

Juuma • Kauhanen • Kontas • Korhonen • Lehtoväre • Leskelä • Liisanantti •
Luiro • Mikkola • Nurmela • H. Ohtamaa • S. Ohtamaa • Ojamaa • Palola •
Snäkin • Soppela • Vähärautio

B

Tuhkat kiertotaloudessa

Tutkimusraportti tuhkan tuottajille ja käyttäjille



LAPIN AMKIN JULKAISUJA

Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 27/2020

Tuhkat kiertotaloudessa

Tuhkat kiertotaloudessa

Tutkimusraportti tuhkan tuottajille ja käyttäjille

Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 27/2020

© Lapin ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-316-382-9 (pdf)
ISSN 2489-2637 (verkkajulkaisu)

Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset
27/2020

Kirjoittajat: Lapin ammattikorkeakoulun
YAMK-koulutuksen Luonnonvarojen älykäs
johtaminen -vuosikurssin 2019-2020 opiskelijat:
Harri Juuma, Suvi Kauhanen, Kirsi-Maria Kontas,
Mikko Korhonen, Jari Lehtoväre, Katri Leskelä,
Hanna Liisanantti, Satu Luiri, Juha Mikkola,
Tuula Nurmela, Heikki Ohtamaa,
Sinikka Ohtamaa, Mikko Ojamaa, Jenni Palola,
Jyrki Vähärautio sekä Juha-Pekka Snäkin,
erityisasiantuntija, Tulevaisuuden biotalous
-osaamisryhmä, Lapin AMK & Jussi Soppela,
yliopettaja Tulevaisuuden biotalous -
osaamisryhmä, Lapin AMK

Taitto: Arto Huhta, Videcam Oy
Kansikuva: Maaseudun Tulevaisuus /
Kari Lindholm

Lapin ammattikorkeakoulu
Jokiväylä 11 C
96300 Rovaniemi

Puh. 020 798 6000
www.lapinamk.fi/julkaisut

Lapin korkeakoulukonserni



Lapin korkeakoulukonserni LUC
on yliopiston ja ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä.
Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto ja Lapin ammattikorkeakoulu.
www.luc.fi



Tämä teos on lisensoitu Creative Commons
Nimeä 4.0 Kansainvälinen -käyttöluvalla.

Sisällys

1. JOHDANTO	9
2. TUHKAN ASEMA KIERTOTALOUDESSA	13
Arvoverkosto	14
3. POLTTOAINEET, POLTTOTEKNIIKAT JA TUHKAN HAITTA-AINEET	15
3.1 Polttoaineet	15
Puu ja turve	15
Kivihiili	15
Yhdyskuntajäte	16
Jätevesiliete	17
3.2 Polttotekniikat	17
Arinapoltto	17
Leijupoltto	17
Kaasupoltto	18
Öljypolttimet	18
PAKU-tekniikka	19
3.3 Tuhkan haitta-aineet ja niiden huomioiminen jatkokäytössä	19
Lentotuhkan ja savukaasujen haitta-aineet	20
Jätteenpoltossa syntyvien tuhkien ja savukaasujen haitta-aineet	21
Tuhkien raskasmetalliliukoisuudet maarakentamisessa	22
Raskasmetallien pitoisuudet lannoitekäytössä	24
Tuhkan raskasmetallien ja haitta-aineiden kulkeutuminen kasveihin ja vesistöihin	25
4. LIIKETOIMINNAN HAASTEET	27
4.1 Kysyntä ja tarjonta	27
4.2 Yhteistyö tuottajien ja hyötykäyttäjien kesken	28
4.3 Logistiikan vaiheet ja haasteet	29
Varastointi	29
Tuhkan käsittely	30
Itsekovetus	30
Rakeistus	30
Pelletöinti	30
Kuljetus- ja levityskustannukset	31

5. TUHKIEN HYÖTYKÄYTTÖÄ OHJAAVAT JA EDISTÄVÄT TEKIJÄT	. . . . .	. 33
5.1 Ohjausjärjestelmien tavoitteet	. . . . .	. 33
REACH-asetus	. . . . .	. 33
Jätelaki 646/2011	. . . . .	. 34
Lannoitevalmistelaki 539/2006	. . . . .	. 34
Ympäristönsuojelulaki 527/2014	. . . . .	. 34
MARA-asetus 843/2017	. . . . .	. 34
Metsätalouden KEMERA-laki	. . . . .	. 35
Maataloustuet	. . . . .	. 36
6. TUHKIEN UUDET KÄYTTÖTAVAT JA MAHDOLLISUUDET	. . . . .	. 37
6.1 Kaivoskäyttö	. . . . .	. 37
Betonin rakenne ja lentotuhka	. . . . .	. 37
Lentotuhkan käyttö rikastushiekka-altaissa	. . . . .	. 38
Lentotuhkan bioliuotus	. . . . .	. 40
6.2 Tuhkien lannoituskäyttö kivennäismailla ravinneerästettynä	. . . . .	. 42
6.3 Tuhkalannoitus kunnostusojituskohteilla	. . . . .	. 44
Kunnostusojitus ja tuhkalannoitus turvemaidella	. . . . .	. 44
6.4 Tuhkan käyttö happamilla sulfaattimaidella	. . . . .	. 47
Tuhkan käyttö maanmuokkauksessa sekä kunnostusojituksessa	. . . . .	. 47
6.5 Tuhkan käyttö maataloudessa	. . . . .	. 48
6.6 Tuhkan uudet käyttökohteet maanrakentamisessa	. . . . .	. 49
6.7 Tuhkalannoitus hiilensidonnain näkökulmasta	. . . . .	. 50
6.8 Tuhkan käyttö turvesoiden pohjien ja vastaavien alueiden metsittämisessä	. . . . .	. 52
7. KYSELY TUHKAN TUOTTAJILLE	. . . . .	. 55
8. KYSELYN TULOKSET	. . . . .	. 57
9. POHDINTA	. . . . .	. 59
LÄHTEET	. . . . .	. 65
LIITTEET	. . . . .	. 73
Liite 1. Kysely tuhkan tuottajille	. . . . .	. 73

1. Johdanto

EU:n tavoitteena on kehittää kiertotaloutta ja tuhkalla on siinä oma roolinsa. Suomessa tuhkaa syntyy lämpö- ja voimalaitoksilta bio- ja fossiilisia polttoaineita poltettaessa. Tuhkaa hyödynnetään metsätaloudessa, maarakentamisessa, kaivosteollisuudessa ja maataloudessa. Pohjois-Suomessa osa alueellisista toimijoista hyödyntää tuhkaa, mutta yhteistyötä on vähän ja koko alueen kattavat tiedot syntyvistä tuhkamääristä sekä hyödyntämismahdollisuuksista ovat puutteellista.

Puun käyttö energiantuotantoon Suomessa on lisääntymässä, samalla kun turpeen käyttöä lämmöntuotantoon vähennetään, jotta tavoiteltava hiilineutraalisuustavoite vuoteen 2035 mennessä voidaan saavuttaa (Hallitusohjelma 2019). Ympäristöministeriön kiertotalousohjelman ohjausryhmä hyväksyi kiertotalouden strategisen suunnittelun ohjelmatyön kesällä 2020. Ohjelman tavoitteena on tukea hiilineutraalisuustavoitetta laajamittaisen ja taloudellisesti kannattavan kiertotalousyhteiskunnan avulla.

Energiateollisuudessa syntyy noin 1,5 miljoonaa tonnia tuhkaa vuosittain, josta suuri osa läjitetään kaatopaikoille jätteenä. Syynä tähän on tuhkan laadun vaihtelu, jolloin käyttökelpoinen tuhka helposti sekoittuu haitta-aineiden raja-arvot ylittävään materiaaliin ja ongelmatuhkan kokonaismäärä kasvaa. Lisäksi tuhkan hyötykäytön puutteellinen osaaminen ja/tai kustannuskysymykset vaikeuttavat sen kiertotalousperiaatteen mukaista hyödyntämistä. Kaatopaikoille kertyvästä tuhkasta voisi paremmalla suunnittelulla ja toimijoiden yhteistyöllä tuottaa jätteen sijasta myyntikelpoista tuotetta esimerkiksi turvemaiden lannoitukseen tai maarakentamiseen.

Turpeen polton vähentyminen muuttaa monia energiatuotannon käytänteitä tulevien vuosien aikana ja turvetuotantoa tullaan ajamaan alas sitä mukaa, kun käytössä olevat turvesuot ajan myötä ehtyvät ja poistuvat käytöstä. Samalla poltosta syntyvä tuhkan laatu muuttuu parempaan suuntaan haitallisten aineiden pitoisuuksien laskiessa polttoaineen muutoksen ja polttotekniikan kehittymisen myötä, kun opitaan huomiomaan paremmin erilaisten tuhkalaatujen muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Tuhkan käyttöä säätelevä lainsäädäntö pyrkii ohjaamaan tuhkatuotantoa hyötykäytön lisäämisen suuntaan verotuksella ja toisaalta myyntikelpoisen tuhkan lannoituskäyttöä tukemalla. Ohjausjärjestelmillä rajataan käyttöä tarkasti ja vaikka tuhka luokitellaan jätteeksi, voidaan sitä käyttää maarakentamisessa metsäteiden ja varastokenttien pohjina tai kaivoksilla täyttöaineena tietyn rajoituksen. Metsätien rakentamisessa tuhkan käytöstä on saatu hyviä kokemuksia, vaikka toistaiseksi käyttö tähän

tarkoitukseen on ollut vähäistä mm. pitkien kuljetusmatkojen vuoksi. Laajeneva kaivostoiminta Lapissa voisi olla hyvä mahdollisuus lisätä tuhkan hyödyntämistä maarakentamisessa.

Metsänlannoitukseen soveltuvan tuhkan käytön haasteena on sen sisältämien raskasmetalli- ja rikkipitoisuuksien jääminen alle lainsäädännössä ilmoitettujen raja-arvojen ja kasveille tarpeellisten ravintoaineiden koostumus. Tuhka ei sisällä typpeä, joka on keskeinen kasvuun vaikuttava pääravinne, mutta toisaalta se voi sisältää monia hivenravinteita, joista on turvemaidella puutetta. Lisäksi kasvunlisäykseen tarvittavat levitysmäärät ovat suuria ja sellaisenaan tuhka on pölyävää, mikä on aiheuttanut ongelmia sen lannoituskäytössä.

Suomessa on kuitenkin tehty tuhkan lannoitustutkimusta jo 1930-luvulta alkaen ja sen pohjalta on kehitetty lannoitussuosituksia, rakeistusta, ravinteiden lisäystä ja levitystekniikkaa siten, että nykyisin levitys voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti suunnitellen turvemaakohteisiin kesällä ja talvella. Hiilipäästöjen vähentämiseksi ja hiilinielujen lisäämiseksi turvemaiden kunnostusohjelmia pyritään vähentämään lisäämällä niiden lannoituksia, jolloin syntyvällä kasvun lisäyksellä voidaan vaikuttaa pohjaveden pinnan korkeutta laskevasti. Lisäksi tuhkan positiivisena puolena voidaan pitää sen soveltuvuutta ravinnehäiriöistä kärsiviin kohteisiin sekä pitkää kasvunlisäyksen vaikutusaikaa, mikä kannattaa muistaa vertailtaessa tuhkalannoituksen ja keinolannoituksen kustannuksia.

Tuhkaa syntyy pääasiassa kuntien lämpölaitoksissa ja teollisuuden energiantuotannon polttoprosesseissa. Kotimaisen uusiutuvan polttoaineen käytön lisääntyessä puun ja muun materiaalin poltosta syntyvää tuhkaa kertyy alueellisesti vaihtelevasti niin määrällisesti kuin laadullisestikin. Puun käytön arvoketjussa tuhka on mahdollista muuttaa jätteestä myyntikelpoiseksi tuotteeksi yhä laajemmin, mutta hyötykäyttötoimijoilla on vaikeata saada tietoa todellisesta tuhkien määrästä kunnittain, koska kaikilla toimijoilla ei ole lakisääteistä ilmoitusvelvollisuutta tuottamastaan tuhkamäärästä. Lisäksi on haasteellista saada kattavaa kuvaa tuhkan laadusta alueittain esimerkiksi metsänlannoitus- tai maanrakennuskäyttöä suunniteltaessa.

Kiertotalouden kehittymisen ja eri ohjaustoimenpiteiden myötä tuhkan hyötykäyttöä tullaan tehostamaan ja kaatopaikoille loppusijoitukseen menevän tuotteen määrää minimoimaan. Tämä on tärkeätä huomioida tuhkan käyttöön liittyvän kiertotalouden kehittämisessä kohti suomalaista kiertotalousyhteiskuntaa vuonna 2035.

Tämän tuhkan käytöstä kertovan raportin lähtökohtana on ollut koota samoihin kansiin kattavasti tuhkan käyttöön liittyvää ajankohtaista tietoa alan uusille ja vakiintuneille toimijoille helpottamaan käytännön toiminnan suunnittelua sekä uusien käyttömahdollisuuksien arviointia. Raportin tuottivat luonnonvara-alan ylemmän korkeakoulututkimuksen opiskelijat Lapin ammattikorkeakoulusta. Tavoitteena oli kartoittaa alueellinen tilanne tuhkan tuotannon osalta, tuottaa tietoa eri toimijoille, sekä esitellä tuhkan hyötykäytön haasteet ja tulevaisuuden mahdollisuudet. Sisältö soveltuu myös koulutustarkoituksiin pyrkien vastaamaan niihin tietotarpeisiin, joita tuhkan tuottamisen ja hyötykäytön suunnittelu edellyttää.

Raporttiin pohjaksi toteutettiin kysely, jossa kartoitettiin Pohjois-Suomen (Lappi, Pohjois-Pohjanmaa ja Kainuu) tuhkan tuottajat, syntyvät tuhkamäärät ja niiden nykyiset käyttökohteet. Tuloksien mukaan mahdollisuuksia ja halukkuutta tuhkan hyötykäytön lisäämiselle on olemassa. Kyselyn vastausprosentti jäi kuitenkin alhaiseksi, joten tutkimusta tarvitaan lisää. Tuhkan hyötykäyttöä voidaan edistää keräämällä hajallaan olevaa tietoa yhteen, purkamalla byrokratiaa ja kehittämällä liiketoimintaa, jonka avulla tuhkan tuottajat ja sen hyödyntäjät pystyvät löytämään toisensa paremmin.

2. Tuhkan asema kiertotaloudessa

Kiertotalouden ajatus pohjautuu teollisen ekologian ja ekologisen taloustieteen tutkimukseen, jossa talous- ja tuotantojärjestelmiä voidaan tarkastella luonnon kiertojen näkökulmasta. Luonnon ekosysteemeissä aineet kiertävät ja energia kulkee kierroissa mukana, eikä jätettä - siinä mielessä kuin se ymmärretään ongelmana - synny ollenkaan.

Tuotantojärjestelmiä tarkasteltaessa kiertotalous voidaan määritellä muodostuvan erilaisista resurssien eliniän pidentämisen strategioista. Näiden käytännön sovelluksia ovat esimerkiksi kierrätys, uudelleenkäyttö, tuotteen hankkiminen palveluna ja uusiutuvan energian käyttö. Yritysten tuottamia sivuvirtoja ja hukkaenergiaa voidaan tehokkaasti hyödyntää etenkin teollisuus- ja yrityspuistoissa, joissa toistensa läheisyydessä olevat toimijat pystyvät tehokkaaseen yhteistyöhön. Ideaalitapauksessa saavutetaan win-win-win- tilanne eli yhteistoiminnalla saadaan taloudellisia, ympäristöön liittyviä ja sosiaalisia hyötyjä kestäväen kehityksen periaatteiden mukaisesti.

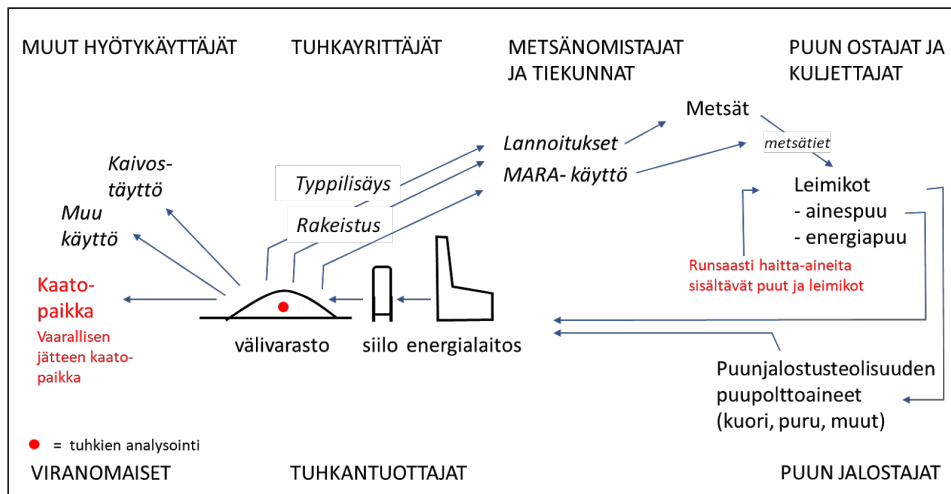
Yhteistoiminta edellyttää sitä, että kaikki toimijat tietävät riittävästi toistensa tuotannosta ja tarpeista aina raaka-aine lähteistä loppukäyttöön saakka. Tähän tavoitteeseen pyritään tuotanto- ja kulutusjärjestelmien muodostamien arvoketjujen digitalisaatiolla, jota kuvastaa Saksasta lähtöisin oleva Teollisuus 4.0- ajattelumalli. Sitä on kuvattu myös teollisen vallankumouksen kolmanneksi aalloksi.

Kiertotaloudessa materiaali- ja energiaressurssien tehokas käyttö tuo yrityksille kilpailuetuja. Edut syntyvät arverkostoissa, jotka muodostuvat resurssien hankinnasta, tuotannosta, uudelleenkäytöstä, kierrätyksestä ja näihin liittyvästä logistiikasta. Muutos kiertotalouteen edellyttää siten yhteistyötä sektori- ja toimialarajojen yli. Yleensä niiden rajapinnoista löytyvät kiinnostavimmat mahdollisuudet uusiin toimintatapoihin, liiketoimintamahdollisuuksiin, digitalisaation hyödyntämiseen sekä materiaalien kierron pidentämiseen.

Kiertotalouden ympäristönäkökulmista etenkin Euroopan Unioni on korostanut ilmastonmuutoksen hillintään liittyen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen tärkeyttä. EU on myös ottanut tavoitteekseen lisätä jäsenmaiden kierrätystavoitteita, antamalla hiljalleen kiristyviä tavoitteita kierrätyksen asteesta. Suomessa Sitra on laatinut tiekartan kiertotalouteen edistämiseksi.

Arvoverkosto

Energialaitosten tuhkat liittyvät lannoituksen kautta puuntuottamisen ja puuvirtojen arvoverkostoihin. Nämä puolestaan kytkeytyvät metsä- ja energiatalouden väyliin ja varastoihin, joissa tuhkia voitaisiin myös hyödyntää. (Kuvio 1) Koska Lapin maakunnan alempi tieverkosto on huonossa kunnossa ja suunnitteilla on suuria metsäteollisuuden investointeja, tarvitaan tietoja myös puuvirtojen ja niiden muutosten aiheuttamasta kuormituksesta tieverkostolle. Tämä tieto voitaisiin ohjata tiekuntien, tienpitäjien ja tienkäyttäjien käyttöön, jotta he voivat paremmin ennakoida tulevia kunnossapitotarpeita puunhankinnan näkökulmasta ja tuhkan mahdollisesta roolista siinä.



Kuvio 1 Esimerkkikaavio tuhkan arvoverkosta Juha-Pekka Snäkinin (2020) mukaan

3. Polttoaineet, polttotekniikat ja tuhkan haitta-aineet

3.1 POLTTOAINEET

Suurin osa Suomessa tuotetusta tuhkasta syntyy energiateollisuudessa. Suomessa energiantuotannon polttoaineina yleisemmin käytetään puupohjaisia ja fossiilisia polttoaineita, turvetta sekä yhdyskuntajätettä. Tuhkaa syntyy noin 1,5 milj. tonnia vuosittain. Osa tuhkasta jää hyödyntämättä vaihtelevan laadun takia, mutta myös sen tunnistamattomien ja tutkimattomien ominaisuuksien takia. (Joensuu 2019.) Polttoprosesseissa syntyy lento- ja pohjatuhkia, rikinpoistotuotteita sekä leijupetihiekkaa.

Puu ja turve

Puun ja turpeen poltosta syntyy niin sanottua biotuhkaa ja se on suurin tuhka- ja turpeen poltossa muodostuu enemmän lentotuhkaa kuin pohjatuhkaa. Seospoltossa syntyvä tuhka on usein kivihiilen lentotuhkaa karkeampaa ja raekooltaan tuhkat muistuttavat silttiä tai hienoa hiekkaa. Seoksen kemiallinen koostumus vaihtelee paljon riippuen voimalaitoksissa käytetystä polttoaineesta, -prosessista, -lämpötilasta ja savukaasujen puhdistustekniikasta. Puhtaiden turve- ja puutuhkien tärkeimpiä ravinteita on fosfori (P), kalium (K), kalsium (Ca) ja boori (B). Biotuhkaa hyödynnetään yleensä suometsälannoitteena, johon se soveltuu hyvin oikeiden ravinnearvojen vuoksi. Polttoprosessissa puun ja turpeen sekä muiden poltettavien biomassojen sisältämät raskasmetallit päätyvät osittain tuhkiin, joka rajoittaa tuhkan lannoitekäyttöä. (Välikangas 2017.) Aihetta käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3, *Tuhkan haitta-aineet ja niiden huomioiminen jatkokäytössä*.

Kivihiili

Kivihiilen poltosta syntyvästä tuhkasta 80 – 100 % on lentotuhkaa, joka pääosin sisältää piitä, alumiinia ja raudan oksideja. Lentotuhka on kevyttä ja eristää lämpöä jonkin verran enemmän kuin luonnon kivimateriaalit. Kivihiilen lentotuhkan ominaisuuksia ovat kalkin kanssa reaktioitumisesta johtuva lujittuminen, kapillaarisuus, huono

vedenläpäisevyys sekä kokoonpuristuvuus. Kun lentotuhkaan lisätään vettä ja tiivistetään, lentotuhka lujittuu. Tiivistyneenä ja lujittuneena lentotuhka ei myöskään roudi. Kivihiihen pohjatuhka on lentotuhkaa hieman karkeampaa ja ominaisuuksiltaan vastaa enemmän luonnon hiekkaa ja soraa. (Välikangas 2017.) Öljyn poltossa syntyy kattila- ja lentotuhkaa. Raskaan polttoöljyn öljytuhkia pidetään vaarallisena jätteenä ja ne tulee toimittaa aina asianmukaiselle vastaanottajalle hävitettäväksi. (Energiateollisuus 2015, 5, 8.)

Yhdyskuntajäte

Suomessa poltetaan enemmän jätettä kuin valtakunnallisen jätesuunnitelman tavoite olisi. Sen sijaan jätteen kierrätystavoitteisiin on Suomessa vielä rutkasti matkaa. (Energiateollisuus 2015, 3, 15.) Jätteenpolttolaitoksen polttoprosessissa syntyviä kiinteitä jätteitä ovat polttoprosessin ensimmäisessä vaiheessa syntyvä pohjakuona ja -tuhka, savukaasuista syklonein ja/tai suotimien avulla erotettava lentotuhka ja kaasujen puhdistuksen jäte (air pollution control residue, APC) ja näiden seokset (Kaartinen, Laine-Ylijoki & Wahlström 2007, 14). Useissa yhteyksissä APC-jätteillä tarkoitetaan kuitenkin kaikkia niitä kiinteitä jätteitä, joita muodostuu lämmön talteenottosysteemissä (kattila/economiser) tai sen jälkeen. Näitä ovat lentotuhka, kattilatuhka, kalkkiylimäärä, kaasunpuhdistuksen reaktiotuotteet, pesuriliuosten käsittelylietteet ja kipsi (Kaartinen ym. 2007, 16). Energiaa talteen ottavassa kattilassa muodostuu lisäksi pienehköjä määriä kattilatuhkaa (Kaartinen ym. 2007, 14). Jätteenpolton savukaasujen puhdistuksessa syntyvät APC-jäte ja hienojakoinen lentotuhka sisältävät runsaasti haitta-aineita. Korkeiden haitta-ainepitoisuuksien takia ne luokitellaan yleensä vaaralliseksi jätteeksi. Yhdyskuntajätteenpolton pohjatuhkia voidaan hyödyntää ympäristöluvan varaisesti maarakentamisessa. Jätteenpolton tuhkista voidaan erottaa metalleja, jonka jälkeen niiden hyödyntäminen on helpompaa. Uudessa MARA-luonnoksessa jätteenpolton pohjakuona on mukana, joten mahdollisesti jätteenpolton pohjakuonaa tullaan tulevaisuudessa käyttämään vielä enemmän maarakentamisessa. (Välikangas 2017.) Tulevaisuudessa bioliuotus ja vaahdotus mahdollistavat kuparin, alumiinin, sinkin ja muiden metallien erotuksen (Kaartinen ym. 2010).

