School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma
Diplomityö

VOIMALAITOSTUHKAN HYÖTYKÄYTTÖ

Matias Majamäki
Lappeenrannassa 26.9.2022

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Matias Majamäki
Voimalaitostuhkan hyötykäyttö
Diplomityö 2022

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
Tutkijatohtori Katja Kuparinen
Ohjaaja: Jenni Kukkonen Ympäristöpäällikkö, Metsä Group

66 sivua, 14 taulukkoa ja 16 kuvaa

Hakusanat: lentotuhka, pohjatuhka, petihiekka, hyötykäyttö, lannoite

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää, voidaanko Metsä Groupin voimalaitoksilla muodostuvien tuhkien hyötykäyttöä metsälannoitteena lisätä. Tavoitteena oli lisäksi tarkastella muita hyötykäyttövaihtoehtoja tuhkille, jotka eivät sovellu metsälannoitukseen. Työ toteutettiin tarkastelemalla aiheen kirjallisuutta, haastattelemalla Metsä Groupin henkilökuntaa ja metsälannoitukseen erikoistunutta palveluntarjoajaa sekä tutkimalla Metsä Groupin tuhkista tehtyjä analyyseja.

Tuhkaa voidaan käyttää hyödyksi useilla tavoilla, kuten metsä- ja peltolannoitteena sekä maarakentamisessa. Tuhkan hyödyntämistä eri käyttötarkoituksiin säädellään ja ohjataan lainsäädännön avulla. Lannoitteeksi käytettävälle tuhkalle on asetettu enimmäispitoisuudet tietyille haitta-aineille sekä vähimmäispitoisuudet tuhkan sisältämille ravinteille. Maarakennuskäyttöön on olemassa oma asetuksensa, jonka vaatimukset täyttäessään tuhkaa voidaan hyödyntää maarakentamisessa ilmoitusmenettelyllä.

Haastatteluiden perusteella Metsä Groupin tuhkien metsälannoituskäyttö on tällä hetkellä hyvällä tasolla. Tuhka-analyysien ja kirjallisuuden perusteella tuhkien metsälannoituskäyttöä voitaisiin kuitenkin lisätä käytettävien polttoaineiden ja tuhkan käsittelyn muutoksilla sekä tehostamalla tuhkan toimitusketjun organisointia. Metsälannoitteeksi soveltumattomat tuhkat voidaan käyttää hyödyksi joko peltolannoitteena tai maarakentamisessa.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Energy Technology

Matias Majamäki
Utilization of power plant ash
2022

Examiners: Professor Esa Vakkilainen
Post-doctoral researcher Katja Kuparinen
Instructor: Jenni Kukkonen Environmental Manager, Metsä Group

66 pages, 14 tables and 16 figures

Keywords: fly ash, bottom ash, bed material, utilization, fertilizer

The purpose of this Master's thesis was to find out whether the utilization of ash generated at Metsä Group's power plants, as forest fertilizer can be increased. The objective was also to consider other utilization options for ashes that are not suitable for the forest fertilization. The thesis was performed by reviewing the literature on the subject, interviewing Metsä Group's staff and a service provider specializing in forest fertilization. Also, the analyzes of Metsä Group's ash were studied.

Ash can be used beneficially in several ways, such as forest and field fertilizer and in soil construction. The utilization of ash for various purposes is regulated and guided by legislation. Maximum concentrations for certain harmful substances and minimum concentrations for the nutrients contained in the ash have been set for the fertilization usage. Soil construction use has its own regulation, and if the requirements are met, ash can be used in soil construction with a notification procedure.

Based on the interviews, Metsä Group's forest fertilization use of ashes is currently at a good level. However, based on ash analyzes and the literature the use of ashes as forest fertilizer could be increased by changing the fuel mix and ash handling, and by making the organization of the ash supply chain more efficient. Ashes which are not suitable for forest fertilization, can be used either as field fertilizer or in soil construction.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1 JOHDANTO 6

2 METSÄ GROUP 8

3 TUHKAN MUODOSTUMINEN 9
3.1 Leijukattilat 9
3.2 Arinakattilat 11

4 TUHKAN HYÖTYKÄYTÖN TOIMINTAYMPÄRISTÖ 14
4.1 Tuhkan hyötykäyttöä koskevat säädökset 14
4.1.1 Lannoitevalmistelaki ja -asetus 14
4.1.2 Lannoitevalmisteiden valvonta 16
4.1.3 Jätelainsäädäntö 16
4.1.4 Ympäristönsuojelulaki 17
4.1.5 MARA-asetus 18
4.2 Tuhkan hyötykäyttömahdollisuudet 21
4.2.1 Metsälannoitteena 22
4.2.2 Peltolannoitteena 26
4.2.3 Maanrakennuksessa 27
4.2.4 Muita käyttökohteita 29

