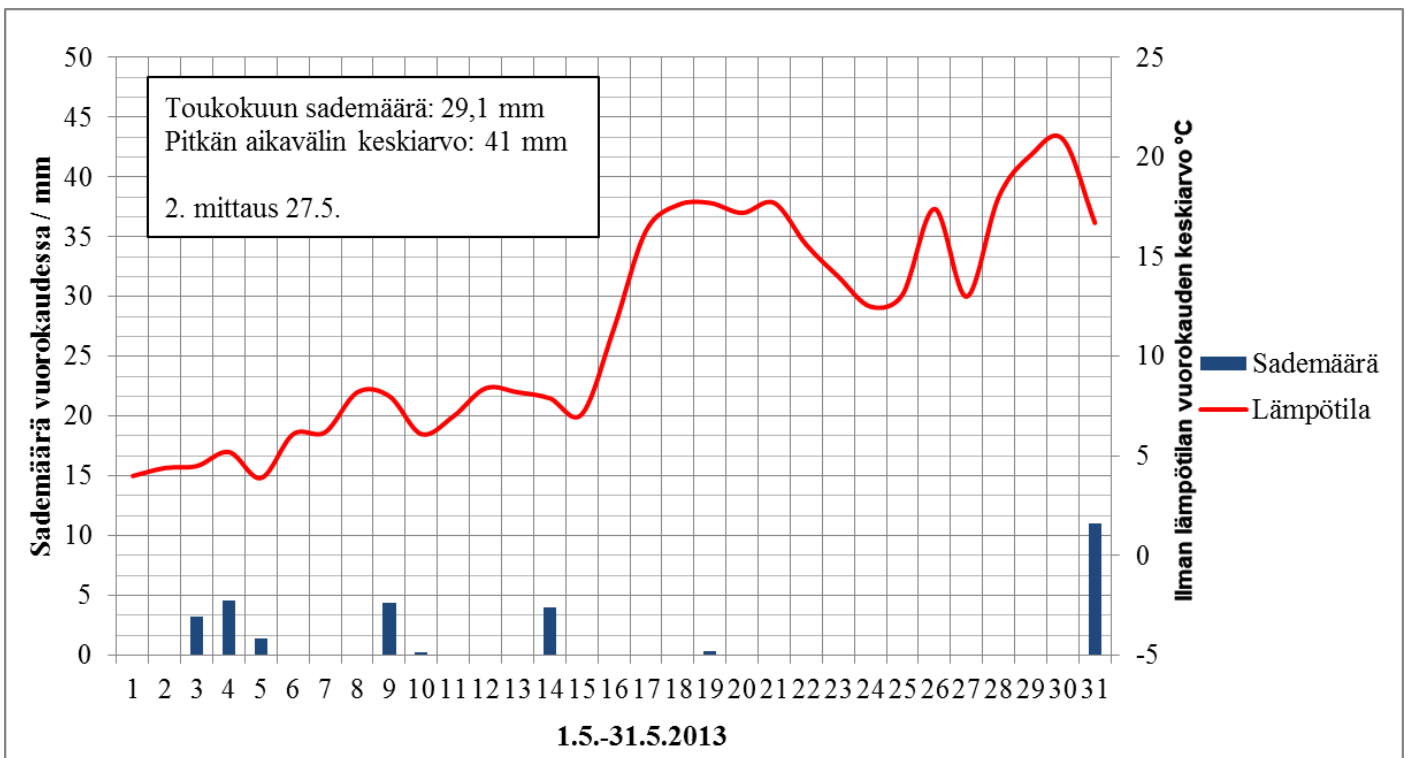
**Sääseurannan yhteenvedot kuukausittain ajalta 