Pohjakuona ja -tuhka kerätään polttoprosessin ensimmäisessä vaiheessa, ja sitä muodostuu noin 20-30 % poltettavan jätteen määrästä. Pohjatuhkan sisältämien aineiden suhteellinen osuus riippuu polttolaitokseen syötettävän jätteen koostumuksesta, aineiden haihtuvuudesta sekä polttokattilan tyypistä ja toiminnasta ja käytettävistä kemikaaleista. Pohjatuhkan koostumuksesta 15-45 % on palamatonta materiaalia kuten lasia, maamineraaleja (esim. kvartsia), metallia ja orgaanista ainesta. Sulamistuotteita on 55-85 %, ja ne ovat pääosin lasia, silikaattimineraaleja ja oksidimineraaleja (esimerkiksi rautaa ja kalkkia). Kaatopaikkakelpoisuuden kannalta kriittisiä aineita saattavat olla lyijy, kupari, antimoni, kloridi, fluoridi ja liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuus (Kaartinen ym. 2007, 15). Arinalta erotettava pohjakuona on karkearakeista ja kivimäistä ainetta, joka koostuu pääosin piin, alumiinin, raudan ja kalsiumin oksideista sekä alkalisista maa- ja maa-alkalimetalleista. Kuonassa voi myös olla raskasmetalleja, klooria ja sulfaatteja, mutta metallien liukoisuus on yleensä

vähäistä. Kuonan ominaisuuksia ja hyödynnettävyyttä voidaan parantaa mm. ikäännyttämällä sekä erottelemalla hyödynnettävät ja hyötykäyttöä rajoittavat materiaalit kuonasta esim. seulomalla. Muutaman kuukauden varastoinnilla on suotuisa vaikutus kuonan kemialliseen stabiilisuuteen. Kuonan määrä jätteenpoltossa on tyypillisesti noin 25 % jätteen massasta, mutta vaihtelee 10-30 % välillä. Kuonasta voidaan erottaa 5-10 % magneettisia ja 3-8 % ei-magneettisia metalleja kierrätykseen. Poltossa muodostuvat lentotuhka ja savukaasujen puhdistuksen reaktiotuotteet ovat tyypillisesti ominaisuuksiensa perusteella vaarallisia jätteitä mm. korkeiden kloridi- ja raskasmetallipitoisuuksien vuoksi. Tuhkat voidaan tarvittaessa käsitellä haittompampaan muotoon esim. stabiloimalla ne ennen loppusijoitusta Loppusijoitus tehdään usein vaarallisen jätteen kaatopaikalle. (Energiateollisuus 2015, 9.)

Jätevesiliete

Valtaosa jätevesilietteistä käsitellään Suomessa mädättämällä ja/tai kompostoimalla. Ravinteiden kierrätystä pyritään jatkuvasti lisäämään. Nykyisin etsitään jätevesilietteen hävittämiseen parempia käsittelyvaihtoehtoja. Yksi ongelma jätevesilietteen jatkohyödyntämiselle on noussut jätevedessä olevat orgaaniset haitta-aineet, lääkeaineet sekä mikromuovit, mutta nämä saadaan poistettua käsittelemällä jätevesiliete termisesti, jonka yhteydessä syntyy tuhkaa. (Suomen vesilaitosyhdistys 2017.)

3.2 POLTTOTEKNIIKAT

Puun- ja turpeen polttolaitoksissa käytettävät tekniikat voidaan ryhmitellä eri tyypeihin: arinapoltto, leijupoltto ja kaasupoltto. Lisäksi polttolaitoksissa on käytössä raskaan- ja kevyen polttoöljyn polttamisen mahdollistavaa tekniikkaa.

Arinapoltto

Arinoiden ja niihin liittyvien tulipesien rakenteet vaihtelevat johtuen kattilan kokoluokasta ja käytettävästä polttoaineesta. Päälaajittelu puupolttoaineille ja palaturpeelle voisi olla: kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina, mekaaninen viistoarina ja mekaaninen tasoarina. (Energiateollisuus 2012, 16.)

Arinat ovat usein edellä mainittujen päätyyppien yhdistelmiä ja eroavat käytettyjen materiaalien sekä arinan jäähdytystapojen osalta. Polttoaine syötetään arinalle kokosen leveydeltä tasaisena patjana. Palamisen hallitsemisen kannalta on erittäin tärkeää, että kerros on tasainen. Tuhkat valuvat tulipesän päästä arinan loppuessa tuhkarinnan kautta vedellä täytettyyn tuhkalaatikkoon, josta ne kulkeutuvat tuhkakonttiin. Savukaasujen mukana leijaileva lentotuhka erotetaan syklonissa, josta se päätyy tuhkalaatikon kautta tuhkakonttiin. (Energiateollisuus 2012, 16.)

Leijupoltto

Leijupoltto on yleisin polttotapa. Leijupolttokattilaa käytetään kiinteän polttoaineen polttamiseen. Leijupolttokattilassa palaminen tapahtuu pedissä, jota leijutetaan ilmassa sen alapuolelta puhallettavan ilman avulla. Peti koostuu petimateriaalista,

joka on useimmiten hiekkaa, käytettävästä polttoaineesta sekä palamisessa syntyvistä savukaasuista. (Blomberg 2005, 46.)

Leijukattilat voidaan jakaa pedin tyyppiin mukaisesti neljään eri alatyyppiin, kiinteään petiin, kuplivaan petiin, turbulenttipetiin ja kiertopetiin. Leijupedin käyttäytymisen perusteella kattilat jaetaan kerrosleijukattiloihin ja kiertoleijukattiloihin. Kerrosleijukattilassa hiukkaset ja petimateriaali pysyvät leijukerroksessa, kun kiertoleijukattilassa ne kulkeutuvat leijukaasun mukana pois leijutustilasta ja ne on polton jatkuvuuden aikaansaamiseksi palautettava takaisin erillisillä sykloni- ja palautusputkilaitteistoilla. (Blomberg 2005, 47.)

Leijupetipolton tyyppillinen piirre on hyvä kaasujen ja kiinteän aineen sekoittuminen ja pedin suuri lämpökapasiteetti. Nämä ominaisuudet mahdollistavat myös huonolaatuisen, matalalämpöarvoisen ja kostean polttoaineen polttamisen hyvällä palamishyötysuhteella. Näiden lisäksi kattilassa on mahdollista käyttää hyvin erilaisia polttoaineita, joiden laatu vaihtelut voivat olla nopeita ja suuria. (Blomberg 2005, 47.)

Kerrosleijukattiloissa polttoaine syötetään tulipesään leijupedin yläpuolelle ja kiertoleijukattiloissa polttoaine syötetään sulkusyöttimen kautta syklonin palautuskanavaan. Palamisen mahdollistava primääri-ilma puhalletaan kattilan alaosaan ja samalla muodostetaan leijupeti. Leijukattiloiden pohjatuhka poistetaan arinan alta sulkuventtiilien kautta tuhkansammuttimelle, tuhkansammuttimen jälkeen se seulotaan ja hienojakoinen aines palautetaan takaisin tulipesään. Lentotuhka erotetaan savukaasuista syklonien avulla. (Blomberg 2005, 48-49.)

Kaasupoltto

Kaasutus on ali-ilmaista polttamista sellaisissa olosuhteissa, joissa polttoaine osittain palamisen ja osittain muiden reaktioiden tuloksena hajoaa kaasuyhdisteiksi. Kaasutuksen ilmakerroin on tyyppillisesti 0,3-0,5 ja lämpötila 500-1000 °C. Näissä olosuhteissa syntyy kaasutuskaasua, joka sisältää palavina ainesosina häkää, vetyä, metaania ja muita hiilivetyjä ja lisäksi typpeä ja hiilidioksidia. Ainesosien määrät riippuvat kaasutettavasta polttoaineesta ja käytettävästä prosessista. (Jalovaara, Aho, Hietämäki & Hyytiä 2003, 40.)

Pienissä polttolaitoksissa kaasutus perustuu kiinteäkerroskaasutukseen, joka voidaan toteuttaa vasta- tai myötavirtaperiaatteella. Vastavirtakaasutin on näistä teknisesti yksinkertaisempi. Tuotekaasut johdetaan kaasukattilaan poltettaviksi. Kaasutuspoltto asettaa tiettyjä vaatimuksia polttoaineen laadulle. Puuhakkeen ja palaturpeen laadun tulee olla tasaista, tuhkan sulamislämpötilan yli 900 °C ja kosteuden tulee olla alle 50 %. (Energiateollisuus 2012, 18.)

Öljypolttimet

Öljypolttimella tulee aikaansaada mahdollisimman stabiili ja tehokkaasti palava liekki, joka mahtuu käytettävissä olevaan tulipesään. Öljypolttimen tärkeimmät tehtävät ovat: öljyn hajotus riittävän pieniksi pisaroiksi ja sen kaasuttaminen, syttymisen varmistaminen, öljypisaroiden tai öljykaasujen ja palamisilman tehokas sekoittuminen. Edellä mainitut tehtävät voidaan toteuttaa erilaisilla polttimilla. Öljypolttimet

jaetaan tavallisesti kahteen ryhmään sen mukaan, miten öljy saatetaan palamisen edellyttämään muotoon. Nämä tyypit ovat hajoituspolttimet ja höyrystyspolttimet. (Jalovaara ym. 2003, 45.)

Hajoituspolttimet ovat tavallisia kattiloissa käytettäviä polttimia. Tällaisia ovat muun muassa pyörivä kuppiset polttimet ja öljynpainehajoitteiset polttimet. Hyvän palamisen edellytyksenä on tehokas öljyn hajoitus ja hallittu palamisilman tuonti. Höyrypolttimissa öljy muutetaan ensin kaasumaiseksi, minkä jälkeen kaasut poltetaan polttokammiossa. Höyrystyspolttimet soveluvat erilaisiin teollisuusuneihin, mutta höyrykattiloissa niiden käyttö on erittäin harvinaista. (Jalovaara ym. 2003, 46.)

PAKU-tekniikka

Erityisesti yhdyskuntajätteen poltossa käytetään arina- ja leijupetipolton lisäksi Suomessa kehitettyä tekniikkaa. Tekniikka poikkeaa selvästi muista lietteenpoltossa käytettävistä tekniikoista. Prosessissa poltto ja kuivaus on yhdistetty ns. kiertomassa-tekniikalla, jossa lietteen sekaan sekoitetaan kuivauksessa hiekkaa. Liete kuivataan yli 95 % kuiva-ainepitoisuuteen. Hiekka ja liete syötetään seoksena polttoyksikköön. Polttoyksiköstä hiekka palautetaan kuivuriin, ja savukaasut johdetaan lämmönvaihtimen kautta savukaasujen käsittelyyn. Prosessissa muodostuu kahdenlaista lentotuhkaa. Syklonilla ensivaiheessa erotettua tuhkua suunnitellaan hyödynnettävän lannoitekäytössä. Tämän ns. tuotetuhkan osuus on noin 90 % kokonaistuhkamäärästä. Seuraavassa vaiheessa muodostuva sivutuotetuhka on savukaasujen käsittelyjätettä, jossa on merkittäviä määriä mm raskasmetalleja, eikä sitä voida hyödyntää lannoitteena. PAKU-prosessi on valmistajan mukaan energiaomavarainen, kun tulevan lietteen kuiva-ainepitoisuus on vähintään 20 %. (Suomen vesilaitosyhdistys 2019, 64-65.)

3.3 TUHKAN HAITTA-AINEET JA NIIDEN HUOMIOIMINEN JATKOKÄYTÖSSÄ

Lentotuhka on emäksistä. Sen pH on 11-13 ja sen sisältämä kalsium neutraloi happoa. Tuhkaa voidaan käyttää maaperän neutralointiin. (Anttila 2008, 16.) Tuhka sisältää ravinteita kasvillisuuden tarvitsemassa suhteessa (Pekkala 2012, 104-105). Vallitsevia ainesosia tuhkassa ovat kalsium, kalium ja magnesium. Näiden lisäksi tuhka sisältää myös mm. fosforia, kuparia, booria ja sinkkiä. (Anttila 2008, 16.) Tuhka ei sisällä typpeä, vaan se poistuu palamisessa (Pekkala 2012, 105). Tuhka sisältää raskasmetalleja, joiden ei haluta leviävän maaperään. Tämän takia on asetettu lentotuhkalle raja-arvot. Jos tuhkaa käytetään lannoitteena, raja-arvojen on alituttava.

Tutkimuksissa on havaittu, että polttoaineen koostumus (puu, turve, kivihiili) ja polttoprosessi (esim. polttotekniikka, polton lämpötila) vaikuttavat lentotuhkien laatuun ja täten liukoisuuksiin. Kivihiilenpolton tuhkissa haitta-aineiden liukoisuudet ovat alhaisemmalla tasolla kuin puun tai turpeen poltossa syntyvissä tuhkissa alittaen päällystetyn rakenteen liukoisuusraja-arvot. (YM 2016a, 19, 57.)

Merenheimo kirjoitti diplomityössään (2017, 16-17), että poltto-olosuhteista varsinkin lämpötila vaikuttaa raskasmetallien rikastumiseen tuhkaan. Polton aikana osa

metalleista höyrystyy ja täten poistuu savukaasun mukana. Osa höyrystyy, mutta tällöin myös tiivistyy uudestaan kiinnittyen pienempiin lentotuhkahiukkasiin. Osa taas ei höyrysty lainkaan ja jää näin lentotuhkan karkeampaan jakeeseen. Tuhkan kaliumpitoisuus voi pienentyä käytettäessä korkeampia polttolämpötiloja. Lisäksi korkeammissa lämpötiloissa tuhkan emäksisyys nousee, mikä puolestaan vaikuttaa tuhkan sisältämien aineiden liukoisuuksiin ja esimerkiksi emäksisessä tuhkassa lyijyn liukoisuus voi olla suurempaa. Tuhkan koostumukseen lämpötilan lisäksi vaikuttavat palamisnopeus, ilman syöttö ja kattilakuormitus. Molybdeeniliukoisuuden on havaittu kasvavan suurella kattilakuormituksella. Eroja on myös eri polttotekniikoissa. Leijupetipolton tuhka on tavallisesti metallipitoisempaa kuin pölypolton tuhka, mikä johtuu osittain matalammasta polttolämpötilasta. Mutta metallien liukoisuudet ovat puolestaan pienempiä kuin pölypolton tuhkissa. Esimerkiksi leijupetipoltossa polttoaineen elohopeasta 50-80 % jää muodostuvaan tuhkaan. Merkittävä vaikutus tuhkan koostumukselle on savukaasujen puhdistuksella, joista tavallisimpia menetelmiä ovat sähkösuodattimet sekä pussisuodattimet. Näillä menetelmillä voidaan saavuttaa 99 % puhdistusteho. Toisaalta, mitä tehokkaampaa savukaasujen puhdistus on, sitä enemmän metalleja kertyy tuhkaan. Esimerkiksi kadmium ja lyijy höyrystyessään kondensoituvat tuhkaan vasta suotimilla. (Merenheimo 2017, 16-17.)

Lentotuhkan ja savukaasujen haitta-aineet

Jätepoltossa syntyvät tuhkat sisältävät useita eri raskasmetalleja kuten mm. arseeni (As), barium (Ba), kadmium (Cd), koboltti (Co), kromi (Cr), kupari (Cu), molybdeeni (Mo), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), elohopea (Hg), antimoni (Sb), seleeni (Se), titaani (Ti), vanadiini (V) ja sinkki (Zn). Ympäristön ja eliöiden kannalta haitallisimmiksi raskasmetalleiksi luokitellaan yleensä arseeni, kadmium, lyijy ja elohopea. Ongelmallisoin on yleensä kadmium. Taulukossa 1 (Korpijärvi ym. 2009) esitellään erilaisten tuhkien raskasmetallipitoisuuksia. Puun ja turpeen polton tuhkat sisältävät myös haitallisia raskasmetalleja. Turvetuhkassa on kuitenkin vähemmän raskasmetalleja kuin puutuhkassa, mutta raskasmetalleista etenkin arseenia on taas turvetuhkassa enemmän kuin puutuhkassa. Kivihiilen poltossa syntyvät tuhkat sisältävät näihin verrattuna yleensä monia raskasmetalleja huomattavasti enemmän. (Ryhti 2016, 16-29.)

Taulukko 1. Erilaisten tuhkien metallipitoisuuksia (mg/kg) (Korpijärvi, ym. 2009)

	Turpeen ja puu lentotuhka	Puutuhka	Puunkuori-liete-lentotuhka
As	30-120	1,0-60	11,0-26,0
Zn	50-2200	200-2000	790-3700
Cu	60-200	50-300	52-85
Cr	43-130	40-250	50-230
Ni	30-700	20-100	38-89
Cd	0,5-5	6,0-40	3,7-14,0
Pb	150-1000	3-1100	34-72
Mo	10,5-50,0	15	
Co	10,0-50,0	3-200	
Hg	0,3-2	0,02-1	0,004-1,1
V	20-500	20-30	
Se	<10-26		
Ba	150-2200	200-1300	

Tuhkien ympäristövaikutukset liittyvät lähinnä niiden sisältämiin raskasmetalleihin, orgaanisiin aineisiin ja suoloihin sekä ennen kaikkea em. haitta-aineiden liukoisuuteen. Muita tuhkien ympäristövaikutuksia ovat mm. pölyäminen ja vedyn muodostus tuhkien sisältämän alumiinin ja veden joutuessa kosketuksiin keskenään. Kriittisiä liukoisia aineita lentotuhkassa ovat arseeni, elohopea, lyijy, kadmium ja kromi ja APC jätteissä liukenevat suolat, erityisesti kloridi (Kaartinen ym. 2007, 17).

Jätteenpoltossa syntyvien tuhkien ja savukaasujen haitta-aineet

Suomessa on yhdeksän vain jätteenpolttoon erikoistunutta polttolaitosta. Voimalat käyttävät pääpolttoaineenaan kierrätyskelvotonta jätettä (Laine-Ylijoki ym. 2018, 34). Jätettä pääpolttoaineena käyttäviä jätevoimalaitoksia on Riihimäellä (I ja II), Kotkassa, Lahdessa, Oulussa, Mustasaarella, Vantaalla, Tampereella ja Leppävirralla.

Jäteperäiset polttoaineet sisältävät perinteisten polttoa häiritsevien aineiden (alkalimetallien, kloorin) lisäksi erilaisia metalleja, jotka vaikeuttavat merkittävästi poltto-prosessin toimintaa tai hankaloittavat poltossa syntyvien tuhkien ja kuonien kaatopaikkasijoitusta tai hyötykäyttöä. Taulukossa 2 (Vainikka 2006) esitetään eräiden alkuaineiden lähteitä jätteissä ja poltossa syntyvissä tuhkissa ja kuonissa. (Kaartinen ym. 2007, 17).

Taulukko 2. Alkuaineiden lähteitä jätteissä (Vainikka 2006)

Alkuaine	Lähde ja käyttötarkoitus
Arseeni	kyllästys, (painomuste, parkitusaine, korroosioesto)
Kadmium	pigmentti, muovien (kuten PVC:n) lämpö- ja valostabilaattori
Kloori	PCV-muovi, suolat
Kromi	metalliseokset, värit (keltainen, vihreä), kyllästys, kromaus, parkitusaine
Kupari	metalli, messinki, kyllästysaine, katalyytti, pigmentti
Elohopea	katalyytti muoveissa, uretaanivaaho
Nikkeli	metalli (niklaus, metalliseokset, katalyytti, pigmentti)
Lyijy	metalli, messinki, juotostina, pigmentti, tiiviste, muovistabilaattori (PVC, polymeerikatalyytti, lyijysilikaatit)
Antimoni	metalliseokset, palonestoaine, maaliväri (keltainen/oranssi), vulkanointiaine, kyllästys/peittäysaine
Sinkki	metalli (sinkitys), messinki, kyllästys, palonesto, vulkanointi, pigmentti, öljyjen kovetin, ruosteenesto, stabilaattori

Polttoainetietojen perusteella on hyvin vaikea selvittää jätteenpolton tuhkien ja kuonien ominaisuuksia, koska ne ovat varsin heterogeenisiä, jolloin näytteenotto ja luotettavien kemiallisten analyysien tekeminen polttoaineesta on hyvin haastavaa. Lisäksi polttolaitokset ovat hyvin yksilöllisiä ja tuhkien ja kuonien ominaisuuksiin vaikuttavia prosessiparametreja on useita. Selkeä tieto käytetyn polttoaineen, prosessi-ongelmien sekä tuhkien ja kuonien ympäristöominaisuuksien väliltä puuttuu. (Kaartinen ym. 2007, 19.)

Tuhkien raskasmetalliliukoisuudet maarakentamisessa

Maarakentamisessa käytettävät tuhkat sisältävät erilaisia kemiallisia yhdisteitä, raskasmetalleja ja palamatonta hiiltä. Tuhkat sisältävät siis lannoitekäytössä hyödynnettäviä ravinteita, mutta myös ympäristölle haitallisia aineita. Tuhkan ominaisuuksia infrarakentamisessa ja muissa hyötykäyttökohteissa on tutkittu suhteellisen vähän, mutta jo tehdyissä tutkimuksissa on ongelmiksi havaittu korkeat raskasmetalliliukoisuudet ja laadunvaihtelut eri tuhkalajikkeiden välillä. (Pohjala 2015, 2.) Käytettävät tuhkat eivät saa aiheuttaa maaperän tai pohjaveden pilaantumista tai muuten vaarantaa ympäristöä. Käytettäessä tuhkaa maarakentamiseen, on huomioitava siitä liukenevien aineiden huuhtoutuminen ympäristöön. Ennen tuhkan käyttöä maarakentamiseen on tuhkasta määritettävä haitallisten aineiden kokonaispitoisuudet sekä niiden liukoisuudet. Suomessa MARA-asetus säätelee eräiden jätteiden hyödyntämistä maarakentamisessa. (VN 843/2017.)

Ympäristöministeriön teettämän taustatutkimuksen (YM 2016a) perusteella on arvioitu kriittisiä haitta-aineita, jotka nykyisten liukoisuusraja-arvojen ylittymisen kannalta edellyttäisivät raja-arvojen uudelleen tarkastelua hyötykäytön edistämiseksi. Selityksessä tarkasteltiin, miten tuhkan jalostaminen erilaisiin sovelluksiin muutti haitta-aineiden liukoisuuksia ja arvioitiin, voiko maarakentamisessa käytössä olevia

tapoja, kuten tuhkan sideaineena käyttöä ottaa mukaan uuteen MARA-asetukseen. Saatujen tulosten perusteella haitta-aineiden liukoisuudet ylittivät lähes kaikissa maarakentamisessa vanhan MARA-asetuksen peitetyn rakenteen liukoisuusraja-arvot vähintään yhden haitta-aineen osalta. (YM 2016a, 3 - 4.)

Taustaselvitys oli jaoteltu seuraaviin teemoihin:

- Tuhkan ikäännyttämisen vaikutus liukoisuuksiin
- Tiivistämisen ja sementtilisäyksen vaikutus massiivituhkan liukoisuuksiin
- Tuhkan seosmateriaalien liukoisuudet
- Tuhkan sideainekäyttö massastabiloinnissa
- Tuhkan sideainekäyttö kerrosstabiloinnissa
- Vanhojen sivutuoterakenteiden liukoisuudet

Tehdyssä selvityksessä tuhkan käyttö kerros- tai massastabiloinnissa osoittautui haitta-aineiden liukoisuuksien kannalta soveltuvan päällystettyihin rakenteisiin. Tuhkan hyötykäyttösovellus sideaineena sekä tuhkien haitta-aineiden liukoisuuksien tutkiminen jalostetusta materiaalista on huomioitu uudessa MARA-asetuksessa. Hyötykäyttävän jätemateriaalin liukoisuuksien tutkiminen tuoreen tuhkan liukoisuuksien sijaan huomioi myös paremmin tuhkan välivarastoinnin aikana tapahtuvan ikääntymisen vaikutuksia tuhkan laatuun. Selityksessä mukana olleista 10 – 15 vuotta vanhoista tierakenteista otettujen sivutuoterakennäytteidien tutkiminen osoitti haitta-aineiden liukenemisen rakenteesta olevan erittäin hidasta, koska näytteet sisälsivät edelleen lähes samaa tasoa olevia haitta-aineiden pitoisuuksia ja liukoisuuksia kuin tuoreet laboratorioissa valmistetut näytteet. (YM 2016a, 19, 57.)

Tuhkien ikäännyttämisen vaikutus haitta-aineiden liukoisuuksiin on tuhka-kohtaista ja siihen vaikuttavat voimallaitoksissa käytettävät polttotekniikat ja -lämpötilat. Lyhytkestoinen ikäännyttäminen (2,5 kk) ei ratkaisevasti pienennä kriittisten haitta-aineiden liukoisuuksia riittävästi. Tuhkan hyötykäyttötarkoituksesta riippuen voidaan ikäännyttämisen kestoa pidentää, jolloin saadaan liukoisuudet todennäköisesti pienentymään edelleen. Tuhkien tiivistämisen vaikutukset haitta-aineiden liukoisuuksiin vaihtelevat tuhka- ja haitta-ainekohtaisesti. Tuhkaa tiivistettäessä pääsee ylimääräinen vesi poistumaan rakennekerroksesta. Maarakenteet rakennetaan eri paksuisiin kerroksiin ja tiivistetään välittömästi. Liukoisuuden pienemiseen tuhkan tiivistämisen jälkeen vaikuttavat kemiallisten tekijöiden (tuhkien pH-muutokset) lisäksi fysikaaliset tekijät, kuten testattujen tuhkanäytteidien rakeisuus sekä veden kanssa kosketuksissa oleva kokonaispinta-ala liukoisuustestissä. Tuhkalle tehty sideainelisäys ja samalla tehty tiivistäminen pienentävät noin puolella tutkimuksessa testatuista tuhista kriittisten haitta-ainepitoisuuksien liukoisuuksia MARA-asetuksen vaatimukset täyttäen. Tuhkien käyttö sideaineena massa- ja kerrosstabiloinnissa ovat haitta-aineiden liukoisuuksien kannalta turvallisia käyttömuotoja ja soveltuvat saatujen tulosten perusteella MARA-asetuksen raja-arvoihin tuhkan laadusta riippuen ainakin päällystettyihin ja peitettyihin rakenteisiin. Sideainesovelluksissa

on rakenteessa käytettävän tuhkan määrä huomattavasti pienempi kuin massiivituhrakenteissa, jolloin myös liukoisuudet ovat täten pienempiä ja ympäristön kannalta turvallisempia. (YM 2016a, 56-57.)

