

HELEÄ – Vihreään siirtymään ratkaisuja tuhkan hyötykäytön ja tuhkalannoituksen lisäämisellä



Loppuraportti

Emilia Virtanen, Jyväskylän yliopisto



Metsäkeskus



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

Tämä raportti on Heleä -hankkeen Jyväskylän yliopiston työpaketin loppuraportti. Elokuussa 2025 julkaistussa Heleä-hankkeen osaraportissa ([Osaraportti](#)) tarkasteltiin tuhkan ravinne- ja haitta-ainepitoisuuksia polttomateriaalin suhteen. Osaraportissa on myös kuvattuna tuhkien analytiikka, joka on tämän vuoksi jätetty tästä loppuraportista pois. Loppuraportti tarkastelee hankkeessa tuotettua haitta-aineiden käsittelymenetelmää, jonka myötä tuhkan käyttö metsälannoituksessa on mahdollisesti tulevaisuudessa laajamittaisempaa. Lisäksi raportissa tuotetaan tietoa tuhkien ravinteiden liukoisuuteen sekä simuloituissa luonnonolosuhteissa että kenttäkokeen kautta. Raportti on suunnattu tuhkan tuottajille, metsänomistajille sekä muille tuhkan hyötykäyttöön liittyville sidosryhmille. Hanketta toteuttaa Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Jyväskylän yliopiston kiertotalouden osaamiskeskittymä ja Suomen metsäkeskus. Hanke on Euroopan unionin osarahoittama ja se kuuluu oikeudenmukaisen siirtymän (JTF) rahoitusohjelmaan. Lisätietoja hankkeesta on saatavilla hankkeen henkilöstöltä sekä osallistuvien organisaatioiden verkkosivuilta.

Lisätietoja

Jamk: Asiantuntija, hankkeen projektipäällikkö Leena Turunen, leena.turunen@jamk.fi

Jyväskylän yliopisto: Professori Ari Väisänen, ari.o.vaisanen@jyu.fi (Yliopistonlehtori Rose Matilainen, rose.b.matilainen@jyu.fi)

Suomen metsäkeskus: Projektipäällikkö Salla Laukkanen, salla.laukkanen@metsakeskus.fi

www.jamk.fi/projekti/helea

www.jyu.fi/fi/hankkeet/helea

www.metsakeskus.fi/fi/hankkeet/helea



Euroopan unionin
osarahoittama



KESKI-SUOMEN LIITTO

Johdanto

Heleä-hankkeen tavoitteena on vahvistaa sekä pienten ja keskisuurten yritysten että metsien elinvoimaisuutta kehittämällä kiertotalouden ratkaisuja tukemalla tuhkan hyötykäyttöä metsälannoitteena. Tuhkan hyötykäyttö tarjoaa merkittävän mahdollisuuden parantaa metsien kasvua ja ravinnetilaa sekä vahvistaa kotimaisen lannoitetuotannon huoltovarmuutta, erityisesti tilanteessa, jossa perinteisten lannoiteraaka-aineiden saatavuus on heikentynyt ja hinnat vaihtelevat voimakkaasti. Samalla tuhkan kierrättäminen takaisin biomassan tuotantoon tukee kansallisia ilmasto- ja kiertotaloustavoitteita.

Heleä-hankkeen osaraportissa ([Osaraportin linkki](#)) tuhkan laadun havaittiin vaihtelevan polttoaineen ja polttotekniikan mukaan. Vaihtelun seurauksena osa tutkituista tuhista sisältää haitta-ainepitoisuuksia, jotka ylittävät lannoitevalmistelainsäädännön raja-arvot. Erityisesti arseenin ja kadmiumin havaittiin estävän lannoituskäytön tutkituissa tuhissa. Näiden haitta-aineiden korkeat pitoisuudet voivat aiheuttaa riskejä maaperälle ja ekosysteemeille, minkä vuoksi niiden poistaminen tai vähentäminen ennen metsälannoituskäyttöä on edellytys metsätuhkalannoitteelle. Valtakunnallisena tavoitteena on kasvattaa tuhkalannoituksen vuosittaista pinta-alaa noin 30 000 hehtaariin, mikä edellyttää laadultaan tasaisempaa ja lainsäädännön vaatimukset täyttävää materiaalia. Tähän päästään vain kehittämällä kustannustehokkaita ja skaalautuvia haitta-aineiden poisto- ja vähennysmenetelmiä, jotka soveltuvat erilaisten tuhkavirtojen käsittelyyn.

