

TUHKAN KÄYTTÖ METSÄLANNOITTEENA

Noora Huotari



METLA

Tuhkan käyttö metsälannoitteena

Noora Huotari

Kansikuva: Muhoksen Leppiniemen vuonna 1947 perustettu tuhkalannoituskoje.

Kuvassa puutuhkalla lannoitettu koeala 62 vuotta lannoituksen jälkeen.

Kuva: Sanna Korpela / Metla

Takakannen pienet kuvat ylhäältä alas: Erkki Oksanen, Asko Kaikusalo, Noora Huotari ja Noora Huotari

Valokuvat: Jorma Issakainen / Metla (ellei toisin mainita)

Taitto, kansi, ulkoasu ja kuvankäsittely: Irene Murtovaara / Metla

2., päivitetty painos

ISBN 978-951-40-2402-3 (nid.)

ISBN 978-951-40-2403-0 (PDF)

Paino: Vammalan kirjapaino Oy 2012

Sisällys

ALKUSANAT	5
1 TUHKAN KOOSTUMUS	6
1.1 Kirjallisuutta.....	7
2 TUHKAN LAATUVAATIMUKSET JA ESIKÄSITTELY	9
2.1 Tuhkalannoitteiden laatuvaatimukset.....	9
2.2 Tuhkan stabiloiminen.....	10
2.3 Tuhkan ”terästäminen”	11
2.4 Kirjallisuutta.....	12
3 TUHKALANNOITUKSEN MAAPERÄVAIKUTUKSET	14
3.1 Maan happamuus (pH) ja ravinteet.....	14
3.2 Raskasmetallit.....	15
3.3 Maaperäeliöt.....	15
3.4 Maaperän kasvihuonekaasupäästöt (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O).....	16
3.5 Kirjallisuutta.....	17
4 TUHKALANNOITUKSEN PUUSTOVAIKUTUKSET	22
4.1 Puiden ravinnetila ja kasvu.....	22
4.1.1 Ojitetut suometsät.....	22
4.1.2 Entiset turvetuotantoalueet ja suopellot	24
4.1.3 Kangasmetsät	25
4.2 Puiden raskasmetallipitoisuudet.....	26
4.3 Kirjallisuutta.....	26
5 TUHKALANNOITUKSEN KASVILLISUUSVAIKUTUKSET	30
5.1 Kasvilajisto ja -lajien väliset runsaussuhteet	30
5.2 Kasvien ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet.....	32
5.3 Marjat ja sienet	32
5.4 Kirjallisuutta.....	33
6 TUHKALANNOITUKSEN VAIKUTUKSET ELÄIMIIN	36
6.1 Kirjallisuutta.....	36
7 TUHKALANNOITUKSEN VESISTÖVAIKUTUKSET	38
7.1 Kirjallisuutta.....	39
8 TUHKALANNOITUKSEN TOTEUTTAMINEN.....	41
8.1 Tuhkalannoitukseen soveltuvat kohteet.....	41
8.2 Logistiikka ja tuhkan levittäminen.....	43
8.3 Kirjallisuutta.....	44
9 YHTEENVETO	46

ALKUSANAT

Tämä tuhkalannoitusopas on osa Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) hallinnoimaa ”Tuhkan rakeistus Pohjois-Pohjanmaalla” -hanketta, joka on toteutettu vuosina 2011–2012 yhteistyössä Oulun yliopiston kemian laitoksen kanssa. Opas on tarkoitettu viranomaisen, päättäjien ja tuhkalannoitteiden käyttäjien avuksi. Tavoitteena on myös, että tuhka-asioiden parissa työskentelevät tutkijat ja asiantuntijat voisivat hyödyntää tätä tuhkaopasta tulevissa tutkimus- ja selvitystöissään.

Käsillä olevaan oppaaseen on koottu nykyinen kotimaiseen ja kansainväliseen tutkimustietoon perustuva tietämyksemme puu- ja turvetuhkan käytöstä metsälannoitteena. Oppaassa käsitellään tuhkan ominaisuuksia ja esikäsittelyä, tuhkalannoituksen vaikutuksia puuston kasvuun ja ympäristöön sekä tuhkalannoituksen toteuttamista. Opas on päivitetty versio aikaisemmin ilmestyneistä oppaista. Teksti on jaettu aihepiireittäin kahdeksaan lukuun, jotka perustuvat kunkin luvun lopussa lueteltuihin tutkimusjulkaisuihin. Tekstissä on runsaasti viitteitä, joiden avulla lukija voi tarvittaessa löytää käytetyt alkuperäisjulkaisut.

Kiitän työtovereitani tutkijoita FT Eila Tillman-Sutelaa, MH Mikko Moilasta ja FT Eero Kubinia sekä MTI Jorma Issakaista, DI Sanna Moilasta ja FM Sanna Korpelaa Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) Oulun toimipaikasta kaikesta avusta ja arvokkaista kommentteista, jotka ovat parantaneet käsikirjoitusta ja oppaan rakennetta. Lisäksi haluan kiittää Metlan tutkijoita FT Anna Saarsalmea, MMT Sirpa Piiraista ja MMT Jyrki Hytöstä, jotka ovat kommentoineet käsikirjoitusta omien erityisosaamisalojensa eli tuhkalannoituksen maaperä-, vesistö- ja puustovaikutusten osalta. MMT Mikko Räisänen FA Forrest Oy:stä on kommentoinut käsikirjoitusta tuhkan laatuvaatimusten, esikäsittelyn sekä logistiikan ja levityksen osalta. Tutkija FM Laura Karvonen Oulun yliopiston kemian laitokselta on kommentoinut tuhkan koostumukseen liittyvää osaa ja ylitarkastaja Titta Suoniitty Evirasta tuhkan laatuvaatimukseen liittyvää osaa. Kiitokset kaikille heille arvokkaista kommentteista! Kiitän myös tutkimusgraafikko Irene Murtovaaraa oppaan taidosta ja ulkoasusta. Lopuksi haluan kiittää kaikkia hankkeessa mukana olleita tahoja yhteistyöstä. Toivon, että tästä oppaasta on iloa ja hyötyä kaikille tuhkalannoituksen parissa työskenteleville ja tuhkalannoituksesta kiinnostuneille.

Oulussa 3.5.2012 Noora Huotari

Yhteystiedot

Metsäntutkimuslaitos Oulu

Rakentajantie 3

PL 413

90014 Oulun yliopisto

e-mail: noora.huotari@metla.fi

I TUHKAN KOOSTUMUS

Suomen lämpö- ja voimalaitoksissa arvioidaan syntyvän vuosittain yhteensä noin 600 000 tonnia puu-, turve- ja sekaturhua (Emilsson 2006). Eri voimalaitoksissa syntyvät tuhkat vaihtelevat alkuainekoostumukseltaan mm. käytetystä polttoaineesta, -prosessista ja -lämpötilasta sekä savukaasujen puhdistustekniikasta riippuen (Etiegni ym. 1991, Olanders & Steenari 1995, Steenari ym. 1999, Demeyer ym. 2001, Österbacka 2001, Korpilahti 2004, Augusto ym. 2008, Ojala 2010, Nurmesniemi ym. 2011). Puutuhkassa on mm. puulajista ja poltettavasta puuositteesta riippuen keskimäärin 0,2–3 % fosforia (P), 0,5–10 % kaliumia (K), 5–40 % kalsiumia (Ca) ja alle 0,1 % booria (B) (Moilanen 2005). Turvetuhkassa erityisesti kalsiumin, kaliumin ja boorin pitoisuudet ovat matalampia kuin puutuhkassa. Turvetuhkista on mitattu keskimäärin seuraavanlaisia ravinnepitoisuuksia: 0,5–2 % fosforia, 0,2–0,4 % kaliumia, 5–10 % kalsiumia ja alle 0,01 % booria (Moilanen 2005). Puhdas puutuhka sisältää tavallisesti tyypeä lukuun ottamatta kaikki puiden tarvitsemat ravinteet oikeissa suhteissa (Vesterinen 2003, Karlton ym. 2008), joten se soveltuu sellaisenaan metsälannoitteeksi. Puhdasta puutuhkaa muodostuu kuitenkin Suomen energia- ja lämpölaitoksissa nykyisin suhteellisen vähän ja valtaosa syntyvästä tuhkasta on puu- ja turvetuhkan seosta. Erilaisten sekaturhkien alkuainepitoisuudet vaihtelevat käytettyjen polttoainesuhteiden mukaan (Taulukko 1).

Ravinteiden lisäksi tuhkaan rikastuu jonkin verran myös puun ja turpeen sekä muiden poltettavien biomassojen sisältämiä raskasmetalleja, esimerkiksi kadmiumia (Cd), arseenia (As), kromia (Cr) ja nikkeliä (Ni). Turvetuhkan raskasmetallipitoisuudet ovat tavallisesti pienemmät kuin puutuhkan (Korpilahti 2004). Arseenia on kuitenkin turvetuhkassa usein enemmän kuin puutuhkassa. Useat raskasmetalleiksi luokiteltavista alkuaineista, kuten mangaani (Mn), kupari (Cu) ja sinkki (Zn), ovat kasveille tarpeellisia hivenaineita. Osa raskasmetalleista, kuten kadmium ja lyijy (Pb), on kuitenkin kasveille ja muille eliöille haitallisia tai jopa



Käytetty polttoaine vaikuttaa syntyvän tuhkan alkuainekoostumukseen ja laatuun.

myrkyllisiä jo pieninä pitoisuuksina (Pasanen ym. 2001, Reimann ym. 2008). Puun poltossa syntyvät tuhkat sisältävät myös vaihtelevia pitoisuuksia radioaktiivista cesium-137:ää, joka on peräisin Tshernobylin ydinvoimalaitoksen onnettomuudesta (Rantavaara & Moring 2001, Vetikko ym. 2004). Tuhkan hyötykäyttöä varten metsälannoitukseen sopivat tuhkaerät onkin tärkeää erotella jo voimalaitoksilla.

Taulukko 1. Oulun energialaitosten keskimääräiset polttoainesuhteet ja poltossa syntyneiden sekaturvikaerien näytteistä analysoidut kokonaisalkuainepitoisuudet vuonna 2011.

Polttoainesuhde keskimäärin				
	Oulun Energia (6 näytettä) turve 73 % puu 27 %		Laanilan Voima (3 näytettä) turve 55 %, puu 25 %, kivihiili 12 %, kaasut 7 %, polttoöljyt 1 %	
pH	11,1–11,5		12,1–12,4	
Alkuaine	g/kg	%	g/kg	%
Typpi (N)				
Fosfori (P)	9,1–12	0,9–1,2	6,6–7,4	0,7
Kalium (K)	4,3–5,8	0,4–0,6	4,6–7,5	0,5–0,8
Kalsium (Ca)	65–89	6,5–8,9	59–76	5,9–7,6
Magnesium (Mg)	11–16	1,1–1,6	12–26	1,2–2,6
Rikki (S)	4,9–6,5	0,5–0,7	7,0–13	0,7–1,3
Mangaani (Mn)	1,8–2,2	0,2	1,3–1,8	0,1–0,2
Natrium (Na)	2,8–3,5	0,3	2,6–3,8	0,3–0,4
Rauta (Fe)	125–151	13–15	86–101	8,6–10,1
Alumiini (Al)	41–44	4,1–4,4	39–60	3,9–6,0
	mg/kg	%	mg/kg	%
Arseeni (As)	26–34	<0,1	28–35	<0,1
Boori (B)	36–60	<0,1	100–120	<0,1
Sinkki (Zn)	180–260	<0,1	130–220	<0,1
Kupari (Cu)	77–100	<0,1	51–63	<0,1
Kromi (Cr)	92–110	<0,1	55–71	<0,1
Nikkeli (Ni)	42–53	<0,1	200–250	<0,1
Kadmium (Cd)	1,2–1,8	<0,1	0,8–1,4	<0,1
Lyijy (Pb)	33–51	<0,1	26–39	<0,1
Molybdeeni (Mo)	5,2–7,5	<0,1	8–8,9	<0,1

Lähteet: Karvonen ym. 2012, Pesonen 2012.

1.1 Kirjallisuutta

- Augusto L, Bakker MR & Meredieu C (2008) Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks. *Plant and Soil* 306: 181–198.
- Demeyer A, Voundi Nkana JC & Verloo MG (2001) Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77: 287–295.
- Emilsson S (2006) International handbook: from extraction of forest fuels to ash recycling. Skogsstyrelsen, Swedish Forest Agency. 42 p. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Recash_International_Handbook_Final2006_EN.pdf

- Etiegni L & Campbell AG (1991) Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bio-resource Technology* 37: 173–178.
- Karlton E, Saarsalmi A, Ingerslev M, Mandre M, Andersson S, Gaitnieks T, Ozolinčius R, Varnagiryte-Kabasinskiene I (2008) Wood ash recycling – possibilities and risks. In: Rösler *et al.* (eds.) Sustainable use of forest biomass for energy: a synthesis with focus on the Baltic and Nordic region. *Managing Forest Ecosystems* 12: 79–108.
- Karvonen L, Pesonen J, Kuokkanen V & Kuokkanen T (2012) Tuhkan rakeistus Pohjois-Pohjanmaalla. Tuhkien jakeistus, niiden kemialliset ominaisuudet ja hyödyntämispotentiaali (pdf). Oulun yliopiston kemian laitoksen raporttisarja. Raportti no. 86. 106 s.
- Korpilahti A (2004) Puu- ja turvetuhkan analysointi ja analyysituloksia. Metsätehon raportti 172. 26 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_172.pdf
- Moilanen M (2005) Suometsien lannoitus. Teoksessa: Ahti E, Kaunisto S, Moilanen M & Murtovaara I (toim.) Suosta metsäksi – Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Vantaan toimintayksikkö. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 947: 134–166.
- Nurmesniemi H, Mäkelä M, Pöykiö R & Dahl O (2011) Comparison of the fertilizer properties of ash fractions from medium-sized (32 MW) and small-sized (6 MW) municipal district heating plants. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 75: 1144–1148.
- Ojala E (2010) Selvitys puu- ja turvetuhkan lannoite- sekä muusta hyötykäytöstä. Motiva, Energiateollisuus. 36 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.energia.fi/sites/default/files/tuhkaselvitys_eo_final.pdf
- Olanders B & Steenari BM (1995) Characterization of ashes from wood and straw. *Biomass and Bioenergy* 8: 105–115.
- Pasanen J, Louekari K & Malm J (2001) Cadmium in wood ash used as forest fertilizer in forestry: risks to the environment and human health. Ministry of Agriculture and Forestry, publications 5/2001. Helsinki. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/julkaisusarja/MMMjulkaisu2001_5.pdf
- Pesonen J (2012) Oulun biotuhkien fraktiointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali. Pro gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, kemian laitos. 122 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Janne-Pesonen-pro-gradu.pdf>
- Pitman RM (2010) Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts. *Forestry* 79, 563–588.
- Rantavaara A & Moring M (2001) Puun tuhkan radioaktiivisuus. Säteilyturvakeskus, STUK-A177. Oy Edita Ab, Helsinki. 41 s.
- Reimann C, Ottesen RF, Andersson M, Arnoldussen A, Koller F & Englmaier P (2008) Element levels in birch and spruce wood ashes – green energy? *Science of The Total Environment* 393: 191–197.
- Steenari B-M, Karlsson LG & Lindqvist O (1999) Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. *Biomass and Bioenergy* 16: 119–136.
- Vesterinen P (2003) Wood ash recycling – State of the art in Finland and Sweden. VTT Research Report PRO2/6107/03, 52 p. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.cti2000.it/solidi/WoodAshReport%20VTT.pdf>
- Vetikko V, Valmari T, Oksanen M, Rantavaara A, Klemola S & Hänninen R (2004) Energiäteollisuudessa syntyvän puuntuhkan radioaktiivisuus ja sen säteilyvaikutukset. STUK-A200. Helsinki 2004, 99 + 7 s.
- Österbacka J (2001) Esikäsittelyn vaikutuksesta puu- ja turvetuhkien ominaisuuksiin ja ravinteiden liukenemiseen. Metsätehon raportti 109. 24 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_109.pdf

2 TUHKAN LAATUVAATIMUKSET JA ESIKÄSITTELY

2.1 Tuhkalannoitteiden laatuvaatimukset

Suomessa tuhkan hyötykäyttöä lannoitteena säätelee lannoitevalmistelaki (539/2006) ja sen perusteella annetut asetukset (MMM asetus 24/11). Laissa määritellään mm. metsien lannoitukseen käytettävien tuhkien laatuvaatimukset, tuhkalannoitteille laadittavan tuoteselosteen sisältö sekä tuottajan vastuu ja velvollisuudet. Näillä määräyksillä pyritään varmistamaan, että Suomessa markkinoille saatettavat lannoitevalmisteet ovat tasalaatuisia, turvallisia ja käyttötarkoitukseensa sopivia. Lannoitevalmisteiden valvonnasta vastaa Elintarviketurvallisuusvirasto Evira.