Raskasmetallien pitoisuudet lannoitekäytössä

Tuhkan lannoitekäyttöä säädellään lannoitevalmistelaitilla (539/2006), joka velvoittaa lannoitevalmistajien tuottajia, myyjiä ja valmistajia. Laissa määritellään lannoitevalmisteita ja toiminnan harjoittamista koskevat säännökset kuten tyyppinimet, toiminnan ilmoitus- ja omavalvontavelvollisuus sekä orgaanisia lannoitevalmisteita valmistavaksi, teknisesti käsiteltäväksi tai varastoitavaksi laitokseksi hyväksyttävät laitokset. (Kalliokoski 2015, 31.)

Mikäli lannoitevalmistetta aiotaan saattaa markkinoille, on sen tyyppinimen oltava joko kansallisessa lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelossa tai Euroopan unionin lannoitetyyppien luettelossa. Myös tyyppinimen hakemisesta säädetään lannoitevalmistelaitissa. (Kalliokoski 2015, 31.)

Taulukko 3. Haitallisten metallien enimmäispitoisuudet epäorgaanisissa lannoitteissa ja kalkitusaineissa tyyppihapolla uutettuna sekä muissa lannoitevalmisteissa kuningasvesimärkäpolttoimenetelmällä uutettuna

Alkuaine	Enimmäispitoisuus mg/kg kuiva-ainetta	Metsätaloudessa käytettävissä tuhkalannoitteissa tai niiden raaka-aineena käytettävässä tuhkassa enimmäisyypitoisuus mg/kg ka.
Arseeni (As)	25	40
Elohopea (Hg) ¹	1,0	1,0
Kadmium (Cd)	1,5 ²	25
Kromi (Cr)	300 ³	300
Kupari (Cu)	600 ⁴	700
Lyijy (Pb)	100	150
Nikkeli (Ni)	100	150
Sinkki (Zn)	1500 ⁴	4500 ⁴

- 1 Elohopean määrittäminen EPA 743-menetelmällä.
- 2 2,5 mg Cd/kg ka maa- ja puutarhataloudessa sekä viherrakentamisessa ja maisemoinnissa käytettävässä tuhkalannoitteissa ja niiden raaka-aineina käytettävässä tuhkassa.
- 3 Sellaisenaan kalkitusaineena käytettävälle sivutuotteelle teräskuona (tyyppinimi 2A2/3) määritetään kromi liukoisena kuuden arvoisena kromina
- 4 Enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteissa voidaan sallia, kun maaperäanalyysin perusteella on todettu puutteita kuparista tai sinkistä. Metsätaloudessa enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteena käytettävässä sivutuotteessa on sallittu ainoastaan sinkkiä suomensissa käytettäessä, silloin kun sinkin puute on kasvustosta todettu joko maaperä-, lehti- tai neulasanalyysillä. Tällöin maksimimäärä sinkkiä lannoitevalmisteena käytettävässä sivutuotteessa saa olla enintään 6000 mg Zn/kg ka.

Tyyppinimistä ja erilaisista toiminnanharjoittajaa ja toimintaa koskevista vaatimuksista säädetään tarkemmin maa- ja metsätalousministeriön antamissa asetuksissa lannoitevalmisteista (24/11). Asetuksen 24/11 liitteessä 4 on luettelo kansallisista lannoitevalmisteiden tyypeistä (1-5) ja tyyppinimistä sekä niitä koskevista vaatimuksista. Tuhka kuuluu ryhmään 1 lannoitteet, sen alaryhmään A epäorgaaniset lannoitteet ja sen alaryhmään 7 tuhkalannoitteet. (Kalliokoski 2015, 32.)

Asetuksen 24/11 liitteessä 4 esitetään lannoitevalmisteiden sallitut haitalliset aineet, eliöt ja epäpuhtaudet (Taulukko 3).

Tuhkan raskasmetallien ja haitta-aineiden kulkeutuminen kasveihin ja vesistöihin

Ennen tuhkan käyttöä ja levitystä ympäristöön on arvioitava ja analysoitava tuhkan ominaisuudet ja haitta-aineet. Tuhkan alkuperän tunteminen, haitta-ainepitoisuuksien tutkiminen ja potentiaalinen liukeneminen tehostavat vesien suojelua ja vähentää mahdollisia haittavaikutuksia ympäristössä ja kasvillisuudessa. (Laine-Ylijoki, Wahlström, Peltola, Pihlajaniemi & Mäkelä 2002.)

Puun ja turpeen poltossa syntynyt tuhka voidaan hyödyntää metsälannoituksessa, sillä puu- ja turvetuhkan sisältämä fosfori ja kalium parantaa puuston kasvua turve- mailla. Puu- ja turvetuhka sisältää myös kalsiumia ja magnesiumia, jotka parantavat fosfori-kalium -lannoitusvaikutusta. (Härkönen 2019.)

Tuhkan ympäristövaikutukset vaatisivat vielä lisäselvityksiä, jotta hyötykäyttömahdollisuuksia voitaisiin lisätä turvallisesti. Tutkimusten ja kokeiden perusteella tuhkalannoitus lisää puuston kasvua ja ravinnevaikutukset kestävät jopa 50 vuoden ajan. (Karikorpi 2013.)

Tuhkalannoituksen vaikutus pintakasvillisuuteen ja muuhun eliöstöön on huomioidava, sillä mahdolliset muutokset kestävät pitkään. Muutokset kasvillisuudessa voivat olla havaittavissa jo muutaman vuoden kuluessa tuhkan levityksestä tai vasta useiden vuosikymmenten päästä. (Laine-Ylijoki ym. 2002.)

Tuhka vaikuttaa marjojen, sienten ja kasvien alkuainepitoisuuksiin, mutta myös kalsiumin, fosforin, kaliumin ja boorin pitoisuuksien on tutkimuksissa havaittu nousevan. Raskasmetallien siirtyminen sieniin ja marjoihin ei ole merkittävää, että siitä aiheutuisi haittaa ihmisille tai eläimille. (Karikorpi 2013.)

Vesistölle tuhkan aiheuttama ympäristöriski on otettava huomioon etenkin fosforin ja raskasmetallien suhteen. Tuhkan sisältämät raskasmetallit ovat kuitenkin usein vaikealiukoisessa muodossa. Myös valumavesien mukana huuhtoutuva happamuus on otettava huomioon, sillä pH-tasapainon muutokset vesistöissä ja maaperässä häiriinnyttävät ekosysteemiä ja vaikutukset saattavat näkyä vasta useiden vuosikymmenten päästä. (Joensuu 2019, 2, 4-5.)

4. Liiketoiminnan haasteet

Tuhkan hyötykäytön edellytyksenä on sen kilpailukyky esimerkiksi muihin metsänlannoitteisiin verrattuna sekä kuljetuskustannusten huomioiminen levityskohteita suunniteltaessa. Kustannuksiin pystytään vaikuttamaan monella tapaa ja valtiolla on mahdollisuus antaa tukea tuhkan hyötykäytölle niin halutessaan. Liiketoiminnan kannattavuutta kehitetään eri tavoin, kuten esimerkiksi yritysten yhteistoiminnan tehostamisella sekä tuotteen laatua parantamalla.

4.1 KYSYNTÄ JA TARJONTA

Energiantuotannossa syntyvä tuhka on laadultaan hyvin vaihtelevaa, ja sen laatuun vaikuttavia syitä ja seurauksia on vaikea hallita (Kalliokoski 2015, 1). Samassa polttolaitoksessakin syntyvät eri tuhkakajakeet voivat olla pitoisuuksiltaan hyvin erilaisia riippuen esim. poltettavien aineiden seossuhteista. Laadun vaihtelun lisäksi tuhkan sisältämät haitta-aineet rajoittavat hyötykäyttöä. Lisäselvityksiä mm. tuhkan laatuun vaikuttavista syistä on vielä tehtävä, sillä tuhkan laadun vakauttaminen ja laadun seuranta on olennaista tuhkan kilpailukykyisen tuotteistamisen sekä laaja-alaisen jälleen käytön ja sen kasvattamisen kannalta.

Tuhkan tuottajia ohjataan mm. ympäristönsuojelulainsäädännöllisillä sekä taloudellisilla syillä hakemaan tuhkalta jälleenkäyttökohteita (Kalliokoski 2015, 1). Ennakko-luuloja tuhkan hyödyntämiseksi kuitenkin aiheuttaa mm. tuhkan luokittelu lainsäädännön näkökulmasta jätteeksi. On myös vaikeaa löytää hyötykäyttökohteita, sillä lupa- ja ilmoitusmenettely saatetaan mieltää raskaaksi ja hitaaksi erityisesti maanrakennuspuolella. Tuhkien MARA- hyödyntämisen taloudellisuutta rakennuttajien ja urakoitsijoiden näkökulmasta ei ole tutkittu riittävästi. Tuhkan kuljettamisen pitkiä matkoja on kallista heikentäen sen kysyntää.

Napapiirin Energia ja Vesi Oy on yksi Lapin alueen suurimmista tuhkan tuottajista. Yhtiön ESQ-asiantuntijan Anne Strandmanin (2019) mukaan laitoksen tuottama lentotuhka menee pääosin metsälannoitukseen, mutta pohjatuhkan maanrakennuskäyttöä olisi tarpeellista lisätä. Lentotuhkan käyttöä metsälannoitteeksi on mahdollistanut vuonna 2019 alkanut yhteistyö lannoitevalmistaja Ecolan Oy:n kanssa. Tuhkan maanrakennuskäyttöä jarruttaa maanrakennusalan tiedon puute hyötykäyttö-

mahdollisuuksista. Hyötykäytön lisääminen on yrityksille tärkeää, koska tuhkan loppusijoittaminen kaatopaikalle maksaa 70 €/tonni. (Strandman 2019.)

Monia projekteja ja hankkeita on tälläkin hetkellä käynnissä, joiden toivotaan antavan ratkaisuja tuhkan jälleen käytön ja liiketoiminnan haasteisiin. Yksi tuoreimmista on Tapio Oy:n 1.9.2019 käynnistämä Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hanke, jonka pääasiallisia tavoitteita ovat mm. tuottaa työopas tuhkan tuottajille ja käyttäjille, parantaa tuhkan hyötykäyttäjien liiketoiminnallisia mahdollisuuksia sekä laatia paikkatietopohjainen sovellus tuhkan tuottajille potentiaalisten hyötykäyttäjien löytämiseksi. (Tenhola 2019.)

4.2 YHTEISTYÖ TUOTTAJIEN JA HYÖTYKÄYTTÄJIEN KESKEN

Tuhkatiedot kerätään Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämään valvonta- ja kuorimitusjärjestelmään (YLVA). Kaikki ympäristöluvan tarvitsevat tuhkan tuottajat on veloitettu käyttämään tätä järjestelmää ja ilmoittamaan syntyvien tuhkien määrät ja laadun. Tiedot siirtyvät paikkatietona Biomassa-Atlas -verkkopalveluun. Näin tuhkaa voi hyödyntää esimerkiksi metsätien suunnittelija, joka voi tarkistaa toimialueella syntyvän tuhkan määrän sovelluksesta. Tuhkatieto pohjautuu viiden erilaisen tuhka-jakeen luokitteluun, mikä puolestaan pohjautuu Eurooppalaisen jätteiden EWC (European Waste Code)-luokitukseen. (Maa- ja metsätalousministeriö 2019.)

Pienet lämpölaitokset eivät ole ilmoitusvelvollisia, joten niiden tuhkatiedot eivät siirry YLVA-tietokantaan. Lämpölaitoksista noin neljännes ei ole ilmoitusvelvollisia. Tuhkan kokonaismäärästä osuus on kuitenkin vain muutamien prosentteja. Pienten lämpölaitoksen tuhka kiinnostaisi käyttäjiä, sillä yleensä ne sijaitsevat kotipaikan lähellä. (Maa- ja metsätalousministeriö 2019). Kunnan ympäristönsuojeluviranomainen ratkaisee energialaitosten ympäristölupahakemukset, jos kyseessä on yli 20 megawatin kiinteän polttoaineen laitos, ja jos laitoksen kaikkien kiinteäpolttoisten kattiloiden yhteenlaskettu teho on alle 50 MW. Tätä suurempien laitosten ympäristöluvut ratkaisee Valtion ympäristölupaviranomainen. (Vna 713/2014.)

Suurin este tuhkien laajamittaiselle hyötykäytölle sekä teiden korjauksessa että tuhkalannoituksessa on tiedon puute ja toimijoiden kohtaanto-ongelma. Lannoitusta suunnittelevilla metsänomistajilla tai heitä neuvovilla organisaatioilla ei ole tietoa lannoituskäyttöön soveltuvan tuhkan saatavuudesta. Tuhkan tuottajilla ja tuhkanlevitysyrittäjillä ei puolestaan ole kattavia tietoja lannoituskelpoisten turvemaiden sijainnista ja niiden omistajista. Maanomistajaa yksilöiviä tietoja ei ole mahdollista saada metsäviranomaisilta ilman maanomistajan lupaa tiedon luovuttamiseen.

Metsänomistajan, tuhkanlevittäjän, maanrakentajan ja kiertomateriaalien tuottajan tai heitä palvelevan toimijan on hyvin työlästä hankkia näitä tietoja omatoimisesti, ja siksi kiertomateriaalien käyttö ei pääse kasvamaan.

Esimerkiksi yritystoimintaa suunnittelevilla henkilöillä ja etenkin aluekehitysvastuussa olevilla tutkimus-, kehittämis- ja innovaatio -hanketoimijoilla sen sijaan on intressi kerätä ja jalostaa kiertomateriaalien syntyyn ja käyttöön liittyvää tietoa. TKI-toimijoilla on lisäksi keskeisenä intressinä myös jakaa tätä tietoa kaikille asiasta

kiinnostuneille osapuolille ja kehittää näiden välistä yhteistyötä. Yhteistyö on kiertomateriaalien hyötykäytön välttämätön edellytys. Tutkimus- ja kehittämistoimenpiteiden edellytysten luominen esim. rahoitusten hakeminen ja yhteistyöverkoston luominen synnyttävät innovaatioita, joita yritykset voivat hyödyntää.

Yritysten, neuvonta- ja kehittäjäorganisaatioiden, tieosakkaiden ja maanomistajien välinen yhteistyö edellyttää sopivaa foorumia ja/tai sovellusta, joka vastaa heidän käytännön tarpeisiinsa. Pelkät luettelot materiaalien tuottajista, määristä ja mahdollisista hyödyntäjistä eivät johda toimintaan ja yhteistyöhön kovinkaan todennäköisesti.

Tieverkosto ja puutavaran puskurivarastot toimivat yhtenä rajapintana tuhkien kiertotalouden käytännön sovelluksille, jotka yhdistävät toimijoita eri tahoilta. Tästä voi syntyä uutta tai tehostuvaa liiketoimintaa alkutuotannosta palveluiden kautta jalostukseen. Kiertotalousnäkökulmien hyödyntäminen käytännön päätöksenteossa tarkoittaa TKI-hanketoimijoiden näkökulmasta pyrkimystä digitaaliseen ja toimialarajat ylittävään systeemiseen ja dynaamiseen tarkasteluun.

TKI-toimijoiden tavoitteeksi voitaisiin ottaa systeemisen kokonaiskuvan luominen puunhankinnan aiheuttamasta kuormituksesta tiestölle ja energialaitosten tuhkien hyödyntämispotentiaalista maanrakennuksessa ja metsänlannoituksessa. Kokonaiskuva saadaan aikaan yhdistämällä eri paikkatietoaineistoja digitaaliseen visualisointi- ja laskentajärjestelmään.

4.3 LOGISTIIKAN VAIHEET JA HAASTEET

Toimiva logistiikka on liiketoiminnan elinehto, koska sitä tarvitaan toimitettaessa oikea määrä tuotetta asiakkaalle oikeaan aikaan. Tämä kuuluu tehdä mahdollisimman kustannustehokkaasti ja ympäristöä tulisi kuormittaa mahdollisimman vähän. (Ritvanen 2011, 19.) Maantiekuljetukset ovat yleisin kuljetusmuoto Suomessa. Noin 90 % tuotteista kuljetetaan kuorma-autolla. (Logistiikan maailma 2018.)

Toimitusketjussa on paljon toimijoita ja organisaatioita, jotka tekevät yhteistyötä. Kullakin ketjun toimijalla on oma tehtävänsä ja toimitusketju yhdistää jakelijat, tavarantoimittajat ja asiakkaat toisiinsa. Toimitusketju on kokonaisuus, joka pyrkii kustannustehokkuuteen ja asiakaslähtöisyyteen. Ketjun rakenteeseen vaikuttavat yrityksen tuote ja toimiala sekä asiakkaat. Toimitusketjun kukin vaihe lisää kustannuksia ja ajanmenekkiä. (Ritvanen 2011, 23-24.)

Varastointi

Tuhkan varastointi peittämättömänä kasassa tai aumassa voi aiheuttaa runsasta pölyämistä. Jos kasan alle ei ole asetettu eristävää materiaalia, voi veden mukana tapahtua myös haitta-aineiden liukenemistä ja huuhtoutumista. Pölyämistä voi vähentää kasan kastelemisella tai peittämällä kasan. Tuhkan haitta-aineiden liukoisuudet laskevat ikääntymisen myötä. Varastoitaessa tuhka reagoi ilman hiilidioksidin sekä kosteuden kanssa. Luonnollista ikääntymistä voidaan tehostaa hiilidioksidin avulla.

Tuhkan käsittely

Tuhkan haitta-aineiden stabiloimisella pyritään niiden liukoisuuden pienentämiseen. Menetelmiä ovat mm. itsekovetus ja pelletointi. Menetelmät perustuvat siihen, että tuhka ensin kostutetaan. Lannoitekäyttöön menevä tuhka käsitellään, jotta levittäminen olisi helpompaa ja vältetään liiallista tuhkan pölyämistä.

Tuhkan kostuttamisen tarve riippuu käsittelymenetelmästä. Puristusvoimaa käytettäessä noin 10 prosentin kostutus on riittävää, kun taas itsekovetuksentuhkan lähtökosteus voi olla jopa 30-35 prosenttia. Kuljetuksen ja levityksen kannalta päästään helpommalla, mitä vähemmän vettä on tuhkan mukana. Jos tuhka on käsittelemätöntä, tulee se kuljettaa umpinaisessa ja tiiviissä kontissa. Esikäsitelty tuhka voidaan käsitellä ja kuljettaa helpommin siirtäen se varastokasasta pyöräkuormaajalla tai laskemalla siilosta tuhka kuljetusautoon. (Korpilahti 2003.)

Itsekovetus

Tuhkan pölyäminen lisää käsittelykustannuksia. Pölyämisen vähentämiseksi yksinkertaisin menetelmä on itsekovetus. Menetelmässä tuhka kostutetaan sekoittamalla siihen vettä. Kostutettu tuhka ajetaan kasaan, jossa sen annetaan kovettua (Rinne 2007). Itsekovetettu tuhka muistuttaa hienojakoista multaa, joka sisältää erikokoisia rakeita. Itsekovetettua tuhkaa seulotaan seulakauhan avulla käytön yhteydessä. Itsekovetettu tuhka pölisee vähemmän kuin kovettamaton tuhka. (Makkonen 2008.)

Rakeistus

Tuhkan rakeistaminen on tehokas menetelmä, jolla pyritään vähentämään tuhkan pölyämistä, parantamaan lujuutta, ulkonäköä, virtaus- ja käsittelyominaisuuksia sekä hidastamaan sen liukoisuutta. Suomessa on käytössä useita kiinteitä tuhkan rakeistuslaitoksia. Kostutettu tuhka voidaan rakeistaa joko lautasella tai rummussa pyörittämällä. (Isännäinen ym. 2006.) Lautasrakeistuksessa jo valmiiksi kostutettu tuhka syötetään pyörivälle, kaltevassa asennossa olevalle lautaselle. Lautasen pinnalta tuhka valuu muodostaen pallomaisia rakeita. Rumpurakeistuksessa rakeet syntyvät pyörivän sylinterin sisäseinämässä. Eirich-tyyppisellä intensiivisekoittimella voidaan tuottaa rakeita eräajona puuntuhkaa sopivasti kostuttamalla. (Rautanen 2010.)

Rakeistamisen tavoitteena on saada alle senttimetrin halkaisijaltaan olevia rakeita. Käytännössä menetelmällä saatujen rakeiden koko kuitenkin vaihtelee (Makkonen 2008). Rakeiden laatuun voidaan vaikuttaa käyttämällä rakeistuksen eri vaiheissa koostumukseltaan erilaisia tuhkia. Itsekovetettuun tuhkaan verrattuna rakeistettu tuhka kovettuu nopeammin, se pölyää vähemmän ja loppukosteus on pienempi. Suurempi pakkaustiheys vähentää esimerkiksi kuljetus- ja varastointikustannuksia.

Pelletointi

Tuhkaa voidaan käsitellä puristamalla se matriisien läpi eli pelletöimällä. Menetelmä ei ole Suomessa käytössä suuressa mittakaavassa tuhkanrakeistuksessa. Pelletöimällä saadaan aikaan hyvälaatuinen lopputuote. Tuhkan pelletöinnissä ongelmana on

pelletöintimatriisien nopea kuluminen, minkä takia kustannukset nousevat korkeaksi. Menetelmä sopii lähinnä pienimuotoiseen toimintaan. (Rinne 2007, Huotari 2012.)

Kuljetus- ja levityskustannukset

Tuhkan jatkojalostajana täytyy ottaa huomioon monta seikkaa toimintaa suunniteltaessa. Raaka-aineen ravinnepitoisuus määrittelee osaksi lannoitteen hinnan. Jos ravinnepitoisuudet ovat riittäviä, tuhka kelpaa sellaisenaan lannoituskäyttöön. Kuljetuskustannukset muodostuvat tuhkan kuljettamisesta voimalaitoksesta jatkojalostuspaikkaan. Kustannuksiin vaikuttaa matkan pituus sekä tuhkan koostumus. Jos tuhka tulee märkänä laitokselta, tuo siihen lisätty vesi myös lisäpainoa kuormaan. Toisaalta kuiva tuhka on hankalampi kuljettaa pölyämisominaisuuden vuoksi, mutta parasta rakeistumisen kannalta. Tuhka-analyysejä tarvitaan omavalvonnan lisäksi viranomaisia varten. Nämä aiheuttavat lisäkustannuksia. Kustannuksiin vaikuttavat myös tuhkan jalostusmenetelmä ja sitä varten valittavat laitteet. Vaikka kustannukset saattavat olla korkeita ja joskus jopa yllättäviä, niin näillä toimilla taataan tuhkan tasainen laatu ja turvallinen käyttö ihmisen ja ympäristön kannalta. (Rautanen 2010.)

5. Tuhkien hyötykäyttöä ohjaavat ja edistävät tekijät

5.1 OHJAUSJÄRJESTELMIEN TAVOITTEET

Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2023 mainitsee yhdeksi tavoitteekseen kierrätysraaka-aineista valmistettujen lannoitevalmisteiden käytön lisäämisen ja sen, että niillä korvataan neitseellisistä raaka-aineista valmistettuja lannoitteita. (Ympäristöministeriö 2018, 37.) Suomen tiekartassa kiertotalouteen 2016-2025 tuhka sijoittuu tiekartan teknisiin kiertoihin. Teknisten kiertojen painopistealueen päämäärä on tuotteiden ja materiaalien kestävä käyttö, kiertoajan pidentäminen sekä elinkaaren eri vaiheissa tapahtuva uudelleenkäyttö. Yksi keskeisistä toimista on etsiä uusia käyttökohteita teollisuuden sivuvirroille ja sivuvirtojen hyödyntäminen mahdollisimman tehokkaasti, joka vähentäisi kaatopaikkasijoitusta. (Sitra 2016, 22, 24.)

REACH-asetus

Euroopan unionin REACH-asetus (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) koskee kemikaalien rekisteröintiä, arviointia, lupamenettelyjä ja rajoituksia. Asetusta on päivitetty 1.1.2020, ja alkuperäinen asetus on julkaistu 30.12.2006. Sen avulla pyritään suojelemaan ihmisten terveyttä ja ympäristöä kemikaalien aiheuttamilta riskeiltä. REACH-asetus myös edistää vaihtoehtoisten keinojen ja tapojen löytämistä käyttöön aineiden aiheuttamien vaarojen arviointiin, jolloin eläinkokeiden määrää pystytään vähentämään. REACH-asetusta sovelletaan kaikkiin kemiallisiin aineisiin. (Tukes 2020.)

Yritykset, jotka Euroopan Unionin alueella markkinoivat tai valmistavat kemikaaleja sisältäviä tuotteita, tulee osoittaa kemikaalivirastolle, miten ainetta voidaan käyttää turvallisesti, ja niiden on tiedotettava riskinhallintatoimenpiteistä käyttäjille. Kun tuotetta ei luokitella jätelain 646/2011 mukaisesti jätteeksi, vaan sivutuotteeksi, aine kuuluu REACH-velvoitteen piiriin. Sivutuotteet, joilla on käyttötarkoitus, tulee rekisteröidä REACH-asetuksen mukaisesti. (Tukes 2020.)

REACH-asetuksen tavoitteena on saada vaaralliset aineet mahdollisimman turvalliseen käyttöön, tai korvaamaan niitä vähemmän vaarallisilla. Mikäli vaarallisten

aineiden aiheuttamia riskejä ei voida hallita, voi viranomaiset rajoittaa vaarallisten aineiden käyttöä.

Jätelaki 646/2011

Jätelaissa kielletään jätteiden sekoittaminen keskenään. Erilleen lajiteltujen jätteiden puhtausaste on parempi, jolloin jakeita on helpompi hyötykäyttää. Jätelain edellyttämä etusijajärjestys asettaa tärkeimmäksi tavoitteeksi jätteen synnyn ehkäisemisen. Jätteen synnyn ehkäisemisen jälkeen tulee jätteen valmistelu uudelleenkäyttöön, jonka jälkeen tulevat kierrättäminen ja energiahyötykäyttö. Viimeisenä vaihtoehtona tulee kaatopaikkasijoitus. (Jätelaki 646/2011 8 §.)