Heleä-hankkeessa Jyväskylän yliopiston tehtävänä on selvittää tuhkan haitta-ainepitoisuuksia ja kehittää menetelmiä, joilla tuhkan laatua voidaan parantaa. Tutkimus perustuu yliopistolla kehitettyihin liuoskemian menetelmiin ja ICP-OES-analytiikkaan. Lisäksi hankkeessa hyödynnettiin XRF-analytiikkaa. Tavoitteena on luoda haitta-aineille käsittelymenetelmä, jolla ne voidaan poistaa tai niiden määrä minimoida, jotta tuhkat saadaan lannoitekelpoisiksi.

Menetelmä haitta-aineiden poistoon

Haitta-ainepitoiset tuhkat

Osaraportissa tutkituista tuhista kahdeksassa havaittiin olevan ylitse maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa määritettyjä haitta-aineita, joista suurimmalla osalla arseenia ja kadmiumia oli yli sallitun pitoisuuden. Pitoisuudet ylittäneet tuhkat ja niiden sisältämät haitta-aineet ovat esitettyinä taulukossa 1 raja-arvojen kanssa.

Taulukko 1. Haitta-ainepitoiset tuhkat ja niiden raja-arvot yksikössä mg/kg. Pitoisuudet ylittävät arvot on merkattu punaisella.

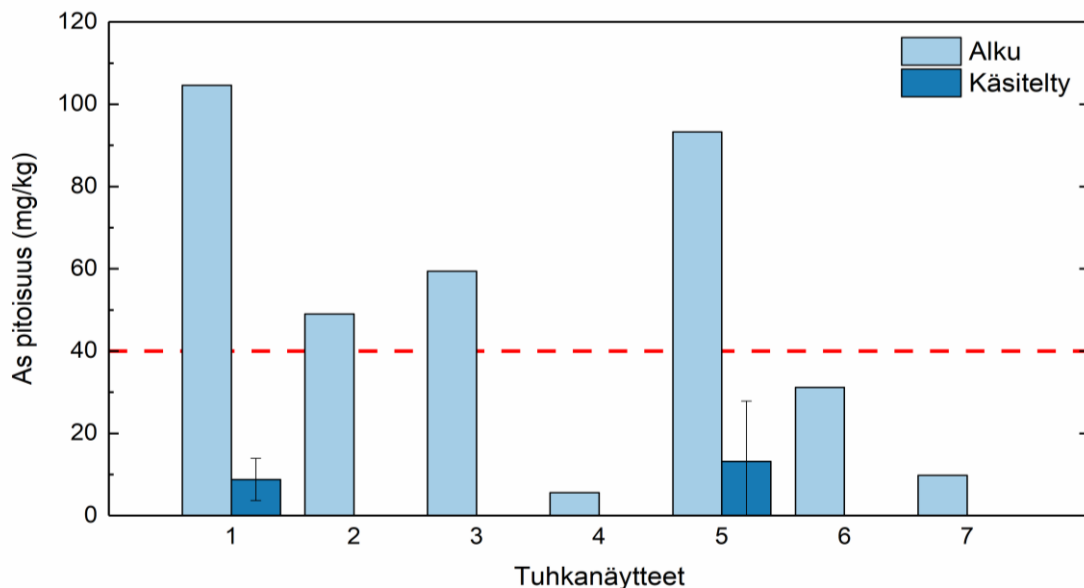
	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)
Raja-arvot	40,0	150	120	600	4500*	300	25
1	105	67,3	86,5	220	48,9	179	27,8
2	49	19,5	16,2	155	711	61,4	20,3
3	59,4	28,2	91,2	215	572	198	16,2
4	5,6	10,3	10,6	122	715	12,5	27,3
5	93,3	332	29,6	268	22900	97,4	74,5
6	31,2	54,8	35,8	235	4350	50,4	36,9
7	9,8	60,0	24,7	150	4940	41,1	25,6
8	0,8	125	3,9	218	10600	170	19,6

*Sinkin enimmäispitoisuuden ylitys on sallittu ainoastaan silloin kun sinkin puute on kasvustosta todettu joko maaperä-, lehti- tai neulasanalyysillä. Tällöin maksimimäärä saa olla enintään 6 000 milligrammaa kilogrammassa kuiva-ainetta.