5 TUHKAN KÄSITTELYMENETELMÄT 31
5.1 Itsekovettaminen 31
5.2 Vanhentaminen 31
5.3 Rakeistaminen 32
5.4 Pelletöinti 33

6 TUHKAN LAATUUN VAIKUTTAMINEN 34
6.1 Polttoaineella 34
6.1.1 Puupolttoaineet 34
6.1.2 Lietteet 37
6.1.3 Turve 39
6.1.4 Kierrätyspolttoaine 41
6.2 Polttoprosessilla 45
6.3 Tuhkanerotustekniikalla 47
6.3.1 Sähkösuodattimet 48
6.3.2 Kuitusuodattimet 48

6.3.3 Mekaaniset erottimet 49
6.3.4 Savukaasupesurit 49
6.4 Tuhkan fraktioinnilla 50
6.5 Tuhkan pesulla 50
6.6 Termisellä käsittelyllä 50

7 METSÄ GROUP TARKASTELTAVAT TUHKAT 52
7.1 Kattilatyypit 52
7.1.1 Tuhkan määrä 53
7.1.2 Tuhkan laatu 54
7.1.3 Tuhkan käsittely tehtailla 55
7.1.4 Tuhkan hyötykäytön nykytilanne 56

8 METSÄLANNOITUKSEN LISÄÄMISEN MAHDOLLISUUDET 58
8.1 Polttoaineen muutoksilla 58
8.2 Tuhkan käsittelyn muutokset 59
8.3 Muita mahdollisia tapoja 60

9 MUUN HYÖTYKÄYTÖN LISÄÄMISEN MAHDOLLISUUDET 62

10 JOHTOPÄÄTÖKSET 64

LÄHTEET 67

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

BFB Bubbling Fluidized Bed boiler – Kuplapetikattila

CFB Circulating Fluidized Bed boiler – Kiertopetikattila

NOx Nitrogen Oxides – Typen oksidit

REF Recovered Fuel – Kierrätyspolttoaine

SRF Solid Recovered Fuel – Kierrätyspolttoaine

1 JOHDANTO

Suomi on asettanut tavoitteeksi olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä sekä ensimmäinen fossiiliton hyvinvointiyhteiskunta (Ympäristöministeriö, 2022). Metsä Group pyrkii omalla toiminnallaan edistämään kestävää kehitystä; yhtiö rakentaa ilmastoneutraalia yhteiskuntaa sekä vastuullista yrityskulttuuria. Yhtenä Metsä Groupin strategisista tavoitteista on hyödyntää 100-prosenttisesti tuotannossa muodostuvat sivuvirrat vuoteen 2030 mennessä. Tuotannon sivuvirtojen hyödyntämisellä on useita positiivisia vaikutuksia. Hyötykäytöllä voidaan esimerkiksi vähentää sivuvirtojen ympäristölle aiheuttamaa kuormitusta sekä jätteiden loppusijoittamisesta aiheutuvia kustannuksia. Tuhka on yksi metsäteollisuudessa muodostuva sivuvirta, jonka vuoksi Metsä Group on kiinnostunut tutkimaan sen hyödyntämismahdollisuuksia.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia, voidaanko Metsä Groupin voimalaitoksilla muodostuvien tuhkien hyötykäyttöä metsälannoitteena lisätä. Lisäksi työssä tarkastellaan muita hyötykäyttömahdollisuuksia tuhkille. Tutkimuksen kohteeksi valittiin Metsä Groupin 13:lta Suomessa sijaitsevilta tuotantolaitoksilta muodostuvat tuhkat. Työssä on tarkoituksena kartoittaa kyseisten tuotantolaitosten tuhkien laatua, käsittelyä, määrää sekä tuhkien nykyisiä käyttökohteita.