Jäteverolaissa todetaan, että “jätevero koskee kaatopaikalle toimitettavia jätteitä, joiden hyötykäyttö on teknisesti ja ympäristönäkökohdat huomioiden mahdollista” (Kuntaliitto 2020). Jäteverolain (1126/2010) 7 §:n mukaan tuhkaa voidaan varastoida korkeintaan kolmen vuoden ajan ja vasta sen jälkeen tuottaja on velvollinen maksamaan jäteveroa. Silloin verottaja tulkitsee, että kaikki kaikki alueella oleva jäte on veronalaista ja ne katsotaan toimitetuiksi kaatopaikalle kolmen vuoden määräajan täytyessä (Jäteverolaki 1126/2010, 7§). Muun muassa voimalaitosten tuhkat luokitellaan määrällisesti suurimpiin jätelajeihin.

Lannoitevalmistelaki 539/2006

Lannoitevalmistelaila varmistetaan Suomessa käytettävien lannoitteiden turvallisuus, hyvälaatuisuus sekä sopivuus kasvintuotantoon. Lailla pyritään myös kasvattamaan lannoitekäyttöön soveltuvien sivutuotteiden hyödyntämistä. Lannoitevalmistelain mukaan lannoitevalmiste ei saa sisältää sellaisia määriä haitallisia aineita, tuotteita tai eliöitä, että sen käyttöohjeiden mukaisesta käytöstä voi aiheutua vaaraa ihmisten tai eläinten terveydelle tai turvallisuudelle, kasvien terveydelle tai ympäristölle. (Lannoitevalmistelaki 539/2006.)

Ympäristönsuojelulaki 527/2014

Tuhkien tuottamiseen, hyötykäyttöön ja hävittämiseen vaikuttaa hyvin paljon ympäristönsuojelulaki tuhkan elinkaaren kaikissa eri vaiheissa. Ympäristönsuojelulaista johtuvat monet ilmoitus-, lupa- ja rekisteröintimenettelyt, jotka vaikuttavat sekä tuhkaa tuottavien laitosten toimintaan että tuhkan hyötykäytön mahdollisuuksiin. Ympäristönsuojelulaki on pilaantumisen torjunnan yleislaki, joka myös ehkäisee jätteiden syntyä ja haitallisia vaikutuksia, edistää luonnonvarojen kestäväää käyttöä, torjuu ilmastonmuutosta ja tukee kestäväää kehitystä. (Ympäristöministeriö 2016a.)

MARA-asetus 843/2017

Maarakentamiseen soveltuva jäte on jalostettu materiaali, jota voidaan käyttää joko sellaisenaan korvaamaan neitseellinen kiviaines tai jolla voidaan parantaa teknisesti heikompileatuista maa-ainesta. Yleisesti näistä jalostetuista materiaaleista käytetään nimitystä uusiomaa-aines, joka ei silmämääräisesti juurikaan eroa varsinaisesta neitseellisestä kiviaineksesta. (Ympäristöministeriö 2019b.) Kivihiilen, turpeen ja puupe-

räisen aineksen polton lentotuhkat, pohjatuhkat ja leijupetihiekka ovat maarakentamiseen soveltuvaan jalostettua jätettä.

Jätteiden hyödyntäminen maarakentamisessa vaatii tavallisesti ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan. Päätävä viranomainen määrittää hyödynnettävän jättemassamäärän perusteella siten, että alle 20 000 tonnia jätettä sisältävän materiaalin käyttöön luvan voi myöntää kunta ja yli 20 000 tonnia jätettä sisältävän materiaalin käyttöön luvan myöntää aluehallintovirasto. Niin sanotulla MARA-asetuksella (VNa 843/2017) voidaan tiettyjä jättemateriaaleja hyödyntää Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle tehdyllä ilmoitus- ja rekisteröintimenettelyllä. (Äystö 2018.)

Metsäteollisuudessa muodostuvat puuperäisen aineksen ja turpeen polton lentotuhkat, eli biomassan polton tuhkat, täyttivät heikosti vanhan MARA-asetuksen (VNa 591/2006 ja VNa 403/2009) liukoisuus-kriteerit, joten MARA-asetus tarvitsi päivitystä (YM 2016b, 9-10). Vuonna 2017 Ympäristöministeriö uudisti eräiden jätteiden hyödyntämistä maarakentamisessa koskevan valtioneuvoston MARA-asetuksen. Uusi MARA-asetus (VNa 843/2017) on tullut voimaan 1.1.2018 (YM 2019a). Rakentamisessa ja muussa vastaavassa toiminnassa syntyvän maa-ainesjätteen hyödyntämistä koskeva valtioneuvoston asetus, ns. MASA-asetus on valmisteluvaiheessa ja se annettaneen vuoden 2020 kuluessa. Näillä asetuksilla edistetään jätteiden hyödyntämistä maarakentamisessa kestävän kiertotalouden asettamien periaatteiden ehdoilla. Uudistetussa MARA-asetuksessa ei siis enää tarvita ympäristölupaa sideainekäytössä, jos sitä hyödynnetään asetuksen ehtojen mukaisesti. MARA-asetuksen uusiminen ja MASA-asetuksen valmistelu ovat ympäristöministeriön ja Suomen ympäristökeskuksen yhteishanke. (YM 2019a.)

MARA-asetuksessa maarakentamiskohteilla tarkoitetaan väyliä (myös metsäteitä), kenttiä, vallejia ja näiden rakennekerroksia sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteita, joita käytetään teolliseen toimintaan tai esineiden tai aineiden varastointiin. Asetusta ei sovelleta asumiseen tarkoitettuihin rakennuksiin. Asetuksessa peittämisellä tarkoitetaan jätettä sisältävän kerrosrakenteen suojaamista jätteen leviämisen ja sille altistumisen estämiseksi. Väylä- ja kenttärakenteissa tarvitaan vähintään 10 cm ja vallirakenteissa vähintään 50 cm paksuiset kerrokset pilaantumaton luonnon maa- tai kiviainesta jätettä sisältävän rakenteen päälle. (VNa 843/2017.)

Metsätalouden KEMERA-laki

Kestävän metsätalouden rahoituslaki on säädetty yksityisten metsänomistajien metsänhoito- ja metsänparannustöiden kannattavuutta parantamaan ja sisältää määritelmiä kulloisenkin työlajin kemera-tukikelpoisuudesta. Metsän terveyslannoitukseen voi Kemera- tukea saada työn kokonaiskustannuksista jopa 30% mukaan lukien suunnittelu-, työ-, tarvikkekustannukset sekä ravinneanalyysi. Ravinneanalyysi vaaditaan kohteen kemera-kelpoisuuden määrittämiseen, koska tukea myönnetään vain terveyslannoituksiin. (Metsäkeskus 2016a) Terveyslannoituksista jääneiden kustannusten lisäksi myös kasvatuslannoitusten kustannukset ovat kuitenkin kokonaan vähentämiskelpoisia metsäverotuksessa (Metsäkeskus 2016b). Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jos tuhka sopii kyseessä olevan ravinnehäiriön hoitoon, Kemera-

tuet vaikuttavat huomattavasti tuhkalannoituksen kannattavuuteen kohteella. Myös verovähennyuskelpoisuus parantaa omaehtoisen tuhkalannoituksen kannattavuutta jonkin verran.

Kemera-tukea oli ennen mahdollista saada metsätalouden käyttöön otettavan metsänkasvatukseen soveltuvan alueen metsittämiseen. Tätä tukea käytettiin paljon esim. käytöstä poistettujen turvemaiden tuhkalannoitukseen ja metsänviljelyyn. Nykyisessä Kemera-laissa ei tällaista mahdollisuutta enää kuitenkaan ole. (Karppinen 2019, 18) Jos vastaavanlainen tukimuoto saataisiin takaisin käyttöön, voisi tuhkan levittäminen turvemaiden pohjille olla kannattavaa sekä metsänomistajalle että myös tuhkan tuottajalle, joka välttäisi ainakin kaatopaikkamaksun.

Nykyisellään turvetuottajan ympäristölupavelvoitteet päättyvät, kun vanhalle turpeennostoalalla on syntynyt kasvillisuutta tai alue on otettu uuteen maankäyttöön (Metsälehti 2019). Jonkinlainen kasvillisuus syntyy yleensä ilman lannoitustakin, joten tämä velvoite ei välttämättä kannusta tuhkalannoitukseen.

Maataloustuet

Tuhkan käyttöä lisääviä maataloustukia ei varsinaisesti ole saatavissa, koska lannoituskustannukset kuuluvat yleisesti pinta-alakohtaiseen peltokorvaukseen. Kuitenkin Ruokaviraston lomakkeessa ympäristökorvauksen syysilmoitukset (lomake 465) on oma kohtansa orgaanisen lannoitevalmisteen levityspinta-aloja varten ja myös tuhka on mainittu hyväksyttävänä lannoitteena. (Ruokavirasto2019). Tämä ympäristökorvaus on osa laajempaa ympäristösitoumusta, jonka viljelijä voi halutessaan tehdä tilalleen. Ympäristösitoumus pitää sisällään monia maatalon käytäntöjä sääteleviä ohjeita ja rajoituksia, joista yksi valinnainen toimenpide on ravinteiden ja orgaanisten aineiden kierrättäminen. Siitä saatavan ympäristökorvauksen ehtona on, että viljelijä tuo tilalleen muualla syntynyttä, tietyn kuiva-aineosuuden omaavaa orgaanista ainetta, joka täyttää lannoitevalmistelain vaatimukset elintarvikkeiden tuotantoon hyväksyttävistä lannoitteista. Viljelijä siis kierrättää näitä orgaanisia aineita saaden pelloilleen lannoitushyödyn sekä ympäristökorvauksen kompensoimaan kierrättämisestä aiheutuvaa ylimääräistä työtä. Viljelijä ei voi kuitenkaan valita pelkästään tuhkan lannoituskäyttöä laajasta ympäristösitoumuksen paletista, vaan hänen täytyy sitoutua sen lisäksi kaikkiin muihin velvoittaviin toimenpiteisiin. (Ruokavirasto 2020a)

Tuhkan käyttöä maa- ja metsätaloudessa säätelevät myös metsä-, vesi- ja luonnon-suojelulaki, joiden mukaan vesistöjen sekä arvokkaiden elinympäristöjen luonnontilaa ei saa muuttaa eikä heikentää. (YM 2019a ja YM 2019b). Tällöin lannoitettavan alan ja vesistön tai elinympäristön väliin täytyy jäädä riittävän leveä suojakaistale.

6. Tuhkien uudet käyttötavat ja mahdollisuudet

6.1 KAIIVOSKÄYTTÖ

Lentotuhkaa syntyy kivihiilen ja orgaanisen aineen polttoprosessissa palamistuotteena. Kivihiilen lentotuhka on hyväksytty betonin lisäaineeksi, sen tulee täyttää SFS-EN 450 standardin vaatimukset. Orgaanista lentotuhkaa ei saa käyttää nykymääräysten mukaan betonin sideaineena. Orgaanista tuhkaa syntyy turpeen, puuhakkeen, kantojen tai muun vastaavan aineen polttoprosessin palamistuotteena. Louhostäytöön tarkoitettulla sideaineliitteellä ei ole yhtä kovia vaatimuksia kuin betonilla, joten maanalaisissa kovettuvissa louhostäytöissä voidaan käyttää orgaanisen polttoaineen palamistuotteena syntyvää lentotuhkaa. (Lehtola 2017.)

Betonin rakenne ja lentotuhka

Betoni koostuu runkoaineesta, sideaineesta ja vedestä. Runkoaineena toimii sora ja sideaineena sementti. Näiden aineiden keskinäisellä suhteella voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Seosaineilla ja lisäaineilla voidaan muokata betonin ominaisuuksia haluttuun suuntaan.

Maanalaisissa louhostäytöissä runkoaineena toimii kalliomurske(sivukivi). Murskeessa on hyvin vaihtelevan kokoisia kiviä ja lohkareita. Itse runkoaineella ei ole tekemistä sementin reaktioiden kanssa. Kiviaineksen tulee olla puhdasta, eikä se saa sisältää sementin kovettumista häiritseviä aineita, kuten humusta tai eloperäisiä aineksia.

Sementin reaktiot tapahtuvat sen joutuessa kosketuksiin veden kanssa. Betonissa käytettävän veden tulee olla puhdasta. Tavallinen vesijohtovesi käy hyvin betonin valmistamiseen. Veden ja sementin suhde vaikuttaa lopulliseen lujuuteen ja tiiveyteen. Mitä pienempi vesimäärä on sementtiin verrattuna, sitä kestävämpää ja tiiviimpää betoni on. Sementti koostuu kalkkikivistä, kvartsista ja savesta. Sementti toimii sideaineena ja reagoidessaan veden kanssa, se sitoo runkoaineet yhteen. Tämä saa betonin kovettumaan kestäväksi lopputuotteeksi. Sementtejä on eri laatuja ja niitä voidaan valmistaa seostamalla Portland-sementtiä esimerkiksi masuunikuonalla tai lentotuhkalla. Sementin päälajeja ovat SFS-EN 197-1 standardin mukaan CEM I Portlandsementti,

CEM II Portlandseossementti, CEM III Masuunikuonaselementti, CEM IV Pozzolaaniselementti ja CEM V Seossementti. Näillä päälajeilla on alaluokkia, jolloin erilaisia sementtejä on yhteensä 27 kappaletta. Seosaineet ovat hienojakoisia ja epäorgaanisia osa-aineita, joilla pyritään vähentämään ympäristökuormaa ja vaikuttamaan sementin ominaisuuksiin. Reaktiot vaikuttavat sementtikiven lujuuden kehitykseen ja kestävyteen yleensä suotuisasti. Seosaineita on kahta tyyppiä: lähes reagoimattomia ja piilevästi hydraulisia eli pozzolaanisia seosaineita. Pozzolaanisen aineen reagoiessa sementin ja veden kanssa syntyy kalsiumsilikaattihydraattigeeliä, joka antaa lujuutta betonille. Lähes reagoimaton seosaine vaikuttaa betonin tiivistymiseen ja lisää lujuutta. (Lehtola 2017.)

Lentotuhkan käytön perusteena voidaan pitää taloudellisia, teknisiä ja ympäristön-suojeluun liittyviä seikkoja. Jokaista käytettyä lentotuhkatonnia kohden voidaan vähentää Betoninormin mukaan 400 kg sementtiä. Lentotuhkan käyttö betonissa vähentää kalleimpien ainesosien käyttöä, joten betonin hinta on huokeampi. Sementin tuotannossa syntyy 700 - 800 kg hiilidioksidia sementtitonnia kohden. Lentotuhka voi korvata 40 paino-% Portland-sementistä, joten lentotuhkan käyttö vähentää noin 300 kg hiilidioksidipäästöjä sementtitonnia kohden. Tähän viitaten voidaan sanoa lentotuhkan käytön olevan ympäristöteko. Lentotuhka on sideaineena vanhempi kuin Portland-sementti. Ajanlaskun alussa betonin kovettuminen perustui tulivuoren tuhkan kykyyn reagoida sammutetun kalkin kanssa. Lentotuhkan käyttö perustuu tähän samaan reaktioon. Lentotuhkan kuulamaiset partikkelit lisäävät betonin notkeutta ja tällöin vedentarve vähenee ja viskositeetti alenee.

Tuhkan määrä vaikuttaa myös lujuuden kehitykseen ja siihen, milloin lujuus saavutetaan. Betonin sisältämä lentotuhka alentaa varhaislujuutta ja kasvattaa loppulujuutta. Lentotuhka toimii sementin kanssa ikään kuin liima, joka saa betonin pysymään koossa paremmin. Lentotuhkabetoni suhteutetaan samalla tavalla kuin tavallinen betoni. Sementin määrää voidaan vähentää 40 % käytettävästä lentotuhkamäärästä. Yleensä myös hienoainesta joudutaan vähentämään, jotta lentotuhkalle saadaan tarpeeksi tilaa. Lentotuhkaa käytettäessä lujuudenkehitys nopeutuu lämpimissä olosuhteissa. Tämä on otettava huomioon erityisesti syvissä kaivoksissa, joissa lämpötila nousee syvyyden lisääntyessä. Esimerkiksi huoneenlämpöä korkeammissa lämpötiloissa lentotuhkabetonin lujuus saavuttaa Portland-sementtibetonin lujuuden noin seitsemässä vuorokaudessa, mutta noin viiden asteen lämpötilassa saman lujuuden saavuttamiseen menee noin 28 vuorokautta. Lujuuden kehitys jatkuu tämänkin jälkeen ja lopullinen lujuus saavutetaan noin kolmen kuukauden kuluessa. Kaivoksien kovettuvat louhostäytöt kovettuvat normaalisti 3-4 kuukauden aikana. (Lehtola 2017.)

Lentotuhkan käyttö rikastushiekka-altaissa

Rikastushiekka on malmin rikastuksessa syntyvää jätettä, jonka määrään vaikuttavat rikastettava malmin rikastusprosessin tehokkuus. Suomen kaivosteollisuudessa rikastushiekkaa muodostuu yhteensä noin 15 – 20 miljoonaa tonnia vuodessa. Rikastusprosesseissa muodostuva hiekka kuljetetaan vesilietteenä yleensä purkuputkia pitkin

padottuihin rikastushiekka-altaisiin. Altaat ovat 1 – 900 ha kokoisia ja niiden tilavuudet vaihtelevat 10 000 - 100 000 000 m³ välillä. (Karjalainen 2016.)

Rikastushiekka-altaan täyttyessä ja kaivostoiminnan loppuessa rikastushiekka-altaisiin tulee rakentaa pintarakenteet. Koska rikastushiekka-altaat ovat laajoja alueita, altaiden pintarakenteisiin tarvitaan suuret määrät erilaisia peitemateriaaleja. Esimerkiksi Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-altaiden pintarakenteisiin tarvittavien materiaalin kokonaismäärä on arvioitu olevan lähes 600 000 m³, kun suljettavan alueen kokonaispinta-ala on n.65 hehtaaria. Materiaalimäärät ovat niin suuria, että kaivosten arvioiduista sulkemiskustannuksista jopa puolet voi syntyä rikastushiekka-altaiden sulkemiseen tarvittavista materiaaleista ja niiden logistiikasta. Suurten kustannusten lisäksi huolenaiheena on neitseellisten luonnonmateriaalien kuluminen, sillä pintarakenteissa käytetään usein luonnonmateriaaleja kuten moreenia. (Karjalainen 2016.)

Suomen maaperässä esiintyy hapettuvia sulfidimineraaleja kuten rikkikiisua (FeS₂), kuparikiisua (CuFeS₂), magneetikiisua (Fe_{1-x}S) ja sinkkivälkettä [(Zn,Fe)S]. Näistä yleisin sulfidimineraali on rikkikiisu eli pyriitti. Sulfidimineraalimalmien rikastuksessa muodostuu sulfidipitoisia rikastushiekkoja, joita voidaan pitää ongelmallisina niiden happamoitumisen vuoksi. Reagoidessaan veden ja hapen kanssa sulfidipitoiset rikastushiekat muodostavat sulfaatti-ioneja (SO²⁻) ja happamuutta aiheuttavia vetyioneja (H⁺). Sulfidipitoisten rikastushiekkojen happamoituminen voi aiheuttaa kaivosalueelta happamia valumavesiä (AMD, acid mine drainage), jollei happoja neutraloivia mineraaleja ole riittävästi saatavilla. Valumavesien happamuus riippuu sulfidipitoisten rikastushiekkojen määrästä, laadusta sekä niiden suhteesta happamuutta neutraloiviin mineraaleihin. Kaivosvedet voivat olla happamoitumisen seurauksena hyvinkin happamia. Veden pH voi olla jopa alle 3. Hapettuessaan sulfidimineraalit kasvattavat myös metallien ja epämetallien liukoisuuksia, jolloin haittaaineliukoisuudet kaivos- ja valumavesissä kasvavat. Esimerkiksi rikkikiisun hapettuminen lisää muun muassa arseenin, kadmiumin, elohopean ja lyijyn liukoisuuksia. (Toropainen 2006.)

Happamoitumisen yleisiä tunnusmerkkejä ovat kyllä- tai punertavanruskeat kaivosvalunnat, veden pH:n ja happipitoisuuksien lasku, redox ja sähkönjohtavuuden nousu, lisääntyneet metallipitoisuudet, rikin haju ja kasvuston puuttuminen. Veden matala pH on merkki pinta- ja pohjavesien happamoitumisesta, jotka vaikuttavat vesieliöihin ja pinta- ja pohjavesien käyttöön. Happamoitumisen seurauksena vesieliöstökanta voi vähentyä tai kadota jopa kokonaan, sillä pahimmillaan happamoituminen voi tehdä vesistöistä lähes elinkelvottomia. Happamoituminen voi aiheuttaa esimerkiksi suuria kalakuolemia. Veden pH:n ollessa matala, kalan kidusten pinnalle muodostuu happea läpäisemätön pinta, jolloin kala kuolee hapenpuutteeseen. (Sutela ym. 2012, Toropainen 2006.)

Rikastushiekka-altaiden ympäristörakenteille ei ole laadittu virallisia ohjeita, joten viranomaiset hyväksyvät laaditut suunnitelmat kullekin altaalle kohdekohtaisesti. Sulfidipitoisten rikastushiekkojen hapon muodostumista voidaan estää hapen määrän minimoinnilla. Hapen pääsyä rikastushiekkakerrokseen voidaan ehkäistä esimerkiksi monikerroksisilla pintarakenteilla tai pitämällä rikastushiekka-allas kokonaan vedellä

kylläisessä tilassa. Muita hapettumisen minimointikeinoja on esimerkiksi rikastushiekan neutraloiminen eli pH:n säätäminen esimerkiksi kalkin, kalkkikiven tai lentotuhkan avulla. (Kauppila ym. 2011, Heikkinen & Noras 2005.)

Pintarakenteilla tarkoitetaan yleisesti rikastushiekka-altaiden peittämistä kaivos-toiminnan loppuessa tai rikastushiekka-altaan täytyessä. Pintarakenteiden ominaisuudet ja peittotavat ovat kohdekohtaisia, jotka riippuvat peitettävän rikastushiekan ominaisuuksista, haitta-ainepitoisuuksista, alueen sijainnista, ilmastosta, peittomateriaalien saatavuuksista, alueen vesitaseesta, jälkikäyttömuodosta, altaiden pohja- ja patorakenteista sekä pohjamaan laadusta. Vaikka pintarakenteille ei ole annettu yhdenmukaisia ohjeita, tulee rakenteiden olla ympäristölle ja terveydelle turvalliset lyhyellä ja myös pidemmällä aikavälillä katsottuna. Suunnitteluissa voidaan soveltaa esimerkiksi kaatopaikkarakenteiden ohjearvoja, kunhan rikastushiekkojen laadut ja sijoitustavat otetaan huomioon. (Bjelkevik 2005, Heikkinen & Noras 2005.)

Pintamateriaalit voidaan jakaa kolmeen materiaalityyppiin; hapenkulkua estäviin, happea kuluttaviin ja hapetusreaktiota estäviin materiaaleihin. Hapenkulkua estäviä materiaaleja ovat esimerkiksi savet, moreenit ja synteettiset kalvot, happea kuluttavia materiaaleja turve, lietteen ja komposti. Tuhka ja kalkki soveltuvat hapetusreaktioita estäviin rakenteisiin, sillä niillä on kyky neutraloida ja nostaa pH:ta ja näin ollen estää rikastushiekan hapetusreaktiot. (Sipilä 1996.)

Lentotuhkan bioliuotus

Metallipitoisten jätteiden käsittelylle on tulevaisuudessa yhä suurempi tarve, sillä neitseelliset raaka-aineet ovat hupenemassa samalla, kun kaatopaikkoja täytetään näillä metallipitoisilla jätteillä, joita voidaan kutsua keinotekoisiksi malmeiksi. Bioliuotus on menetelmänä kustannustehokkaampi ja ekologisempi, kuin perinteiset menetelmät sillä mikrobit tekevät suurimman työn ja vain pieniä materiaali- ja ravinnelisyksiä tarvitaan. Bioliuotus voi olla yksi keino alentaa lentotuhkan raskasmetallipitoisuuksia. Siinä hyödynnetään mikrobin kykyä tuottaa metalleja liuottavia aineita, kuten happoja ja aineenvaihduntatuotteita.

Bioliuotus tai biokasaliuotus on kaivosteollisuudessa käytetty rikastusmenetelmä, jolla metallit erotetaan malmista. Prosessina bioliuotusta tapahtuu jokaisessa sopivassa malmiossa myös luonnossa, mutta teollisesti prosessia nopeutetaan huomattavasti säätämällä olosuhteet bakteereille sopiviksi sekä kasvattamalla malmin pinta-alaa murskaamalla. Bioliuotuksella saadaan talteen kultaa, kuparia, sinkkiä ja nikkeliä. Alhaisten perustamis- ja käyttökkustannusten vuoksi menetelmä on kannattava myös sellaisilla esiintymällä, joilla metallipitoisuus on alhainen.

Esimerkkinä Terrafamen kaivoksella Sotkamossa malmi murskataan ensin hienoksi (n. 8 mm raekoko). Sen jälkeen erillisessä agglomerointirummussa agglomeroidaan rikkihappoa käyttäen pienet hiukkaset liittymään isojen pintaan. Agglomeroitu murske kasataan suuriin kasoihin (3–5 % kaltevuus). Malmikasoihin puhalletaan ilmaa ja niitä kastellaan happamalla tuotantoliuoksella, jolloin luodaan optimaaliset olosuhteet mikrobitoiminnalle.

Kasattua malmia liuotetaan ensin noin 15 kuukautta primäärikasalla. Sen jälkeen malmikasa puretaan ja siirretään sekundäärikasalle loppuliuotukseen. Yleisimpiä bioliuotuksessa käytettyjä bakteereja ovat Acidithiobacillus ferrooxidans ja Acidithiobacillus thiooxidans, joista ensimmäinen hapettaa rautaa ja jälkimmäinen rikkiä. Bakteerien optimaalinen toiminta-alue on pH 1,5–2,5, riippuen liuotuksessa esiintyvistä bakteereista. PH:n säätö vaatii siis happoa, koska monien mineraalien liuottaminen kuluttaa happoa enemmän, kuin sulfidien hapettuminen vapauttaa. Liuotus toimii melko laajalla lämpötila-alueella, mutta yleisimmät bakteerikannat toimivat 25 °C ja 38 °C välillä. Kuitenkin myös yli 80 °C toimivia bakteereja on tavattu muun muassa japanilaisista kaivoksista.