1.4.2013–4.2.2014**

Lähde: Ilmatieteen laitoksen ilmastokeskus

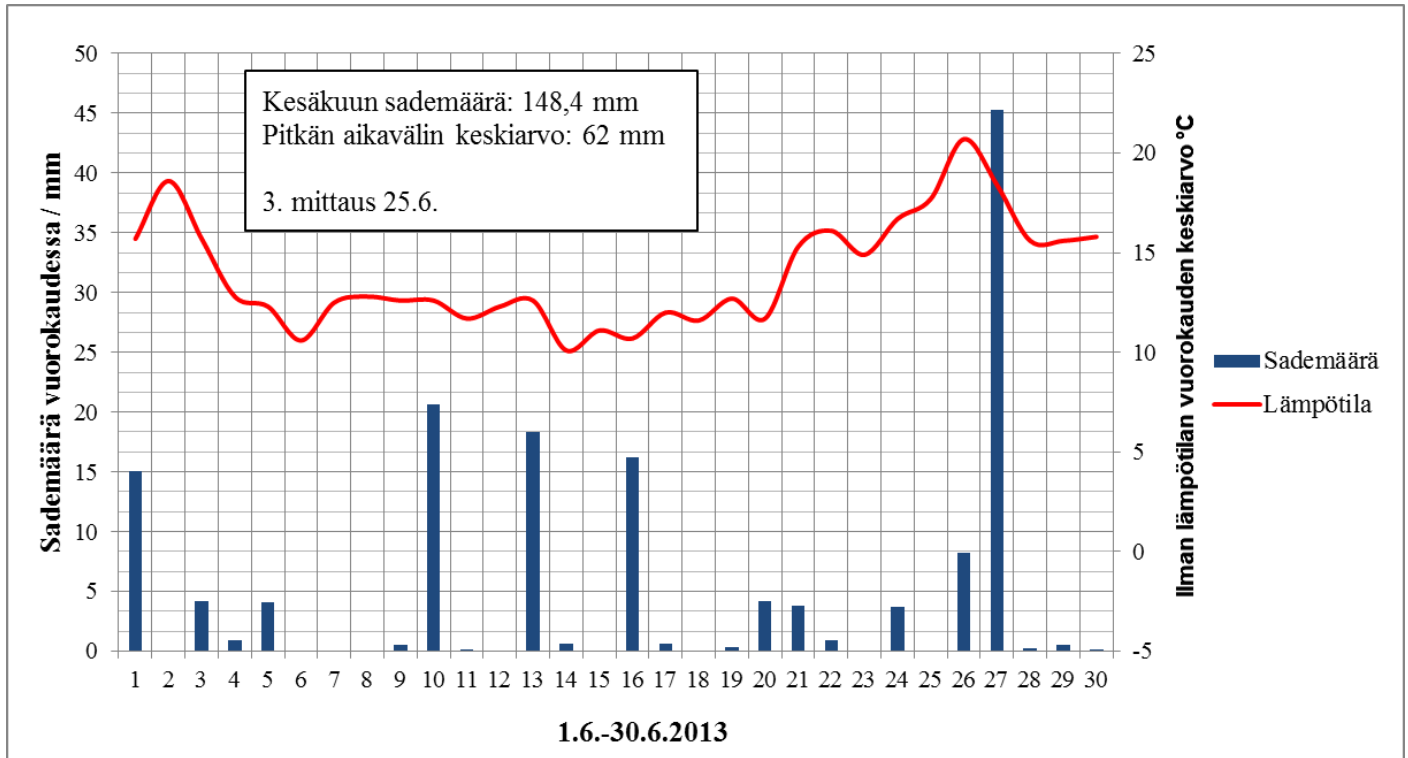