Tuhkalannoitteena tai sen raaka-aineena voidaan käyttää puun, turpeen tai peltobiomassan polttamisesta syntynyttä tuhkaa sekä eläinlannan poltossa syntynyttä tuhkaa. Tuhka on myös käsiteltävä siten, että pölyäminen on mahdollisimman vähäistä. Metsälannoitteena käytettävässä tuhkassa fosforin (P) ja kaliumin (K) yhteispitoisuuden tulee olla vähintään 2 % ja kalsiumin (Ca) vähintään 6 % (MMM asetus 24/11). Fosforin ja kaliumin keskinäisen suhteen tulee kuitenkin olla noin 1:2, jotta tuhkalannoitteella olisi optimaalinen vaikutus puiden kasvuun. Rakeistettuun tuhkalannoitteeseen saa lisätä epäorgaanisia lannoitevalmisteita sen käyttökelpoisuuden lisäämiseksi tai vähimmäisvaatimusten täyttämiseksi. Jos tuhkalannoitevalmisteeseen on lisätty booria, sen levittäminen pohjavesialueella ja suojelualueilla on kielletty. Jos tuhkaan halutaan lisätä orgaanista ainetta, esimerkiksi biolietettä typpipitoisuuden lisäämiseksi, on sitä valmistavan toiminnanharjoittajan haettava Eviralta tyyppinimeä ennen tuotteen markkinoille saattamista.

Taulukko 2. Metsälannoitteena käytettävälle tuhkalalle asetetut haitallisten metallien sallitut enimmäispitoisuudet mg/kg kuiva-ainetta (MMM asetus 24/11).

Alkuaine	Raja-arvo (mg/kg)	Enimmäiskuormitus (g/ha/v)
Arseeni (As)	40	Enintään 160 g/ha 60 vuoden ajanjaksona annettuna
Elohopea (Hg)	1,0	
Kadmium (Cd)	25	Enintään 100 g/ha 60 vuoden ajanjaksona annettuna
Kromi (Cr)	300	
Kupari (Cu)	700	
Lyijy (Pb)	150	
Nikkeli (Ni)	150	
Sinkki (Zn)	4500 ¹⁾	

¹⁾ Enimmäispitoisuuden ylitys sallittu ainoastaan suomensissä käytettäessä, silloin kun sinkin puute on todettu kasvustosta joko maaperä-, lehti- tai neulasanalyyysillä. Tällöin sinkkiä saa olla lannoitevalmisteissa enintään 6 000 mg/kg.

Tuhkalannoitteet eivät saa aiheuttaa vaaraa tai haittaa ihmisille, eläimille, kasveille tai ympäristölle. Tämän vuoksi valmistajien tulee täyttää niille erikseen asetetut vaatimukset. Metsälannoitteena käytettävälle tuhkalalle on määritetty lannoitevalmistelaisissa haitallisten metallien sallitut enimmäispitoisuudet (Taulukko 2). Tuhkalannoitevalmisteen ostajalle ja/tai käyttäjälle on aina myynnin tai luovutuksen yhteydessä annettava tuoteseloste, jossa on tiedot lannoitevalmisteen tyyppi- ja kaupanimestä, ominaisuuksista, koostumuksesta, käytöstä, valmistajasta ja maahantuojasta. Tällä hetkellä tuhkalannoiteisiin liittyviä tyyppinimiä ovat ”Puun- ja turpeen tuhka” ja ”Eläinperäinen tuhka”. Tuhkan käyttötarkoitus määritellään tuoteselosteen käyttöohjeessa ja se määräytyy pääasiallisesti haitallisten aineiden pitoisuuksien perusteella.

2.2 Tuhkan stabiloiminen

Käsittämätön irtotuhka on erittäin hienojakoista ja helposti pölyävää. Kuljetuksen ja levityksen helpottamiseksi sekä pölyämisestä aiheutuvien ympäristö- ja terveysriskien poistamiseksi tuhka on esikäsiteltävä eli stabiloitava ennen käyttöä (Väätäinen ym. 2000). Tuhkan esikäsitelymenetelmiä ovat itsekovettaminen, rakeistus ja pelletointi (Steenari & Lundqvist 1997, Takalo 1997, Kuopanportti 2001, Pesonen 2012). Kaikissa menetelmissä tuhka kostutetaan vedellä, jolloin tuhka kovettuu. Yksinkertaisin stabiloimismenetelmä on tuhkan itsekovetus, jossa tuhka jätetään kostuttamisen jälkeen kasaan kovettumaan (Isännäinen ym. 1997, Korpilahti 2003, Väätäinen ym. 2010). Sopiva veden annostusmäärä on noin 30–35 % veden ja tuhkan yhteenlasketusta massasta (Korpilahti 2003). Kovettumisilmiö johtuu biopoltoainetuhkissa esiintyvistä liukoisista kalsium-, alumiini- ja sulfaattiyhdisteistä, jotka saostuvat sementtimäisiksi aineiksi ja sitovat tuhkahiukkasia tiiviiksi rakeiksi kun tuhkaan lisätään vettä (Österbacka 2001). Kovettumisprosessi jatkuu muutamia viikkoja kostuttamisen jälkeen. Kovettunut tuhka murskataan sopivan kokoisiksi partikkeleiksi ennen levitystä. Vaikka tuhkassa on itsekovetuksen jälkeen runsaasti hienojaetta, se pölyää huomattavasti irtotuhkaa vähemmän, koska itsekovetetun tuhkan kosteus sitoo pölyä (Korpilahti 2003).

Rakeistus on tehokkain käytössä oleva tuhkan stabiloimismenetelmä. Erilaisia rakeistusmenetelmiä on useita, mutta kaikille niille on yhteistä kostutetun tuhkan sekoittaminen, jolloin tuhka muodostaa rakeita ennen kovettumistaan (Isännäinen ym. 1997, Väätäinen ym. 2000, Korpilahti 2003). Rakeistamisessa tuhka kovettuu itsekovetusta nopeammin. Heikosti kovettuviin tuhkiin voidaan lisätä hieman sementtiä, jotta rakeista saadaan riittävän kestäviä (Österbacka 2001). Rakeistettu tuhka pölyää vähemmän ja sen loppukosteus on pienempi kuin itsekovetetussa tuhkassa (Korpilahti 2003). Tämä pienentää mm. kuljetus- ja levityskustannuksia. Rakeistaminen on itsekovetusta kalliimpi menetelmä, mutta rakeet ovat helppokäyttöisempiä ja niillä päästään parempaan levitystarkkuuteen. Tuhkan rakeistaminen antaa myös mahdollisuuden muuttaa tuhkan ravinnesuhteita lisäämällä siihen lannoitteita tai jätteenaineita.



Käsittlemätön tuhka on erittäin hienojakoista ja helposti pölyävää. Kuljetuksen ja levityksen helpottamiseksi sekä pölyämisestä aiheutuvien ympäristö- ja terveysriskien poistamiseksi tuhka on esikäsiteltävä ennen käyttöä.

2.3 Tuhkan ”terästäminen”

Rakeistamisen yhteydessä tuhkaa voidaan ”terästää” eli sen lannoitearvoa voidaan säädellä sekoittamalla keskenään erilaisia tuhkalaatuja tai lisäämällä tuhkaan ravinteita tarpeen mukaan (Hytönen 1998, 1999). Metsälannoitekäyttöön tarkoitettuihin tuhkalannoitevalmisteisiin lisätään tavallisesti booria, mutta joskus myös fosforia tai kaliumia. Booripitoisuuden lisäämiseksi tuhkaan voidaan sekoittaa booripitoisia suoloja (esim. soluboori) tai boorihappoa. Kaliumpitoisuutta voidaan puolestaan lisätä esimerkiksi biotiitin avulla (Issakainen 2003).

Rakeistus on tehokkain käytössä oleva tuhkan stabiloimismenetelmä. Rakeistamisen yhteydessä tuhkaa voidaan ”terästää” eli siihen voidaan lisätä ravinteita tarpeen mukaan.



Rakeistamalla tuhkaa typpipitoisen lietteen, kuten metsäteollisuuden biolietteen tai yhdyskuntajätevesilietteen kanssa sopivassa suhteessa, on mahdollista saada aikaan typpiköyhille kasvupaikoille sopiva tuhkalannoitevalmiste (Ferm & Takalo 1981, Isännäinen & Huotari 1994, Hytönen 1998, Lindh ym. 2001, Korpilahti 2003, Orava ym. 2004). Typpipitoisen biolietteen ja tuhkan sekoitteilla on tehty joitakin lannoituskokeita (Moi-
lanen ym. 1987, Veijalainen ym. 1993, Hytönen & Takalo 1997, Hytönen 1999, Lazdina ym. 2011), mutta suosituksia näiden lietetuhkien metsälannoitekäytöstä ei vielä ole. Yleensä lietteessä on myös runsaasti fosforia, joten sitä voidaan käyttää lannoitevalmisteissa fosforin lähteenä. Tällä hetkellä bioliete-tuhkaseosta ei voi markkinoida metsäkäyttöön, sillä siltä puuttuu lannoitevalmistelain (539/2006) mukainen tyypinimi. Tuhkan ja biolietteen hyödyntäminen metsälannoitteena vaatii vielä monipuolista tutkimus- ja selvitystyötä.

2.4 Kirjallisuutta

- Ferm A & Takalo S (1981) Tuhka ja puhdistamoliete – jätteitä vai hyödyksi metsälle. *Metsä ja Puu* 10: 10–11.
- Hytönen J (1998) Puutuhkasta ja muista jäteaineista valmistetut pelletit rauduskoivun taimien ravinnelähteenä. *Suo* 49(2): 49–63.
- Hytönen J (1999) Tuhkapellettien hajoaminen maastossa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999: 533–538.
- Hytönen J & Takalo T (1997) Tuhkapellettien kestävyys maastossa ja varastoinnissa. *Julkaisussa: Nurmi J, Hytönen J & Polet K (toim.). Energiapuusta puutuhkaksi. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja* 660: 44–50.
- Issakainen J (2003) Turvetuhkasta ja biotiitista ravinnepellettejä. *Metlan tiedote* 12/2003, 2 s.
- Isännäinen S & Huotari H (1994) Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi lannoitekäyttöön soveltuvaksi. *Esiselvitys. VTT Energia*. Jyväskylä. 70 s. + liitteet.
- Isännäinen S, Huotari H & Mursunen H (1997) Lentotuhkan itsekovetus. *Tutkimusselostus VTT Energiassa tehdyistä laboratoriokokeista. Tutkimusseloste ENE23/T0032/97. Metsätehon raportti* 30. Metsäteho Oy, Helsinki. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_030.pdf
- Korpilahti A (2003) Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. *Metsätehon raportti* 143. 19 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_143.pdf
- Kuopanportti H (2001) Disc pelletization of wood ash from a pulp mill to be used as a forest fertilizer. *University of Oulu, Department of Process and Environmental Engineering, Report* 264.
- Lazdina D, Bardule A, Lazdins A & Stola J (2011) Use of waste water sludge and wood ash as fertilizer for *Salix* cultivation in acid peat soils. *Agronomy Research* 9(1–2): 305–314.
- Lindh T, Isännäinen S, Mursunen H, Rantala P-R, Ollila S & Kaunisto S (2001) Metsäteollisuuden tuottaman tuhkan ja biolietteen käsittely metsälannoitteeksi. *VTT Energian Raportteja* 10. Jyväskylä. 58 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2001/enerap_10_2001.pdf
- Maa- ja metsätalousministeriö (2011) Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Asetus nro 24/11. Helsinki, 13.9.2011. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.finlex.fi/data/normit/37638–11024fi.pdf>

- Moilanen M, Ferm A & Issakainen J (1987) Kasvihuonekokeita erilaisten jätteaineiden vaikutuksesta hieskoivun alkukehitykseen turvealustalla. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 281. 36 s.
- Orava H, Matilainen A, Halinen A, Tontti T, Nordman T (2004) Kompostista ja tuhkasta rakeistamalla lannoitevalmistetta. Mikkelin ammattikorkeakoulu. A: *Tutkimuksia* (2004): 14. 118 s.
- Pesonen J (2012) Oulun biotuhkien fraktiointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali. Pro gradu – tutkielma, Oulun yliopisto, kemian laitos. 122 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Janne-Pesonen-progradu.pdf>
- Steenari B-M & Lundqvist O (1997) Stabilisation of bio fuel ashes for recycling to forest soil. *Biomass and Bioenergy* 13: 39–50.
- Takalo S (1997) Tuhka ja jätteet pelleteiksi lieriöpuristimella. Teoksessa: Nurmi J, Hytönen J & Polet K (toim.) *Energiapuusta puutuhkaksi*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660: 59–62.
- Veijalainen H, Silfverberg K & Hytönen J (1993) Metsäteollisuuden bioliete ja kivihiiilen tuhka rauduskoivun taimien ravinnelähteenä. *Suo* 44(3): 63–73.
- Väätäinen K, Sikanen L & Asikainen A (2000) Rakeistetun puutuhkan metsäänpalautuksen logistiikka. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 116.
- Österbacka J (2001) Esikäsittelyn vaikutuksesta puu- ja turvetuhkien ominaisuuksiin ja ravinteiden liukenemiseen. *Metsätehon raportti* 109. 24 s. Saatavilla pdf-muodossa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_109.pdf

3 TUHKALANNOITUKSEN MAAPERÄVAIKUTUKSET

3.1 Maan happamuus (pH) ja ravinteet

Nykyisten lannoitussuositusten mukaisilla tuhka-annoksilla (n. 3 000–5 000 kg/ha) maan happamuus vähenee ja pintakerroksen (n. 15 cm) kokonaisravinnevarat lisääntyvät tyypeä lukuun ottamatta merkittävästi vuosikymmenien ajaksi sekä turve- että kangasmail-la (Silfverberg & Huikari 1985, Clapham & Zibilske 1992, Eriksson 1998, Eriksson ym. 1998, Saarsalmi ym. 2001, Ludwig ym. 2002, Moilanen ym. 2002, Moilanen & Issakainen 2003, Huotari ym. 2011). Kangashumuksen ja pintaturpeen pH kohoaa tuhka-annoksesta, tuhkan laadusta ja kasvupaikasta riippuen noin 0,5–3 pH-yksikköä (Bramryd & Fransman 1995, Kahl ym. 1996, Hytönen 1998, Saarela 1991, Fritze ym. 2000, Saarsalmi ym. 2001, Hytönen 2003, Brunner ym. 2004, Saarsalmi ym. 2010). Puutuhkan neutraloimiskyky on yleensä voimakkaampi kuin turvetuhkan (Saarela 1991, Hytönen 2003). Vaikka kasvualustan ravinnelisäys on puuston vuotuisen tarpeeseen nähden moninkertainen, eri alkuaineiden liukoisuus ja saatavuus vaihtelevat tuhkissa huomattavasti (Zhan ym. 1996, Nieminen 2003, Nieminen ym. 2005). Tuhkan lannoitusvaikutusta tarkasteltaessa olennaista onkin se, millaisena ajanjaksona ja kuinka paljon ravinteita tuhka vapautuu puuston ja muun kasvillisuuden käyttöön.

Pääravinteista fosfori on tuhkassa kaikkein hidasliukoisin (Silfverberg 1998, Steenari ym. 1999, Nieminen ym. 2005, Callesen ym. 2007). Tuhkan mukana kasvupaikalle lisäystä kokonaisfosforivarannosta voi heppoliukoisessa muodossa olla vain alle 1 % (Ohno 1992, Nieminen ym. 2007). Turvemailloilla fosforin hyvään pidättymiseen kasvupaikalla vaikuttavat turpeen ja tuhkan sisältämät rauta- ja alumiiniyhdisteet, jotka sitovat vapautuvaa fosforia vaikealiukoiseen mutta kasveille käyttökelpoiseen muotoon (Nieminen ym. 2007). Kalium ja boori puolestaan liukenevat tuhkasta hyvin nopeasti maaveteen (Nieminen ym. 2005). Myös kalsiumia ja magnesiumia voi vapautua tuhkasta vähäisiä määriä jo ensimmäisten vuosien aikana (Nieminen 2003). Vaikka valtaosa tuhkasta ja sen sisältämistä alkuaineista jää maan pintakerrokseen, heppoliukoisten ravinteiden, kuten kaliumin, kalsiumin, rikin ja boorin on havaittu huuhtoutuvan juuriston ulottumattomiin, erityisesti jos niitä on kasvillisuuden tarpeisiin nähden ylen määrin (Nilsson 2001, Nieminen 2003, Moilanen & Issakainen 2003). Esimerkiksi kaliumin hävikki kasvupaikalta voi olla niin suuri, että sillä on vaikutusta lannoitusvaikutuksen kestoon (Huotari 2011).

Tuhka vilkastuttaa pitkällä aikavälillä maaperän mikrobien hajotustoimintaa, mikä puolestaan lisää myös orgaanisessa muodossa olevan typen vapautumista kasvien käyttöön (Huikari 1953, Karsisto 1979, Kaunisto 1983, Weber ym. 1985, Lehtonen & Tikkanen 1986, Hytönen 1998, Mahmood ym. 2003). Typen lisääntyneestä mineralisoitumisesta huolimatta maassa olevan liukoisen typen määrän voi myös laskea tuhkalannoituksen seurauksena, sillä kasvava puusto, runsastuva kasvillisuus ja lisääntyvä mikrobibiomassa käyttävät aiempaa enemmän typpeä (Hytönen 1998, Mahmood ym. 2003, Huotari ym.

2011). Karuissa kangasmetsissä, joilla typen puute on voimakkaimmin kasvua rajoittava tekijä, tuhkalannoituksen ei ole havaittu lisäävän merkittävästi typen saatavuutta (Fritze ym. 1994, Saarsalmi ym. 2001, Arvidsson & Lundkvist 2003). Karuilla kangasmailla maan ravinnetilan parantaminen puuston kasvun lisäämiseksi edellyttääkin tuhkan ohella myös typpilisäystä (Saarsalmi ym. 2004, 2006, 2010, Helmisaari ym. 2009). Tuhkalannoituksen vaikutuksia typen mineralisaatioon pitkällä aikavälillä ei kuitenkaan tunnetta vielä hyvin.