Vuonna 2011 tehtiin Tekesin rahoittama PROBIO-projektin rinnakkaishanke Savonia-ammattikorkeakoulussa (Tissari 2011), jossa yhtenä osana tutkittiin turpeen ja hakkeen sekapolton lentotuhkan bioliuotusta Aspergillus niger -homeella. Hankkeen yhtenä tavoitteena oli selvittää seospolton lentotuhkan bioliuotukselle Aspergillus niger -sienellä optimaaliset olosuhteet (mm. muuttamalla liuotusaikaa, tuhkapitoisuutta ja ravinneliuoksen sakkaroosipitoisuutta), sekä tutkia, onko tuhkan hyötykäyttö esiteityissä käyttökohteissa bioliuotuksen jälkeen mahdollista.

Mikro-organismien tehtävänä on tuottaa liuottavat kemikaalit ja luoda tila, missä liuotusreaktiot tapahtuvat. Mikrobin kyky liuottaa ja saada metalleja kiinteistä aineista liukoiseen muotoon perustuu kolmeen pääreaktioon:

- orgaanisten ja epäorgaanisten happojen tuotanto
- hapetus-pelkistysreaktiot
- kompleksoivien yhdisteiden eritys

Sienet ovat moninainen ryhmä organismeja ja niitä esiintyy kaikkialla ympäristössä. Niillä on elintärkeä rooli kaikissa ekosysteemeissä ja ne säätelevät ravinteiden ja energian virtausta rihmastonsa läpi. Sienet voivat selviytyä ja olla olemassa melkein missä tahansa elinympäristössä. Sieniä voidaan käyttää mm. hajottamiseen, indikoimaan ympäristön tilaa, puhdistamaan ympäristö alkuperäiseen tilaansa ja puhdistamaan jätevesiä.

Aspergillus on homesieniin kuuluva sienisuku ja sen alalajiin kuuluva Aspergillus niger on rihmamainen, itiöitä tuottava ja kaikkialla luonnossa esiintyvä home. Aspergillus niger on tyypillinen ruuan saastuttaja ja aiheuttaa mustahometta tiettyihin hedelmiin ja vihanneksiin, kuten greippeihin, sipuleihin ja pähkinöihin. Aspergillus niger voi aiheuttaa infektioita myös ihmiselle pääasiassa inhalaation välityksellä, jos ihmisellä on heikentynyt immuunivaste. Sen lisäksi, että Aspergillus niger voi olla ruualle ja ihmisille haitallinen on se taloudellisesti tärkeä organismi sitruunahapon tuotannossa aineenvaihduntansa avulla. Teollinen sitruunahapon tuotanto Aspergillus niger -sienellä on yksi tehokkaimmista ja saannoltaan paras bioprosessi mitä teollisuudessa käytetään. Vuosittainen sitruunahapon tuotanto Aspergillus niger -sienellä on yli miljoona tonnia.

Aspergillus niger on tyypillinen maaperän mikrobiston jäsen ja sillä on merkittävä rooli maailmanlaajuisessa hiilen kierrossa toimien maaperässä lahottajana pilkkomalla tuottamiensa entsyymien avulla kasvien ligniiniä ja selluloosaa. Osa näistä hapettavista ja hydrolyyttisistä entsyymeistä ovat myös tärkeitä bioteknolomiteollisuuden käytössä. *Aspergillus niger* kykenee tuottamaan aineenvaihduntatuotteinaan happoja myös korkeammassa pH:ssa eikä vaadi kasvaakseen happamia olosuhteita. Tämän vuoksi *Aspergillus niger* on yleisesti valittu mikrobi tuhkien liuotukseen sillä se sietää tuhkan emäksisyyttä.

Tutkimuksessa (Tissari 2011) havaittiin, että ravistelupullokokeiden perusteella parhaat liukenemistulokset saavutettiin liuotusajan ollessa vähintään 14 vuorokautta ja tuhkamäärän ollessa enintään 5 %. Sakkaroosipitoisuudella huomattiin olevan vaikutusta yksittäisten metallien liukenemisiin. 14 vrk:n, 1 %:n tuhkapitoisuudella metallien liukeneminen oli kolmella eri sakkaroosipitoisuudella hyvin samansuuruiset. Yllättävää oli se, että hyviä tuloksia saavutettiin myös sakkaroosipitoisuuden ollessa 5 %. Syynä tähän voi olla mikrobin hanakampi sopeutumistarve vallitseviin olosuhteisiin käyttämällä tuhkan alkuaineita kasvuunsa ja tuottamalla liuottavia elementtejä tehokkaammin. 31 vuorokauden liuotuksessa havaittiin, että metallien liukeneminen on lähes yhtä hyvä kaikilla kolmella tuhkapitoisuudella (1, 3, 5 %).

Lentotuhkan bioliuotus on pääpiirteissään helppo hallita, sillä voimakkaita kemikaaleja ei tarvitse käyttää ja sieni on helppo mikrobi käsitellä ja kasvattaa. Homesien haisee voimakkaalle ja tuottaa kasvaessaan itiöitä ja biomassaa.

Sienen energian saannin tulee olla riittävä, jotta liuottavaa ainetta, orgaanisia happoja ja muita aineenvaihduntatuotteita syntyy tarpeeksi. Fermentointikokeiden perustella havaittiin, että myös lämpötilan on oltava riittävän korkea, vähintään 14 °C, että nuijahome kasvaa. Tuhkan laatu vaikuttaa olennaisesti tietyllä mikrobilla ja tietyissä olosuhteissa suoritettavan bioliuotuksen tehokkuuteen ja soveltuvuuteen. Yksi haaste bioliuotukselle onkin tuhkan laadun vaihtelu ja sen takia muutettavat prosessiparametrit bioliuotuksen olosuhteissa. Bioliuotuksessa käytettävä mikrobi tulee osata valita myös käyttökohteeseen sopivaksi, liuotettavan materiaalin laadun mukaan. (Tissari 2011.)

6.2 TUHKIEN LANNOITUSKÄYTTÖ KIVENNÄISMAILLA RAVINNETERÄSTETTYNÄ

Kivennäismaan metsiä lannoitetaan pääasiassa typpilannoitteilla. Typen sekaan voidaan lisätä muitakin ravinteita kuten fosforia ja booria. Varsinkin rehevät kivennäismaan metsät kärsivät usein boorin puutteesta. Turvemaiden tyypillisimmillä lannoituskohdeilla typpipitoisuudet ovat puuston kasvulle riittävät. Puuston kasvu kuitenkin hidastuu, jos turpeesta puuttuu muita ravinteita. Tämä näkyy myös erilaisina kasvuhäiriöinä. Kasvua ja puuston terveyttä parannetaan yleensä fosfori-, kalium- ja boori-pohjaisilla terveyslannoituksilla. Turvemaan lannoituksessa käytetään usein tuhkalannoitetta. Tuhkalannoitteiden käyttöä voitaisiin lisätä myös kivennäismaalla. Kivennäismaan tuhkalannoitusta tehdään tällä hetkellä vain muutamalla sadalla

hehtaarilla vuodessa. Levityspaikat ovat pääasiassa Pohjanmaalla ja Pohjois-Savossa (Riikilä 2019). Tällä hetkellä esimerkiksi valtion mailla ei tehdä kivennäismaan tuhkalannoituksia muualla kuin boorin puutoksesta kärsivillä kohteilla.

Puutuhkassa on luontaisesti runsaasti muun muassa fosforia ja kaliumia, mutta ei juurikaan typpeä (Huotari 2012, 6). Kivennäismaan metsissä kasvun pieneneminen johtuu pääosin typen puutteesta. Tuhka itsessään ei juuri lisää kivennäismaan puuston kasvua. Osassa tutkimuksista tuhka ei ole lisännyt metsän kasvua ollenkaan tai on jopa vähentänyt sitä (Jacobson 2003, Saarsalmi, Smolander, Kukkola & Arola 2010). Kasvulisäystä saadaan kuitenkin aikaiseksi rikastamalla tuhkalannoitetta typpellä (Saarsalmi, Smolander, Moilanen & Kukkola 2014). Esimerkiksi Ecolan® NITRO typpi-tuhkalannoite sisältää 4,7 % typpeä, 1,0 % fosforia, 2,8 % kaliumia, 0,06 % booria ja 12 % kalsiumia (Ecolan s.a). Sopivimpia kohteita typpellä rikastetun tuhkalannoitteen käytölle ovat puolukka-tyypin mäntymetsät, joiden humuskerros on luonnostaan hapan. Tällaisilla kohteilla puuston lisäkasvu lannoitteen vaikutusaikana voi olla jopa 10 m³/ha enemmän kuin pelkällä typpilannoitteella. (Riikilä 2019)

Tuhka voi parantaa puuston kykyä hyödyntää typpeä kasvussaan. Typpellä rikastettu tuhkalannoite lisää puuston kasvua jopa 20 vuoden ajan, kun tuhkamäärä on 2,5 tonnia hehtaarille. Tavallisen typpilannoitteen kasvulisäys kestää 7-10 vuotta. (Saarsalmi, Kukkola, Moilanen & Arola 2006) Tuhkalannoitus myös nostaa maaperän pH-arvoja, minkä seurauksena maaperän haitallisten metallien liukeneminen ja kulkeutuminen pienenevät. (Matilainen, Pisto, Rinnepelto & Kinnunen 2014, 32). Typpi-tuhka lannoite voi myös vähentää kivennäismaan metsien kasvuhäiriöitä, jotka johtuvat esimerkiksi ravinteiden epätasapainosta tai boorin puutteesta (Saarasalmi ym. 2006). Typpituhka on hieman kalliimpaa kuin tavallinen tuhka. Levitysmäärä on kuitenkin pienempi kuin tuhkalannoitteella, joten kokonaiskustannukset ovat samaa luokkaa. (Metsänhoitoyhdistys 2016.) Kivennäismaan kemiallisiin lannoitteisiin verrattuna typpi-tuhkalannoitteen hehtaariohtainen kustannus tulee noin 100 euroa kalliimmaksi (Mantsinen 2020). Lannoittaminen lentolevityksenä maksaa 400-500 euroa hehtaarille. Paras ajankohta typpi-tuhkalannoitukselle on muutama vuosi ensiharvennuksen jälkeen. (Riikilä 2019.)

Typpi-tuhkalannoitusta voidaan harkita myös metsissä, joista on kerätty hakkuutähteet. Hakkuutähteiden kerääminen harvennetuista metsistä voi joissain tapauksissa muuttaa humuskerroksen orgaanisen aineen ominaisuuksia pitkäaikaisesti. Esimerkiksi harvennetuissa kuusikoissa typen vapautuminen orgaanisesta aineesta voi hidastua (Smolander ym. 2008, 2010 ja 2013, Tamminen ym. 2014, 79 mukaan). Hakkuutähteiden kerääminen harvennetuista metsistä on todettu vähentävän metsien kasvua 4-5 % 10 vuoden seuranta-aikana (Helmisaari ym. 2011). Myös hakkuutähteiden kerääminen uudistusaloilta vaikuttaa puuston kasvuun, koska tulevasta taimikosta poistetaan ravinteita. Vaikutus on pienempi mäntytaimikoissa kuin kuusikoissa. Viljavissa kuusikoissa taimien pituuskasvu on voinut hidastua jopa kahden vuoden pituuskasvun verran kymmenessä vuodessa (Egnell & Lejon 1999). Kasvupaikalta poistuvia ravinteita voidaan korvata typpi-tuhkalannoitteella. Typpien lisätty tuhka

vähentää humuskerroksen happamuutta ja kalsium-, magnesium- ja kaliumpitoisuudet kasvavat (Saarsalmi ym. 2010).

Metsälannoitteissa käytetyn typen muoto on vaihdellut viime vuosikymmeninä ammoniumsulfaatin, urean ja ammoniumnitraatin välillä (Smolander 2018). Puutuhkan kanssa voitaisiin rakeistaa myös esimerkiksi metsäteollisuuden biolietettä tai yhdyskuntajätevesilietettä. Lietteet sisältävät runsaasti typpeä. Sopivilla suhteilla seoksesta saadaan aikaiseksi metsälannoitteeksi soveltuva typellä rikastettu tuhkalannoite. (Isännäinen & Huotari 1994, 70; Korpilahti 2003, 19.) Bioliete-tuhkaseosta ei kuitenkaan tällä hetkellä voida markkinoida metsätalousoikeuteen, koska siltä puuttuu lannoitevalmistelaimen mukainen tyyppinimi (Huotari 2012, 6). Biolietteiden käytön edistäminen olisi ensiarvoisen tärkeää. Lietteen käyttö typpi-tuhkalannoitteisiin edistäisi kiertotaloutta ja samalla voitaisiin hyödyntää eri tuotantolaitosten ylijäämätuotoksia yhdessä.

6.3 TUHKALANNOITUS KUNNOSTUSOJITUSKOYTEILLA

Tuhkan käytön eri vaihtoehtoja tarkasteltaessa metsänlannoitus on yksi perinteisistä käyttötavoista ja nykyisessä metsänhoidossa tämä on entistä perustellumpaa ottaen huomioon tuhkaista jalostetut uudet tuotteet sekä levitysmääräsuositusten muutokset aiempiin verrattuna. Lisäksi tarve lisätä hiilinielua sekä vähentää metsätalouden vesistöhaittoja asettaa paineita suosia kaikkia niitä keinoja, joilla näitä tavoitteita voidaan edistää. Kunnostusojituskohteet ovat tässä suhteessa yksi tärkeimmistä tavoista toteuttaa kiertotaloutta metsätaloudessa ja palauttaa ravinteet uudelleen kiertoon samalla metsien kasvua ja terveydentilaa parantaen.

Kunnostusojitus ja tuhkalannoitus turvemilla

Kunnostusojituksella tarkoitetaan oijtetun suon vanhojen kuivatusojien perkausta. Toimenpiteellä tavoitellaan vedenpinnan tason laskemista parantamalla ojaverkoston vedenkuljetuskykyä (Hökkä & Kojola 2017, 51), jotta ehkäistäisiin alueen uudelleen soistuminen ja siten puuston kasvun aleneminen. Ojia kunnostetaan Suomessa noin 50 000 hehtaarilla vuodessa (Hökkä & Hynynen 2019). Kunnostusojituksen tarpeellisuuden arviointi ei ole aivan yksiselitteistä ja sitä on aina syytä tarkastella huolellisesti niin taloudellisesta kuin vesiensuojelullisesta näkökulmasta. Oikein toteutettuna ja ajoitettuna ojitus on kannattava investointi metsänomistajalle vain, kun puuston kasvun lisäys kattaa kaivukustannukset. Merkittävin ympäristöllinen tekijä, jota kunnostusojituksessa on hyvä tarkastella, on ojien kaivamisesta aiheutuva kiintoainepäästö, jolla on merkittäviä vaikutuksia valumavesien laatuun. (Sarkkola, Hökkä, Jalkanen, Koivusalo & Nieminen 2013, 159.)

Valtakunnan metsien inventoinnissa kunnostusojitustarve on perinteisesti pohjautunut ojien kuivatustekniseen kuntoon. Viimeisimmät tutkimukset kuitenkin osoittavat, ettei ojituksia ole aina syytä tehdä edes kohteilla, joilla ojaston kunto on huomattavasti heikentynyt. Tähän on syynä puuston haihdunnan merkitys vedenpinnan tason säätelyssä. Metlan ja Helsingin yliopiston tekemässä tutkimuksessa

saatiin selville, että eniten vedenpinnan syvyyteen vaikuttivat puuston määrä ja sääolosuhteet. (Sarkkola ym. 2013, 159-161). Pohjoisessa haihdunta on vähäisempää ja puuston kasvu hitaampaa kuin etelässä (Hökkä, Nieminen, Lauren, Launiainen & Sarkkola 2013). Esimerkkilaskelmien mukaan kymmenen kuutiometrin lisäys puuston tilavuudessa laskee vedenpintaa keskimäärin yhden senttimetrin. Tähän vaikuttavat mm. puuston kunto ja maantieteelliset erot. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että vaikka ojasto olisi huonossa kunnossa, niin puuston haihdutuspotentiaali on riittävä pitämään vedenpintaa alhaalla, kun normaalikuntoista puustoa on Etelä-Suomessa 120 m³/ha ja Pohjois-Suomessa 150 m³/ha. (Sarkkola ym. 2013, 161.) Tällaisessa tapauksessa puusto riittää kuivattamaan aluetta kasvukauden aikana eikä kunnostusojitusta ei ole tarpeen tehdä.

Turvemaiden lannoituksella on tarkoitus parantaa suopuuston ravinnetaloutta ja näin mahdollistaa puuston kasvun lisääntyminen. Tuhkalannoituksella parannetaan puuston ravinnetilaa pitkäaikaisesti (Hökkä & Hytönen 2019). Lannoitusvaikutus on hyvä etenkin runsastyyppisillä ojitetuilla soilla, joilla kaliumin ja fosforin puute rajoittavat puuston kasvua. Lannoitteena puutuhka on parempi kuin turvetuhka, sillä turvetuhka sisältää niukasti kaliumia, josta tavallisesti on puute turvemaametsissä. Fosforinpuutos korjaantuu keskimäärin 2-5 vuoden kuluessa lannoituksesta. Lannoituksen jälkeen puuston ravinnetila on säilynyt turvemailla hyvänä noin 20-50 vuotta. (Huotari 2012, 22-23.)

Viime vuosina on kiinnostuttu siitä, voidaanko turvemaita lannoittamalla saada puustossa aikaan kasvun lisäys ja sitä kautta suurempaa haihduntaa, minkä seurauksena ojen kunnostamisen tarve vähenisi. Tutkimuksissa on selvitetty, että puuston kasvuun tuhkalannoituksella on kohtalaisen hidaskasvu, mutta kuitenkin voimakas ja pitkäaikainen vaikutus (Huotari 2012, 23). Turpeen typpipitoisuudella on merkittävä vaikutus kasvun lisäykseen sekä ajallisesti että määrällisesti. Runsastyyppisillä alueilla puuston kasvu on ajallisesti lisääntynyt keskimäärin 2-3 vuoden ja niukkatyyppisillä paikoilla noin 7-8 vuoden kuluttua lannoituksesta. Kasvun määrälliseen lisäykseen turpeen typpipitoisuudella on vaikutusta siten, että runsaasti typpeä sisältävillä kasvupaikoilla kasvun lisäys on ollut 2-6 m³/ha/v ja niukkatyyppisillä paikoilla 1-3 m³/ha/v kiertoajan kuluessa. (Huotari 2012, 22-23.)

Tuhkalannoitus lisää neulasten kokoa ja määrää, minkä seurauksena suurempi neulamassa pidättää sadetta ja haihduttaa enemmän vettä. Tämä näkyy alentuneena vedenpinnan tasona jo muutaman vuoden kuluessa lannoituksesta. Tästä seuraa positiivinen kierre, jossa vedenpinnan lasku parantaa edelleen puuston kasvua ja kuivatus tehostuu entisestään. (Hökkä & Hynynen 2019.) Puutuhkalannoituksella parannetaan sekä puuston ravinnetilaa että kasvua vähintään 20 vuoden ajan (Tapio 2008, 26), tuoreimpien tutkimusten mukaan ainakin 30 vuotta (Hökkä & Hynynen 2019).

Merkittävää on verrata tuhkalannoituksella saatavaa puuston kasvun lisäystä kunnostusojituksen tuottamaan kasvun lisäykseen. Ojituksen kasvun lisäys on keskimäärin huomattavasti vähäisempi mitä lannoituksella saatu: uusimpien tutkimusten mukaan vain 0,2-1,5 m³/ha/v, enemmän pohjoisessa ja paksaturpeisilla soilla kuin etelässä ja ohutturpeisilla soilla (Hökkä & Kojola 2017, 51). Kunnostusojituksella

saavutettu kasvun lisäys on vieläkin vähäisempi, jos puustossa on epätasapainoa ravinteiden osalta, etenkin typen, kaliumin ja fosforin suhteen. Ojituksen vaikutus kestää 15-20 vuotta. (Hökkä & Hytönen 2019, 3.)

Kunnostusojitukseen liittyy ympäristövaikutuksia, sillä ojien kaivu on metsätalouden merkittävin kiintoainekuormituksen lähde (Hökkä & Hytönen 2019, 2); lähes 100 % kaikesta kiintoainekuormasta (Hökkä ym. 2013, 14). Mikäli ojat ulottuvat turpeen alla olevaan hienojakoiseen kivennäismaahan, se lisää myös ravinnepestöjä (Hökkä & Hytönen 2017, 52). Runsaasti soita sisältävillä alueilla kuormitushaitat on katsottu niin merkittäviksi, että on alettu keskustella ojitusten vähentämisestä ja jopa niiden lopettamisesta (Rättilä 2019). Tuhkalannoituksen vesistövaikutukset ovat sen sijaan vähäisiä eikä kiintoainepäästöjä synny lainkaan.

On tutkittu, että vesistöjä rehevöittävän fosforin sekä tuhkan sisältämien haitallisten raskasmetallien huuhtoutuminen lannoituskohteelta on hyvin vähäistä, jos tuhkaa ei lannoituksen yhteydessä pääse suoraan ojiin tai vesistöihin. Myöskään typen huuhtoutumista ei tapahdu. Suurimmat riskit liittyvät talvilannoituskohteisiin, mutta riittävillä suojavyöhykkeillä myöskään talvilannoitus ei lisää merkittävästi fosforin huuhtoumia. (Huotari 2012, 38.)

Tuhkan levittäminen turvemaille voidaan toteuttaa joko maakoneella tai helikopterilla. Maakoneella levitettäessä metsän pohjan pitää olla kantava ja koneelle on oltava kulku-urat (Huotari 2012, 43). Tämä tarkoittaa käytännössä lannoituksen toteuttamista hakkuun jälkeen ja talviaikaan maan ollessa jäässä. Helikopterilevitys on vapaammin toteutettavissa ympäri vuoden ja myös kohteilla, joita ei ole vielä harvennettu (Huotari 2012, 44). Lentolevitys on tehokkaampaa ja samalla myös kalliimpaa kuin maakonelevitys, mutta se on hyvä vaihtoehto kivisissä tai soiden ja vesistöjen rikkomissa maastoissa (Huotari 2010, 44). Vesiensuojelu huomioidaan tuhkan maa-levityksessä jättämällä purojen varsille 15-20 metrin ja muiden vesistöjen varsille 50 metrin lannoittamaton suojavyöhyke estämään ravinteiden huuhtoutumista vesiin. Lentolevityksessä suojavyöhyke on 50 metriä kaikkiin vesistöihin ja lisäksi ojien varsille jätetään 5 metrin lannoittamaton kaista. (Tapio 2008, 24.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että tuhkalannoituksella voidaan vähentää kunnostusojituksen tarvetta. Lannoitus lisää suopuustojen kasvua, tilavuutta ja haihdutuskykyä ja siten lannoituksella on tietyissä kohteissa mahdollista saada sama tai suurempi kuivatusvaikutus kuin ojien perkauksella (Hökkä & Hynynen 2019). Lannoituksen aiheuttama puuston kasvureaktio on isompi ja pitkäaikaisempi kuin ojituksella saatava kasvun lisäys. Tuhkalannoituksen hyviä puolia on myös se, että sillä saadaan samalla hoidettua mahdollista ravinne-epätasapainoa, mitä usein esiintyy suopuustossa. Ympäristövaikutukset ovat huomattavasti vähäisempiä kunnostusojitukseen verrattuna. Ojituksen suurin haittatekijä on kaivun seurauksena syntyvä kiintoainekuormitus valumavesiin, mikä taasen tuhkalannoittamalla voidaan välttää. Näin päästäisiin myös ympäristön kannalta parhaaseen lopputulokseen.

6.4 TUHKAN KÄYTTÖ HAPPAMILLA SULFAATTIMAILLA

Euroopan suurimmat happamien sulfaattimaiden esiintymät sijaitsevat Suomessa Perämeren rannikolla ja entisen Litorinameren ylimmän rantaviivan alapuolella (Rosendahl & Wikman 2009) ja vaikka niiden haitallisista vaikutuksista on tiedetty jo 1960 – luvulta lähtien (GTK 2009) on niiden järjestelmällinen kartoitus aloitettu vasta vuonna 2009 (Edèn ym. 2012, 29). Suomessa noin 230 000 hehtaaria metsätalouden maata sijaitsee happamilla sulfaattimaa-aloilla (Joensuu, 2019). Vuonna 2011 Ympäristöministeriö sekä Maa- ja metsätalousministeriö hyväksyivät strategian happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämiseksi. Strategian tavoitteena on edistää ja tukea vesienhoitosuunnitelmien toteuttamista sekä vähentää happamista sulfaattimaista aiheutuvaa kuormitusta vuoteen 2020 mennessä (Keskisarja, Salminen & Westberg 2018, 7).