**Huhtikuu 2013**



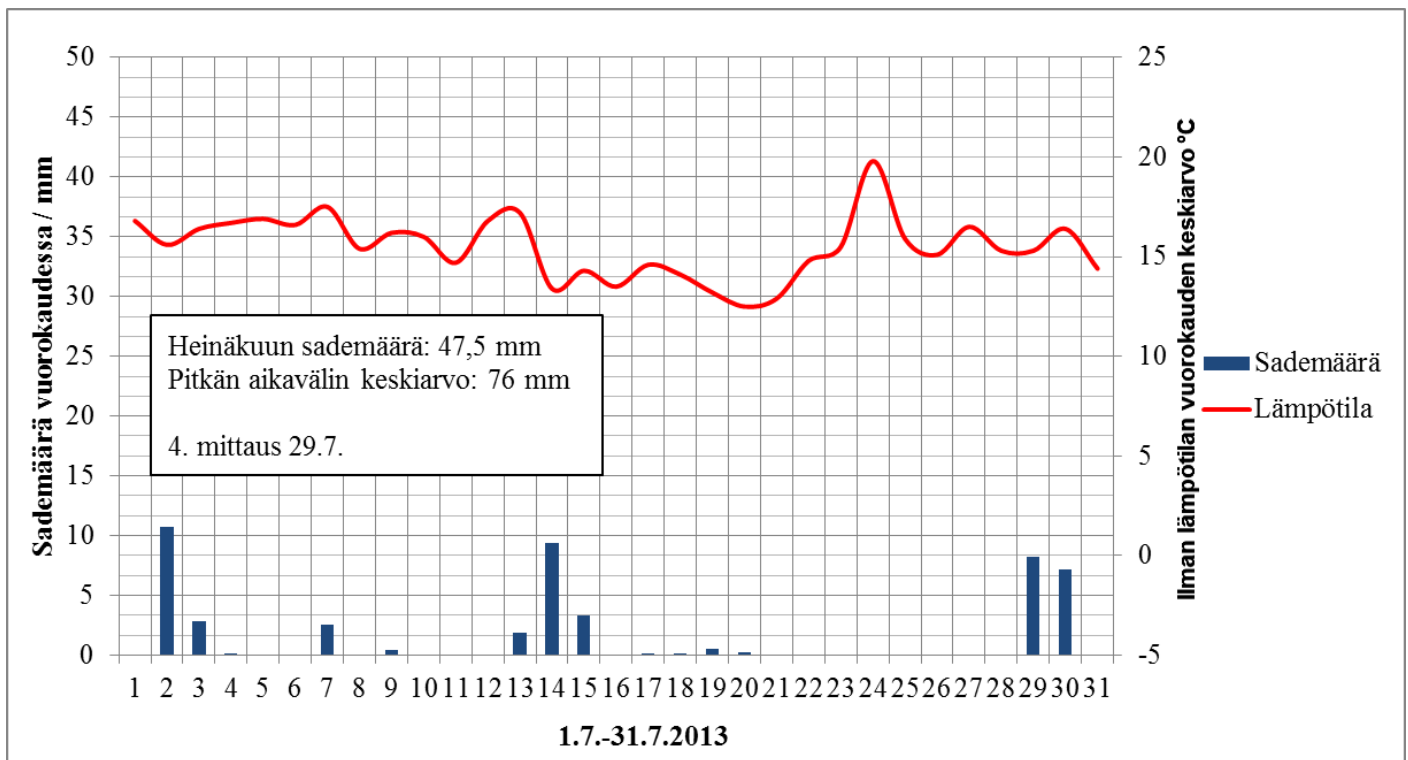
**Toukokuu 2013**