3.2 Raskasmetallit

Tuhkalannoituksen seurauksena alun perin suuremmalta metsäpinta-alalta puustoon kertyneet alkuaineet kasautuvat paikallisesti, mikä lisää raskasmetallien, kuten kadmiumin, kokonaisvarantoa maaperässä (Tamminen 1998, Saarsalmi ym. 2004). Tuhkalannoituksen vaikutukset maan raskasmetallipitoisuuksiin riippuvat sekä tuhkassa olevista pitoisuuksista että käytetystä tuhkamäärästä. Myös eri raskasmetallien liukoisuus vaihtelee suuresti. Haitalliset raskasmetallit, kuten kadmium ja lyijy, ovat tuhkan korkean pH:n vuoksi erittäin hidasliukoisessa muodossa (Rumpf ym. 2001, Nieminen 2003, Perkiömäki & Fritze 2003, Nieminen ym. 2005, Saarsalmi ym. 2005). Tuhkan sisältämän kadmiumin on havaittu sitoutuvan maaperään useiden kymmenien vuosien ajaksi ravinteisuudeltaan erilaisilla suo- ja kangasmetsäkasvupaikoilla (Moilanen & Issakainen 2000, Fritze ym. 2001). Joissakin tutkimuksissa kadmiumin biosaatavuuden eli maaveteen liuenneen kadmiumin määrän on havaittu lisääntyvän ohimenevästi ensimmäisen viiden vuoden jaksolla (Pihlström ym. 2005, Ring ym. 2006).

Maan happamuudella on ratkaiseva vaikutus raskasmetallien pidättymiseen maaperässä. Jos maan pH alkaa laskea, voi raskasmetalleja pitkällä aikavälillä alkaa liueta maaveteen tuhkalannoitetuilta alueilta (Nieminen 2003, Perkiömäki & Fritze 2003). Myös maaperän omasta raskasmetallivarannosta voi vapautua raskasmetalleja, jos tuhka muuttaa maan tasapainotilaa äkillisesti. Koska raskasmetallien liukenemisestä ja biosaatavuudesta pitkällä aikavälillä ei ole riittävästi tutkimustietoa, ovat tuhkalannoitteille asetetut raskasmetallien raja-arvot välttämättömiä. Näin estetään haitallisten raskasmetallien liiallinen kertyminen maaperään.

3.3 Maaperäeliöt

Maaperäeliöt, kuten mikrobit, mykorrhizasienet ja maaperäeläimet ovat keskeisiä metsän ravinnekierron säätelyssä. Ne osallistuvat maahan kerääntyvän orgaanisen aineksen eli karikkeen hajottamiseen ja ravinteiden palauttamiseen kasveille käyttökelpoiseen muotoon.

Tuhkalannoituksen on todettu muuttavan maaperän mikrobisyhteisöjen rakennetta ja lajistoa, mutta samalla usein myös lisäävän niiden aktiivisuutta sekä turve- että kivennäismail-

la (Huikari 1953, Karsisto 1979, Weber ym. 1985, Bååth & Arnebrant 1994, Bååth ym. 1995, Fritze ym. 2000, Perkiömäki & Fritze 2002, Zimmermann & Frey 2002, Mahmood ym. 2003, Perkiömäki 2004). Lisääntynyt mikrobitoiminta nopeuttaa maahan kertyneen karikkeen hajoamista ja ravinteiden vapautumista kasvillisuuden ja maaperäeliöiden käyttöön (Perkiömäki ym. 2004). Tuhkan sisältämän kadmiumin ei ole laboratorio- eikä kenttäkokeissa havaittu aiheuttavan haitallisia muutoksia maaperän mikrobistolle tai sen biologiselle toiminnalle (Fritze & Perkiömäki 1999, Fritze ym. 2000, Perkiömäki ym. 2003, Perkiömäki & Fritze 2005). Syynä tähän on todennäköisesti kadmiumin vaikealiukoisuus, minkä vuoksi tuhkan kadmium ei muutu haitallisissa määrin biosaatavaan eli mikrobeille käyttökelpoiseen muotoon (Perkiömäki 2004, Fritze ym. 2001).

Tuhkalannoituksen ei ole havaittu vahingoittavan myöskään mykorritsoja eli sienijuuria (Taylor & Finlay 2003). Mykorritsientien biomassan on havaittu pysyvän ennallaan tai lisääntyvän hieman tuhkalannoituksen seurauksena (Ohtonen & Tuohenmaa 1999, Hagerberg & Wallander 2002, Strömmer ym. 2003). Tiettyihin lajiryhmiin kuuluvien mykorritsientien on havaittu kolonisoivan tehokkaasti tuhkarakeita (Mahmood ym. 2001, 2002, Hagerberg ym. 2005). Mykorritsoilla arvellaankin olevan tärkeä rooli tuhkassa olevien ravinteiden vapauttamisessa kasvien käyttöön ja toisaalta myös liuenneiden ravinteiden pidättämisessä kasvupaikalla (Mahmood ym. 2001, 2003, Wallander ym. 2003, Hagerberg ym. 2005).

Tuhkan levityksen vaikutukset maaperäeläinten, kuten esimerkiksi änkyri-, sukkula- ja kastematojen runsauteen ovat vaihdelleet. Toisissa tutkimuksissa matojen tai muiden maaperän pieneliöiden määrä on pysynyt muuttumattomana tai lisääntynyt tuhkalannoituksen seurauksena (Huhta ym. 1986, Lundkvist 1998, Liiri ym. 2002b), toisissa taas joidenkin lajien on havaittu vähentyneen (Hotanen 1986, Huhta ym. 1986, Haimi ym. 2000, Liiri ym. 2001, Liiri ym. 2002a). Vähentymisen syynä saattaa olla se, että tuhkalannoitetuilla aloilla esimerkiksi madot siirtyvät syvemmälle maan sisään (Lundkvist 1998). Änkyrimadoissa kadmiumpitoisuuksien on todettu nousevan ohimenevästi (Lundkvist 1998). Yleisesti ottaen tuhkalannoituksella ei ole ollut merkittäviä vaikutuksia maaperäeläimiin ja edellä mainitut vaikutukset ovat yleensä olleet ohimeneviä.

3.4 Maaperän kasvihuonekaasupäästöt (CO_2 , CH_4 , N_2O)

Tuhkalannoitus vaikuttaa maaperän mikrobiologisiin prosesseihin ja sitä kautta myös maaperän kasvihuonekaasujen eli hiilidioksidin (CO_2), metaanin (CH_4) ja dityppioksidin (N_2O) päästöihin. Erityisesti tuhkalannoitukseen hyvin soveltuvien tyyppirikkaiden turvemaiden hiilidioksidi- ja dityppioksidipäästöjen on arvioitu kasvavan, jos orgaanisen aineksen hajotustoiminta lisääntyy merkittävästi.

Tähänastisissa tutkimuksissa tuhkalannoituksella ei ole havaittu olevan merkitsevää vaikutusta maan dityppioksidin (N_2O) päästöihin eli typen siirtymiseen maaperästä ilmakehään kangas- tai turvemailla (Maljanen ym. 1999, 2006 a ja b, Ernfors ym. 2010,

Rosenberg ym. 2010). Tuhkalannoituksen on todettu myös vähentävän turvemaiden metaanipäästöjä (CH₄) ja lisäävän kivennäismaiden metaaninielua entisestään (Maljanen ym. 2006 a ja b). Hiilidioksidin (CO₂) osalta tulokset ovat olleet päinvastaisia. Tuhkalannoituksen on havaittu nopeuttavan orgaanisen aineksen hajoamista ja hiilen vapautumista maaperästä ilmakehään hiilidioksina, erityisesti typpirikkailla turvemaidella (Maljanen ym. 2006 a ja b). Toisaalta, typpirikkailla turvemaidella tuhkalannoitus lisää myös puuston kasvua, mikä osaltaan tasoittaa metsikön hiilidioksidivirtaa. Kokonaisvaikutusten arvioimiseksi tuhkalannoituksen vaikutuksista metsikön hiilidioksidivirtoihin tarvitaan pitkäkestoista ja monipuolista tutkimusta.

3.5 Kirjallisuutta

- Arvidsson H & Lundkvist H (2003) Effects of crushed wood ash on soil chemistry in young Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management* 176: 121–132.
- Bååth E & Arnebrant K (1994) Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 26: 995–1001.
- Bååth E, Frostegard A, Pennanen T & Fritze H (1995) Microbial community structure and pH response in relation to soil organic matter quality in wood-ash fertilized, clear-cut or burned coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 229–240.
- Bramryd T & Fransman B (1995) Silvicultural use of wood ashes – effects on the nutrient and heavy metal balance in a pine (*Pinus sylvestris* L.) forest soil. *Water, Air and Soil Pollution* 85(2): 1039–1044.
- Brunner I, Zimmermann S, Zingg A & Blaser P (2004) Wood-ash recycling affects forest soil and tree fine-root chemistry and reverses soil acidification. *Plant and Soil* 267: 61–71.
- Callesen I, Ingerslev M, Raulund-Rasmussen K (2007) Dissolution of granulated wood ash examined by in situ incubation: effects of tree species and soil type. *Biomass and Bioenergy* 31: 693–699.
- Clapham WM & Zibilske LM (1992) Wood ash as a liming amendment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23: 1229–1227.
- Eriksson HM (1998) Short-term effects of granulated wood ash on forest soil chemistry in SW and NE Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 43–55.
- Eriksson HM, Nilsson T & Nordin A (1998) Early effects of lime and hardened and non-hardened ashes on pH and electrical conductivity of the forest floor, and relations to some ash and lime qualities. *Recycling of wood-ash: selected results from Swedish R&D programme*. *Scandinavian Journal of Forest Research, Suppl. 2*: 56–66.
- Ernfors M, Sikström U, Nilsson M & Klemetsson L (2010) Effect of wood-ash fertilization on forest floor greenhouse gas emissions and tree growth in nutrient poor drained peatland. *Science of the Total Environment* 408: 4580–4590.
- Fritze H & Perkiömäki J (1999) Puutuhkan vaikutus humuskerroksen mikrobistoon kangasmaalla. *Metsätalon raportti* 82. 17 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_082.pdf
- Fritze H, Perkiömäki J, Petänen T, Pennanen T, Romantschuck M, Karp M & Yrjälä K (2001) A microcosmos study on the effects of Cd-containing wood ash on the coniferous forest humus fungal community and Cd bioavailability. *Journal of Soils and Sediments* 1(3): 146–150.

- Fritze H, Perkiömäki J, Saarela U, Katainen R, Tikka P, Yrjälä K, Karp M, Haimi J & Romantschuk M (2000) Effect of Cd-containing wood ash on the microflora of coniferous forest humus. *FEMS Microbiology Ecology* 32: 43–51.
- Fritze H, Smolander A, Levula T, Kitunen V & Mälkönen E (1994) Wood-ash fertilization and fire treatments in a Scots pine forest stand: Effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biology and Fertility of Soils* 17: 57–63.
- Hagerberg D, Pallon J & Wallander H (2005) The elemental content in the mycelium of the ectomycorrhizal fungus *Piloderma* sp. during the colonization of hardened wood ash. *Mycorrhiza* 15: 387–392.
- Hagerberg D & Wallander H (2002) The impact of forest residue removal and wood ash amendment on the growth of the ectomycorrhizal external mycelium. *FEMS Microbiology Ecology* 39: 139–146.
- Haimi J, Fritze H & Moilanen P (2000) Responses of soil decomposer animals to wood-ash fertilization and burning in a coniferous forest. *Forest Ecology and Management* 129(1–3): 53–61.
- Helmisaari H-S, Saarsalmi A & Kukkola M (2009) Effect of wood ash and nitrogen fertilization on fine root biomass and soil and foliage nutrients in a Norway spruce stand in Finland. *Plant and Soil* 314: 121–132.
- Hotanen J-P (1986) Tuhka- ja NPK-lannoituksen lyhyen aikavälin vaikutuksista änkyrimatoihin kahdella vanhalla ojitusalueella Itä-Suomessa. *Suo* 37(2): 35–43.
- Huhta V, Hyvönen R, Koskeniemi A, Vilkamaa P, Kaasalainen P, Sulander M (1986) Response of soil fauna to fertilization and manipulation of pH in coniferous forests. *Acta Forestalia Fennica* 195: 1–30.
- Huikari O (1953) Tutkimuksia ojituksen ja tuhkalannoituksen vaikutuksista eräiden soiden pieneliöstöön. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 42: 2. 18 s.
- Huotari N (2011) Recycling of wood- and peat-ash – a successful way to establish full plant cover and dense birch stand on a cut-away peatland. *Acta Universitatis Ouluensis. Series A, Scientiae rerum naturalium* A576. 48 s. + 4 osajulkaisua.
- Huotari N, Tillman-Sutela E & Kubin E (2011) Ground vegetation has a major role in element dynamics in an ash-fertilized cut-away peatland. *Forest Ecology and Management* 261: 2081–2088.
- Hytönen J (1998) Effect of peat ash fertilization on the nutrient status and biomass production of short-rotation willow on cut-away peatland area. *Biomass and Bioenergy* 15(1): 83–92.
- Hytönen J (2003) Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots Pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. *Silva Fennica* 37(2): 219–234.
- Kahl JS, Fernandez IJ, Rustad LE & Peckenham J (1996) Threshold application rates of wood ash to an acidic forest soil. *Journal of Environmental Quality* 25: 220–227.
- Karsisto M (1979) Maanparannustoimenpiteiden vaikutuksista orgaanista ainetta hajottavien mikrobien aktiivisuuteen suometsissä. Osa II. Tuhkalannoituksen vaikutus. *Suo* 30(4–5): 81–91.
- Kaunisto S (1983) Koripajun (*Salix viminalis*) biomassatuotos sekä ravinteiden ja veden käyttö eri tavoin lannoitetuilla turpeilla kasvihuoneessa. *Folia Forestalia* 551, 43 s.
- Lehtonen EM & Tikkanen E (1986) Turvetuhkan vaikutus maahan sekä vesipajun (*Salix cv. aquatica*) ravinnetalouteen ja kasvuun turpeentuotannosta vapautuneella suolla. Summary: Effect of peat ash on soil properties and growth on willow (*Salix cv. aquatica*) at an abandoned peat production area. Research Institute of Northern Finland. University of Oulu. C 69: 1–100.

- Liiri M, Haimi J & Setälä H (2002a) Community composition of soil microarthropods of acid forest soils as affected by wood ash application. *Pedobiologia* 46: 108–124.
- Liiri M, Setälä H, Haimi J, Pennanen T & Fritze H (2001) Influence of *Cognettia spaghnetorum* (*Enchytraeidae*) on birch growth and microbial activity, composition and biomass in soil with or without wood ash. *Biology and Fertility of Soils* 34: 185–195.
- Liiri M, Setälä H, Haimi J, Pennanen T, Fritze H (2002b). Soil processes are not influenced by the functional complexity of soil decomposer food webs under disturbance. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1009–1020.
- Ludwig B, Rumpf S, Mindrup M, Meiwes K-J & Khanna PK (2002) Effects of lime and wood ash on soil-solution chemistry, soil chemistry and nutritional status of a pine stand in northern Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 225–237.
- Lundkvist H (1998) Wood ash effects on enchytraeid and earthworm abundance and enchytraeid cadmium content. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 86–95.
- Mahmood S, Finlay RD, Erland S & Wallander H (2001) Solubilisation and colonization of wood ash by ectomycorrhizal fungi isolated from a wood ash fertilized spruce forest. *FEMS Microbiology Ecology* 35: 151–161.
- Mahmood S, Finlay RD, Fransson A-M & Wallander H (2003) Effects of hardened wood ash on microbial activity, plant growth and nutrient uptake by ectomycorrhizal spruce seedlings. *FEMS Microbiology Ecology* 43: 121–131.
- Mahmood S, Finlay RD, Wallander H & Erland S (2002) Ectomycorrhizal colonization of roots and ash granules in a spruce forest treated with granulated wood ash. *Forest Ecology and Management* 160(1–3): 65–74.
- Majdi H, Truus L, Johansson U, Nylund J-E & Wallander H (2008) Effects of slash retention and wood ash addition on fine root biomass and production and fungal mycelium in a Norway spruce stand in SW Sweden. *Forest Ecology and Management* 255: 2109–2117.
- Maljanen M, Jokinen H, Saari A, Strömmer R & Martikainen PJ (2006a) Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil Use and Management* 22: 151–157.
- Maljanen M, Nykänen H, Moilanen M & Martikainen P (1999) Tuhkalannoituksen vaikutus metsämaan kasviuonekasuvirtoihin. *Metsätalon raportti* 83. 18 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_083.pdf
- Maljanen M, Nykänen H, Moilanen M & Martikainen PJ (2006b) Greenhouse gas fluxes of coniferous forest floors as affected by wood ash addition. *Forest Ecology and Management* 237: 143–149.
- Moilanen M & Issakainen J (2000) Tuhkalannoituksen metsävaikutukset. *Metsätalon raportti* 93. 38 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_093.pdf
- Moilanen M & Issakainen J (2003) Puu- ja turvetuhkien vaikutus maaperään, metsäkasvillisuuden alkuainepitoisuuksiin ja puuston kasvuun. *Metsätalon raportti* 162. 91 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_162.pdf
- Moilanen M, Silfverberg K & Hokkanen TJ (2002) Effects of wood-ash on the growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest Ecology and Management* 171: 321–338.
- Nieminen M (2003) Ravinteiden ja raskasmetallien vapautuminen tuhkalannoitteista. *Metsätalon raportti* 155. 20 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_155.pdf