Happamia sulfaattimaita esiintyy pääasiassa hienojakoisella maaperällä, joita ovat lieju, savi, hiesu, hieno hieta ja hieta. Happamia sulfaattimaita esiintyy pääasiassa hienojakoisella maaperällä, joita ovat lieju, savi, hiesu, hieno hieta ja hieta. Geologian tutkimuslaitoksen (myöhemmin GTK) tutkimuksien perusteella happamia sulfaattimaita esiintyy pienemmissä määrin myös karkeammissa maalajeissa, kuten karkeassa hiedassa, hienossa hiekassa ja hiekassa. Tämän lisäksi happamoitunutta maaperää on satunnaisesti löydetty moreenista sekä turpeesta. Kahden viimeisen maalajin happamuus on GTK:n tutkimuksien perusteella lähtöisin rikki- ja metallipitoisesta mustaliuskeesta. Mustaliuskeesta happamuutensa saavia maalajeja esiintyy myös sisämaassa (Keskisarja ym. 2018, 15)

Luonnontilaisena hapan sulfaattimaa on veden kyllästämä ja sen pH-arvo on lähes neutraali, mutta esimerkiksi maanmuokkauksen ja kunnostusojituksen yhteydessä tämä potentiaalinen hapan sulfaattimaa joutuu kosketuksiin ilman kanssa, jolloin siitä kehittyä todellinen hapan sulfaattimaa. Hapettumisen myötä maaperän sulfidirikki muuttuu rikkihapoksi (sulfaatti), joka aiheuttaa voimakasta maaperän pH-arvon laskua eli happamoitumista sekä metallien liukenemista maaperään (Finér, Hökkä, Ihalainen & Nieminen 2016, 6, 10)

Tuhkan käyttö maanmuokkauksessa sekä kunnostusojituksessa

Happamia huuhtoumia on kunnostusojitusalueilla pyritty hillitsemään ojitusteknisillä vaihtoehdoilla kuten ojasyvyydellä, -tiheydellä, erilaisilla patorakennelmilla sekä kaivukatkoilla. Maanmuokkausaloilla, joilla esiintyy happamia sulfaattimaita, suositellaan kuormitusriskien arvioimista samalla tavalla kuin kunnostusojituskohteilla (Finér ym. 2016, 30-31) Edellä kuvatut menetelmät perustuvat sulfidihapettumisen vähentämiseen sekä happaman veden käsittelyyn (Ihme, Karppinen, Nokela & Riihimäki 2016, 10).

Valuma-alueen kalkitus ja kaivumassojen neutralointi taas perustuvat maaperän happamuuden neutralointiin (Ihme ym. 2016, 10). Tuhkalla on hyvin emäksisenä happamuutta neutraloiva vaikutus ja sen on tutkittu alentavan maaperän happamuutta jopa 2-3 yksikköä, samalla hidastaen maaperän raskasmetallien liukenevuutta.

Tuhkan käyttöä maaperän happamoitumisen neutraloimisessa on tutkittu varsinkin 2000-luvulla enenevässä määrin, vaikka kenttätutkimukset edelleenkin painottuvat erittäin vahvasti maatalouteen sekä käytöstä poistuneisiin turvetuotantoalueisiin (Huotari 2012, 5; Keskisarja ym. 2018, 42-43). Suomessa metsätalouden toimenpiteisiin liittyviä kenttätutkimuksia tuhkan vaikutuksista maaperän happamuuteen on vuosien saatossa tehty muutamia.

90-luvun loppupuolella Metsäteho suoritti Lammin Evolla kenttätutkimuksen, jossa seurattiin tuhkalannoituksen vaikutusta turvemaalta ja kivennäismaalta tuleviin valumavesiin. Tutkimuskohteille levitettiin niin sanottua itsekovetettua tuhkaa keskimäärin 6 400 kg hehtaaria kohden ja kolme tutkimusaluetta muodostivat yhteensä noin 14 hehtaarin alueen. Yksi tarkastelun alainen asia oli valumavesien pH-arvon muuttuminen. Tutkimustulosten perusteella tuhkalannoituksen jälkeisenä vuonna valumavesien pH-arvo kasvoi. Sen sijaan kontrollipurossa valumavesien pH-arvo laski. Tosin tutkimustulokset myös toteavat, että kyseisessä tutkimuksessa käytetyillä tuhkamäärillä ei pystytty selkeästi vaikuttamaan alapuolisten vesistöjen pH-arvoon. (Arvola, Ollila & Tulonen 2000, 4, 7- 9, 12-15, 36.)

Vuosina 2010–2011 tutkittiin kunnostusojitusalueiden tuhkalannoitusten vaikutusta Oulun Sanginjoen valumavesien happamuuteen. Rakeistettua tuhkaa levitettiin koealueelle 5 000 kg hehtaaria kohden ja koko koealueen koko oli noin 14 hehtaaria. Näytepisteistä kerättyjen vesinäytteiden perusteella veden pH:n vaihteluväli oli 4,2–6,0 ja tuhkalannoitetulta alueelta tulevan valumaveden pH oli 0,2–1,3 yksikköä suurempi kuin lannoittamattomalta alueelta tuleva valumavesi. Vaikka kyseisen kenttätutkimuksen tulokset ovat vain suuntaa antavia, tukevat ne aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia tuhkan vaikutuksista maaperään. (Heikkinen ym. 2012, 108-110; Hynönen, Makkonen & Moilanen 2008, 16; Kukkola & Saarsalmi 2009, 64-65.)

Luonnonmukainen valuma- ja maavesien käsittelymenetelmä happamien sulfaattimaiden metsänuudistamisaloilla, HaSuMetsä –hanke on vuonna 2018 alkanut pilotti-hanke, jonka tavoitteena on selvittää vähentääkö tuhka metsänuudistamisen maanmuokkaukseen liittyvää valumavesien happamuutta riittävästi ja oikea aikaisesti, kun tuhka levitetään välittömästi maanmuokkauksen yhteydessä. Hankkeessa testataan ja luodaan käytännön tasolla tuhkaan perustuva vesiensuojelumenetelmä, jota pystyy soveltamaan sekä metsätaloudessa kuin käytöstä poistetuilla turvetuotanto-alueillakin. (Härkönen 2019.) Ensimmäisiä tutkimustuloksia voi odottaa vuonna 2020.

6.5 TUHKAN KÄYTTÖ MAATALOUDESSA

Rakeistettu tuhka sopisi Pohjois-Suomen usein turvepohjaisille pelloille sekä kalkitusvaikutuksen että kaliumin imeytymisen hidastumista edistävän vaikutuksensa vuoksi. Pohjoisessa viljellään pääasiassa nurmikasveja, jotka tarvitsevat paljon kaliumia ja maaperässä on luonnostaan sitä huonosti. Tällä hetkellä ainoa saatavilla oleva pitkävaikutteinen kaliumlannoite on Siilinjärven kaivoksen sivutuotteena tuleva biotiitti. Sen käyttöä rajoittaa pohjoisessa kuitenkin rahdin kalleus. Tuhkan käytön mahdollisuudet maataloudessa riippuvat lupakäytäntöjen täyttämistä ja pellolle levittämisen

tekniikasta, joka nykyisellään suosisi enemmän vähemmän tutkittua pölytuhkaa. (Hannukkala, 2020.)

Ruokaviraston luomulannoiteluettelossa on mainittu muutamien yritysten tuottaman tuhkan soveltuminen maanparannusaineeksi luomutuotannossa. Nämä eivät kuitenkaan ole ainoita tuhkamerkkejä, vaan muitakin ehdot täyttäviä tuotteita voi käyttää. Soveltuvuus luomuun arvioidaan tuotteen koostumuksen perusteella. (Ruokavirasto 2020b.) Etenkin puuperäisen tuhkan käyttöä rajoittaa yleensä sen luontainen raskasmetallipitoisuus. Syntyvän tuhkan raskasmetallipitoisuutta voisi kuitenkin vähentää huomattavasti polttotekniikalla. Eräs polttotekninen keino olisi leijupetihiekan osittainen korvaaminen dolomiitilla, joka mahdollistaisi tuhkan haitta-ainepitoisuuden alenemisen alle pelto- ja luomuviljelyyn määritellyn tason. (Ruotanen 2018.)

6.6 TUHKAN UUDET KÄYTTÖKOHTEET MAANRAKENTAMISESSA

Vuosittain Suomessa käytetään noin 100 miljoonaa tonnia kiviaineksia, joista osa voidaan korvata tuhkillä (Joensuu 2019). Tuhkaa nykyisellään käytetään maarakentamisessa monipuolisesti. Täyttötöissä ja kerrosrakenteissa tuhkaa ja etenkin lentotuhkaa voidaan käyttää sellaisenaan massiivirakenteena tai seosmateriaalina teollisuuden sivutuotteiden kanssa. Tuhkaa hyödyntämällä pystytään vähentämään kiviainesten käyttöä. Etenkin tiheästi asutuilla alueilla tämä on merkittävä hyöty, koska kiviaineksia on todennäköisesti hankittava kaukaa rakennuskohteesta. (Kiviniemi ym. 2012, 6.) Tuhkaa hyödynnetään mm. väylärakentamisessa, teollisuus- ja varasto rakennuksien pohjissa, valleissa ja kenttärakenteissa (Ympäristöministeriö 2019b, 5).

Uusi MARA-asetus (VNa 843/2017) on tullut voimaan 1.1.2018, uusi asetus helpottaa jätteiden käyttöä maarakentamisessa sekä tukee luonnonvarojen kestäväää käyttöä ja kiertotaloutta. Asetus määrittelee edellytykset, joiden täytyessä ympäristölupaa (ympäristönsuojelulaki 527/2014) ei tarvita jätteen käytössä maarakentamiseen. (Ympäristöministeriö 2019b, 2.) Tämä tuo uusia mahdollisuuksia käyttää tuhkaa helpottamalla tuhkan käyttöä metsä- ja yksityisteiden perusparannuksissa ja uusien teiden rakentamisessa.

Tuhkan käytöstä metsätierakennuksen materiaalina on saatu viime aikoina erittäin hyviä kokemuksia. Metsätierakenteissa tuhkaa voidaan käyttää sellaisenaan tiivistettynä 30 – 50 cm kerroksena 10 cm pintamurskekerroksen alla. (Joensuu 2019.) Tuhkan käyttöä metsäteiden pintarakenteissa perusparannuksen yhteydessä on tutkinut TuhkaTie -hanke, josta on saatu hyviä tuloksia. Hanke toteutettiin vuosien 2011-2014 aikana. Metsäteiden rakentaminen ja kunnostus pyritään yleensä tekemään mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tavoitteena kuitenkin on, että tie saadaan kestäväään 76 tonnin puutavara-autot.

Käytettäessä peittämätöntä tuhka-murske -seosta tämä vaatimus pystytään saavuttamaan. Korvattaessa mursketta tuhkillä saavutetaan tien perusparannuksen kustannuksissa 12-18 prosentin säästö. Puolet murskeesta voidaan korvata käyttämällä noin 15-20 painoprosenttia tuhkaa. Kerrosvahvuus olisi suosituksena sama kuin pelkkää mursketta käytettäessä. Teiden seitsemän vuoden seurantajaksolla ei ympäristöhaittoja

ole havaittu, vuosille 2018-2020 ajoittuva ARVO-TUHKA -hanke jatkaa teiden ympäristöhaittojen seurantaa. (Hyypiäinen 2018, 25–26.)

Rakeistetun tuhkan käyttöä maarakentamisessa on myös tutkittu. Oulun kaupungin Resurssiviisas infra -kehittämishanke on tutkinut rakeistetun tuhkan käyttöä kaupunkialueella katu- ja rakennussuunnitelman toteutuksessa. Kohteilla rakeistettua tuhkaa käytettiin suodatinkerroksena korvaamassa suodatinhiekkaa. Rakeistetun tuhkan ja pohjamaan väliin asennettiin suodatinkangas ja rakeistettua tuhkaa levitettiin 400 mm kerros. Kokemukset olivat pääosin hyviä, suodatinkerroksen kantavuus oli 68,7 Mpa, mikä oli odotettua parempi. Optimikosteudessa rakeistettu tuhka oli helppo tiivistää. Sateinen sää aiheutti tuhkan liettymistä ja voimakkaan sateen ajaksi rakentaminen jouduttiin keskeyttämään. (Holappa 2017, 5, 15–16, 25.)

Tuhkan käyttö maarakentamisessa tulee todennäköisesti lisääntymään uuden MARA-asetuksen tuomien mahdollisuuksien vuoksi. Tuhkan käyttö on uuden asetuksen myötä helpompaa metsä- ja yksityisteiden rakentamisessa ja hankkeista saadut tulokset ovat kannustavia. Lisää tutkimusta ja kokemuseräistä tietoa kuitenkin tarvitaan. Kaupungistuminen voi myös lisätä tuhkan käyttöä maarakentamisessa, murskeen pidemmät kuljetusmatkat tulevat lisäämään kierrätysmateriaalien käyttöä kaupunki-infran rakentamisessa.

6.7 TUHKALANNOITUS HIILENSIDONNAN NÄKÖKULMASTA

Ilmastonmuutoksen ehkäisyssä hiilinielujen merkitys on kasvanut. Suomen metsät ovat tärkeä hiilinielu ja vuotuisen metsänkasvun arvioidaan kompensoivan n. 30 - 60 % koko Suomen hiilidioksidipäästöistä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 82). Tuhkalannoituksella on pitkäaikaisia positiivisia vaikutuksia metsän kasvuun (Matilainen 2017). Metsien ja muun biomassan kasvun edistäminen esimerkiksi lannoituksella on siis tärkeä keino ilmastonmuutoksen hillinnässä, mutta tuhkalannoituksen rooli hiilensidonnassa ei ole yksiselitteinen. Vaikutus riippuu mm. siitä, onko lannoituksen kohteena turve- vai kivennäismaa.

Tuhkalannoituksen on todettu joissakin tapauksissa lisäävän ns. maahengitystä, jolla tarkoitetaan hiilidioksidipäästöjen vapautumista ilmakehään esimerkiksi juurten kasvuun ja ylläpitohengityksen sekä kuolleen orgaanisen aineen hajoamisen kautta (Hiilipuu 2019). Maaperästä vapautuvia kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidin (CO₂) lisäksi metaani (CH₄) ja dityppioksidi (N₂O) (Huotari 2012).

Tutkimuksia tuhkalannoituksen vaikutuksista kasvihuonekaasujen päästöihin on vähän ja ne ovat osittain ristiriitaisia. Tutkimukset eroavat useiden tekijöiden suhteen: mm. millaista elinympäristöä on tutkittu, miten paljon tuhkalannoitusta on käytetty, mihin aikaan vuodesta lannoitus on tehty ja mitä tutkimuksessa oikeastaan on mitattu. Muutamia selkeitä tuloksia on kuitenkin saatu. Esimerkiksi lannoituksesta kuluvalle ajalle on vaikutusta siten, että lyhyellä aikavälillä (< 5 vuotta) tuhkalannoitus ei lisää hiilidioksidin päästöjä turvemailla, mutta pitkällä aikavälillä (10 - 50 vuotta) näin tapahtuu. Erityisesti orgaanisen aineen hajoamisesta syntyvä maahengitys

vaikuttaa lisääntyvän ja hiilidioksidipäästöjen taso korreloi positiivisesti maan pH-arvon kanssa. (Huotari ym. 2015, 232.)

Tuhkalannoituksen hiilidioksidipäästöjä lisäävä vaikutus on suurin erityisesti typpirikkailla turvemaileda. Sen sijaan tuhkalannoituksella ei ole turvemaileda merkittäviä vaikutuksia dityppioksidin päästöihin ja metaanipäästöjä tuhkalannoitus jopa vähentää. (Huotari 2012, 16 - 17.)

Kivennäismailla tuhkalannoituksen vaikutus hiilidioksidipäästöihin riippuu huomattavasti siitä, millainen on maan ravinnepitoisuus ja happamuustaso. Maahengitys ei välttämättä lisäännny, jos nämä tekijät eivät ennestään rajoita hajoamisprosessia. Poikkeuksena ovat havupuumetsät, joissa vähäinen hiilidioksidipäästöjen lisääntyminen on mahdollista. Asian mittaaminen on kuitenkin vaikeaa. (Huotari ym. 2015, 232.)

Matilainen (2017, 47) on todennut, että kangasmetsissä tuhkalannoitus lisää maahengitystä erityisesti lämpimillä alueilla, kun maaperässä on enemmän orgaanista ainesta. Sama vaikutus on silloin, kun maaperässä ei ole typeä. Lisäksi runsas tuhkan käyttö nostaa maanperän pH-tasoa, mikä edelleen lisää maahengitystä. Suosituksena Matilainen (2017, 47) toteaa, että ”Kohtuullinen määrä rakeistettua tuhkaa typpisällä viieleän ilmaston kuivahkoihin kangasmetsiin lisää maahengitystä vähiten, ja samalla lisää myös puuston kasvua, joka kompensoi hiilidioksidipäästöä”. (Matilainen 2017, 46 - 48.) Typpirikkailla kivennäismailla tuhkalannoituksen ei ole havaittu lisäävän typpidioksi- tai metaanipäästöjä. Sen sijaan metaanin sidonta voi jopa lisääntyä pitkällä aikavälillä. (Huotari ym. 2015, 232.)

Tutkimukset antavat viitteitä, että tuhkalannoituksen avulla saatu puuston kasvunlisäys riittää kompensoimaan mahdollisia kasvihuonekaasujen päästöjä erityisesti pitkällä aikavälillä (Huotari 2012, 46; Huotari ym. 2015, 226 - 240; Matilainen 2017, 77). Yleisesti ottaen metsänlannoitus on hiilensidontan kannalta kannattava vaihtoehto (Vaara ym. 2018, 30). Tutkimustietoa tarvitaan kuitenkin lisää, jotta voidaan tarkemmin selvittää tarkemmin metsien hiilitasetta ja tuhkalannoituksen vaikutuksia hiilensidontaan. Luonnonvarakeskuksella on käynnissä useita metsätalouteen ja maatalouteen liittyviä tutkimusprojekteja asian tiimoilta (Luke 2019). Taulukossa 4 on esitetty joitakin esimerkkejä hiilensidontaan ja tuhkaan liittyvistä hankkeista, jotka olivat käynnissä syksyllä 2019.

Taulukko 4. Esimerkkejä hiilensidontaan ja tuhkaan liittyvistä hankkeista syksyllä 2019. Lähteet luke 2019 ja VTT

Hankkeen nimi	Lyhenne	Organisaatio	Kesto
PPP: Metsien hiilensidonta, hiilivarastot ja niiden kehitys	PPP-hiili	LUKE	26.3.19 - 31.12.19
Puustobiomassan hiilivarasto maankäytön muutosalueille	Puubiomassa	LUKE	2.1.19 - 31.12.19
Hiilen kierron dynamiikka hieskoivuvaltaisilla turvemaidella	CarBe	LUKE	1.3.19 - 29.2.19
Hiilimetsätalous osana tulevaisuuden ilmatoratkaisu		VTT	1.5.19 - 31.10.21
Soiden monimuotoisuus ja hiilinielut PPP		LUKE	1.6.19 - 31.5.22
Haasteelliset polttoaineet energiatuotannossa		VTT	
Jätteenpolttilaitosten tuhkien talteenotto		Itä-Suomen yliopisto UEF	
Black Carbon Footprint	BC Footprint	Tampereen yliopisto, VTT ym.	2019 - 2022
Hiilikädenjälki - Carbon handprint	Handprint	VTT ja LUT	2018 - 2020

6.8 TUHKAN KÄYTTÖ TURVESOIDEN POHJEN JA VASTAAVIEN ALUEIDEN METSITTÄMISESSÄ

Turvetuotantoalueita poistuu vuosittain merkittävä määrä turvetuotannon loppuessa. Turvetuotannon jälkeen entisestä kitu- tai joutomaasta voi avautua uusia mahdollisuuksia alueen käytön suhteen. Turvetuottaja vastaa jälkihoidosta ympäristöluvan mukaisesti ja maanomistaja jälkikäytöstä. Jälkikäytön pääasiallisia vaihtoehtoja ovat metsätalous, peltoviljely, vesittäminen ja soistaminen. (Salo & Savolainen 2008.) Vuosittain siirtyy uuteen maankäyttömuotoon noin 2000-3000 hehtaaria suonpohjia. Alueista 75 prosenttia siirtyy metsätaloukseen. Turvetuotannon pinta-alaa on tällä hetkellä noin 60 000 hehtaaria. (Bioenergia 2019.)

Suomen kokonaisviljelyalasta noin 10 % on turvemaidella. Turvemaiden viljely rasittaa ilmastoa huomattavasti, sillä turpeen hajoamisesta syntyy hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöjä. Erityisesti typpioksiduuli on ilmastolle erittäin haitallinen, sillä se on noin 300 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi. Noin 14 prosenttia Suomen kaikista kasvihuonepäästöistä syntyy turvepeltojen viljelystä. Yksi keino vähentää turvepeltojen ilmastovaikutuksia on pienentää pinta-alaa esimerkiksi metsittämällä alue. (Berninger, Kekkonen & Lehtonen 2019.) Suomen hallituksen linjauksena on edistää ruuantuotantoon soveltumattomien peltojen metsittämistä yhtenä keinona maatalouden ilmastopäästöjen vähentämiseksi (Valtioneuvosto 2019, 120–121).

Suopeltojen metsittämisellä on merkittävä vaikutus hiilidioksidipäästöihin, koska maanviljelyksen aikana tehdyt toimenpiteet, jotka nopeuttavat turpeen hajoamista

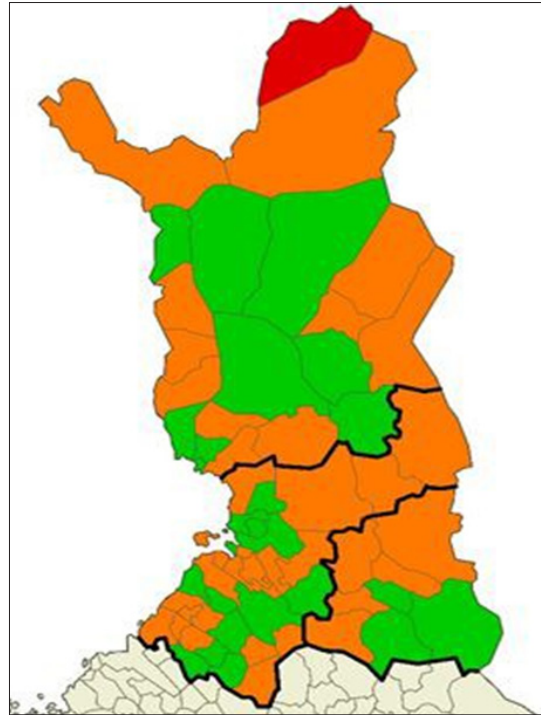
loppuvat. Suopellot ja suopohjat yleisesti lannoitetaan ja muokataan metsityksen yhteydessä. Toimenpiteet lisäävät kasvillisuutta, joka kuljettaa tuoretta hiiltä turpeeseen. Nämä muutokset yhdessä todennäköisesti lisäävät hiilidioksidipäästöjä maan mikrobiologisen toiminnan ja hengityksen lisääntyessä. Suotuisissa olosuhteissa metsän kasvatusvaiheessa tapahtuva hiilensidonta kuitenkin kompensoi päästöt ja alueet muuttuvat hiilinieluiksi. (Maa- ja metsätalousministeriö 2007, 36.)

Nykyinen ilmapiiri ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi tuo myös mahdollisuuksia lisätä tuhkan käyttöä lannoitteena suopeltoilla ja suopohjilla. Suopeltojen metsittäminen voi tulevaisuudessa lisääntyä ja maanomistajia voidaan kannustaa muuttamaan suopeltoja hiilinieluiksi. Turvetuotantoalueiden pohjien metsittämisessä on myös mahdollisuus lisätä tuhkan käyttöä. Turpeen polttokäyttö näyttäisi vähenevän nopeasti ja uusista käyttömuodosta huolimatta turpeen kokonaiskäyttö todennäköisesti supistuu, tämän myötä myös turpeen tuotantoalat tulevat vähenemään. Tämä osittain vie pohjaa pois tuhkan käytön lisäämisestä suopohjilla. Tulevaisuutta turpeen käytön osalta on kuitenkin vaikea ennustaa.

7. Kysely tuhkan tuottajille

Lapin ammattikorkeakoulun YAMK -opiskelijat toteuttivat vuodenvaihteessa 2019 - 2020 kyselyn tuhkantuottajille Lapin, Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun maakunnissa. Projektissa kartoitettiin syntyvien tuhkien määriä ja selvitettiin hyötykäytön mahdollisuuksia. Aluksi selvitettiin tuhkantuottajat eli lämpö- ja energialaitokset kunnittain. Löytyneille yhteyshenkilöille lähetettiin sähköpostitse kysely, yhteensä 89 kappaletta. Kuviossa 2 esitetään maakunnittain kunnat, joita lähestyttiin ja ne kunnat, joista saatiin vastauksia. Kyselyssä tiedusteltiin tuhkien määrä- ja laatu-tietoja sekä sitä, miten tuhkien käsittely, hyöty- ja loppukäyttö tai varastointi on järjestetty ja mitä kuljetustarpeita ja kustannuksia tähän on liittynyt.

Vastauksia jouduttiin kyselemään myös puhelimitse, sillä vastausmäärä jäi pieneksi. Vastausprosentit olivat Lapissa 35,7 %, Pohjois-Pohjanmaalla 18,7 % ja Kainuussa 23,1 %. Tämä tarkoittaa sitä, että kyselyn tulokset ovat lähinnä suuntaa antavia. Toisaalta juuri isoilta tuhkantuottajilta saatiin vastauksia, jolloin voidaan arvioida, että määrällisesti kysely kattoi suuren osan Pohjois-Suomessa syntyvästä tuhkasta.