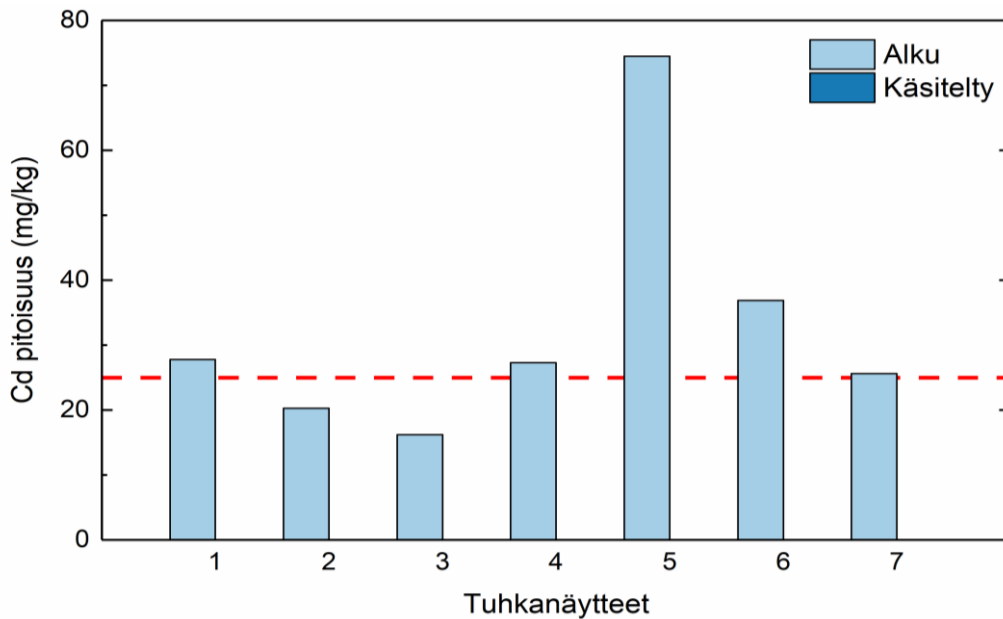
Arseenin ja kadmiumin lisäksi tuhista yhdellä ylitettiin reilusti lyijyn raja-arvo ja kahdella enimmäissinkkipitoisuus, jopa siinäkin tapauksessa, että maaperässä olisi todettuna sinkkivaje. Haitta-aineiden poistoon valittiin kaikki tuhkat, joissa havaittiin arseenin ja kadmiumin pitoisuuksien ylittyneen, vaikka ylitys olisikin hyvin lähellä raja-arvoa. Näin saadaan tutkittua erilaisten tuhkien soveltuvuutta menetelmään.

Menetelmä tuhkien käsittelylle

Haitta-ainepitoisille tuhkille 1–7 kehitettiin kustannustehokas menetelmä haitta-aineiden poistamiseksi, keskittyen erityisesti tuhkissa runsaammin esiintyvien arseenin ja kadmiumin poistoon. Siten tuhkaa 8 ei otettu käsittelyyn. Menetelmässä tuhkia liuotetaan lyhyen ajan verran, jolloin tuhkan sisältämät haitta-aineet siirtyvät nestefaasiin. Liuotuksessa hyödynnetään luonnollista orgaanista happoa, joka vaikuttaa tuhkassa oleviin haitta-aineisiin ilman että kaikki ravinteet liukenevat samalla pois tuhkasta. Tämän ansiosta haitta-aineita voidaan poistaa tuhkasta säilyttäen vaadittu ravinnepitoisuustaso, joka mahdollistaa tuhkien käytön metsätuhkalannoitteena käsittelyn jälkeen. Liuotuksen jälkeen hapan orgaaninen happo neutralisoidaan, jolloin palautetaan tuhkien pH emäksiseksi. Haitta-aineiden poiston tehokkuutta seurattiin määrittämällä alkuainepitoisuudet induktiivisesti kytketyllä plasma-optisella emissiospektrometrillä (ICP-OES). Mittaukset tehtiin tuhkalle käsittelyn jälkeen kokonaishajottamalla osa tuhkasta. Kokonaishajottaminen tehtiin kuningasvedellä ultraääniavusteisesti 60 °C:ssa, kuten [osaraportissa](#) on esitettyä. Analyysin perusteella pystyttiin määrittämään tuhkan alkuainekoostumus käsittelyn jälkeen. Arseenin ja kadmiumin pitoisuudet käsitellyissä tuhkissa ovat esitettyinä kuvissa 1 ja 2 vastaavasti. Muiden haitta-aineiden pitoisuudet ja ravinteiden määrä liitteessä 1.