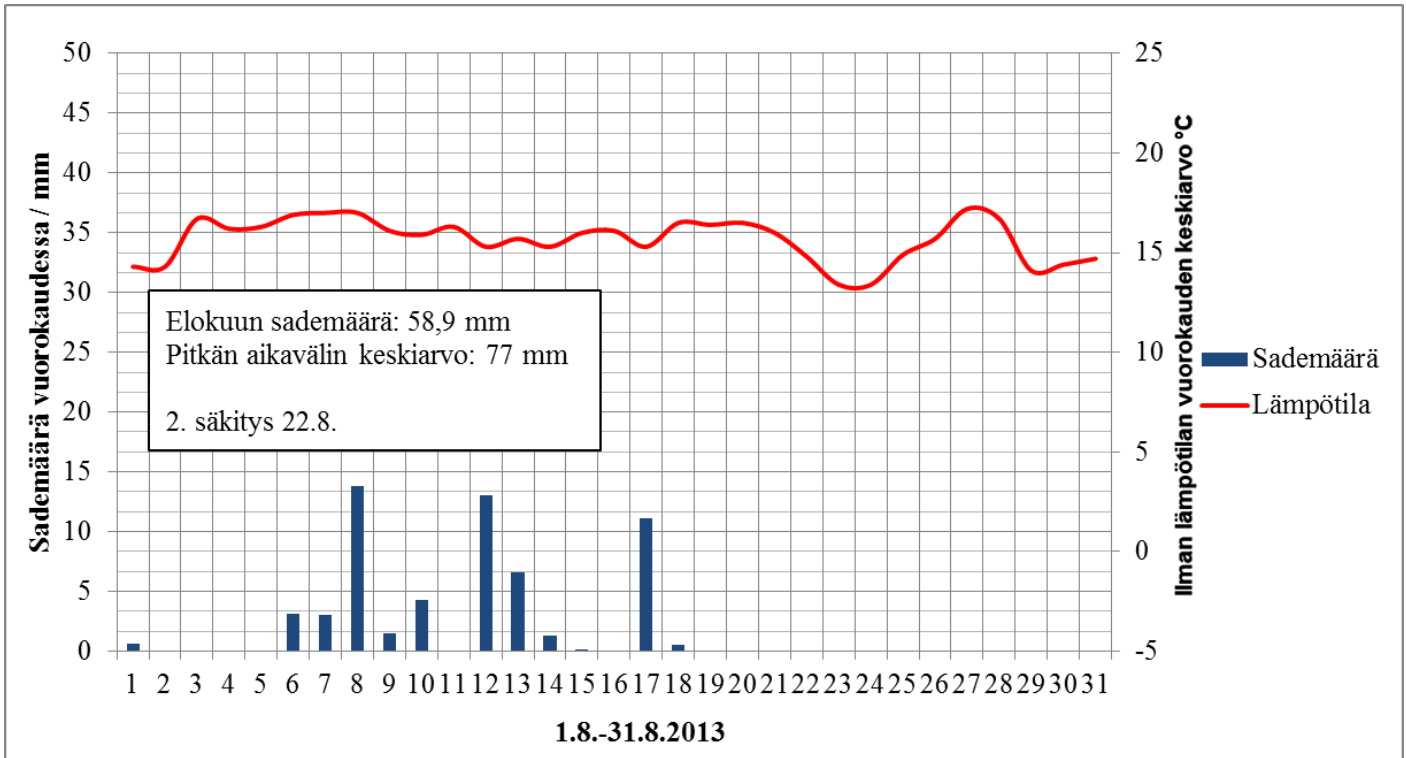
**Kesäkuu 2013**



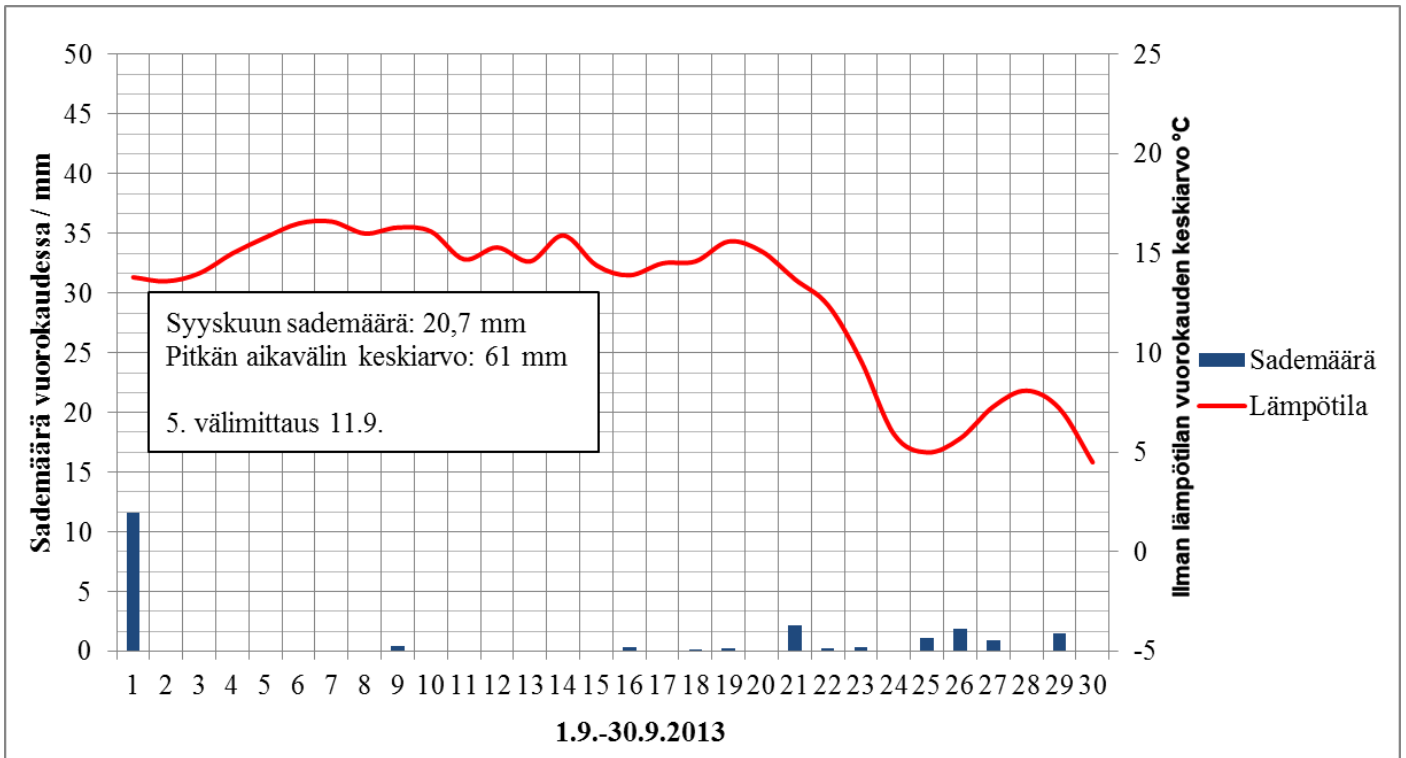