- Nieminen M, Piirainen S & Moilanen M (2005) Release of mineral nutrients and heavy metals from wood and peat ash fertilizers: field studies in Finnish forest soils. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 146–153.
- Nieminen M, Piirainen S & Moilanen M (2007) Phosphorus allocation in surface soil of two drained peatland forests following wood and peat ash application – why effective adsorption on low sorptive soils? *Silva Fennica* 41(3): 395–407.
- Nilsson T (2001) Wood ash application effects on elemental turnover in a cutover peatland and uptake in vegetation. *Acta Universitatis Agriculturae Suecicae, Silvestria* 208. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Soils. Uppsala 2001. ISBN 91–576–6092–1. 35 p.
- Ohno T (1992) Neutralization of soil acidity and release of phosphorus and K by wood ash. *Journal of Environmental Quality* 21: 433–438.
- Ohtonen R & Tuohenmaa H (1999) Tuhkalannoituksen vaikutus männyn ektoomykorritsa-symbioosiin kangasmaalla. *Metsätalon raportti* 84. 18 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_084.pdf
- Perkiömäki J (2004) Wood-ash use in coniferous forests: a soil microbiological study into the potential risk of cadmium release. The Finnish Forest Research Institute, Research papers 917, 54 p. + 7 original papers. Doctoral Thesis. Available at: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/3260/woodashu.pdf?sequence=1>.
- Perkiömäki J & Fritze H (2002) Short and long-termed effects of wood ash on the boreal forest microbial community. *Soil Biology & Biochemistry* 34(9): 1343–1353.
- Perkiömäki J & Fritze H (2003) Does simulated acid rain increase the leaching of cadmium from wood ash to toxic levels for coniferous forest humus microbes? *FEMS Microbiology Ecology* 44: 27–33.
- Perkiömäki J & Fritze H (2005) Cadmium in upland forests after vitality fertilization with wood ash – a summary of soil microbiological studies into the potential risk of cadmium release. *Biology and Fertility of Soils* 41: 75–84.
- Perkiömäki J, Kiikkilä O, Moilanen M, Issakainen J, Tervahauta A & Fritze H (2003) Cadmium-containing wood ash in a pine forest: effects on humus microflora and cadmium concentrations in mushrooms, berries and needles. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 2443–2451.
- Perkiömäki J, Levula T & Fritze H (2004) A reciprocal decomposition experiment of Scots pine needles 19 yr after wood ash fertilization. *Soil Biology & Biochemistry* 36: 731–734.
- Pihlström M, Rummukainen P, Mäkinen A, Tulonen T & Arvola L (2005) Tuhkalannoituksen vaikutus kasvillisuuden ja maaperän raskasmetalli- ja ravinnepitoisuuksiin. *Metsätalon raportti* 184. 49 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_184.pdf
- Ring E, Jacobson S, Nohrstedt H-Ö (2006) Soil-solution chemistry in a coniferous stand after adding wood ash and nitrogen. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 153–163.
- Rosenberg O, Persson T, Högbom L & Jacobson S (2010) Effects of wood-ash application on potential carbon and nitrogen mineralisation at two forest sites with different tree species, climate and N status. *Forest ecology and Management* 260: 511–518.
- Rumpf S, Ludwig B & Mindrup M (2001) Effect of wood ash on soil chemistry of a pine stand in Northern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 164: 569–575.
- Saarela I (1991) Wood, bark, peat and coal ashes as liming agents and sources of calcium, magnesium, potassium and phosphorus. *Annales Agriculturae Fenniae* 30: 375–388.

- Saarsalmi A, Derome J & Levula T (2005) Effect of wood ash fertilization on stand growth, soil, water and needle chemistry, and berry yields of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in a Scots pine stand in Finland. In: Mandre M (ed.). Utilisation of industrial wastes in forestry. Forestry Studies 42: 13–33.
- Saarsalmi A, Kukkola M, Moilanen M & Arola M (2006) Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a Scots pine stand. Forest Ecology and Management 235(1–3): 116–128.
- Saarsalmi A & Levula T (2007) Wood ash application and liming: Effects on soil chemical properties and growth of Scots pine transplants. Baltic Forestry 13(2): 149–157.
- Saarsalmi A, Mälkönen E & Kukkola M (2004) Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. Scandinavian Journal of Forest Research 19(3): 217–233.
- Saarsalmi A, Mälkönen E & Piirainen S (2001) Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. Silva Fennica 35(3): 355–368.
- Saarsalmi A, Smolander A, Kukkola M & Arola M (2010) Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland. Plant and Soil 331: 329–340.
- Silfverberg K (1998) The leaching of nutrients from ash- and PK-fertilised peat. Tiivistelmä: Ravinteiden huuhtoutuminen tuhka- ja PK-lannoitetusta turpeesta. Suo – Mires and Peat 49(4): 115–123.
- Silfverberg K & Huikari O (1985) Wood ash fertilization on drained peatlands. Folia Forestalia 633, 25 s.
- Steenari B-M, Karlsson LG & Lindqvist O (1999) Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. Biomass and Bioenergy 16: 119–136.
- Strömmer R, Jokinen H & Holma A (2003) Tuhka- ja typpilannoitus varttuneessa OMT-kuusikossa. Sienijuuret ja typen mobilisaatio. Metsätehon raportti 160. Saatavissa pdf-muodossa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_160.pdf
- Tamminen P (1998) Typpi- ja tuhkalannoitus punalatkan vaivaamassa männikössä. Metsätieteen aikakauskirja. Folia Forestalia 3: 411–420.
- Taylor AFS & Finlay RD (2003) Effects of liming and ash application on below ground ectomycorrhizal community structure in two Norway spruce forests. Water, Air, and Soil Pollution: Focus 3: 63–76.
- Wallander H, Mahmood S, Hagerberg D, Johansson L, Pallon J (2003) Elemental composition of ectomycorrhizal mycelia identified by PCR-RFLP analysis and grown in contact with apatite or wood ash in forest soil. FEMS Microbiology Ecology 44: 47–65
- Weber A, Karsisto M, Leppänen R, Sundman V & Skujiņš J (1985) Microbial activities in a histosol: Effects of wood ash and NPK fertilizers. Soil Biology and Biochemistry 17(3): 291–296.
- Zhan G, Erich MS & Ohno T (1996) Release of trace elements elements from wood ash by nitric acid. Water, Air, and Soil Pollution 88: 297–311.
- Zimmermann S & Frey B (2002) Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. Soil Biology & Biochemistry 34: 1727–1737.

4 TUHKALANNOITUKSEN PUUSTOVAIKUTUKSET

4.1 Puiden ravinnetila ja kasvu

4.1.1 Ojitetut suometsät

Tuhkalannoitus parantaa puuston ravinnetilaa pitkäaikaisesti. Puiden ravinnetilassa tapahtuviin muutoksiin vaikuttavat mm. kasvupaikan ravinteisuus, puulaji, levitetyn tuhkan määrä ja laatu sekä puuston ravinnetila ennen lannoitusta. Tuhkan lannoitusvaikutus on hyvä erityisesti runsastyyppisillä ojitetuilla soilla, joilla puiden kasvua rajoittaa kaliumin niukkuus ja fosforin huono saatavuus (Moilanen ym. 2002). Tuhkan ravinteet voivat vaikuttaa puuston ravinnetilaan nopeasti. Esimerkiksi puiden kasvua rajoittava kaliumin ja boorin puutostila on korjautunut usein jo levitystä seuraavana vuonna (Silfverberg & Issakainen 1987b, Silfverberg & Hotanen 1989, Silfverberg & Issakainen 2001, Moilanen ym. 2005, Moilanen & Issakainen 2003). Turvetuhka ei alhaisen kaliumpitoisuutensa vuoksi nosta neulasten kaliumpitoisuutta yhtä tehokkaasti kuin puutuhka (Silfverberg & Issakainen 1987a ja b, Silfverberg & Hotanen 1989, Issakainen ym. 1994, Moilanen ym. 2012). Puiden fosforinpuutos korjaantuu keskimäärin 3–4 vuoden kuluttua tuhkalannoituksesta, sillä fosfori liukenee tuhkasta selvästi hitaammin kuin kalium (Moilanen & Issakainen 2000, Moilanen ym. 2002, Nieminen 2003). Lannoituksen jälkeen puuston ravinnetila on säilynyt suometsissä hyvänä käytetystä tuhkamäärästä riippuen noin 20–50 vuoden ajan (Silfverberg 1996, Moilanen & Issakainen 2000, Moilanen ym. 2002, 2004, 2005). Kaliumin nopealiukoisuuden ja huuhtoutumisalttiuden vuoksi voidaan joillakin kohteilla tarvita kaksi lannoituskertaa metsikön kasvatusaikana, jotta puuston ravinnetila säilyisi hyvänä.



Fosforin ja kaliumin niukkuus rajoittavat tavallisesti puiden kasvua runsastyyppisillä turvemaila. Tuhkalannoituksella saadaan aikaan hitaasti käynnistyvä, mutta pitkäkestoinen ja voimakas puuston kasvureaktio. Lannoittamaton (ylh.) ja 15 vuotta aikaisemmin tuhkaa saanut koelata (alh.) Vaalan Pelson suolla.

Tuhka ei sisällä typpeä, sillä typpi vapautuu ilmakehään palamisprosessissa. Tuhkalannoitus voi kuitenkin vaikuttaa puiden typpitalouteen joko muiden ravinteiden pitoisuuksien muutosten tai turpeen typpivarojen vapautumisen kautta maan hajotustoiminnan lisääntyessä. Tämän vuoksi neulasten typpipitoisuudet ovat toisissa tutkimuksissa pysyneet ennallaan tai ne ovat hieman nousseet (Silfverberg & Hotanen 1989, Moilanen ym. 2002), kun taas toisissa neulasten typpipitoisuus on alentunut tuhkalannoituksen seurauksena (Silfverberg & Huikari 1985, Silfverberg & Issakainen 2001). Pitoisuuden alenemisen arvellaan johtuvan ”ohentumisilmiöstä”. Toisin sanoen parantuneen ravinnetilanteen seurauksena puuston kasvu lisääntyy, jolloin typpi jakaantuu suurempaan biomassaan ja sen pitoisuus puussa laimenee.

Tuhkalannoituksella saadaan aikaan hitaasti käynnistyvä, mutta pitkäkestoinen ja voimakas puuston kasvureaktio (Silfverberg & Huikari 1985, Moilanen ym. 2005). Runsastypillisillä kasvupaikoilla puuston kasvun on havaittu lisääntyvän keskimäärin 2–3 vuoden ja niukkatypillisillä kasvupaikoilla noin 7–8 vuoden kuluttua tuhkan levityksestä (Moilanen & Issakainen 2000). Tuhkalannoitus lisää puuston kasvua sitä enemmän, mitä enemmän turpeessa on typpeä. Runsastypillisillä kasvupaikoilla puuston kasvun lisäys on ollut keskimäärin 2–6 m³/ha/v ja niukkatypillisillä kasvupaikoilla 1–3 m³/ha/v kiertoajan kuluessa (Moilanen & Issakainen 2000, Moilanen & Issakainen 2003, Moilanen ym. 2005). Suometsissä tuhkaa on ravinnepitoisuuksista riippuen levitettävä noin 3–5 tonnia/ha, jotta lannoitussuositusten mukaiset ravinne määrät, fosforia 40–50 kg/ha ja kaliumia 80–100 kg/ha saavutettaisiin (Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille 2007). Tuhka lisää puuston kasvua ensimmäisinä vuosina usein hieman vähemmän kuin kaupallinen PK-lannoite, mutta pitkällä aikavälillä tuhkalannoituksella saadaan kuitenkin aikaan yhtä hyvä tai parempi kasvureaktio kuin PK-lannoitteella (Silfverberg 1996, Moilanen & Issakainen 2003, Moilanen ym. 2004, Sikström ym. 2010).



Kaliumin puutosoireena mänyllä (vas.) etenkin edellisen vuosikerran neulasten kärjet ovat keltaisia kun taas kuusella (oik.) edellisen vuosikerran neulaset ovat kauttaaltaan keltaiset. Puutostilan korjaantuminen näkyy neulasten ulkoasussa usein jo tuhkan levitystä seuraavina vuosina.

4.1.2 Entiset turvetuotantoalueet ja suopellot

Myös turvetuotannosta vapautuneilla suopohjilla turpeessa on runsaasti typpeä, mutta tavallisesti hyvin vähän kasveille välttämättömiä mineraaliravinteita (Paavilainen & Päivänen 1995). Puiden kasvua suopohjilla rajoittaa erityisesti fosforin ja kaliumin, joskus myös boorin niukkuus. Tuhkalannoituksen vaikutus puuston ravinnetilaan ja kasvuun suopohjilla riippuu mm. levitetyn tuhkan määrästä ja laadusta sekä kasvatettavasta puulajista. Puutuhkalannoituksen on havaittu lisäävän koivun ja pajun biomassan tuottoa suopohjien energiapuuviljelmillä (Hytönen & Kaunisto 1999), kun taas turvetuhkan vaikutus on ollut heikkoa sen alhaisen kaliumpitoisuuden vuoksi (Lehtonen & Tikkanen 1986, Lumme 1988, Hytönen 1998a). Ainoastaan hyvin suuret turvetuhka-annokset, 50 t/ha tai enemmän, ovat korjanneet koivun ja pajun kaliuminpuutosta ja lisänneet biomassan tuottoa merkittävästi energiapuuviljelmillä (Lumme 1988, Hytönen 1998a). Toisaalta jo pienet puu- ja turvetuhkamäärät (4–5 t/ha) ovat edistäneet hieskoivutiheikön alkukehitystä jopa tehokkaammin kuin kaupallinen PK-lannoite (Huotari ym. 2008, 2009). Kaliumin riittävyys pitkällä aikavälillä on kuitenkin epävarmaa (Huotari 2011). Turvetuhka sellaisenaan soveltuu siten hyvin energiapuumetsiköiden alkulannoitteeksi, kun jäljelle jäänyt turvekerros on ohut (< 30 cm). Myöhemmin, kun puut varttuvat, niiden juuret ulottuvat ohuen turvekerroksen alla olevaan kivennäismaahan, josta ne saavat kasvuun tarvittavia ravinteita. Kivennäismaan kyky turvata puiden kivennäisravinteiden saantia riippuu kuitenkin paljon maalajista. Tuhkalannoitus on hyvä vaihtoehto kaupallisille PK-lannoitteille ja annostuksena suositellaan: P 50 kg/ha, K 80–150 kg/ha ja B 1,5 kg/ha (Hytönen &



Tuhkalannoitus nopeuttaa merkittävästi hieskoivutiheikön alkukehitystä suopohjilla. Lannoittamaton (etualalla) ja 8 vuotta aikaisemmin puutuhkaa saanut koeala (taustalla) Limingan Hirvinevällä.

Aro 2005, Issakainen & Huotari 2007). Kaliumia voidaan myös lisätä turvetuhkaan epä-organaisena ainesosana esim. biotiitin muodossa (MMM asetus 24/11), jolloin lannoitus takaa puiden kasvun pitkäksi aikaa.

Suopeltojen turpeessa on yleensä runsaasti typpeä ja fosforia puiden kasvuun, mutta kaliumista ja boorista sekä muista hivenravinteista saattaa olla puutetta (Ferm ym. 1992, Hytönen & Ekola 1993, Hytönen 2003). Ravinteiden epätasapainon aiheuttamat kasvuhäiriöt ovatkin yleisiä metsitetyillä suopelloilla kasvavissa männyissä, kuusissa ja koi-vuissa (Hytönen & Aro 2005). Suopeltojen metsitysalojen lannoituksen ensisijaisena tavoitteena on puuston tasapainoisen ravinnetalouden ylläpitäminen ja häiriöttömän kasvun turvaaminen. Puutuhkan on havaittu kohottavan männyn neulasten kalium- ja booripitoisuuksia, vähentävän puiden kasvuhäiriöitä sekä lisäävän kasvua merkittävästi jo muutaman vuoden kuluessa lannoituksen jälkeen (Ferm ym. 1992, Hytönen 1995, Hytönen & Pietiläinen 1995, Hytönen 2003). Tuhkalannoituksella ei puolestaan ole ollut vaikutusta neulasten typpi- ja fosforipitoisuuksiin, jos ne ovat olleet riittävällä tasolla jo ennen lannoitusta (Ferm ym. 1992, Hytönen 2003). Suopeltojen lannoitteeksi sopii siis myös vähän fosforia sisältävä tuhka. Metsitetyillä suopelloilla turvetuhkalla ei ole havaittu olevan merkitsevää vaikutusta puiden ravinnetilaan ja kasvuun, sillä se sisältää vain vähän puiden tarvitsemaa kaliumia ja booria (Hytönen 2003)

4.1.3 Kangasmetsät

Kangasmailla merkittävin puuston kasvua rajoittava tekijä on maaperässä olevan käyttökelpoisen typen vähäinen määrä, mutta joskus myös boorista ja fosforista voi olla puutetta. Tuhkalannoituksen on havaittu nostavan erityisesti neulasten booripitoisuuksia, joten tuhka näyttää soveltuvan hyvin boorinpuutostilojen korjaamiseen (Nohrstedt 2001, Jacobson 2003, Saarsalmi ym. 2004, 2005, 2006). Tuhkalannoitus ei ole muuttanut merkittävästi neulasten typpipitoisuuksia kangasmetsissä (Moilanen & Issakainen 2000, Vuorinen & Kurkela 2002, Jacobson 2003, Saarsalmi ym. 2004). Joissakin tapauksissa neulasten typpipitoisuus on hieman kohonnut, minkä on arvioitu johtuvan tuhkalannoituksen myötä lisääntyneestä maan orgaanisen typen mineralisaatiosta (Arvidsson & Lundkvist 2002). Tulokset tuhkalannoituksen vaikutuksista neulasten fosfori-, kalium- ja kalsiumpitoisuuksiin kangasmailla ovat puolestaan olleet vaihtelevia (Kaunisto 1987, Moilanen & Issakainen 2000, Arvidsson & Lundkvist 2002, Jacobson 2003, Saarsalmi ym. 2004, 2006, Helmisaari ym. 2009), sillä kivennäismailla näitä ravinteita on yleensä saatavilla riittävästi puiden kasvuun myös ilman lannoitusta.