KUVIO 2. Kyselyvastaukset maakunnittain. Kuviossa vihreällä kuntakohtaisesti saadut vastaukset, oranssilla kunnat, joista ei saatu vastausta, punaisella kunnat, joita ei lähestytty

8. Kyselyn tulokset

Tässä esitetyt tulokset perustuvat Lapin ammattikorkeakoulussa vuonna 2019 toteutettuun tuhkan hyötykäyttöä koskevaan kyselyyn (Lapin AMK, tuhkien hyötykäyttökysely, 2019). Kyselyn mukaan Lapissa, Kainuussa ja Pohjois-Pohjanmaalla syntyi tuhkaa noin 80 000 tonnia vuonna 2018. Määrästä hyödynnettiin noin 60 500 tonnia, varastoitui tai loppusijoitettiin (kaatopaikalle) noin 9700 tonnia. Hyödyntämiskelpoista tuhkaa jäi tarjolle noin 9600 tonnia, josta valtaosa ilmoitettiin maarakentamiseen kelpolliseksi. (Taulukko 5)

Taulukko 5. Tuhkien kokonaismäärä, hyödynnettyjen tuhkien kokonaismäärä, MARA- ja lannoituskäyttöön tarjolla oleva tuhkapotentiaali sekä varastoitujen ja loppusijoitettujen tuhkien kokonaismäärä vuonna 2018 Lapin, Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun maakunnissa (tonnia)

Maakunta	Määrä	Hyödyntäminen	Varastointi/ loppusijoitus	Hyödyntämispotentiaali MARA	Lannoitus
Lappi	38 173	26 784	1 957	9 432	0
P-P	38 978	31 191	7 688	0	100
Kainuu	2 685	2 582	103	0	100
Yhteensä	79 836	60 557	9 748	9 432	200

Kyselyyn osallistuneissa maakunnissa hyödynnettiin tuhkia MARA-käytössä yhteensä noin 31 000 tonnia. Lannoituksen osuus jäi siitä alle kolmannekseen (9100 tn) ja sitä toteutettiin vain Lapissa. Käyttöä ei yksilöity noin 21 000 tonnin osalta. (Taulukko 6)

Taulukko 6. Lapin, Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun maakunnissa MARA- ja lannoituskäytössä hyödynnettyjen tuhkien määrä yhteensä/tn vuonna 2018. Lisäksi taulukossa on esitetty tuhkan määrä, jonka käyttökohdetta tuottaja ei ole vastauksessaan esittänyt

Tuhkien hyötykäyttö tn/v 2018				
Maakunta	MARA	Lannoitus	Ei yksilöity	Yhteensä
Lappi	16 947	9 100	737	26 784
P-P	13 191	0	18 000	31 191
Kainuu	582	0	2 000	2 582
Yhteensä	30 720	9 100	20 737	60 557

Varastoitujen ja kaatopaikalle loppusijoitettujen tuhkien osalta tuhkakyselyn vastauksissa oli epätarkkuutta. Vastauksista ilmeni, että tuhkista varastoitiin tavalla tai toisella noin 2600 tonnia ja loppusijoitettiin hieman alle 7200 tonnia. (Taulukko 7)

Taulukko 7. Loppusijoitettujen ja varastoitujen tuhkien kokonaismäärä Lapin, Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun maakunnissa, tonnia v 2018

Maakunta	Loppusijoitettu	Varastoitu	Ei tietoa
Lappi	0	1 957	0
P-P	7 057	240	391
Kainuu	103	0	0
Yhteensä	7 160	2 197	391

Kyselyn mukaan vuonna 2018 tuhkaa ei loppusijoitettu Lapissa lainkaan. Pohjois-Pohjanmaalla ja Kainuussa tuhkaa loppusijoitettiin yhteensä 7160 tonnia. Vastaavasti tuhkaa ei kertynyt varastoihin Kainuussa, kun sen sijaan Lapissa ja Pohjois-Pohjanmaalla tuhkavarastoja kartutettiin yhteensä 2588 tonnia, kun siihen lasketaan mukaan syntyneet tuhkat, joille ei ole ilmoitettu olleen mitään käyttöä.

9. Pohdinta

Kysely lähetettiin 89:lle tuhkan tuottajalle ja vastauksia saatiin 22 kappaletta. Vastausprosentti jäi siis pieneksi, ainoastaan 24,7 %. Vaikka vastausprosentin perusteella kyselyn tuloksista ei voida vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä, voidaan huomata, että vastauksia saatiin nimenomaan isoilta tuhkan tuottajilta. Hyötykäytöstä saatiin siis määrällisesti suhteellisen kattava käsitys. Tuloksen arvioidaan johtuvan siitä, että isoilla tuhkan tuottajilla on jo hioutunut prosessi, jolloin tuhkan määrästä ja laadusta tiedetään tarkemmin. Heillä on ehkä myös riittävästi henkilöresursseja kyselyihin vastaamiseen.

Vähäiseen vastausten määrään saattoi vaikuttaa esimerkiksi se, että valitut yhteyshenkilöt eivät aina olleet oikeita henkilöitä vastaamaan kyselyyn. Lisäksi vastauksista kävi ilmi, että tuhkaan liittyviä kyselyitä oli viime vuosina ollut paljon, joten motivaatio vastaamiseen oli vähäistä. Kaivoksilta ei saatu vastauksia lainkaan, mikä voi johtua kysymysten asettelusta, joka pitäisi räätälöidä enemmän myös kaivoksille sopivaksi. Lisäksi kyselyn ajankohta vuoden vaihteessa saattoi vaikuttaa matalaan vastausprosenttiin. Pieniltä tuhkan tuottajilta ei vaadita ympäristölupaa, joten he eivät ehkä kokeneet kyselyn koskevan heitä.

Pohjois-Suomen maakunnittain kootut tulokset ovat keskenään hyvin erilaiset. Saamiemme vastausten perusteella vuonna 2018 varsinaista tuhkan hyötykäyttöpotentiaalia - eli tuhkaa, joka olisi toimijan vastauksen mukaan hyödynnettävissä, mutta jota ei ole hyödynnetty - näyttäisi olleen Lapista noin 9430 tonnia ja muualta 200 tonnia. Tähän suurehkoon eroon vaikuttaa se, että Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan maakuntien alueilla tuhkaista enin osa meni jo hyötykäyttöön, kun taas Lapissa käyttöpotentiaalia oli enemmän.

Eräs tuhkan hyötykäytön muoto on metsälannoitus ja etenkin turvemaapuustojen lannoitus, johon puutuhka soveltuu sellaisenaan hyödynnettäväksi varsin hyvin, mutta myös turvetuhka, kun sitä ensin rikastetaan tarvittavilla ravinteilla. Edellä mainitusta tuhkan käyttöpotentiaalista lannoitukseen sopivaa on ilmoitettu vain Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan alueilta, yhteensä 200 tonnia. Tämä määrä olisi joko sellaisenaan tai rikastamalla käytettävissä metsien lannoitukseen esimerkiksi turvemaille.

Pohjois-Suomen alueella on tunnetusti runsaasti turvemaita, joten tuhkalannoituksesta hyötyviä puustoja voisi löytyä paljonkin. Nykyisten lannoitussuosittelun

mukaan (4000 kg/ha) 100 tonnilla tuhkaa lannoitettaisiin 25 hehtaaria Kainuun metsiä. Puuston kasvuun se vaikuttaisi maaperän ravinteisuudesta riippuen keskimäärin 1-6 m³/ha vuodessa lannoitusvaikutuksen ollessa vähintään 20 vuotta. Tämä tarkoittaisi puuston kasvun lisäystä noin 25 kuutiometrillä 150 kuutiometriin vuositasolla ja koko lannoitusvaikutuksen aikana (20 vuotta) kasvu olisi 500 - 3000 kuutiometriä.

Paitsi kasvun lisäystä tuhkalannoitus kohentaisi myös metsiköiden terveydellistä tilaa, sillä turvemaapuustoissa on usein ravinne-epätasapainoa, johon lannoituksella olisi suotuisat vaikutukset. Lannoituksen merkitys korostuu myös Luonnonvarakeskuksen Metsäteollisuus ry:lle tekemässä tuoreessa selvityksessä, jossa tarkasteltiin tulevaisuuteen suunniteltujen suurten hakkuumäärien ja toisaalta hiilinielujen samanaikaista säilyttämistä (Koistinen 2020). Selvityksen mukaan Suomen metsien hiilivarastot voisivat jopa kasvaa tehokkaan metsänhoidon seurauksena, vaikka hakkuumäärät kasvaisivat nykyisestä. Selvityksessä tehokkaan metsänhoidon toimenpiteisiin luetaan taimikoiden ja turvemaiden lannoitusten huomattava lisääminen. Näistä varmasti osa voitaisiin toteuttaa tuhkalannoituksina, mikä lisäisi tuhkan hyötykäyttötarvetta tulevaisuudessa tuntuvasti. Happamien sulfaattimaiden tuhkalannoitusta on alettu tutkia ja tutkimustuloksia on odotettavissa lähivuosina. Mikäli tuhkan levittämällä ojitus- ja maanmuokkausalojen yhteydessä saadaan positiivisia tuloksia vesiensuojelun kannalta, niin myös tässä olisi kohtalaisen laaja tuhkan hyötykäyttömahdollisuus tulevaisuudessa.

Valtioneuvosto on 2.4.2020 hyväksynyt Kemera-lakia koskevan muutosasetuksen, jonka johdosta 1.5.2020 alkaen laista poistuu vaatimus puuston ravinne-epätasapainon osoittamisesta tuhkalannoituksen osalta. Näin ollen kaikki turvemaille kohdistuva tuhkalannoitus kuuluu Kemera-tuettuihin metsänhoitotöihin.

Maa- ja metsätalousministeriö linjaa tuhkalannoituksen keinoksi kasvattaa metsien hiilinielua. (Maa- ja metsätalousministeriö 2020.) Kyseisen muutosasetuksen voimaantulo todennäköisesti lisää tuhkalla lannoitettavan metsäalan määrää ja näin ollen tukee samalla tuhkan hyötykäyttöä. Kuten raportin kappaleessa "Tuhkalannoitus turvemilla" on aikaisemmin tuotu esille, voidaan turvemaiden tuhkalannoituksella vähentää kunnostusojituksia, joka taas vähentää esimerkiksi happamien sulfaattimaiden haitallisia valumia sekä muuta kiintoainekuormitusta ojitusalueilta.

Kyselyn vastausten perusteella tuhkan käyttöä maarakentamisessa on mahdollista lisätä. Erityisesti Lapin maakunnan alueella on potentiaalia hyötykäytön lisäykselle. Kuitenkin tulee huomioida kyselyyn liittyvät epävarmuustekijät, kuten alhainen vastausprosentti. Suurin osa kyselyssä esille tulleesta hyötykäytöstä kohdistui maarakentamiseen. Maarakennuskäyttö koetaan kuitenkin olevan hyvin projektiluontoista, minkä vuoksi käyttöä tulisikin tarkastella pidemmällä aikavälillä. Kyselyn mukaan tuhkaa on myös varastoitu tai sen käyttömuodosta ei ole tietoa, todennäköisesti osa tästä tuhkasta on soveltuvaa maarakentamiseen. Kyselyssä rajoittavina tekijöinä tuhkan käytölle maarakentamisessa nousivat esiin tiukat säädökset, byrokratia, tiedon puute ja toiminnan projektimainen luonne.

Tuhkan käyttöä pyritään koko ajan helpottamaan ja uusia käyttötapoja kehitetään. Maarakentamisen osalta uusista käyttötapoista on jo hyviä kokemuksia ja näiden

kautta pystytään saavuttamaan myös kustannussäästöjä perinteisiin toimintatapoihin verrattuna. Tuhkan käyttö metsäteiden rakentamisessa ja kunnostamisessa on tästä hyvä esimerkki, aiheesta tehdyt tutkimukset antavat lupaavia tuloksia. Uudet käyttötavat ja mahdollisuudet luovat myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Oleellista toiminnan kehittämisen kannalta on tiedon lisääminen koko arvoketjussa nopeasti muuttuvassa toimintaympäristössä. Esimerkiksi Metsäkeskuksen ylläpitämä tienhoito.fi-palvelu voisi soveltua tähän tarkoitukseen. Arvoketjua ajatellen tuhkan maarakennuskäytössä on mahdollista saavuttaa taloudellista kokonaishyötyä ja samalla edistää kiertotaloutta. Tämä riippuu kuitenkin siitä mikä on tuhkan todellinen käyttöpotentiaali. Lisäksi muutokset polttoaineiden suhteissa muuttavat myös tuhkan käyttötapoja, esimerkiksi puun polton lisääminen suosii tuhkan käyttöä lannoitteena.

Lentotuhkan osalta koettiin ongelmaksi luparajojen ylittävä sulfaattipitoisuus. Luparajojen alittuessa lentotuhkaa käytetään maarakennusmateriaalina, kerrospaksuuden ollessa alle 1,5 m ja peitettynä (VNa 843/2017). Yksi lentotuhkan hyötykäytön esteistä on sen ominaisuuksien vähäinen tutkimustieto, esim. lentotuhkan käyttöä rakennusmateriaalina on tutkittu vähän. Kaivoksilla lentotuhkaa käytetään maanalaisessa louhostäytössä ja rikastushiekka-aitaiden ennallistamisessa ns. peittomenetelmällä.

Bioliuotuksen soveltuvuus lentotuhkan metallipitoisuuksien alentamiseksi on haasteellista. Suurimpia haasteita bioliuotusprosessissa ovat energian ja lämmön saanti, bakteerien tuottaman biomassan erottelu tuhkasta ja sen jatkokäyttö, liuotus suuremmissa mittakaavassa sekä lentotuhkan epätasaalaisuus. Tulevaisuudessa tulisikin tutkia bioliuotusta suuremmissa mittakaavassa ja kartoittaa eri energialähteiden käyttöä sekä miettiä tuotetulle biomassalle erottelukeinoja ja käyttökohteita. Myös prosessin kokonaiskustannusten arvioiminen tulisi selvittää.

Tuhkan käsittelystä syntyy kustannuksia, jotka rajoittavat joissakin tapauksissa hyötykäytön mahdollisuuksia. Monet tuottajat hoitavat kuljetukset ostopalveluna. Kyselyn vastauksista käy ilmi, että esimerkiksi pitkät kuljetusmatkat ja toisaalta pienet syntyvät tuhkamäärät eivät ole kustannustehokas yhdistelmä. Lisäksi kustannuksia syntyy tuhkan analysoinnista, lupien hakemisesta ja varastoinnista. Myös tuhkan toimittaminen kaatopaikalle voi olla iso kustannuserä. Jätelain perusteella tuhka kuuluu jätteisiin, joiden hyötykäyttö on teknisesti ja ympäristöperusteisesti mahdollista. Näistä jätteistä on maksettava jätevero, kun ne toimitetaan kaatopaikalle tai kun kolmen vuoden määräaika varastoinnille täyttyy. Vuonna 2020 jätevero on 70 € tonnilta (Verohallinto 2020). Kyselyn tuloksissa oli epätarkkuutta sen suhteen, oliko läjitys ymmärretty varastointina vai loppusijoituksena. Läjitykseen päättyi vastausten perusteella noin 2600 tonnia ja loppusijoitukseen vajaa 7200 tonnia tuhkaa.

Kyselyn vastauksissa korostuivat suurien tuhkantuottajien vastaukset. Niitä saatiin määrällisesti enemmän ja ne olivat myös pidempiä ja analyttisempiä vastauksia. Suurilla tuhkan tuottajilla tuntuu olevan tieto sekä oman laitoksen tuhkan koostumuksesta että sen mahdollisuuksista hyötykäyttöön. Tuhkia on niissä analysoitu ja käyttökohteiden vaatimukset ovat tiedossa. Pienemmiltä tuhkantuottajilta saatiin määrällisesti vähemmän vastauksia ja ne olivat joissakin tapauksissa myös lyhyempiä. Voisi kuvitella, että jos syntyvät tuhkamäärät ovat vähäisiä, saattaa tuottajalla olla iso

kynnys perehtyä tuhkan käyttöä koskevaan lainsäädäntöön, jos he kokevat, että siihen investoitu aika ei maksa vaivaa. Lainsäädäntö ehkä koetaan Suomessa usein vaikeana ja monitulkintaisena osa-alueena. Lähtöoletus saattaa olla, että Suomen lainsäädäntö raja-arvoista on kuitenkin niin tiukkaa, että vain hyvin pieni määrä tuhkasta soveltuisi lopulta hyötykäyttöön.

Savukaasujen puhdistamiseksi säädetyt lait ja asetukset voivat osaltaan hieman vähentää tuhkan hyötykäytön mahdollisuutta. Koska savukaasuista täytyy puhdistaa rikki pois, saattaa tämä lisätä tuhkan sulfaattipitoisuutta. Kuten eräs kyselyyn vastanneista henkilöistä totesi: ”Polttoaineiden rikki siirtyy tuhkaan, ei taivaalle”. Eräs toinen kyselyyn vastanneista arvioi tuhkan sulfaattipitoisuuden johtuvan osaksi myös polttoaineita tuottavan maaperän happamuudesta. Raskasmetallien ja haitallisten aineiden pitoisuudet tuhkissa vaikuttavat olevan melko vaihtelevia ja välillä hyötykäytön raja-arvot ylittäviä. Tällöin voi olla helpompaa ja vaivattomampaa läjittää tuhkat kaatopaikalle kuin ottaa riski ympäristön pilaamisesta. Pienellä tuottajalla jäteveron maksaminen voi olla kilpailukykyinen kustannus verrattuna vaihtelevan tuhkan analysointiin ja jatkuvaan yhteydenpitoon mahdollisiin hyötykäyttäjiin. Pienessä polttolaitoksessa todennäköisesti henkilöstöresurssit ovat vähäisempiä, jolloin sama henkilö voi hoitaa esimerkiksi polttoaineiden hankinnan, polttoprosessin ylläpidon ja tuhkan loppusijoituksen.

Kuten kyselyn vastauksista käy ilmi, on tuhkan saaminen hyötykäyttöön vielä erittäin byrokraattista ja aikaavievää. Lisäksi logistiikka koettiin myös ongelmalliseksi. Yksi ratkaisu tähän ongelmaan voisi olla erillinen logistiikkakeskus tai useita keskuksia hyötykäytettävälle tuhkalle. Erillisillä tuhkan hyötykäyttöön erikoistuneilla keskuksilla olisi mahdollista keskittää tuhka-asiantuntemusta ja näin voisi mahdollistua palvelu, josta tuhkan tuottaja voisi yhdellä puhelinsoitolla selvittää, mitä lupia ja tutkimuksia kyseinen tuhka erä tarvitsee ja mikä olisi sopiva hyötykäytökohde sille. Palveluun voisi myös sisältyä tarvittavien tutkimusten teettäminen tämän keskitetyn logistiikkakeskuksen kautta. Keskus voisi toimia joko kuntatasolla tai jokaisen suurempia määriä tuhkaa tuottavan laitoksen yhteydessä voisi toimia ulkopuolisen tahon operoima logistiikkakeskus, josta tuhka myytäisiin sitä tarvitseville toimijoille. Näin toimien tuhkan hyötykäyttö muuttuisi ammattimaisemmaksi ja koordinoitummaksi liiketoiminnaksi, jolloin myös tuhkan tuottajat ja -hyödyntäjät mahdollisesti kohtaisivat paremmin. Ammattimainen toiminta voisi myös lisätä tuhkan hyötykäytön parempaa tilastointia, jolloin kaikesta syntyvästä tuhkasta löytyisi tarkka tieto, sekä tieto siitä, mihin se päättyy hyödynnettäväksi. Tämänkaltaisen innovaatiokumppanuuden käytössä tulisi tosin ensin toteuttaa tarkat kustannuslaskelmat liittyen logistiikkakeskuksien määrään ja sijaintiin, jotta toiminta olisi kannattavaa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka tuhkalle selkeästi löytyy paikka Suomen kiertotalouden tavoitteissa ja sen potentiaali on tunnistettu, on hyötykäytön edistämiseksi tehtävä vielä paljon töitä niin paikallis- kuin EU-tasollakin. Poliittisia ohjauskeinoja ja uusia tutkimuksia tuhkan käytöstä tulisi kenties kehittää vielä nykyistä vahvemmin ja tuhkan ympärille kehittää kannattavaa liiketoimintaa. Kysely osoittaa, että isommissa laitoksissa tuhkan hyötykäyttö on hyvällä tasolla ja pienemmissä

laitoksissa sitä voitaisiin tehostaa. Hyötykäyttöä rajoittavat mm. tuhkan laadunvaihtelut ja mittauksiin liittyvät epävarmuustekijät sekä lupamenettelyt, jotka ainakin joissain tuotantolaitoksissa koetaan hankaliksi ja aikaavieviksi. Logistiikka on myös ongelma, sillä kuljetukset aiheuttavat kustannuksia, eikä pienien määrien kuljettaminen erikseen ole kustannustehokasta. Esimerkiksi rakeistamoiden sijainti isojen tuotantolaitosten lähellä minimoi kuljetuskustannukset isoille tuottajille, mutta ei välttämättä pienille. Tuhkan kuljetukseen olisi tarpeellista suunnitella kokonaisvaltaisia logistiikkaratkaisuja, joilla voitaisiin palvella useampia toimittajia. Tärkein huomio hyötykäytön ongelmista on kuitenkin se, että käyttökohteet ovat usein projektiluonteisia, jolloin esimerkiksi lupamenettelyjen aikataulu ei ehdi projektiin mukaan. Yksi vastaajista totesikin: “Haaste (on) löytää (käyttö)kohde mihin tuhkaa saisi hyödynnettäväksi jatkuvana virtana”.

Lähteet

- Arvola, L., Ollila, S. & Tulonen, T. 2000. Tuhkannoituksen vesistövaikutukset. Metsätehon raportti 87. Helsinki: Metsäteho Oy.
- Berninger, K., Kekkonen, H. & Lehtonen, H. 2019. Turvepeltojen käyttöön ilmastokestäviä vaihtoehtoja. Luonnonvarakeskus. Viitattu 18.11.2019. <https://www.luke.fi/sompa/2019/02/01/blogi-turvepeltojen-kayttoon-ilmastokesta-via-vaihtoehtoja/>
- Bioenergia ry. 2019. Turvetuotannosta poistuneet suonpohjat ovat jo hiilinieluja – metsitys tärkein jälkikäyttömuoto. Viitattu 1.12.2020. [Turvetuotannosta poistuneet suonpohjat ovat jo hiilinieluja – metsitys tärkein jälkikäyttömuoto – Bioenergia ry](https://www.bioenergia.fi/tuotteet/suonpohjat-ovat-jo-hiilinieluja-metsitys-tarkein-jalkikayttomuoto-bioenergia-ry)
- Bjelkevnik, A. 2005. Water cover closure design for tailings dams, State of the art report. <http://epubl.ltu.se/1402-1528/2005/19/LTU-FR-0519-SE.pdf>
- Blomberg, P. 2005. Kattilalaitosten polttotekniikat ja ilmajärjestelmät. Tampereen ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Kone- ja laiteautomaatio. Opinnäytetyö.
- Ecolan s.a. Ecolan Silva NITRO typpi-tuhkalannoite. Viitattu 18.1.2020. <https://www.ecolan.fi/fi/tuotteet/silvan-tuotteet/ecolan-silva-nitro-typpi-tuhkalannoite/#top>
- Edén, P., Rankonen, E., Auri, J., Yli-Halla, M., Österholm, P. Beucher, A. & Rosendahl, R. 2012. Definition and classification on Finnish acid sulfate soil. Teoksessa [useita kirjoittajia] 7th International Acid Sulfate Soil Conference Vaasa Finland 2012 Towards Harmony between Land Use and the Environment. Opas 56. Espoo:Geologian tutkimuskeskus.
- Egnell, G. & Lejon, B. 1999. Survival and growth of planted seedlings of Pinus sylvestris and Picea abies after different levels of biomass removal in clear-felling. Scandinavian Journal of Forest Research 14, 303-311.
- Energiategollisuus ry 2015. Jätteiden energiahyödyntäminen Suomessa. Loppuraportti.
- Energiategollisuus ry & Ympäristöministeriö 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Tutkimusraportti.
- Finér, L., Hökkä, H., Ihalainen, A. & Nieminen, T. M. 2016. Metsänhoito happamilla sulfaattimailla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 12/2016. Helsinki: Luonnonvarakeskus.
- Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 4.9.2014/713.

- GTK 2009. Happamien sulfaattimaiden haitat hallintaan. Viitattu 24.9.2019. <http://www.gtk.fi/export/sites/fi/ajankohtaista/viestintamateriaalit/esitteet/EsiteHappamatSulfaattimaat.pdf>
- Hannukkala, A. 2020. Sähköpostiviesti koskien tuhkan käyttömahdollisuuksia Pohjois-Suomen nurmiviljelyssä. 5.2.2020
- Heikkinen, K., Hyvärinen, M., Ihme, R., Klöve, B., Martinmäki, K., Marttila, H., Saarinen, T., Saukkoriipi, J., Tammela, S., Tertsunen, J. & Tolkkinen, M. 2012. Happamuuden aiheuttamat vesistöhaitat ja niiden torjuntakeinot Sanginjoella. Suomen Ympäristö 37/2012. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus.
- Heikkinen, P. M. ja Noras, P. 2005. Kaivoksen sulkemisen käsikirja, kaivostoiminnan ympäristötekniikka.
- Helmisaari, H.-S., Holt Hansen, K., Jacobson, S., Kukkola, M., Luiro, J., Saarsalmi, A. & Tamminen, P. 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: long-term impact on tree growth. *Forest Ecology and Management* 261, 1919-1927.
- Hiilipuu 2019. Helsingin yliopiston Ilmakehätieteiden keskuksen (INAR) Fysiikan ja Metsätieteiden yksiköiden sekä ohjelmistoyritys Simosolin ja kuvataiteilija Terike Haapojan yhteistyöhanke. Viitattu 3.10.2019. <http://www.hiilipuu.fi/fi/artikkelit/maahengitys>
- Holappa, T. 2017. Kipsitien koerakenteet. WSP Finland Oy. Seurantareportti. <https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Kipsitie-seurantareportti.pdf/ba208b35-612a-4d2b-91d7-24f78afb6841>
- Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. 2., päivitetty painos. Vammalan kirjapaino Oy.
- Huotari, N., Laiho, R., Moilanen, M. & Tillman-Sutela, E. 2015. Recycling of ash – For the good of the environment? *Forest Ecology and Management* 348 (2015) 226 - 240.
- Hynönen, T., Makkonen, T. (toim.) & Moilanen, M. 2008. Tuhkalannoitus. Hyvän metsänhoidon opassarja. Porvoo: Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio.
- Hyytiäinen, L. 2018. Tuhkan mahdollisuudet metsäteiden rakentamisessa. *Koneyrittäjä* 9/2018, 26–27.
- Härkönen, L. 2019. Luonnonmukainen valuma- ja maavesien käsittelymenetelmä happamien sulfaattimaiden metsänuudistamisaloilla – HaSuMetsä. Tapio. Viitattu 28.9.2019. <https://tapio.fi/konsultointi/kaynnissa-olevat-hankkeet/luonnonmukainen-valuma-ja-maavesien-kasittelymenetelma-happamien-sulfaattimaiden-metsanuudistamisaloilla/>
- Hökkä H. & Hytönen J. 2017. Turvemaiden puustot hyötyvät kivennäisravinteiden lisäyksestä. Teoksessa Hynynen J., Huuskonen S. & Kojola S. (toim.) *METSÄ* 150: Metsänkasvatuksen keinot lisätä puuntuotantoa kestävästi ja kannattavasti. 16/2017. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Luonnonvarakeskus (Luke), 46-49.
- Hökkä H. & Hytönen J. 2019. Tuhkalannoitus turvemaiden metsänhoidossa. Pohjanmaan ravinneratas -hankkeen infotilaisuus Sievi/Kokkola 20.2.2019. Viitattu 19.9.2019.

https://www.vesiensuojelu.fi/pohjanmaa/wp-content/uploads/2019/02/Tuhkalannoitusinfo_20022019_tiivis.pdf

Hökkä H. & Kojola S. 2017. Kunnostusojitus. Teoksessa Hynynen J., Huuskonen S. & Kojola S. (toim.) METSÄ 150: Metsänkasvatuksen keinot lisätä puuntuotantoa kestävästi ja kannattavasti.16/2017. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Helsinki: Luonnonvarakeskus (Luke). 51-53.