**Heinäkuu 2013**



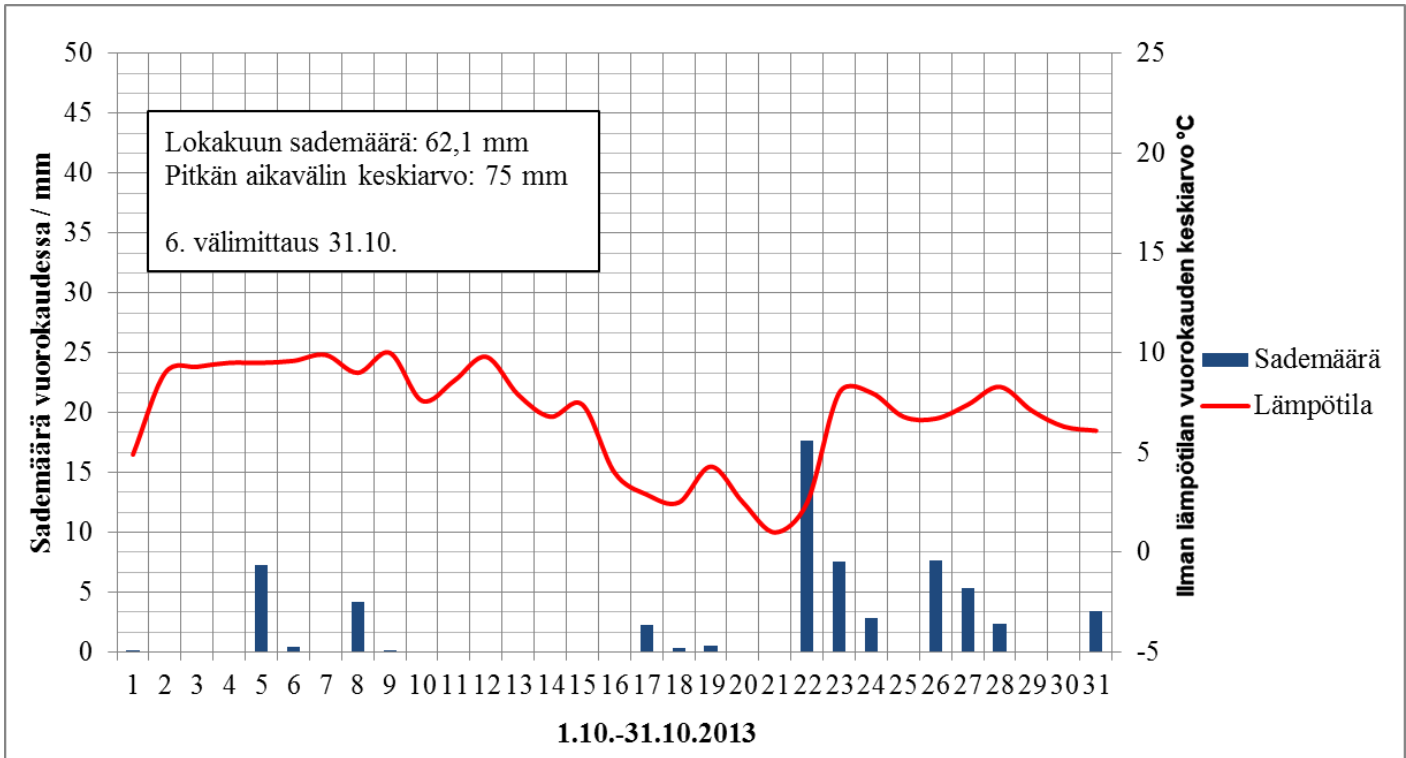
**Elokuu 2013**