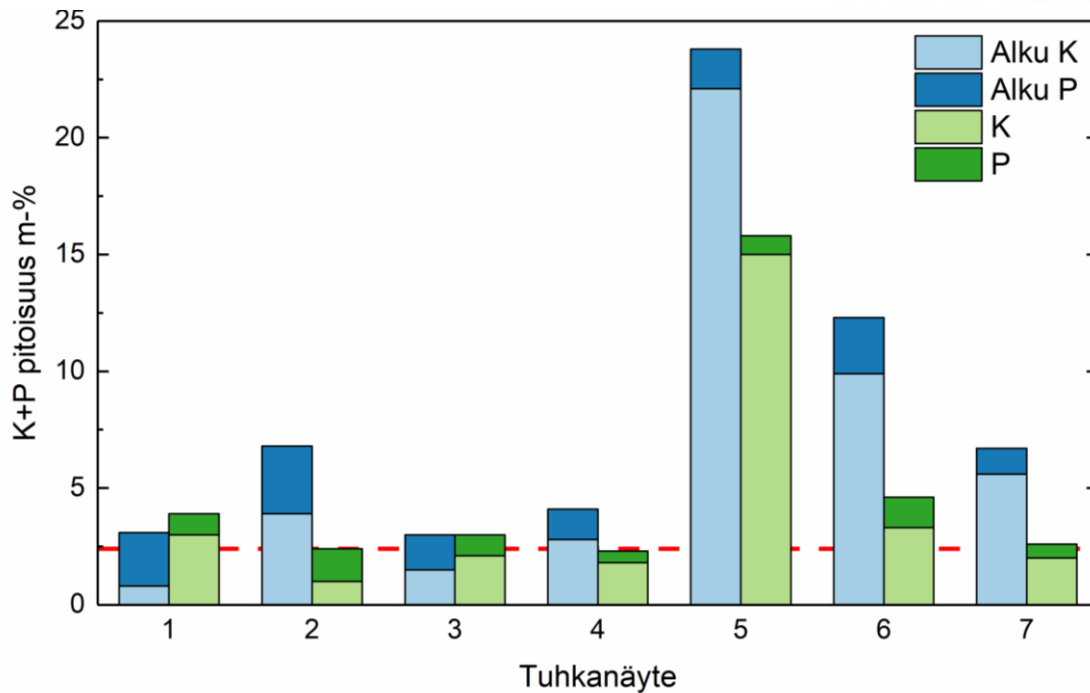
Kuva 1. Arseenin pitoisuus ennen tuhkien käsittelyä ja käsittelyn jälkeen virherajoiheen. Punainen katkoviiva havainnollistaa 40 mg/kg haitta-ainepitoisuusrajaa.



Kuva 2. Kadmiumin pitoisuus ennen tuhkien käsittelyä ja käsittelyn jälkeen. Punainen katkoviiva havainnollistaa 25 mg/kg haitta-ainepitoisuusrajaa.

Käsitellyssä tuhkassa havaittiin pieniä arseenipitoisuuksia tuhkalla 1 ja 5, mutta muiden tuhkien tapauksessa arseenia ei havaittu. Samoin kadmiumin kohdalla, tuhkissa ei havaittu enää kadmiumia käsittelyn jäljiltä.

Haitta-aineiden lisäksi seurattiin myös tuhkien ravinnepitoisuutta käsittelyn jälkeen. Maa ja metsätalousministeriön asetuksen mukaan tuhkissa on oltava yhteensä 2,4 m-% kaliumia ja fosforia, jotta sitä voidaan käyttää metsätuhkalannoitteena. Yhdistetty kalium ja fosforipitoisuus esitettyinä kuvassa 3. Analyysien mukaan suurin osa käsiteltyjen tuhkien ravinteista saadaan pidettyä vaadittavalla tasolla 2,4 m-%:ssa, poikkeuksena tuhka 4, jossa raja hieman alitetaan. Tuhkan 1 ja 3 lisääntynyt kaliumpitoisuus johtuu menetelmässä käytetystä kaliumhydroksidista. Menetelmää on vielä mahdollista optimoida pidemmälle ravinteiden säilyttämisen suhteen.