Hökkä H., Nieminen M., Lauren A., Launiainen S. & Sarkkola S. 2013. Kunnostusojitustarve vesitalouden ja vesiensuojelun näkökulmasta. Viitattu 20.9.2019. <http://www.metla.fi/tapahtumat/2013/vesiensuojelu/Hokka.pdf>

Ihme, R., Karppinen, A., Nokela, T. & Riihimäki, J. 2016. Sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiä maankäyttömuodoittain – Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun. Sulfidimaiden neutralointimenetelmät. [Kustannuspaikka tuntematon]: Suomen Ympäristökeskus.

Isännäinen, S. & Huotari, H. 1994. Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi lannoitekäyttöön soveltuvaksi. Esiselvitys. VTT Energia. Jyväskylä.

Isännäinen S., Rinne S., Järvelä E. & Lindh, T. 2006 Tuhkan käyttö metsälannoitevalmisteenä. [http://www.skogsstyrelsen.se/Global/myndigheten/projekt/RecAsh/Handh%c3B6cker%Handbooks/RecAsh%20handbok%20\(finska\).pdf](http://www.skogsstyrelsen.se/Global/myndigheten/projekt/RecAsh/Handh%c3B6cker%Handbooks/RecAsh%20handbok%20(finska).pdf)

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.

Jalovaara, J., Aho, J., Hietämäki, E. & Hyytiä, H. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristökeskus julkaisu.

Jäteverolaki 1126/2010, 7 §.

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkinen, H. & Wahlström, M. 2010. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. VTT tiedotteita 2567. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2010/T2567.pdf>

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J. & Wahlström, M. 2007. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. VTT tiedotteita 2411. Edita Prima, Helsinki.

Karikorpi, J 2013. Karhulan biolämpölaitoksen lentotuhkan hyötykäyttövaihtoehdot kotkan energia oy:lle. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Karjalainen, N. 2016. Uusiomateriaalien hyödyntäminen rikastushiekka-altaiden pintarakenteissa. Oulun Yliopisto. Ympäristötekniikka. Diplomityö.

Kalliokoski, M. 2015. Puu- ja turvetuhkan hyötykäyttökelpoisuuteen vaikuttavat tekijät pienillä polttolaitoksilla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Karppinen, S. 2019. Suonpohjalle uusi elämä. *Metsälehti* 29.8.2019, 18-19. Metsäkustannus, Joensuu.

- Kauppila, P., Räisänen, M. & Myllyoja, S. (2011) Metallikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011.
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY_29_2011.pdf?sequence
- Keskisarja, V., Salminen, E. & Westberg, V. 2018. Happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivat vuoteen 2020. Väliraportti. Maa- ja metsätalousministeriön työryhmämuistio 2018:1. Helsinki: Maa- ja metsätalousministeriö.
- Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman, J. 2013. Tuhkarakentamisen käsikirja. Ramboll Finland Oy.
- Koistinen, A. 2020. Metsäteollisuuden selvitys: Hakkuita voidaan kasvattaa ja hiilinielut turvata samanaikaisesti - Vaatisi isot panostukset metsänhoitoon. YLE Uutiset. 17.4.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-11310818>
- Korpilahti, A. 2003. Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. Metsätehon raportti 143, 19. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/raportti/Raportti_143.pdf
- Korpijärvi, K., Mroueh, U., Merta, E., Laine-Ylijoki, J., Kivikoski, H., Järvelä, E., Wahlström, M. & Mäkelä, E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maa-rakennuskäyttöön. VTT Tiedotteita 2499. Espoo, Suomi.
- Kukkola, M. & Saarsalmi, A. 2009. Tuhkalannoituksen vaikutus maaperään ja puuston kasvuun. Metsätieteen aikakauskirja 1/2009.
- Kuntaliitto 2020. Jäteverotus.
<https://www.kuntaliitto.fi/yhdyskunnat-ja-ymparisto/tekniikka/jatehuolto/jateverotus>
- Laine-Ylijoki, J., Wahlström, M., Peltola, K., Pihlajaniemi, M. & Mäkelä, E. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. VTT tiedotteita 2141.
- Laine-Ylijoki, J., zu Castell-Rüdenhausen, M., Kaartinen, T., Kärki, J., Pellikka, T., Punkkinen, H., Saastamoinen, H., Wahlström, M. & Pohjakallio, M. 2018.
- Selvitys eräiden jätteiden ja rejektien käsittelykapasiteetin sekä muutaman jäteperäisen materiaalin markkinan tilanteesta Suomessa. Ympäristöministeriön raportteja 21/2018. Helsinki.
- Lannoitevalmistelaki 29.6.2006/539. Asetus 24/11
- Lehtola, T., 2017 Oulun ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan koulutusohjelma, Märkäpurretun lentotuhkan hyödyntäminen kaivoksen louhostäytössä
- Lindroos, N., Ronkainen, M. & Järvinen, K. 2016. Metsä- ja energiateollisuuden jättejakeiden ympäristökelpoisuus maarakentamisessa. Ympäristöministeriön raportteja 8/2016. Helsinki.
- Logistiikan maailma, 2018. Maantiekuljetus, viitattu 22.3.2020. <http://www.logistiikanmaailma.fi/kuljetus/maantiekuljetus>
- Joensuu, S. 2019. Tuhka. Biomassa-atlas. Tapio Oy. Viitattu 16.12.2019. <https://www.luke.fi/biomassa-atlas/biomassojen-kuvaukset/tuhka/>
- Joensuu, S. 2019. Tuhkalla ehkäistään valumaveden happamuuspiikkejä rannikon metsänuudistamisaloilla. Tapio Oy.
<https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/04/HaSuMetsä-hanke-Joensuu.pdf>

- LUKE 2019. Luonnonvarakeskus, projektit. Viitattu 4.11.2019. <https://www.luke.fi/tutkimus/projektit-arkisto/>
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2007. Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaihutuksen suomessa. Tutkimusohjelman loppuraportti.
- Maa- ja Metsätalousministeriö 2019. Tuhkan tuotanto- ja käyttöpotentiaalit - tuhkan hyödyntäminen tienrakennuksessa. Viitattu 17.9.2019 https://mmm.fi/biotalous-hankeartikkeli/-/asset_publisher/tuhkan-tuotanto-ja-kayttopotentiaali-tiedot-biomassa-atlakseen
- Maa- ja metsätalousministeriö 2020. Metsien tuhkalannoituksen tuki laajenee, valtioneuvosto hyväksyi asetusmuutoksen. Tiedote. Viitattu 19.4.2020. https://mmm.fi/artikkeli/-/asset_publisher/metsien-tuhkalannoituksen-tuki-laajene-e-valtioneuvosto-hyvaksyi-asetusmuutoksen#fc4e78c3
- Makkonen, T. (toim.) 2008. Tuhkalannoitus. http://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhkalannoitus_tapio_2008_pakattu.pdf.
- Mantsinen, H. 2020. Tuhkan hyötykäyttöön perustuva liiketoiminta, rakeistus ja kopterilevitys. Ecolan Oy. Liiketoimintapäällikön luento 7.2.2020.
- Matilainen Mervi 2017. Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa: Hajautetun bio- lämpöenergian tuhkan kierrätyksen merkitys ja taloudellisen ekosysteemimallin luominen. Opinnäytetyö. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Ylempi ammattikorkeakoulututkinto. Karelia-ammattikorkeakoulu.
- Matilainen, M., Pisto, S., Rinnepelto, P. & Kinnunen, N. 2014. Metsäteollisuuden ravinteet - Metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen lannoitevalmisteina. Ympäristöministeriön Ravinteiden kierrätyksen edistämistä ja Saaristomeren tilan parantamista koskevan ohjelman hankkeen Metsäteollisuuden ravinteet – Metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen lannoitevalmisteina selvitys. Joensuu.
- Merenheimo, T. 2017. Biolämpölaitoksen lentotuhkan hyödyntämisen ratkaisut ja liiketoimintaverkostot. Aalto-yliopisto. Kemian, bio- ja materiaalitekniikan maisteriohjelma. Diplomityö.
- Metsakeskus 2016a. Tuki metsän terveyslannoitukseen. Viitattu 29.9.2019 <https://www.metsakeskus.fi/tuki-metsan-terveyslannoitukseen>
- Metsakeskus 2016b. Tuhkalannoitusmateriaalit. Viitattu 29.9.2019 <https://www.metsakeskus.fi/tuhkalannoitus-materiaalit>
- Metsälehti 2019. Kolme neljästä turvesuosta päätyy kasvamaan puuta. Julkaistu 8.3.2019, viitattu 29.9.2019 <https://www.metsalehti.fi/uutiset/kolme-neljasta-turvesuosta-paatyy-kasvamaan-puuta/>
- Metsänhoitoyhdistys 2016. Uusi tyyppi-tuhkalannoite antaa lisäpotkua kasvuun jopa 25 vuodeksi. Julkaistu 16.6.2016. Viitattu 18.1.2020. <https://www.mhy.fi/savotta/uutiset/uusi-tyyppi-tuhkalannoite-antaa-lisapotkua-kasvuun-jopa-25-vuodeksi>
- Ojala, E. 2010 Selvitys puu ja turvetuhkan lannoite sekä muusta hyötykäytöstä. Keskustelu muistio Rautanen Juha.
- Pohjala, M. 2015. Tuhkien tilastokysely 2014. Energiategollisuus ry 2015. https://energia.fi/files/397/Tuhkien_tilastokysely_2014_loppuraportti.pdf

- Riikilä, M. 2019. Jatkoaikaa apulannalle - tuhkan ja typen seoslannoite voi lisätä puuston kasvua kivennäismailla jopa yli 20 vuoden ajan. *Metsälehti* 5.3.2019. Viitattu 28.9.2019. <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/jatkoaikaa-apulannalle/>
- Rinne, S. 2007. Biopolttoaineiden tuhkaa metsälannoitteeksi. [http://www.motiva.fi/files/3052/ Biopolttoaineiden tuhkaa lannoitteeksi.pdf](http://www.motiva.fi/files/3052/Biopolttoaineiden_tuhkaa_lannoitteeksi.pdf).
- Ritvanen, V. 2011. Logistiikan ja toimitusketjun hallinnan perusteet, viitattu 22.3.2020. [http://www.logistiikanmaailma.fi/wp-content/uploads/2018/06/logistiikan ja toimitusketjun hallinnanperusteet.pdf](http://www.logistiikanmaailma.fi/wp-content/uploads/2018/06/logistiikan_ja_toimitusketjun_hallinnanperusteet.pdf)
- Rosendahl, R. & Wikman, U. 2009. Happamat sulfaattimaat. Maaseutuverkoston julkaisu. Viitattu 18.10.2019. [https://www.maaseutu.fi/globalassets/esitteet-ja-oppaat/happamat sulfaattimaat b5_low.pdf](https://www.maaseutu.fi/globalassets/esitteet-ja-oppaat/happamat_sulfaattimaat_b5_low.pdf)
- Ruokavirasto 2019. Hyväksyttävät lanta- ja lannoitelajit. Viitattu 6.10.2019. <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/viljelijat/tuet-ja-rahoitus/ymparistokorvaus/hyvakysyttavat-lanta-ja-lannoitelajit.pdf>
- Ruokavirasto 2020a. Ympäristökorvauksen sitoumusehdot 2015. Viitattu 24.3.2020. <https://ruokavirasto.mobiezone.fi/zine/553/article-42048>
- Ruokavirasto 2020b. Luonnonmukaiseen tuotantoon soveltuvat lannoitteet ja maanparannusaineet. Viitattu 16.3.2020. [https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/luomumaatilat/luomukasvit/Luomun-tuotanto panoiset/luomulannoitteet/](https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/luomumaatilat/luomukasvit/Luomun-tuotanto_panoiset/luomulannoitteet/)
- Ruotanen, K. 2018. Dolomiitilla aktivoitu tuhka sopii lannoitteeksi. Maaseudun tulevaisuus. Julkaistu 12.12.2018. Viitattu 16.3.2020. <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/mielipiteet/artikkeli-1.346224>
- Ryhti, K. 2016. Aineiden huuhtoutuminen metsätiekokeiden rakenteissa käytettävästä tuhkasta. Helsingin yliopisto. Metsätieteen laitos. Pro gradu-tutkielma.
- Rättilä, M. 2019. Tuhkalannoitus lisää metsätuottoja turvemaidilla. *Kaleva* 25.9.2019, 9.
- 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., 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.
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M., Kukkola, M. 2014. Wood ash in boreal, low-productive pine stands on upland and peatland sites: Long-term effects on stand growth and soil properties. *Forest Ecology and Management* 327, 86-95.
- Salo, H., & Savolainen, V. 2008. Turvetuotantoalueiden jälkikäyttö. Opas alan toimijoille. Turveteollisuusliitto.
- Sarkkola S., Hökkä H., Jalkanen R., Koivusalo H. & Nieminen M. 2013. Kunnostusojitustarpeen arviointi tarkentuu -puuston määrä tärkeä ojituskriteeri. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2013, 159-166.
- Sipilä, P. 1996. Kaivosten jätealueiden kunnostaminen, Yleinen osa. Sulfidimikavosten rikastamoiden jätealueista aiheutuvien ympäristöongelmien syyt ja niiden ehkäiseminen. Geologian tutkimuskeskus http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/ka61_97_1.pdf

- Sitra 2016. Kierrolla kärkeen - Suomen tiekartta kiertotalouteen 2016-2025. Sitran selvityksiä 117. Helsinki: Sitra.
- Smolander, A. 2018. Typpilannoitus metsämaan viljavuuden parantajana – kestävyysnäkökohtia maan ja ympäristön kannalta. Metsätieteen aikakauskirja 2018-10080. Tieteen tori, 2.
- Smolander A., Levula T. & Kitunen V. 2008. Response of litter decomposition and soil C and N transformations in a Norway spruce thinning stand to removal of logging residues. *Forest Ecology and Management* 256, 1080-1086.
- Smolander A., Kitunen V., Tamminen P. & Kukkola M. 2010. Removal of logging residue in Norway spruce thinning stands: Long-term changes in organic layer properties. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 1122-1228.
- Smolander, A., Adamczyk, B., Kitunen, V., Kukkola, M. & Tamminen, P. 2013. Hakkuutähteen korjuun pitkäaikainen vaikutus metsämaan orgaanisen aineen laatuun. Leppälampi-Kujansuu ym. (toim.) Maankäytön kestävyys. VII Maaperätieteen päivien abstraktit. *Pro Terra* 61, 16-17.
- Strandman, A. 2019. Tuhka kiertotaloudessa... Sähköposti anne.strandman@neve.fi 9.10.2019. Tulostettu 10.10.2019.
- Suomen vesilaitosyhdistys ry. 2017. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 46.
- Suomen vesilaitosyhdistys ry, Pöyry Finland Oy. 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56.
- Sutela T., Vuori K-M., Louhi P., Hovila K., Jokela S., Karjalainen S., Keinänen M., Rask M., Teppo A., Urho L., Vehanen T., Vuorinen P. & Österholm P. (2012), Suomen ympäristökeskus, Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat vesistövaikutukset ja kalakuolemat Suomessa. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38771/SY_14_12_Happamat_sulfaattimaat.pdf?sequence.com
- Tamminen, P., Saarsalmi, A., Smolander, A., Lindroos, A-J & Kukkola, M. 2014. Energiapuun korjuun vaikutus metsämaan ominaisuuksiin ja prosesseihin sekä puuston kasvuun. Metlan työraportteja 289. Bioenergiaa metsistä – Tutkimus- ja kehittämissuunnitelman keskeiset tulokset.
- Tapio 2008. Tuhkalannoitus. Makkonen T. (toim.) Helsinki: Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhkalannoitus_tapio_2008_pakattu.pdf
- Tenhola, T. 2019. Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta. Tapio Oy. Viitattu 8.12.2019. <https://tapio.fi/vastuullista-liiketoimintaa-tuhkasta/>
- Tissari, Meri. 2011. Savonia ammattikorkeakoulu.Ympäristötekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö. Lentotuhkan bioliuotus.Viitattu 19.4.2020 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/28670/Tissari_Meri.pdf?sequence=1
- Toropainen, V. 2006. Yhteenveto sulfidimalkaivostoiminnasta Suomessa ja toiminnasta muodostuvista sivutuotteista sekä niiden ympäristövaikutuksista. Geologian tutkimuskeskus. Viitattu 14.12.2015. http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/s49_0000_2006_2.pdf

Tukes 2020. REACH-asetus. Viitattu 19.4.2020 <https://tukes.fi/kemikaalit/reach/reach-asetus>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Huttunen R. (toim.). Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia 4/2017. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vaara, I., Björqvist, N., Honkavaara, T., Karvonen, L., Kiljunen, N., Salmi, J. & Vainio, K. 2018. Ilmastoviisas metsätalous: Ilmastomuutosta hillitsevä metsätalous (47314) -projektin loppuraportti 3.10.2018. Metsähallitus. http://www.e-julkaisu.fi/metsa-hallitus/ilmastoviisas_metsatalous/mobile.html#pid=1

Vainikka, P. 2006. Seospolton käytettävyysohjelmien hallinta. Esitelmä. Jätehuollon energiapäivät. Vantaa. 12.-13.12.2006.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 7.12.2017/843

Valtioneuvosto. 2019. Osallistava ja osaava Suomi –sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31.

Verohallinto 2020. Jätevero – Miten vero määräytyy? <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteiset/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/jatevero/>

Välikangas, H., 2017. Liiketoimintamahdollisuuksien tunnistaminen teollisuuden jätteistä ja sivutuotteista. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Ympäristöministeriö 2016a. Taustaselvitys rakentamisen maa-ainesjätteiden ja eräiden muiden jätteiden hyödyntämistä koskevaa asetusvalmistelua varten (MASA- ja MARA-asetukset). <https://www.ym.fi/download/noname/%7B76828F77-2CD0-40E6-90ED-8D4ABB D81EC8%7D/148047>

Ympäristöministeriö 2016b. Metsä- ja energiateollisuuden jätejakeiden ympäristökelpoisuus maarakentamisessa. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/64970>

Ympäristöministeriö 2018a. Kierrätyksestä kiertotalouteen. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2023. Suomen Ympäristö 01|2018. Helsinki: Lönnberg Print & Promo.

Ympäristöministeriö 2018b. Vesien ja merensuojelun lainsäädäntö. Viitattu 6.10.2019. https://www.ym.fi/fi-FI/Luonto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Vesien_ja_merensuojelun_lainsaadanto

Ympäristöministeriö 2019a. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, soveltamisohje. <https://www.ym.fi/download/noname/%7B5925E94C-828D-42BC-8023-BBABC 7E03AFE%7D/135698>

Ympäristöministeriö 2019b. Jätteiden hyödyntämismahdollisuuksia maarakentamisessa laajennetaan. Viitattu 28.9.2019. https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Ymparistonsuojelun_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Jatteiden_hyodyntaminen_maarakentamisessa

Äystö, L., 2018. MARA-asetus. Powerpoint -esitys Kaakkois-Suomen ELY-keskuksen alueen ympäristöviranhaltijoiden neuvottelupäivillä 30.11.2018. Viitattu Suomen Ympäristökeskus.

Liitteet

LIITE 1. KYSELY TUHKAN TUOTTAJILLE

Arvoisa vastaanottaja,

Teidät on valittu vastaajaksi Lapin AMK:n kyselyyn, jossa kartoitamme tuhkan hyötykäytön mahdollisuuksia Lapin, Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun maakunnissa. Projektissa kartoitetaan syntyvien tuhkien määrät ja selvitetään hyötykäytön mahdollisuuksia. Lopputuloksena laaditaan tuhkien kiertotalous näkökulmia avaava kirjallinen raportti, joka julkaistaan AMK:n julkaisusarjassa.

Tiedustelemme energialaitoksilta tuhkien määrä- ja laatutietoja sekä sitä, miten tuhkien käsittely, hyöty- ja loppukäyttö tai varastointi on järjestetty ja mitä kuljetustarpeita ja kustannuksia tähän on liittynyt vuonna 2018. Mikäli kyseinen vuosi oli tavanomaisesta poikkeava, niin pyydämme lähettämään myös edellisen vuoden tiedot. Kuvaile myös, miksi vuosi 2018 oli poikkeava.

Pyydämme vastauksia alla oleviin kysymyksiin **ma 16.12.2019** mennessä.

1. tuhkien määrät lajeittain (tn/a) ja käytetyt polttoaineet
2. onko tuhkien hyötykäyttö kelpoisuutta määritetty (haitta-ainepitoisuudet ja/tai -liukoisuudet)? Jos on, mikä oli tulos?
3. hyötykäyttöön (lannoitus, maanrakennus, muut) menneiden tuhkien määrät (tn/a) ja kuljetusmatkat hyötykäyttö kohteisiin, jos tiedossa (km)
4. loppusijoitukseen menneiden tuhkien määrät (tn/a) ja kuljetusmatka (km)
5. tuhkien kuljetusten järjestäminen (omana työnä, ostopalveluna)
6. arvioita tuhkan käsittelyyn, analysointiin, kuvitukseen, kuljetuksiin ja varastointiin liittyvistä kustannuksista
7. näkemyksiä ja kokemuksia tuhkien hyötykäyttöön liittyvistä haasteista ja mahdollisuuksista
8. voidaanko yrityksen tuhka tietoja (määrät, haitta-aineet, loppukäyttö) esittää julkisuudessa?
9. voidaanko yrityksen tuhkiin liittyviä kustannustietoja esittää julkisuudessa?

Kyselyn tuloksista laadimme maakuntia koskevan kuvauksen tuhkiin liittyvistä materiaalivirroista, tuhkien kuljetuksista ja jalostuksesta sekä niihin liittyvistä energiankulutuksesta ja kustannuksista. Raportissa kuvataan myös tuhkien eri käyttömahdollisuuksia, arvioita hyötykäyttökohteiden määristä (lannoitus, maanrakennus, muut kohteet) ja esitetään tuhkiin liittyvää lainsäädäntöä eri toimijoiden näkökulmista.

Alueellisia, tuhkia koskevia systeemitarkasteluita ei tietääksemme ole laadittu, joten osallistumisenne kyselyyn mahdollistaa osaltaan tällaisen kokonaistarkastelun laatimisen. Toivomme sen myös edistävän tuhkien kestävä hyötykäyttöä ko. maakuntien alueella.

Annamme mielellämme lisätietoja ”Tuhkat kiertotaloudessa” -projektista.

Ystävällisin terveisin

nimi/nimet, tutkinto, YAMK-opiskelija

yhteystiedot

Suomen energiateollisuus synnyttää energiantuotannon ohella vuosittain noin 1,5 miljoonaa tonnia tuhkaa, josta suuri osa hyödynnetään biokierto-talouden tuotteena metsänlannoituksessa ja maarakentamisessa. Tuhkien hyötykäyttöä edistämällä voidaan vaikuttaa hiilipäästöjen vähentämiseen sekä metsätalouden kannattavuuden parantamiseen samalla kun minimoidaan kaatopaikoille loppusijoitettavan tuhkan määrää.

Liiketalouden näkökulmasta tuhkan hyödyntämistä tulisi kehittää edelleen, jotta mahdollisimman suuri osa raaka-aineesta voidaan hyödyntää taloudellisesti kannattavasti, pyrkien erityisesti eri toimijoiden yhteistyöllä saavuttamaan yhä monipuolisempaa ja alueellisesti kattavampaa kierto-talouteen perustuvaa tuotantotoimintaa. Viimeaikaisilla ja tulevilla tuki-rahoituksilla tavoitellaan hiilensidonnain lisäämistä eri muodoissaan, mikä tulee taloudellisesti parantamaan tuhkan hyötykäytön mahdollisuuksia. Tämä edellyttää yrityksiltä ja muilta alan toimijoilta yhteistoiminnan lisäksi tietoa ja osaamista tuhkan käytöstä, siihen liittyvästä ympäristölainsäädännöstä sekä liiketoiminnasta.

Tuhkan hyötykäytön mahdollisuuksista ei ole ollut saatavilla kokoavaa, aiheen eri näkökulmia valottavaa yhteenvetoa, mikä herätti ajatuksen kirjoittaa tämä julkaisu. Siihen on koottu monipuolisesti tietoa hyötytuhkan perinteisistä ja uusista käyttökohteista, polttoteknisistä ratkaisuista sekä ympäristölainsäädännöstä ja liiketoiminnan mahdollisuuksista. Tietoperustaa täydennettiin vielä Pohjois-Suomen ja Kainuun tuhkatuottajille suunnatulla kyselyllä.