Koska tuhka ei sisällä typpeä, se ei ole lisännyt merkittävästi puuston kasvua vähätyppisillä kangasmailla (Levula 1991, Sikström 1992, Moilanen & Issakainen 2000, Saarsalmi ym. 2004, 2005, 2010). Karuilla kasvupaikoilla tuhkalannoitus saattaa aluksi jopa heikentää puiden kasvua todennäköisesti siksi, että maan pH:n nousun myötä lisääntyvä maaperän hajottajaeliöstö sitoo itseensä entistä enemmän puille käyttökelpois-

sa muodossa olevaa tyyppiä (Jacobson 2003). Viljavilla, runsastyyppisillä kangasmailla puuston kasvu voi puolestaan hieman parantua tuhkalannoituksen jälkeen, jos maassa olevan orgaanisen typen mineralisaatio lisääntyy (Jacobson 2003). Pitkällä aikavälillä (>10 vuotta) tuhkalannoituksen aiheuttama maan hajotustoiminnan vilkastuminen voi hieman parantaa puuston kasvua myös niukkatyyppisillä kangasmailla (Saarsalmi ym. 2004). Tuhkalannoituksen vaikutus puuston kasvuun kangasmailla on kuitenkin hyvin pieni. Tuhkalannoitus parantaakin kangasmetsissä enemmän maaperää ja sen biologista aktiivisuutta kuin puiden kasvua. Tuhkan ja typen yhteiskäytön on joissakin tapauksissa havaittu lisänneen puiden kasvua karuillakin kangasmailla pelkkää typpilannoitusta enemmän (Saarsalmi ym. 2006). Tulokset ovat tältä osin kuitenkin ristiriitaisia. Joissakin tutkimuksissa kasvunlisäystä ei ole havaittu (Jacobson 2003, Saarsalmi ym. 2010) tai tuhkan ja typen yhteisvaikutus on hidastanut puiden kasvua (Pettersson 1990, Jacobson 2003). Tuhkan laajamittainen käyttö kangasmetsien lannoitteena edellyttää vielä monipuolista tutkimus- ja kehitystyötä.

4.2 Puiden raskasmetallipitoisuudet

Puiden neulasten tai lehtien raskasmetallipitoisuudet ovat yleensä pysyneet alhaisina tuhkalannoituksesta huolimatta (Hytönen 1998b, Hytönen 2003, Moilanen & Issakainen 2003, Pihlström ym. 2005, Solla-Gullón ym. 2006, Mandre ym. 2010, Huotari ym. 2011). Joidenkin raskasmetallien pitoisuuksien on havaittu aluksi nousevan vähän, mutta laskevan muutaman vuoden kuluttua lähtötasolle tai jopa sen alapuolelle (Moilanen & Issakainen 2003, Österås ym. 2005). Muutoksen tulkitaan johtuvan puuston kasvun voimistumisesta ja ”ohentumisilmioistä”. Joillakin puulajeilla, kuten pajuilla ja hieskoivulla, voi lehtien raskasmetallipitoisuuksien kohoaminen kuitenkin olla pitkäaikaista (Moilanen & Issakainen 2003). Joissakin tapauksissa koivun juurien kadmium- ja lyijypitoisuuksien on havaittu nousseen tuhkalannoituksen seurauksena (Mandre ym. 2010), mutta tuhkalannoituksen vaikutuksia puiden eri osien raskasmetallipitoisuuksiin ei tunneta vielä hyvin. Havaituista muutoksista huolimatta puiden raskasmetallipitoisuudet ovat pysyneet luontaisen pitoisuusvaihtelun rajoissa. Lisäksi tuhkalannoituksen on todettu vähentävän männyn neulasiin kertyvän radioaktiivisen ¹³⁷Cs:n määrää (Vetikko ym. 2010). Tämän arvellaan johtuvan tuhkan sisältämästä kaliumista (K), joka syrjäyttää cesiumia kasvien ravinteidenotossa (Högbom & Nohrstedt 2001).

4.3 Kirjallisuutta

- Arvidsson H & Lundkvist H (2002) Needle chemistry in young Norway spruce stands after application of crushed wood ash. *Plant and Soil* 238: 159–174.
- Ferm A, Hokkanen T, Moilanen M & Issakainen J (1992) Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. *Plant and Soil* 147: 305–316.

- Helmisaari H-S, Saarsalmi A & Kukkola M (2009) Effect of wood ash and nitrogen fertilization on fine root biomass and soil and foliage nutrients in a Norway spruce stand in Finland. *Plant Soil* 314: 121–132.
- Huotari N (2011) Recycling of wood- and peat-ash - a successful way to establish full plant cover and dense birch stand on a cut-away peatland. *Acta Universitatis Ouluensis. Series A, Scientiae rerum naturalium* A576. 48 s. + 4 osajulkaisua.
- Huotari N, Tillman-Sutela E & Kubin E (2011) Ground vegetation has a major role in element dynamics in an ash-fertilized cut-away peatland. *Forest Ecology and Management* 261: 2081–2088.
- Huotari N, Tillman-Sutela E & Kubin E (2009) Ground vegetation exceeds tree seedlings in early biomass production and carbon stock on an ash-fertilized cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* 33(9): 1108–1115.
- Huotari N, Tillman-Sutela E, Pasanen J & Kubin E (2008) Ash-fertilization improves germination and early establishment of birch (*Betula pubescens* Ehrh.) seedlings on a cut-away peatland. *Forest Ecology and Management* 255: 2870–2875.
- Hytönen J (1995) Turvepeltojen mäntytaimikoiden lannoituskokeiden tuloksia Keski- ja Pohjois-Pohjanmaalta. Julkaisussa: Nurmi J & Heino E (toim.) *Metsäntutkimuspäivä Kalajoella. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 570: 46–53.
- Hytönen J (1998a) Effect of peat ash fertilization on the nutrient status and biomass production of short-rotation willow on cut-away peatland area. *Biomass & Bioenergy* 15(1): 83–92.
- Hytönen J (1998b) Puutuhkasta ja muista jätteenaineista valmistetut pelletit rauduskoivun taimien ravinnelähteenä. Pellets made of wood ash and other wastes as nutrient sources for silver birch seedlings. *Suo – Mires and Peat* 49(2): 49–63.
- Hytönen J (2003) Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. *Silva Fennica* 37(2): 219–234.
- Hytönen J & Aro L (2005) Suopellot ja suopohjat puiden kasvualustoina. Teoksessa: Ahti E, Kaunisto S, Moilanen M & Murtovaara I (toim.) *Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 947: 167–176.
- Hytönen J & Ekola E (1993) Maan ja puuston ravinnetila Keski-Pohjanmaan metsitetyillä pelloilla. *Metsätieteen aikakauskirja - Folia Forestalia* 822. 32 s.
- Hytönen J & Kaunisto S (1999) Effect of fertilization on the biomass production of coppiced mixed birch and willow stands on a cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* 17(6): 455–469.
- Hytönen J & Pietiläinen P (1995) Turvepeltojen lannoitus ravinne-epätasapainon korjaamiseksi. Julkaisussa: Hytönen J & Polet K (toim.) *Peltojen metsitysmenetelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 581: 149–164.
- Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille (2007) *Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Metsäkustannus Oy*, 50 s.
- Högbom L & Nohrstedt H-Ö (2001) The fate of ¹³⁷Cs in coniferous forests following the application of wood-ash. *Science of the Total Environment* 280: 133–141.
- Issakainen J & Huotari N (2007) Suopohjien metsittäminen. Moniste, 11 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metla.fi/julkaisut/muut/suopohjien-metsittaminen/suopohjien_metsittaminen.pdf
- Issakainen J, Moilanen M & Silfverberg K (1994) Turvetuhkan vaikutus männyn kasvuun ja ravinnetilaan ojitetuilla rämeillä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 499. 22 s.

- Jacobson S (2003) Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations. *Silva Fennica* 37: 437–450.
- Kaunisto S (1987) Lannoituksen ja muokkauksen vaikutus männyn ja rauduskoivun istutus-taimien kasvuun suopohjilla. *Folia Forestalia* 681, 23 p.
- Lehtonen EM & Tikkanen E (1986) Turvetuhkan vaikutus maahan sekä vesipajun (*Salix cv. aquatica*) ravinnetalouteen ja kasvuun turpeentuotannosta vapautuneella suolla. Summary: Effect of peat ash on soil properties and growth on willow (*Salix cv. aquatica*) at an abandoned peat production area. Research Institute of Northern Finland. University of Oulu. C 69: 1–100.
- Levula T (1991) Tuhkalannoitus kangasmailla. *Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja* 394: 49–59.
- Lumme I (1988) Early effects of peat ash on growth and mineral nutrition of the silver birch (*Betula pendula*) on a mined peatland. *Silva Fennica* 22: 99–112.
- Mandre M, Korsjukov R & Ots K (2004) Effect of wood ash application on the biomass distribution and physiological state of Norway spruce seedlings on sandy soils. *Plant and Soil* 265: 301–314.
- Mandre M, Pärn H, Klõšeiko J, Ingerslev M, Stupak I, Kört M & Paasrand K (2010) Use of biofuel ashes for fertilization of *Betula pendula* seedlings on nutrient-poor peat soil. *Biomass and Bioenergy* 34: 1384–1392.
- Moilanen M & Issakainen J (2000) Tuhkalannoituksen metsävaikutukset. *Metsätehon raportti* 93. 38 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_093.pdf
- Moilanen M & Issakainen J (2003) Puu- ja turvetuhkan vaikutus maaperään, metsäkasvillisuuden alkuainepitoisuuksiin ja puuston kasvuun. *Metsätehon raportti* 162. 91 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_162.pdf
- Moilanen M, Issakainen J & Silfverberg K (2012) Peat ash as a fertilizer on drained mires – effects on the growth and nutritional status of Scots pine. *Working papers of the Finnish Forest Research Institute* 231. 18 p.
- Moilanen M, Silfverberg K & Hokkanen TJ (2002) Effects of wood-ash on the growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest Ecology and Management* 171: 321–338.
- Moilanen M, Silfverberg K, Hökkä H & Issakainen J (2004) Comparing effects of wood ash and commercial PK fertiliser on the nutrient status and stand growth of Scots pine on drained mires. *Baltic Forestry* 10(2): 2–10.
- Moilanen M, Silfverberg K, Hökkä H & Issakainen J (2005) Wood ash as a fertilizer on drained mires – growth and foliar nutrients of Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* 35(11): 2734–2742.
- Nieminen M (2003) Ravinteiden ja raskasmetallien vapautuminen tuhkalannoitteista. *Metsätehon raportti* 155. 20 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_155.pdf
- Nohrstedt HO (2001) Response of coniferous forest ecosystem on mineral soils to nutrient additions: a review of Swedish experiences. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16: 555–573.
- Ozolinčius R, Varnagirytė-Kabašinskienė I, Stakėnas V & Mikšys V (2007) Effect of wood ash and nitrogen fertilization on Scots pine crown biomass. *Biomass and Bioenergy* 31: 700–709.
- Paavilainen E, Päivänen J (1995) Peatland forestry, ecology and principles. *Ecological Studies*, vol. 111. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

- Pettersson F (1990) Complementary fertilization after whole-tree thinning. Institutet för skogsförbättring. Information växtnäring-skogsproduktion 2 1990/91. Uppsala. 4 p.
- Pihlström M, Rummukainen P, Mäkinen A, Tulonen T & Arvola L (2005) Tuhkalannoituksen vaikutus kasvillisuuden ja maaperän raskasmetalli- ja ravinnepitoisuuksiin. Metsätehon raportti 184. 49 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_184.pdf
- Saarsalmi A, Derome J & Levula T (2005) Effect of wood ash fertilization on stand growth, soil, water and needle chemistry, and berry yields of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in a Scots pine stand in Finland. Teoksessa: Mandre M (ed.). Utilisation of industrial wastes in forestry. Metsanduslikud Uurimused - Forestry Studies 42: 13–33.
- Saarsalmi A, Kukkola M, Moilanen M & Arola M (2006) Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a Scots pine stand. Forest Ecology and Management 235(1–3): 116–128.
- Saarsalmi A, Mälkönen E & Kukkola M (2004) Effects of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. Scandinavian Journal of Forest Research 19: 217–233.
- Saarsalmi A, Smolander A, Kukkola M & Arola M (2010) Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland. Plant and Soil 331: 329–340.
- Sikström U (1992) Stamtväxt hos tall och gran på fastmark efter behandling med låg kalkgiva, kvävegödsel och vedaska. (Summary: Stemgrowth of Scots pine and Norway spruce on mineral soils after treatment with a low lime dose, nitrogen fertilizer and wood ash.) Institutet för Skogsförbättring, Rapport 27, 22 s.
- Sikström U, Almqvist C & Jansson G (2010) Growth of *Pinus sylvestris* after the application of wood ash or P and K fertilizer to a peatland in southern Sweden. Silva Fennica 44(3): 411–425.
- Silfverberg K (1996) Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 588.
- Silfverberg K & Hotanen J-P (1989) Puuntuhkan pitkäaikaisvaikutukset ojitetulla mesotrofisella kalvakkanevalla Pohjois-Pohjanmaalla. Folia Forestalia 742. 23 s.
- Silfverberg K & Huikari O (1985) Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemilla. Folia Forestalia 633. 25 s.
- Silfverberg K & Issakainen J (1987a) Turpeentuhkan vaikutuksista puuston kasvuun ja ravinnetilaan käytännön lannoitustyömailla. Suo 38(3–4): 53–62.
- Silfverberg K & Issakainen J (1987b) Tuhkan määrän ja laadun vaikutus neulasten ravinnepitoisuuksiin ja painoon rämemänniköissä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 271. 25 s.
- Silfverberg K & Issakainen J (2001) Puuntuhka ja kauppalannoitteet suomänniköiden ravinnetalouden hoidossa. Metsätieteen aikakauskirja 1/2001: 29–44.
- Solla-Gullón F, Santalla M, Rodríguez-Soalleiro RJ & Merino A (2006) Nutritional status and growth of a young *Pseudotsuga menziesii* plantation in a temperate region after application of wood-bark ash. Forest Ecology and Management 237: 312–321.
- Vetikko V, Rantavaara A & Moilanen M (2010) Uptake of ¹³⁷Cs by berries, mushrooms and needles of Scots pine in peatland forests after wood ash application. Journal of Environmental Radioactivity 101: 1055–1060.
- Vuorinen M & Kurkela T (2000) *Lophodermella sulcigena* infection in Scots pine needles and tree nutrition. Forestry 73: 239–246.
- Österås AH, Sunnerdahl I & Greger M (2005) The impact of wood ash and green liquor dregs application on Ca, Cu, Zn and Cd contents in bark and wood of Norway spruce. Water, Air and Soil Pollution 166: 17–29.

5 TUHKALANNOITUKSEN KASVILLISUUSVAIKUTUKSET

5.1 Kasvilajisto ja -lajien väliset runsaussuhteet

Levitetyn tuhkan määrä sekä kasvupaikan alkuperäinen ravinteisuus vaikuttavat keskeisesti tuhkalannoituksen aiheuttamiin muutoksiin kasvillisuudessa. Kangas- ja suomet-sissä tuhkalannoitus on aiheuttanut näkyviä vaurioita alkuperäisiin sammaliin ja jäkä-liin sekä vähentänyt niiden peittävyttä (Gyllin & Kruuse 1996, Kellner & Weibull 1998, Pihlström ym. 2000, Jacobson & Gustafsson 2001, Moilanen ym. 2002, Ozolinčius ym. 2007, Silfverberg ym. 2010). Sammalet ja jäkälät ovat usein kuivuneet, ruskettuneet ja jopa kuolleet pian irtotuhkan levityksen jälkeen, todennäköisesti tuhkan korkean emäk-sisyyden ja ns. suolavaikutuksen seurauksena. Rahkasammalet ovat usein korvautuneet metsäsammalilla ja kuolleen sammalkasvuston päälle on levittäytynyt pioneirilajeja, jot-ka valloittavat tehokkaasti vapaita kasvupaikkoja (Silfverberg & Huikari 1985, Gyllin & Kruuse 1996, Jacobson & Gustafsson 2001, Moilanen ym. 2002). Alkuvaiheessa taantu-neet sammallajit ovat osittain elpyneet muutamia vuosia tuhkan levityksen jälkeen (Ja-cobson & Gustafsson 2001). Pohjakerroksen lajiston ja lajien välisten runsaussuhteiden muutokset ovat kuitenkin usein olleet pitkäkestoisia tai pysyviä. Rakeistettua tai itseko-vetettua tuhkaa käytettäessä vaikutukset eivät ole yleensä olleet yhtä voimakkaita kuin irtotuhkaa käytettäessä (Gyllin & Kruuse 1996, Kellner & Weibull 1998, Ring ym. 1998, Jacobson & Gustafsson 2001, Arvidsson ym. 2002).