Kuva 3. Kaliumin ja fosforin yhteispitoisuus tuhkissa ennen käsittelyä sinisellä ja käsittelyn jälkeen vihreällä yksikössä m-%. Punainen katkoviiva merkitsee 2,4 m-% rajaa.

Metsätuhkalannoitteen vaatimukseen on myös kirjattu, että tuhkaan ei saa käsittelyjen yhteydessä lisätä muita aineita yli 10 m-%. Tuhkan massasta pidettiin kirjaa käsittelyn aikana ja todettiin, että käsitelty tuhka ei ylittänyt laissa kirjattua 10 m-% lisäaineiden suhteen. Tuhkien pH:t mitattiin käsittelyn jälkeen ja havaittiin niiden olevan emäksisiä, jolloin ne soveltuvat hyvin happamille metsämaille. Kokonaisuudessaan tulokset osoittavat, että haitta-aineiden postomenetelmä soveltuu eri polttomateriaalista syntyviin ja eri alkuainepitoisiin tuhkiin.

Ravinteiden liukoisuus tuhkista

Rakeistetussa tuhkissa esiintyvien ravinteiden liukoisuutta tarkasteltiin suoveteen laboratoriossa. Erikokoisia tuhkarakeita sekoiteltiin happamassa suovedessä noin kolmen kuukauden ajanjaksolla. Vedestä otettiin näyte aluksi viikon välein, ja myöhemmin kahden viikon välein. Pitoisuuksien ei havaittu nousevan useamman kuukauden seurannasta huolimatta, joten testi lopetettiin kolmen kuukauden kohdalla. Rakeiden ei ole tarkoituskaan liueta nopeasti, joten tulosta voidaan pitää hyvänä tämän kannalta.

Puu- ja seostuhkan annettiin olla altistettuna luonnonolosuhteisiin ajanjaksolla 25.4.2024–10.11.2025. Tuhkat olivat vettäläpäisevissä pusseissa peitettynä verkolla maastossa kuvan 4 mukaisesti. Tuhkat analysoitiin ennen kenttäkoetta, ja kenttäkokeen jälkeen kokonaishajottamalla tuhkat ultraääniavusteisesti. Kyseisen ajanjakson jälkeen kaliumin määrän havaittiin hieman laskeneen, mutta muita merkittäviä muutoksia tuhkien alkuainepitoisuuksissa ei havaittu (liite 2). Kenttäkoe puoltaa tulosta siitä, että ravinteet liukenevat hitaasti maastoon, mahdollistaen tuhkien pitkäaikaisen lannoitusvaikutuksen.



Kuva 4. Tuhkat luonnonolosuhteissa, vasemmalla verkon päältä poistettu luonnosta tulleet lehdet yms. roskat ja oikealla tuhka-astiat ennen altistuksen päättymistä.

Ravinteiden sitoutumista ja kulkeutumista tuhkalannoitettujen alueiden osalta kenttäkokein ei ole voitu suuremmin toteuttaa hankkeeseen käytetyn ajan puitteissa. Tutkimuksessa käytiin kuitenkin ottamassa vesinäytteitä tuhkalannoituskohteelta ja sen läheltä. Näytteitä otettiin lannoittamattomalta alueelta, lannoitetulta alueelta ja purovedestä lannoitetun alueen läheltä. Fosforipitoisuudet purossa ja lannoittamattomalla alueella olivat alhaisia, mutta lannoitetun alueen pitoisuudet olivat koholla (liite 3). Ravinteet eivät siis näytä valuvan lannoitusalueelta viereisiin alueisiin tai puroihin, mikä on hyvä tulos.