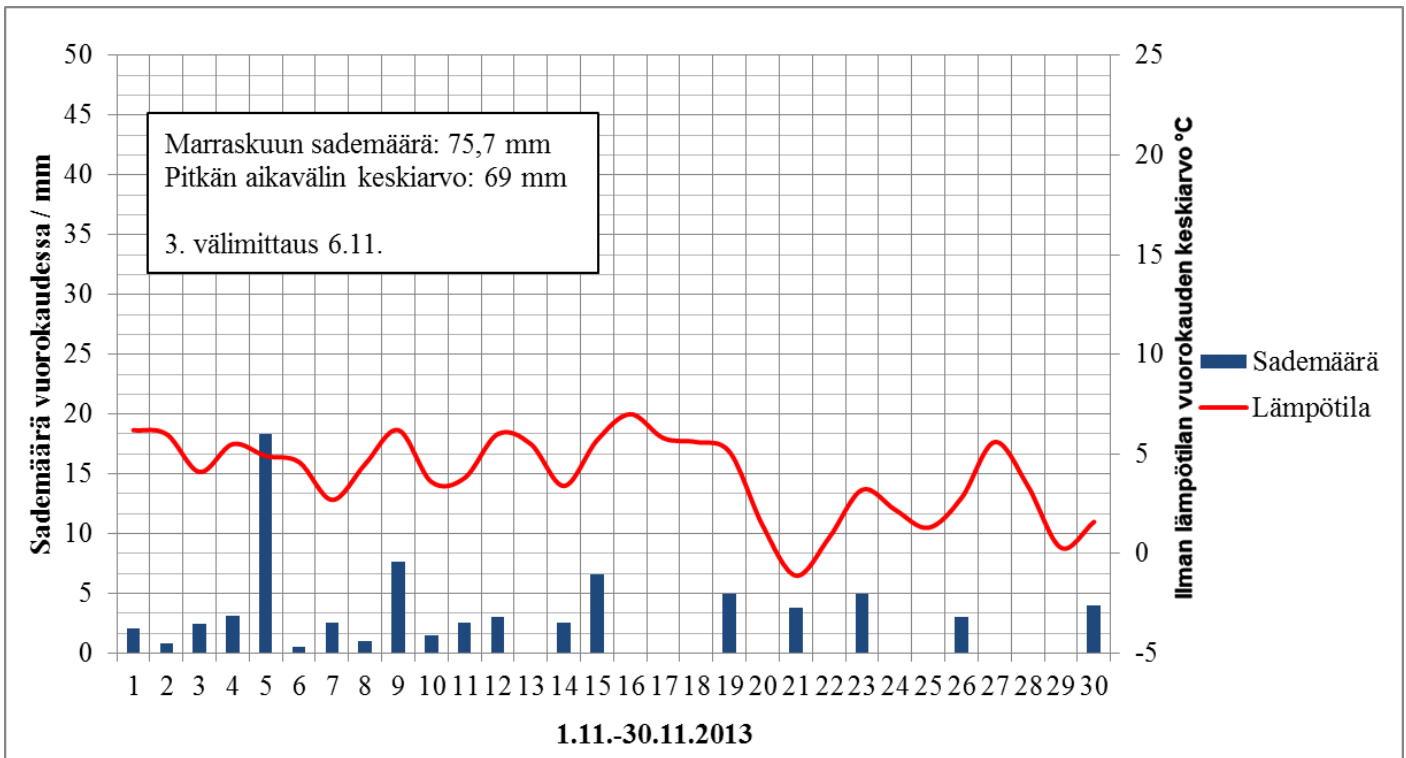
**Syyskuu 2013**



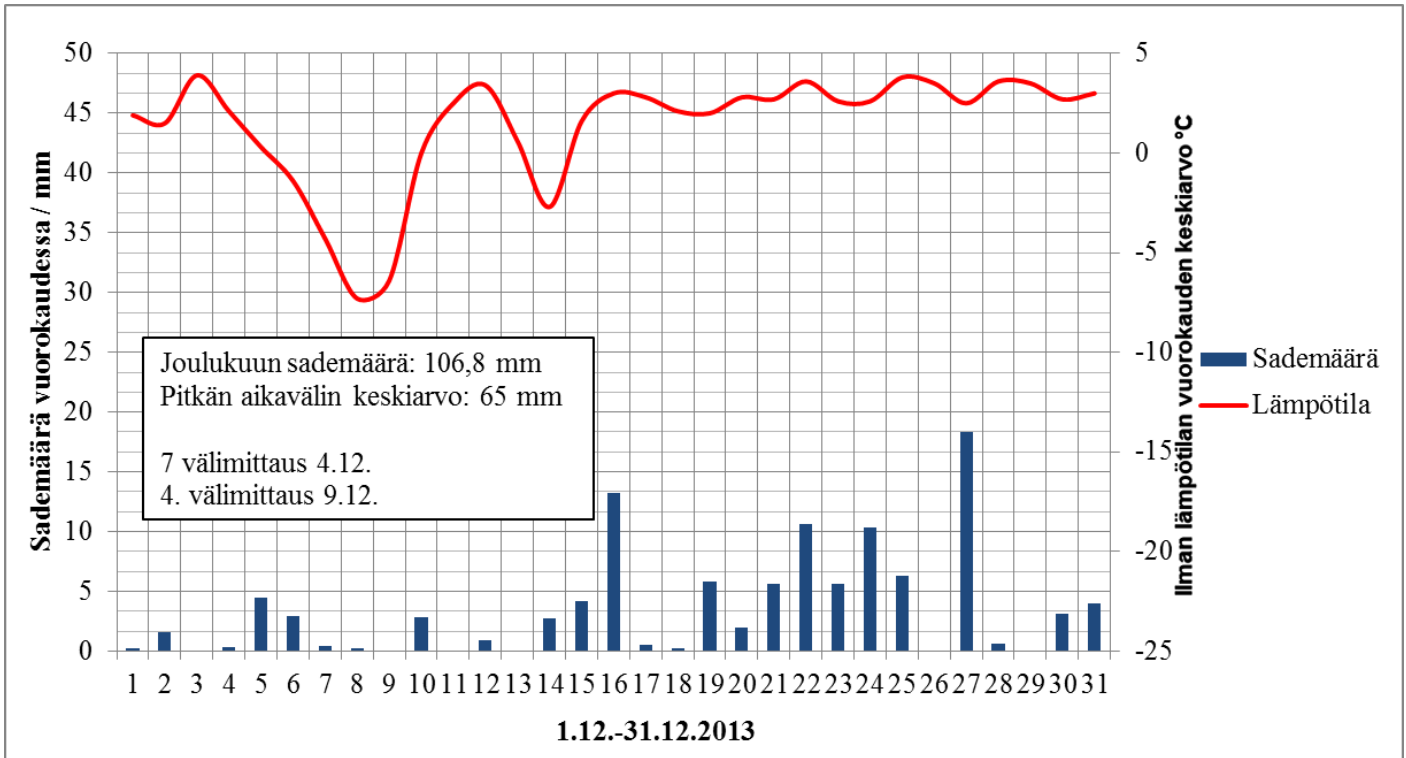
**Lokakuu 2013**



**Marraskuu 2013**



**Joulukuu 2013**



**Tammikuu ja helmikuu 2014**