Tuhkalannoitus lisää heinä-, ruoho- ja pensaslajien määrää etenkin runsastyyppisissä suo-metsissä ja kasvupaikka muuttuu ilmiänsultaan aiempaa rehevämmäksi.



Tuhkalannoitetuille alueille levittäytyy nopeasti palopaikoilla viihtyviä sammallajeja. Kuvassa päärynäsammal, *Leptobryum pyriforme* (Hedw.) Wils. (Kuva: Noora Huotari / Metla).

Tuhkalannoituksen on havaittu lisäävän heinä- ja ruoholajien määrää sekä kangas- että suometsissä, kun taas varpukasvit ovat vähentyneet (Silfverberg & Huikari 1985, Silfverberg & Hotanen 1989, Silfverberg & Issakainen 1991, Gyllin & Kruuse 1996, Rühling 1996, Silfverberg 1996, Levula ym. 2000, Jacobson & Gustafsson 2001, Moilanen ym. 2002, Olsson & Kellner 2002, Rummukainen ym. 2004). Kenttäkerroksen muutokset ovat voineet ilmetä voimakkaina jo ensimmäisen viiden vuoden aikana tuhkalannoituksen jälkeen ja olleet pysyviä. Typpirikkailla turvemilla tuhkalannoituksen vaikutukset kasvilajistoon ovat olleet yleensä voimakkaampia kuin kangasmailla tai niukkatyppisillä soilla (Reinikainen 1980, Silfverberg & Huikari 1985, Arvidsson ym. 2002). Niukkatyppisillä kasvupaikoilla ruoho- ja heinäkasvien runsastumisen on arvioitu johtuvan maan happamuuden vähentymisestä ja typen lisääntyneestä mineralisaatiosta, typpirikkailla turvemilla puolestaan muiden ravinteiden, lähinnä fosforin ja kaliumin lisääntyneestä saatavuudesta. Vaikka kasvupaikan lajisto muuttuu tuhkalannoituksen jälkeen, monimuotoisuus voi lisääntyä, koska vanhoja ja uusia lajeja esiintyy rinnakkain.

Turpeennoston jälkeen alkutilanne on täysin päinvastainen kuin kangas- ja suometsissä, sillä jäljelle jäänyt turvepinta on lannoitusvaiheessa kasvuton. Tuhkalannoituksen on todettu nopeuttavan merkitsevästi sammalpeitteen muodostumista ennestään kasvittomalle turvepinnalle (Näsi 2004, Huotari ym. 2007). Erityisesti palopaikoilla viihtyvät pioneerisammalet hyötyvät tuhkan levityksestä ja muodostavat nopeasti laajoja, kuramattoa muistuttavia kasvustoja. Lisäksi suopohjalle syntyy tuhkalannoituksen jälkeen monipuolinen ruohojen ja heinien lajivalikoima, kun taas lannoittamaton alue voi pysyä kasvi-peitteettömänä jopa vuosikymmenien ajan. Paljaalle suopohjalle nopeasti syntyvällä kasvipeitteellä on huomattava merkitys haitallisten ympäristövaikutusten, kuten eroosion ja ravinteiden sekä hienoaineksen huuhtoutumisen vähentäjänä.

5.2 Kasvien ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet

Tutkimustieto tuhkalannoituksen vaikutuksista aluskasvillisuuden, kuten sammalten, ruohovartisten kasvien sekä varpukasvien ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksiin rajoittuu muutamii tutkimuksiin, joiden tulokset ovat olleet vaihtelevia (Moilanen & Issakainen 2003, Pihlström ym. 2005, Ozolinčius & Varnagirytė 2005, Omil ym. 2007, Ozolinčius ym. 2007, Huotari ym. 2011). Tuhkalannoituksella ei ole havaittu olevan vaikutusta metsäsammalten raskasmetallipitoisuuksiin (Ozolinčius & Varnagirytė 2005, Ozolinčius ym. 2007). Turvetuotannosta vapautuneilla suopohjilla taas tuhkalannoituksen jälkeen syntyneiden pioneerisammalten kadmiumpitoisuudet ovat olleet hieman suurempia kuin tavanomaisen fosfori-kalium-lannoituksen jälkeen (Huotari ym. 2011). Pienestä muutoksesta huolimatta kadmiumpitoisuudet ovat kuitenkin pysyneet alhaisella tasolla Suomessa aiemmin mitattuihin sammalten yleisiin pitoisuuksiin suhteutettuna (Poikolainen ym. 2004). Tuhkalannoitus ei ole lisännyt muiden raskasmetallien pitoisuuksia suopohjien pioneerisammalissa.

Ruohojen ja heinien sekä varpukasvien raskasmetallipitoisuudet ovat pysyneet erittäin alhaisella tasolla tuhkalannoituksesta huolimatta (Moilanen & Issakainen 2003, Huotari ym. 2011). Joissakin tapauksissa esim. mustikan ja maitohorsman lehdissä on kuitenkin todettu lievästi kohonneita kadmiumpitoisuuksia muutaman vuoden ajan tuhkalannoituksen jälkeen (Moilanen & Issakainen 2003, Pihlström ym. 2005), mutta nämä muutokset ovat olleet ohimeneviä. Eri tuhkalaatujen vaihteleva alkuainekoostumus sekä lannoitukseen käytetty tuhkan määrä ovat olleet merkittävimpiä kasvien alkuainepitoisuuksien muutoksiin vaikuttavia tekijöitä. Pienistä muutoksista huolimatta tuhkalannoitetuilta alueilta mitatut kasvien raskasmetallipitoisuudet eivät ole poikenneet merkittävästi eri kasvilajien luontaisista vaihtelurajoista.

5.3 Marjat ja sienet

Marjojen ja sienten ravinnepitoisuudet, erityisesti fosfori, kalium, kalsium ja boori, kohoavat yleensä 1–2 vuotta tuhkalannoituksen jälkeen (Levula ym. 2000). Marjoissa ravinnepitoisuudet ovat tasaantuneet lannoitusta edeltävälle tasolle noin 10 vuodessa tuhkan levityksen jälkeen, kun taas sienissä ravinnepitoisuuksien muutoksia on todettu jopa 10–20 vuoden ajan. Parantunut ravinnetila ei kuitenkaan ole lisännyt marja- tai sienisatoja (Moilanen & Issakainen 2000). Joissakin tapauksissa marjasadon on havaittu pienentyvän tuhkalannoituksen aiheuttaman varpukasvien voimakkaan taantumisen seurauksena (Saarsalmi ym. 2005).

Marjojen ja sienten raskasmetallipitoisuudet (Silfverberg & Issakainen 1991, Rüling 1996, Egnell ym. 1998, Nilsson & Eriksson 1998, Levula ym. 2000, Moilanen & Issakainen 2000, Perkiömäki ym. 2003) sekä radioaktiivisen ¹³⁷Cs:n pitoisuudet (Levula ym. 2000, Vetikko ym. 2010) ovat pysyneet muuttumattomina tai jopa laskeneet tuhkalannoit-



Tuhkan sisältämien raskasmetallien ei ole pitkäaikaisissa tutkimuksissa havaittu siirtyvän marjoihin tai sieniin siinä määrin, että niistä aiheutuisi vaaraa ihmisten tai eläinten terveydelle. (Kuva vasemmalla: Kalervo Kylmänen / Metla).

tuksen seurauksena. Joissakin tutkimuksissa sienten ja marjojen raskasmetallipitoisuuksien on havaittu tilapäisesti kohonneen heti tuhkan levityksen jälkeen, mutta myöhemminä vuosina erot ovat tasaantuneet (Lodenus ym. 2002, Moilanen ym. 2006). Todetut muutokset ovat olleet pieniä eri lajien välisiin luontaisiin eroihin verrattuna. Todennäköisenä syynä pitoisuuksien tilapäiseen nousuun pidetään suoraa kosketusta tuhkan kanssa. Yli 50 vuotta vanhoilla kokeilla marjojen ja sienten raskasmetallipitoisuuksissa ei ole enää havaittu selviä muutoksia (Moilanen & Issakainen 2003).

Marjojen ja sienien pinnalle mahdollisesti kertyvän tuhkapölyn takia niiden keräämistä on syytä välttää tuhkan levitystä seuraavan kesän aikana erityisesti, jos raetuhkan asemasta on käytetty pölyävää irtotuhkaa.

5.4 Kirjallisuutta

- Aronsson KA & Ekelund NGA (2004) Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Quality* 33(5): 1595–1605.
- Arvidsson H, Vestin T & Lundkvist H (2002) Effects of crushed wood ash application on ground vegetation in young Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management* 161: 75–87.
- Egnell G, Nohrstedt H-Ö, Weslien J, Westling O & Örländer G (1998) Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av skogsbränsleuttag, asktillförsel och övrig näringskompensation. Skogsstyrelsen. Rapport 1/1998.
- Gyllin M & Kruuse A (1996) Effekter på florán efter tillförsel av ved- och blandaska. Ramprogram askåterföring. NUTEK, R 1996: 36, Stockholm, 23 s.
- Huotari N, Tillman-Sutela E, Kauppi A & Kubin E (2007) Fertilization ensures rapid formation of ground vegetation on cut-away peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 874–883.

- Huotari N, Tillman-Sutela E & Kubin E (2011) Ground vegetation has a major role in element dynamics in an ash-fertilized cut-away peatland. *Forest Ecology and Management* 261: 2081–2088.
- Jacobson S & Gustafsson L (2001) Effects on ground vegetation of the application of wood ash to a Swedish Scots pine stand. *Basic and Applied Ecology* 2: 233–241.
- Kellner O & Weibull H (1998) Effects of wood ash on bryophytes and lichens in a Swedish pine forest. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2(suppl.): 76–85.
- Levula T, Saarsalmi A & Rantavaara A (2000) Effects of ash fertilization and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and ¹³⁷Cs concentrations in lingonberries (*Vaccinium vitis-idaea*). *Forest Ecology and Management* 126: 269–279.
- Lodenius M, Soltanpour-Gargari & Tulisalo E (2002) Cadmium in forest mushrooms after application of wood ash. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 68: 211–216.
- Moilanen M, Fritze H, Nieminen M, Piirainen S, Issakainen J & Piispanen J (2006) Does wood ash application increase heavy metal accumulations in forest berries and mushrooms? *Forest Ecology and Management* 226: 153–160.
- Moilanen M & Issakainen J (2000) Tuhkalannoituksen metsävaikutukset. Metsätehon raportti 93. 38 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_093.pdf
- Moilanen M & Issakainen J (2003) Puu- ja turvetuhkien vaikutus maaperään, metsäkasvillisuuden alkuainepitoisuuksiin ja puuston kasvuun. Metsätehon raportti 162. 91 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_162.pdf
- Moilanen M, Silfverberg K & Hokkanen TJ (2002) Effects of wood-ash on the growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest Ecology and Management* 171: 321–338.
- Nilsson T & Eriksson HM (1998) Vedaska och kalk. Effekter på upptag av näringsämnen och tungmetaller i blåbär. Ramprogram askåterföring. ER 1998–10. NUTEK, Stockholm.
- Näsi N (2004) Tuhkalannoituksen vaikutukset maan ravinnetalouteen ja kasvillisuuden sukkessioon turpeennostosta vapautuneella suopohjalla. Pro gradu -tutkielma, Oulun yliopisto, biologian laitos, 79 s.
- Olsson B & Kellner O (2002) Effects of soil acidification and liming on ground flora establishment after clear-felling of Norway spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 158: 127–139.
- Omil B, Pineiro V & Merino A (2007) Trace elements in soils and plants in temperate forest plantations subjected to single and multiple applications of mixed wood ash. *Science of the Total Environment* 381: 157–168.
- Ozolinčius R, Buožytė R & Varnagirytė-Kabašinskienė I (2007) Wood ash and nitrogen influence on ground vegetation cover and chemical composition. *Biomass and Bioenergy* 31: 710–716.
- Ozolinčius R & Varnagirytė I (2005) Effects of wood ash application on heavy metal concentrations in soil, soil solution and vegetation in a Lithuanian Scots pine stand. *Metsanduslikud uurimused/Forestry Studies* 42: 66–73.
- Perkiömäki J, Kiikkilä O, Moilanen M, Issakainen J, Tervahauta A & Fritze H (2003) Cadmium-containing wood ash in a pine forest: effects on humus microflora and cadmium concentrations in mushrooms, berries and needles. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 2443–2451.

- Pihlström M, Rummukainen P & Mäkinen A (2000) Tuhkalannoitusprojektin kasvillisuus- ja maaperätutkimukset Evolla 1997–1999. Metsätehon raportti 89. 53 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_089.pdf
- Pihlström M, Rummukainen P, Mäkinen A, Tulonen T & Arvola L (2005) Tuhkalannoituksen vaikutus kasvillisuuden ja maaperän raskasmetalli- ja ravinnepitoisuuksiin. Metsätehon raportti 184. 49 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_184.pdf
- Poikolainen J, Kubin E, Piispanen J & Karhu J (2004) Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985–2000 using mosses as bioindicators. *The Science of the Total Environment* 318: 171–185.
- Reinikainen A (1980) Tuhkalannoituksen ekologiaa. Metsäntutkimuslaitos, Muhoksen tutkimusaseman tiedonantoja 20: 24–27.
- Ring E, Jacobson S & Nohrstedt H-Ö (1998) Självhårdad trädaska påverkade markvegetation och markvattenkemi. *Skogforsk Resultat* 15: 1–2. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.skogforsk.se/upload/Dokument/Resultat/1998–15.pdf>
- Rummukainen P, Pihlström M & Mäkinen A (2004) Puutuhkalannoituksen lyhytaikaiset vaikutukset kasvilajistoon. Metsätehon raportti 171. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_171.pdf
- Rüling Å (1996) Uptag av tungmetaller i swamp och bär samt förändring i florans sammansättning efter tillförsel av aska till skogsmark. Ramprogram askätetförelse. NUTEK, R 1996: 49, Stockholm, 42 s.
- Saarsalmi A, Derome J & Levula T (2005) Effect of wood ash fertilization on stand growth, soil, water and needle chemistry, and berry yields of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in a Scots pine stand in Finland. Teoksessa: Mandre M (ed.). Utilisation of industrial wastes in forestry. *Metsanduslikud Uurimused – Forestry Studies* 42: 13–33.
- Silfverberg K (1996) Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland, D. Sc. thesis. University of Helsinki, Faculty of Science. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 588. 27 s.
- Silfverberg K & Hotanen J-P (1989) Puutuhkan pitkäaikaisvaikutukset ojitetulla mesotrofi-sella kalvakkanevalla Pohjois-Pohjanmaalla. Summary: Long-term effects of wood-ash on a drained mesotrophic *Sphagnum papillosum* fen in Oulu district, Finland. *Folia Forestalia* 742. 23 p.
- Silfverberg K & Huikari O (1985) Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemaidilla. *Folia Forestalia* 633. 25 s.
- Silfverberg K, Huotari N & Kokkonen A-M (2010) Puu- ja turvetuhkan vaikutukset kasvillisuuteen ja männyn taimettumiseen pätehtäkatulla turvekankaalla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2010: 341–353.
- Silfverberg K & Issakainen J (1991) Tuhkalannoituksen vaikutukset metsämarjoihin. Summary: Effects of ash fertilization on forest berries. *Folia Forestalia* 769. 23 s.
- Vetikko V, Rantavaara A & Moilanen M (2010) Uptake of ¹³⁷Cs by berries, mushrooms and needles of Scots pine in peatland forests after wood ash application. *Journal of Environmental Radioactivity* 101: 1055–1060

6 TUHKALANNOITUKSEN VAIKUTUKSET ELÄIMIIN

Tuhkalannoituksen mahdollisesti eläimille aiheuttamia haittavaikutuksia ovat raskasmetallien, erityisesti kadmiumin, kertyminen elimistöön ja rikastuminen ravintoketjuissa. Tuhkalannoituksen jälkeisiä kadmiumpitoisuuksia on mitattu muutamissa tutkimuksissa piennisäkkäistä, lintujen munista, madoista, vesielioistä sekä erilaisista hyönteisistä. Piennisäkkäät ovat hyviä biologisia indikaattoreita, sillä niitä on helppo pyydystää, ne liikkuvat rajatulla alueella ja niihin kuuluu sekä kasvinsyöjiä että hyönteissyöjiä. Tutkimalla tuhkalannoituksen vaikutuksia hyönteisten, kasvien ja marjojen raskasmetallipitoisuuksiin sekä niitä ravinnokseen käyttävien eläinten raskasmetallipitoisuuksiin saadaan tietoa raskasmetallien mahdollisesta rikastumisesta ravintoketjuissa.

Päästäisten maksassa ja munuaisissa, joihin ympäristömyrkyt yleensä kertyvät, on todettu lievästi kohonneita kadmiumpitoisuuksia ensimmäisen kahden vuoden aikana tuhkalannoituksen jälkeen (Lodenius ym. 2002, Lodenius 2003). Metsämyyrissä pitoisuudet ovat puolestaan pysyneet muuttumattomina tai jopa hieman laskeneet lannoituksen seurauksena (Lodenius ym. 2002). Ero johtuu todennäköisesti erilaisista ruokavalioista, sillä metsämyyrät syövät pääasiassa kasviraivintoa ja päästäiset taas hyönteisiä ja matoja. Tuhkalannoituksen ei ole todettu lisäävän kasvien maanpäällisten osien tai marjojen kadmiumpitoisuuksia (ks. luku 5), kun taas kastemadoissa on todettu lievästi kohonneita kadmiumpitoisuuksia (Lodenius 2003).