Yhteenveto

Aiemmin julkaistussa osaraportissa tutkituista tuhkanäytteistä kahdeksassa havaittiin maa- ja metsätalousministeriön asetuksen raja-arvot ylittäviä haitta-ainepitoisuuksia, yleisimmin arseenin ja kadmiumin osalta. Lisäksi yksittäisissä tuhkissa ylitettiin lyijyn raja-arvo sekä sinkin enimmäispitoisuus. Arseenin ja kadmiumin raja-arvot ylittävät tuhkat valittiin mukaan haitta-aineiden poistomenetelmän kehittämiseen. Hankkeen aikana onnistuttiin kehittämään Haitta-ainepitoisille tuhkille kustannustehokas liuotukseen perustuva käsittelymenetelmä, jossa hyödynnettiin luonnollista orgaanista happoa. Menetelmä osoittautui tehokkaaksi erityisesti arseenin ja kadmiumin poistossa, samalla kun ravinteet säilyivät pääosin tuhkassa. Valtaosa käsitellyistä tuhkista täytti metsätuhkalannoitteen asetetun kaliumin ja fosforin yhteispitoisuusvaatimuksen ($\geq 2,4$ m-%), ja vain yhdessä tapauksessa raja alittui lievästi.

Kehitetty haitta-aineiden puhdistusmenetelmä osoittautui toimivaksi ja käytännössä toteuttamiskelpoiseksi ratkaisuksi haitta-ainepitoisten tuhkien puhdistamiseen. Menetelmä mahdollistaa haitta-aineiden alentamisen sellaiselle tasolle, että puhdistettu tuhka voidaan potentiaalisesti hyödyntää metsätuhkalannoitteena sen sijaan, että materiaali jäisi hyödyntämättä.

Laboratorio- ja kenttäkokeet osoittivat, että rakeistetun tuhkan ravinteet liukenevat hitaasti sekä happamissa olosuhteissa että luonnonympäristössä, mikä tukee tuhkan pitkäaikaista lannoitusvaikutusta. Kenttäkokeessa puu- ja seostuhkien alkuainepitoisuudet säilyivät käytännössä muuttumattomina noin 1,5 vuoden altistuksen aikana. Vesinäytteiden perusteella ravinteiden, erityisesti fosforin, kohonneet pitoisuudet rajoittuivat lannoitetulle alueelle, eikä ravinteiden kulkeutumista viereisiin alueisiin tai pintavesiin havaittu. Tämä viittaa vähäiseen ympäristökuormitukseen tuhkalannoituksen seurauksena.

LIITE 1 Tuhkien haitta-ainepitoisuudet ja ravinteet käsittelyn jälkeen.

	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	8,8	42,4	0,0	65,0	10,0	26,5	0
2	0	0,0	0,0	84,6	173,3	13,8	0
3	0	23,7	66,9	125,5	244,9	103,4	0
4	0	0,0	0,0	79,2	195,8	9,0	0
5	13,2	395,9	0,0	93,7	1280,6	50,0	0
6	0	19,7	0,0	114,6	1130,3	14,9	0
7	0	32,8	0,0	63,4	932,1	15,1	0

	Ca (m-%)	K (m-%)	P (m-%)	B (m-%)
1	2,9	3,0	0,9	0,03
2	17,3	1,0	1,4	0,02
3	12,6	2,1	0,9	0,03
4	18,7	1,8	0,5	0,01
5	6,3	15,0	0,8	0,02
6	19,4	3,3	1,3	0,05
7	15,6	2,0	0,6	0,03

LIITE 2 Luonnonolosuhteille altistettujen tuhkien ravinnepitoisuudet ennen altistusjaksoa ja sen päätyttyä.

	Altistettu tuhka 1		Altistettu tuhka 2	
	Alku	Altistuksen jälkeen	Alku	Altistuksen jälkeen
Ca (m-%)	5,9 %	5,7 % ± 0,1 %	18,2 %	23,4 % ± 0,4 %
K (m-%)	0,9 %	0,3 % ± 0,1 %	5,1 %	3,8 % ± 0,2 %
P (m-%)	2,3 %	2,1 % ± 0,1 %	1,9 %	2,4 % ± 0,1 %
B (m-%)	0,05 %	0,05 % ± 0,01 %	0,03 %	0,02 % ± 0,01 %

LIITE 3 Tuhkalannoituskohteen vesinäytteet

Mitattu alkuaine	Lannoittamaton alue	Lannoitettu alue	Purovesi läheltä aluetta
Ca (mg/l)	5,1 ± 0,2	1,4 ± 0,1	6,0 ± 0,4
K (mg/l)	1,8 ± 0,8	0,0 ± 0,0	1,7 ± 0,6
P (mg/l)	0,1 ± 0,1	1,5 ± 0,4	0,4 ± 0,3