Tuhkan sisältämien raskasmetallien ei ole havaittu siirtyvän haitallisissa määrin metsämyyriin. (Kuva: Asko Kaikusalo / Metla).

Tuhkalannoituksella ei ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta erilaisten hyönteisten, kuten muurahaisten, maakiitäjäisten ja kovakuoriaisten toukkien kadmiumpitoisuuksiin (Lodenius ym. 2009). Myöskään talitiaisen ja kirjosiepon munien kadmiumpitoisuudet eivät ole kohonneet tuhkalannoituksen seurauksena (Lodenius 2003). Tuhkalannoituksen ei ole todettu lisäävän raskasmetallien kertymistä valuma-alueen alapuolisten järvi- en eläinplanktonissa, pohjaeläimissä tai kaloissa (Tulonen ym. 2000, Tulonen ym. 2003). Tuhkalannoituksen vaikutuksia eri eläinten raskasmetallikertymiin yli viittä vuotta pidemmällä aikavälillä ei kuitenkaan tunneta hyvin. Tuhkan levityksen vaikutukset maaperäeläimiin on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3: ”Tuhkalannoituksen maaperävaikutukset”.

6.1 Kirjallisuutta

- Lodenius M (2003) Cadmium concentrations in a boreal forest ecosystem after application of wood ash. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 71:776–781.
- Lodenius M, Josefsson J, Heliövaara K, Tulisalo E & Nummelin M (2009) Cadmium in insects after ash fertilization. *Insect Science* 16: 93–98.
- Lodenius M, Soltanpour-Gargari, Tulisalo E & Henttonen H (2002) Effect of ash application on cadmium concentration in small mammals. *Journal of Environ. Quality* 31: 188–192.
- Tulonen T, Arvola L, Pihlström M, Mäkinen A, Rummukainen A & Rask M (2003) Tuhkalannoituksen vaikutus metsäjärvissä. *Metsätehon raportti* 146. 31 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_146.pdf
- Tulonen T, Ollila S & Arvola L (2000) Tuhkalannoituksen vesistövaikutukset. *Metsätehon raportti* 87. 42 s. + liite. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_087.pdf

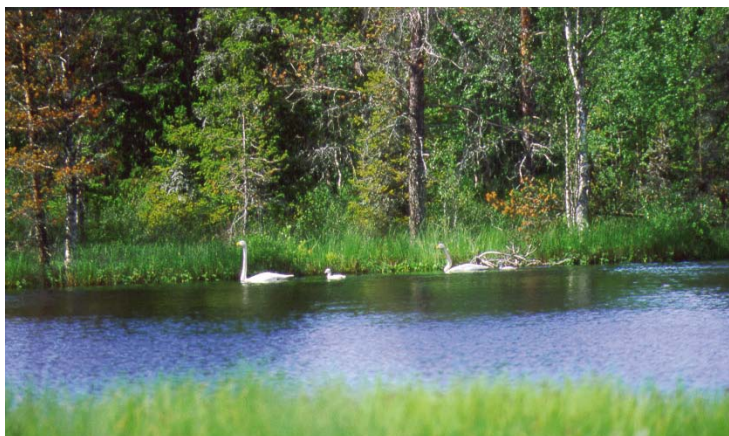
7 TUHKALANNOITUKSEN VESISTÖVAIKUTUKSET

Tuhkalannoituksen vesistöille mahdollisesti aiheuttamina ympäristöriskeinä pidetään tuhkan suhteellisen korkeaa fosforipitoisuutta sekä tuhkan sisältämiä raskasmetalleja, jotka liuetessaan saattavat huuhtoutua vesistöihin. Vaikka tuhka itsessään ei sisällä typpeä, tuhkalannoituksen aiheuttama maan happamuuden vähentyminen sekä hajotustoiminnan aktivoituminen voi lisätä typen vapautumista runsastypillisillä alueilla. Tällöin myös riski typen huuhtoutumiselle kasvaa.

Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että jos tuhkaa ei joudu lannoituksen yhteydessä suoraan ojiin, vesistöjen rehevöitymistä edistävän fosforin sekä haitallisten raskasmetallien huuhtoutuminen tuhkalannoitetuilta alueilta on hyvin vähäistä (Nilsson & Lundin 1996, Tulonen ym. 2003, Piirainen & Domisch 2004 a ja b, Nieminen ym. 2005, Piirainen ym. 2008, Núñez-Delgado ym. 2011). Tuhkalannoituskokeissa ei ole havaittu myöskään lisääntynyttä typen huuhtoutumista (Tulonen ym. 2002, Piirainen ym. 2008). Puusto sekä tuhkalannoituksen jälkeen runsastuva kenttäkerroksen kasvillisuus todennäköisesti pidättävät vapautuvia ravinteita tehokkaasti. Suurimmat tuhkalannoituksen aiheuttamat ravinnehuuhtoumat ovat aiheutuneet yleensä talvella lumen päälle levitetyn tuhkan kulkeutuessa keväällä sulamisvesien mukana ojiin. Talvilevityksen jälkeisiä huuhtoumia voidaan ehkäistä ojien reunoille jätettävillä 1–2 metrin levyisillä suojavyöhykkeillä. Purojen reunoille tulisi jättää 10–15 metrin suojavyöhyke ja järvien, lampien ja jokien rannoille vähintään 50 metrin suojavyöhyke (Makkonen 2008). Lentolevityksen yhteydessä suositellaan käytettäväksi 50 metrin suojavyöhykkeitä.

Tuhkasta vapautuva fosfori sitoutuu nopeasti tuhkan ja myös turpeen sisältämiin rauta- ja alumiiniyhdisteisiin hidasliukoiseen muotoon (Nieminen ym. 2007), mikä osaltaan selittää sen vähäistä huuhtoutumista tuhkalannoitetuilta alueilta (Haveraaen 1986, Nieminen ym. 2005). Myös suon ravinteisuudella on vaikutusta huuhtoutumisriskin voimakkuuteen (Piirainen & Domisch 2004b). Karuilla, vähäpuustoisilla soilla esimerkiksi fosforin huuhtoutumisriskin on arveltu kasvavan siksi, että karujen soiden turve sisältää vähemmän rauta- ja alumiiniyhdisteitä ja myös puuston ravinteidenotto kyky on pienempi.

Tuhkalannoituksen on havaittu nostavan etenkin valumavesien kalium-, rikki-, ja kloridipitoisuuksia pian lannoituksen jälkeen (Nilsson & Lundin 1996, Piirainen & Finér 2000, Tulonen ym. 2000 ja 2002, Piirainen & Domisch 2004b, Piirainen ym. 2005). Myös valumavesien pH-arvo voi nousta lievästi (Rosén ym. 1993, Fransman & Nihlgård 1995, Tulonen ym. 2002). Nämä vaikutukset ovat kuitenkin olleet yleensä lyhytaikaisia, eikä niitä pidetä vesistöjen kannalta haitallisina. Jos kaliumhävikki turvemaidella on suuri, puuston kasvu heikkenee kuitenkin pitkällä aikavälillä ja silloin tarvitaan lisälannoitusta. Rakeistaminen hidastaa useiden ravinteiden, esim. kaliumin ja boorin, liukenemista tuhkasista ja näin ollen vähentää ravinnehuuhtoumia kasvupaikalta (Nieminen 2003, Nieminen ym. 2007).



Tuhkalannoituksen vesistövaikutukset ovat vähäisiä, kun käytetään lannoitussuosittelun mukaisia tuhkamääriä ja huolehditaan riittävästä suojavyöhykkeistä. (Kuva: Erkki Oksanen / Metla).

Raskasmetallit, erityisesti lyijy, nikkeli ja kadmium, pysyvät tuhassa vaikealiukoisessa muodossa tuhkan emäksisyyden takia (Nieminen ym. 2005). Tuhkan on havaittu vaikuttavan myös maassa ennestään oleviin raskasmetalleihin, joiden liukoisuus on ainakin ensimmäisten vuosien aikana vähentynyt tuhkan aiheuttaman maaperän happamuuden pienemisen seurauksena (Tulonen ym. 2000, Perkiömäki ym. 2003). Tuhkalannoituksen pitkäaikaisvaikutuksia tai metsikön myöhempien käsittelyiden, kuten harvennusten tai päätehakkuiden, vaikutuksia tuhkan sisältämien ravinteiden ja raskasmetallien huuhtoumiin ei kuitenkaan vielä tunneta hyvin (Piirainen & Domisch 2005). Koska raskasmetallien tiedetään liukenevan maaperästä ja tuhkasta vesiin sitä helpommin, mitä happamampaa maa on, tuhkan neutralointikyky ja sen kesto vaikuttavat keskeisesti mahdollisiin tulevaisuudessa tapahtuviin huuhtoumiin (Kepanen ym. 2005). Riskien minimoimiseksi onkin tärkeää, että metsälannoituksessa käytettävälle tuhkalta on määritetty selkeät raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot.

7.1 Kirjallisuutta

- Fransman B & Nihlgård B (1995) Water chemistry in forested catchments after topsoil treatment with liming agents in southern Sweden. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 895–900.
- Haveraaen O (1986) Ash fertilizer and commercial fertilizers as nutrient sources for peatland. *Meddelelser Norsk institutt for skogforskning* 39(14): 251–263.
- Kepanen A, Lodenius M, Tulisalo E & Hartikainen H (2005) Effects of different wood ashes on the solubility of cadmium in two boreal forest soils. *Boreal Environment Research* 10(2): 135–143.
- Makkonen T (2008) (toim.) Tuhkalannoitus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Metsäkustannus Oy, Porvoo. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Metsatietostandardi/tuhkalannoitusopas_fin.pdf
- Nieminen M (2003) Ravinteiden ja raskasmetallien vapautuminen tuhkalannoitteista. Metsätehon raportti 155. 20 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_155.pdf

- Nieminen M, Piirainen S & Moilanen M (2005) Release of mineral nutrients and heavy metals from wood and peat ash fertilizers: Field studies in Finnish forest soils. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20(2): 146–153.
- Nieminen M, Moilanen M & Piirainen S (2007) Phosphorus allocation in surface soil of two drained peatland forests following wood and peat ash application – Why effective adsorption on low sorptive soils? *Silva Fennica* 41(3): 395–407.
- Nilsson T & Lundin L (1996) Effects of drainage and wood ash fertilization on water chemistry at a cutover peatland. *Hydrobiologia* 335: 3–18.
- Núñez-Delgado A, Quiroga-Lago F & Soto-González B (2011) Runoff characteristics in forest plots before and after wood ash fertilization. *Maderas. Ciencia y tecnología* 13(3): 267–284.
- Perkiömäki J, Tom-Petersen A, Nybroe O & Fritze H (2003) Boreal forest microbial community after long-term field exposure to acid and metal pollution and its potential remediation by using wood ash. *Soil Biology & Biochemistry* 35: 1517–1526.
- Piirainen S & Domisch T (2004a) Leaching of nutrients and heavy metals from drained peatlands after wood ash fertilization. In: Päivänen, J. (ed.). *Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress, Tampere, Finland, 6–11 June 2004. Vol. 1. Oral presentations. International Peat Society, Jyväskylä.* p. 491–499. ISBN 952–99401–0–6.
- Piirainen S & Domisch T (2004b) Tuhkalannoituksen vaikutus pohja- ja valumavesien laatuun ja ainehuhtoumiin ojitetuilla soilla. *Metsätehon raportti* 168. 42 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_168.pdf
- Piirainen S & Domisch T (2005) Huuhtoutuuko tuhkalannoitusaloilta ravinteita vesistöihin? Julkaisussa: Ahti E, Kaunisto S, Moilanen M & Murtovaara I (toim.). *Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 947: 266–269.
- Piirainen S, Domisch T, Nieminen M & Moilanen M (2005) Nutrient and heavy metal leaching after wood ash fertilization from drained peatland. In: Pechová J & Karas J (eds.). *Regular Recycling of Wood Ash to Prevent Waste Production. RecAsh – A Life-environment demonstration project. RecAsh International Seminar, 8th–9th (10th) of November 2005, Prague, Czech Republic. Proceedings. Forests of the Czech Republic, S. E., pp. 47–55.*
- Piirainen S, Domisch T, Nieminen M & Moilanen M (2008) Long-term leaching of nutrients from drained peatland after ash fertilization. In: Farrel C & Feehan J (eds.). *Proceedings of the 13th International Peat Congress. After Wise Use – The Future of Peatlands. Tullamore, Ireland, 8–13 June 2008. Volume 1, Oral Presentations. International Peat Society, p. 502–505.*
- Piirainen S & Finér L (2000) Leaching from wood ash fertilized drained peatlands. In: Rochefort L & Daigle J-Y (eds) *Sustaining Our Peatlands. Proceedings of the 11th International Peat Congress, Québec, Canada, 6–12 August, 2000, Canadian Society of Peat and Peatlands & the International Peat Society, pp. 977–983.*
- Rosén K, Eriksson H, Clarholm M, Lundkvist H & Rudebek A (1993) Granulerad vedaska till skog på fastmark – ekologiska effekter. *NU-TEK Rapport* 26. 60 s.
- Tulonen T, Arvola L, Pihlström M, Mäkinen A, Rummukainen A & Rask M (2003) Tuhkalannoituksen vaikutus metsäjärvissä. *Metsätehon raportti* 146. 31 s. + liitteet. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_146.pdf
- Tulonen T, Ollila S & Arvola L (2000) Tuhkalannoituksen vesistövaikutukset. *Metsätehon raportti* 87. 42 s. + liite. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_087.pdf
- Tulonen T, Ollila S & Arvola L (2002) Limnological effects of wood ash application to the subcatchments of boreal, humic lakes. *Journal of Environmental Quality* 31: 946–953.

8 TUHKALANNOITUKSEN TOTEUTTAMINEN

8.1 Tuhkalannoitukseen soveltuvat kohteet

Metsälannoituksen tarkoituksena on lisätä kasvupaikalle niitä ravinteita, joita maassa on niukasti puuston tarpeeseen nähden. Tavoitteena voi olla joko puuston kasvun parantaminen eli puuntuotoksen lisääminen tai maan ravinne-epätasapainon korjaaminen puuston häiriöttömän kehityksen turvaamiseksi pitkällä aikavälillä (Päivänen 2007).

Metsätalouden käyttöön on laadittu useita soiden kasvupaikkaluokituksia, joissa alkupeiräisen kasvupaikan ravinteisuus ja puuntuotoskyky määritellään indikaattorilajien avulla (Huikari 1952, Heikurainen 1986, Laine & Vasander 1990, 2005, Laine ym. 2012). Tuhkalannoitukseen parhaiten soveltuvia kohteita ovat runsastyyppiset ojitetut suometsät, joiden turvekerroksen paksuus on vähintään 30 cm ja puuston kasvua rajoittaa fosforin ja kaliumin puute. Tällaisia kohteita ovat tyypillisesti paksaturpeiset II-tyyppin puolukka- ja mustikkaturvekankaat, joilla turve on kohtalaisen pitkälle maatunutta. Maatuneessa turpeessa on runsaasti kasveille käyttökelpoisessa muodossa olevaa typpeä (Päivänen 2007). Maastossa turpeen tyypipitoisuutta voidaan arvioida pintaturpeen maatuneisuuden ja turvelajin silmämääräisen tarkastelun avulla (von Post 1922). Jos turve hajoaa kädessä puristettaessa puuromaiseksi massaksi ja puristejäännös jää sormien avaamisen jälkeen ennalleen, eikä kimmoa takaisin, on turpeessa yleensä puiden tarpeisiin nähden riittävästi typpeä. Kasvupaikan ravinteisuuden karkeassa arvioinnissa voidaan käyttää myös yksittäisiä kasvilajeja, jotka kuvastavat pintaturpeen tyyppimäärää. Esimerkiksi



Tuhkalannoitukseen parhaiten soveltuvia kohteita ovat runsastyyppiset ojitetut suometsät, joiden turvekerroksen paksuus on vähintään 30 cm ja puuston kasvua rajoittaa fosforin ja kaliumin puute.

korpikastikkaa, riidenliekoa, katajaa, pihlajaa ja talvikkeja esiintyy usein silloin kun pinta-urpeen typpipitoisuus on yli 2 % (Moilanen & Issakainen 2003, Moilanen ym. 2005), mikä on riittävä puunkasvatuksen turvaamiseksi. Tarvittaessa turpeen typpipitoisuus voidaan määrittää myös laboratoriossa tehtävällä ravinneanalyysillä. Joskus jo metsikön ulkoasu voi paljastaa kaliumin ja fosforin puutuksesta kärsivät alueet ja kertoa kasvupaikan typpipitoisuudesta. Voimakas, puuston kasvua haittaava ravinnetalouden epätasapaino ja ravinnepuutokset näkyvät neulasten tai lehtien poikkeavina värioireina, kasvun taantumisenä ja runkovikoina (Moilanen ym. 2005). Ravinnepuutokset on epäselvissä tilanteissa syytä selvittää keräämällä neulasnäytteet metsikköä edustavasta valtapuustosta ja määrittämällä näytteistä tärkeimpien ravinteiden (N, P, K, B) pitoisuudet. Edustava neulasnäyte saadaan keräämällä 1–2 oksaa vallitsevan latvuskerroksen 5–10 puusta, latvuksen yläosan uusimmista neulasista (Moilanen ym. 2005).

Tuhkalannoitus sopii erinomaisesti turvetuotannosta vapautuville suopohjille, jotka halutaan metsittää esimerkiksi energiapuun tuotantoa varten tai maisemoida kasvillisuuden peittoon ympäristöhoidollisista syistä (Huotari ym. 2007, 2008, 2009). Metsänkasvatuksen perusedellytys on suopohjan kuivatus kohtuullisin kustannuksin. Alueen metsänkasvatuskelpoisuutta voidaan arvioida karkeasti turvekerroksen paksuuden ja pohjamaalajin perusteella (Aro 2008). Kasvupaikan puuntuotoskyky on yleensä sitä parempi mitä ohuempi jäljelle jäänyt turvekerros on ja mitä hienojakoisempaa turpeen alla oleva pohjamaa on. Tarkempi turpeen ravinteisuuden arvioiminen edellyttää maa-analyysien tekemistä. Myös suopohjien turpeessa on tavallisesti runsaasti typpeä, mutta niukasti kivennäisravinteita, erityisesti kaliumia. Puuston kasvulle riittävänä typpivarastona pidetään 15–30 cm:n turvekerrosta (Issakainen & Huotari 2007). Tällöin myös puiden juuristo ulottuu aikanaan pohjamaan ravinteisiin. Jo 10 cm:n turvekerros saattaa kuitenkin estää puun taimien juurten pääsyn kivennäismaahan (Aro 2008), joten metsikköä perustettaessa alkulannoitus on usein tarpeen. Jos jäljelle jäänyt turvekerros on paksuudeltaan yli 40–50 cm, edellyttää hyvän puuntuotoskyvyn ylläpitäminen yleensä toistuvaa lannoittamista.



Tuhkalannoitus on hyvä vaihtoehto turvetuotannosta vapautuville suopohjille, jotka halutaan metsittää tai maisemoida kasvillisuuden peittoon. Lannoittamaton (vas.) ja tuhkaa 5 vuotta aikaisemmin saanut suopohja (oik.) Limingan Hirvinevalla.

Metsitetyillä suopelloilla tuhkalannoitusta voidaan käyttää maan ravinne-epätasapainon korjaamiseen ja puuston häiriöttömän kasvun turvaamiseen (Hytönen 2008). Suopeltojen ravinnetila vaihtelee huomattavasti mm. maanviljelyssä käytetyistä maanparannus- ja viljelymenetelmistä, alkuperäisestä suotyypistä ja turpeenpaksuudesta riippuen. Suopeltojen metsitysaloilla puiden normaalia kehitystä saattaa vaarantaa ravinteiden epätasapaino, sekä kaliumin ja boorin puutokset (Hytönen & Aro 2005, Hytönen 2008). Arvioitaessa suopeltojen ominaisuuksia puiden kasvualustana on tärkeää selvittää turvekerroksen paksuus, turpeen maatuneisuus sekä maanviljelyn aikana käytetyn painomaan määrä ja maalaji. Arviota voidaan tarkentaa maan kemiallisilla analyyseilla. Puuston ravinnetilaa voidaan arvioida silmävaraisesti puustossa esiintyvien kasvuhäiriöiden ja puutosoireiden avulla sekä neulasista ja lehdistä tehtävien ravinneanalyyysien avulla (Moilanen ym. 2005). Metsitetyillä suopelloilla ei yleensä tarvita typpi- tai fosforilannoitusta (Hytönen & Aro 2005). Jos puustossa esiintyy kaliumin, boorin tai muiden hivenravinteiden puutetta, voidaan ravinnetilaa korjata tuhkalannoituksella. Suopelloilla käytettävän tuhkalannoitteen tulisi sisältää runsaasti kaliumia ja booria.

Kangasmailla tuhkalannoitusta voidaan käyttää ravinteiden epätasapainosta tai esimerkiksi boorin puutoksesta aiheutuvien puiden kasvuhäiriöiden torjumiseen (Saarsalmi & Kukkola 2009). Lisäksi tuhkaa voidaan levittää korvaamaan puubiomassan korjuun aiheuttamaa ravinteiden menetystä ja ehkäisemään maaperän happamoitumista (Eriksson 1998, Jacobson ym. 2004, Wang ym. 2010).

8.2 Logistiikka ja tuhkan levittäminen

Metsän lannoitukseen on käytettävä rakeistettua tai itsekovetettua tuhkaa, jotta pölyäminen olisi mahdollisimman vähäistä (MMM asetus 24/11). Tuhkalannoitus kannattaa suunnitella ja toteuttaa usean tilan yhteishankkeena, jolloin lannoituspinta-alan laajuus tuo säästöjä kuljetus- ja levityskustannuksiin (Moilanen 2009). Tuhkalannoituksista on hyvä tiedottaa etukäteen ympäristön asukkaille.

Esikäsitelty tuhka kuljetetaan metsään kuorma-autolla, joten tien kantavuudesta sekä talviaikaan mahdollisesta aurauksesta ja hiekoituksesta on huolehdittava. Tuhkalannoitteen varastopaikaksi valitaan kovapohjainen ja tasainen alue, jonka tulee olla suuruudeltaan noin 5 m x 8 m jokaista rekka-autollista kohden. Varastoalueen on oltava myös riittävän avara, jotta raskas kuljetuskalusto pääsee liikkumaan esteettä. Lannoitevarastoa koskevat urakoitsijakohtaiset vaatimukset on varmistettava ja huomioitava aina erikseen. Kun käytetään säkitettyä tuhkaa, tuhkalannoitevarasto voidaan sijoittaa vapaammin ja varastoa on mahdollista jakaa pienemmissä erissä tarpeen mukaan.

Tuhkalannoitus voidaan toteuttaa joko lento- tai maalevityksenä. Maalevitys tehdään tavallisesti metsätraktorilla tai maatalouskalustolla. Maalevitystä varten metsän pohjan pitää olla riittävän kantavaa, joten suometsissä lannoitus suoritetaan talviaikaan, kun maa on jäässä. Tuhkan maalevityksessä myös metsänhoitotoimenpiteiden ajoitus on tärkeää



Helikopterilla tuhkan levitys voidaan toteuttaa ympäri vuoden myös kohteille, joita ei ole vielä harvennettu. (Kuva: Noora Huotari / Metla, FA Forest Oy:n tuhkalannoitusnäytös).

(Isännäinen ym. 2006). Ensin tulee suorittaa harvennushakkuu, jonka yhteydessä hakataan myös ajourat levityskalustoa varten. Hakkuun jälkeen tehdään tuhkalannoitus ja lopuksi kunnostusojitus.

Helikopterilla suoritettavaa levitystä ei ole sidottu mihinkään vuodenaikaan tai tiettyyn metsänkäsittelyvaiheeseen (Väätäinen ym. 2000), joten se voidaan toteuttaa ympäri vuoden myös kohteille, joita ei ole vielä harvennettu. Lentolevitys on hyvä vaihtoehto mm. kivisissä tai soiden ja vesistöjen rikkomissa maastoissa. Lentolevitys on tehokkaampaa, mutta kustannuksiltaan maalevitystä kalliimpaa (Korpilahti 2004, Väätäinen ym. 2011). Kustannusten pienentämiseksi

olisi hyvä muodostaa mahdollisimman suuria lannoituskeskittymiä tai ketjuttaa levityskohteet siten, että päästään mahdollisimman suuriin levityseriin. Helikopterilevityksenä lannoitettavan alueen tulisikin olla yhteensä vähintään 30–40 ha (Väätäinen ym. 2011). Lentolevitys edellyttää aina rakeistetun tuhkan käyttöä. Jos alueella on vesistöjä, tulee huomioida suojavyöhykkeet. Levityssuunnitelma tulisi laatia siten, etteivät helikopterin siirtymämatkat olisi kovin pitkiä (Makkonen 2008, Väätäinen ym. 2011). Suositeltava lentomatka tuhkan varastopaikalta lannoituskuviolle on enintään 2 km.

8.3 Kirjallisuutta

- Aro L (2008) Suopohjat metsätaloudessa. Teoksessa: Korhonen R, Korpela L & Sarkkola S (toim.) Suomi – Suomaa. Soiden ja turpeen tutkimus sekä kestävä käyttö. Maahenki Oy, Suoseura ry. Sivut 207–211.
- Eriksson HM (1998) Short-term effects of granulated wood ash on forest soil chemistry in SW and NE Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Suppl. 2: 43–55.
- Heikurainen L (1986) Suo-opas. 4. uudistettu painos. Kirjayhtymä, Helsinki, 51 s.
- Huikari O (1952) Suotyypin määrittäminen maa- ja metsätaloudellista käyttöä silmälläpitäen. *Silva Fennica* 75: 1–22.
- Huotari N, Tillman-Sutela E, Kauppi A. & Kubin E (2007) Fertilization ensures rapid formation of ground vegetation on cut-away peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 874–883.
- Huotari N, Tillman-Sutela E, Pasanen J & Kubin E (2008) Ash-fertilization improves germination and early establishment of birch (*Betula pubescens* Ehrh.) seedlings on a cut-away peatland. *Forest Ecology and Management* 255: 2870–2875.
- Huotari N, Tillman-Sutela E & Kubin E (2009) Ground vegetation exceeds tree seedlings in early biomass production and carbon stock on an ash-fertilized cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* 33(9): 1108–1115.

- Hytönen J (2008) Suopeltojen metsitys. Teoksessa: Korhonen R, Korpela L & Sarkkola S (toim.) Suomi – Suomaa. Soiden ja turpeen tutkimus sekä kestävä käyttö. Maahenki Oy, Suoseura ry. Sivut 212–216.
- Hytönen J & Aro L (2005) Suopellot ja suopohjat puiden kasvualustoina. Teoksessa: Ahti E, Kaunisto S, Moilanen M & Murtovaara I (toim.) Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947: 167–176.
- Issakainen J & Huotari N (2007) Suopohjien metsittäminen. Moniste, 11 s. Metsäntutkimuslaitos, Muhos. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metla.fi/julkaisut/muut/suopohjien-metsittaminen/suopohjien_metsittaminen.pdf
- Isännäinen S, Järvelä E, Lindh T & Rinne S (2006) Tuhkan käyttö metsälannoitevalmisteena. Tiedote. EU Life -ohjelma, RecAsh -hanke. 16 s.
- Jacobson S, Högbom L & Ring E (2004) Effects of wood ash dose and formulation on soil chemistry at two coniferous forest sites. *Water Air and Soil Pollution* 158: 113–125.
- Korpilahti A (2004) Tuhkan kuljetus ja levitys metsään. Metsätehon raportti 173. 28 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_173.pdf
- Laine J & Vasander H (1990) Suotyypit. Kirjayhtymä, Helsinki. 80 s.
- Laine J & Vasander H (2005) Suotyypit ja niiden tunnistaminen. Metsäkustannus Oy. 110 s.
- Laine J, Vasander H, Hotanen J-P, Nousiainen H, Saarinen M & Penttilä T (2012) Suotyypit ja turvekankaat – opas kasvupaikkojen tunnistamiseen. Metsäkustannus Oy, Helsinki. 160 s.
- Maa- ja metsätalousministeriö (2011) Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Asetus nro 24/11. Helsinki, 13.9.2011. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.finlex.fi/data/normit/37638-11024fi.pdf>
- Moilanen M (2009) Metsätuhkan ravinteet takaisin metsään. Motiva, esite, 8 s. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: http://www.motiva.fi/files/3014/Metsatuhkan_ravinteet_takaisin_metsaan.pdf
- Moilanen M & Issakainen J (2003) Turvemaiden tervehdyttämislannoituskohteiden suunnittelu -kehittämishankkeen loppuraportti Metsähallitukselle. 15 s. + liitteet.
- Moilanen M, Kaunisto S & Sarjala T (2005) Puuston ravinnetilan arviointi. Teoksessa Ahti E, Kaunisto S, Moilanen M & Murtovaara I (toim.) Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947: 81–95.
- Päivänen J (2007) Suot ja suometsät – järkevä käytön perusteet. Metsäkustannus Oy. 368 s.
- Saarsalmi A & Kukkola M (2009) Tuhkalannoituksen vaikutus maaperään ja puuston kasvuun. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2009: 63–68. Saatavilla pdf-muodossa osoitteessa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff091063.pdf>
- von Post L (1922) Sveriges geologiska undersöknings torv inventering och några av dess hittills vunna resultat. *Svenska Mosskulturforeningens Tidskrift* 1: 1–27.
- Väätäinen K, Sikanen L & Asikainen A (2000) Rakeistetun puutuhkan metsäänpalautuksen logistiikka. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 116.
- Väätäinen K, Sirparanta E, Räisänen M & Tahvanainen T (2011) The costs and profitability of using granulated wood ash as a forest fertilizer in drained peatland forests. *Biomass and Bioenergy* 34: 3335–3341.
- Wang P, Olsson BA, Arvidsson H & Lundkvist H (2010) Short-term effects of nutrient compensation following whole-tree harvesting on soil and soil water chemistry in a young Norway spruce stand. *Plant and Soil* 336: 323–336.

Suomessa syntyy energiantuotannon sivutuotteena vuosittain yhteensä noin 600 000 tonnia puu-, turve- ja sekaturhua. Erilaisten tuhkien alkuainepitoisuudet vaihtelevat huomattavasti riippuen mm. käytetyistä polttoaineista. Puhdas puutuhka sisältää tyypeä lukuun ottamatta kaikki puiden kasvuunsa tarvitsemat ravinteet oikeissa suhteissa. Turvetuhkan kaliumpitoisuus on pienempi kuin puutuhkan. Ravinteiden lisäksi tuhkaan rikastuu jonkin verran myös puun ja turpeen sisältämiä raskasmetalleja, kuten kadmiumia ja arseenia. Suomessa tuhkan hyötykäyttöä lannoitteena säätelee lannoitevalmistelaki (539/2006) ja sen perusteella annetut asetukset (MMM asetus 24/11). Metsälannoitteena käytettävässä tuhassa fosforin ja kaliumin yhteispitoisuuden pitää olla vähintään 2 % ja kalsiumin vähintään 6 %. Lisäksi asetuksessa on määritelty haitallisten raskasmetallien sallitut enimmäispitoisuudet: esim. tuhkan kadmiumpitoisuus saa olla enintään 25 mg/kg.

Metsän lannoitukseen tulee käyttää rakeistettua tai itsekovetettua turhua, jotta pölyäminen olisi mahdollisimman vähäistä. Tuhkan levitys voidaan toteuttaa joko lento- tai maalevityksenä. Tuhkalannoitus sopii parhaiten runsastyyppisille ojitetuilla turvemaille, joilla puuston kasvua rajoittaa kaliumin ja fosforin niukkuus. Tällaisissa suometsissä puuston ravinnetila on säilynyt hyvänä käytetystä tuhkamäärästä riippuen noin 20–50 vuoden ajan. Tuhkalannoitus sopii hyvin myös turvetuotannosta vapautuville suopohjille, jotka halutaan metsittää tai maisemoida kasvillisuuden peittoon. Kangasmailla puiden kasvua rajoittaa typen niukkuus, joten tuhkalannoitus ei yleensä lisää puiden kasvua. Kangasmailla tuhkalannoitusta voidaan kuitenkin käyttää ravinteiden epätasapainosta tai puutoksesta aiheutuvien puiden kasvuhäiriöiden torjumiseen.

Tuhkalannoitus vähentää maan happamuutta ja lisää maan pintakerroksen kokonaisravinnevaroja pitkäaikaisesti. Pääravinteista fosfori on tuhassa kaikkein hidasliukoisin, kun taas kalium ja boori liukenevat nopeasti maaveteen. Myös maan raskasmetallipitoisuudet kohoavat tuhkalannoituksen seurauksena, mutta tuhkan emäksisyydestä johtuen ne pysyvät kuitenkin erittäin hidasliukoisessa muodossa. Tuhkalannoitus vilkastuttaa maaperän hajotustoimintaa, mikä edistää pitkällä aikavälillä maan orgaanisen aineksen hajoamista ja typen vapautumista kasvien käyttöön.

Tuhkan levitys voi vähentää aluksi kasvupaikan alkuperäisten sammalten peittävyttä. Heinät ja ruohot tavallisesti lisääntyvät ja varpukasvit puolestaan vähentyvät. Kasvupaikan lajimäärä voi jopa lisääntyä, kun uusia ja vanhoja lajeja esiintyy rinnakkain. Ennestään kasvittomilla alueilla, kuten turvetuotannosta vapautuneilla suopohjilla, tuhkalannoitus nopeuttaa kasvillisuuden muodostumista merkittävästi. Tuhkan sisältämien raskasmetallien ei ole havaittu siirtyvän kasvillisuuteen, marjoihin tai sieniin haitallisissa määrin. Sammalten pitoisuudet ovat joissakin tapauksissa kohonneet hieman tuhkan levityksen jälkeen, mutta ne eivät ole kuitenkaan poikenneet olennaisesti luonnollisista vaihtelurajoista. Marjojen ja sienten raskasmetallipitoisuudet voivat nousta tilapäises-

ti niiden pinnalle kertyvän tuhkapölyn vuoksi, joten niiden poimimista heti levitystä seuraavana kesänä tulisi välttää.

Tuhkalannoituksen ei ole havaittu lisäävän kadmiumin kertymistä erilaisten hyönteisten, jyrsijöiden tai kalojen elimistöön eikä linnunmuniin. Jos tuhkaa ei joudu lannoituksen yhteydessä suoraan ojiin, ravinteiden ja raskasmetallien huuhtoutuminen tuhkalannoituiltualueilta vesistöihin on ollut hyvin vähäistä. Pitkän aikavälin riskien minimoimiseksi on kuitenkin tärkeää, että metsälannoituksessa käytettävälle tuhkalalle on määritetty selkeät raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot.