Työ on toteutettu haastattelemalla tutkittujen tuotantolaitosten henkilökuntaa sekä metsälannoitukseen erikoistunutta palveluntarjoajaa, tutkimalla aiheen kirjallisuutta sekä tuotantolaitosten tuhkista tehtyjä analyyseja. Tuotantolaitosten henkilökunnan haastattelut suunniteltiin ennakkoon ja luotiin haastattelulomake, jonka avulla saatiin kartoitettua tuhkien muodostumisen, käsittelyn sekä hallinnan nykytila. Haastattelujen perusteella tehtiin vuokaaviot tuhkien käsittelystä eri tuotantolaitoksilta. Metsälannoitukseen erikoistuneen palveluntarjoajan haastatteluun käytettiin omaa kysymyspatteristoaan, jonka avulla haluttiin taata ulkopuolinen näkökanta Metsä Groupin tuhkista. Suurin osa työssä tarkastelluista tuhka-analyyseista oli teetetty ennen diplomityötä sekä joitain tuhka-analyyseja teetettiin työn aikana.

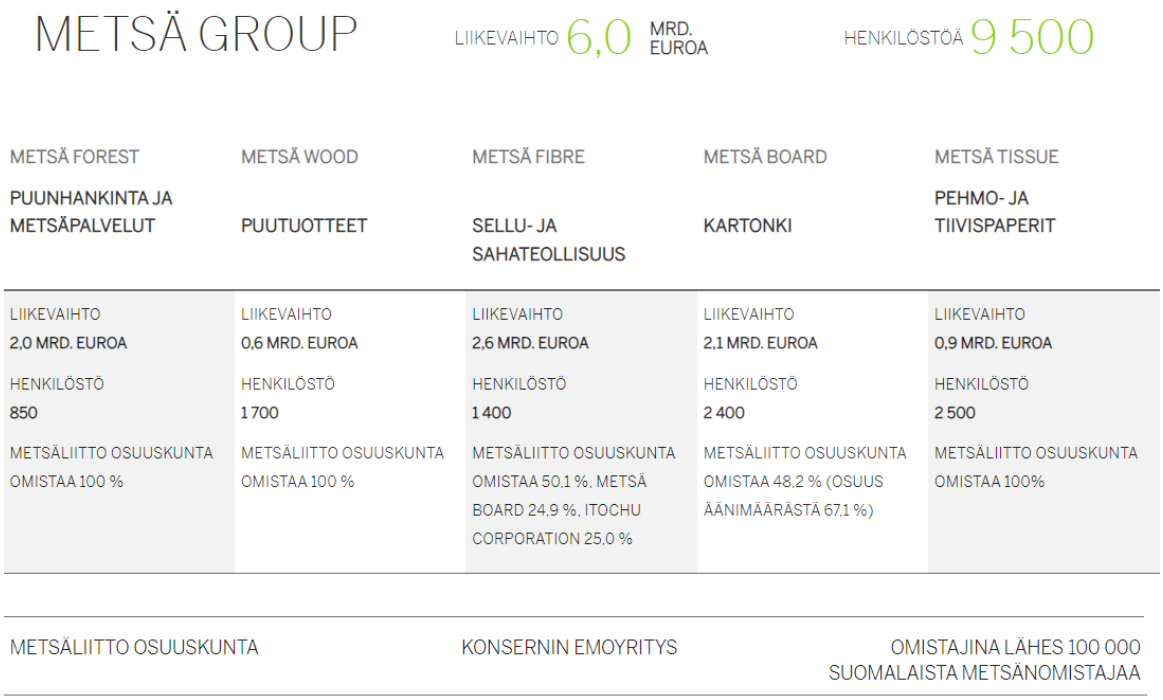
Aluksi työssä esitetään lyhyesti Metsä Groupin liiketoiminta-alueet. Kolmannessa kappaleessa tarkastellaan kirjallisuuden perusteella eri kattilatyyppejä ja niiden merkitystä tuhkan

muodostumisessa. Tämän jälkeen esitellään tuhkan hyötykäytön toimintaympäristö; tuhkan hyötykäyttöä koskevat säädökset sekä eri hyötykäyttömahdollisuudet tuhkalle. Työn viidennessä kappaleessa käydään läpi tuhkan erilaiset käsittelymenetelmät. Tämän jälkeisessä kappaleessa tutkitaan, kuinka tuhkan laatuun voidaan vaikuttaa esimerkiksi polttoaineilla tai polttoprosessilla. Seitsemännessä kappaleessa tarkastellaan Metsä Groupin tuhkia ja niiden hyötykäytön nykyistä tilannetta. Kahdessa seuraavassa kappaleessa esitetään mahdollisuuksia eri hyötykäyttökohteiden lisäämiseksi. Viimeisessä kappaleessa esitetään työstä tehdyt johtopäätökset.

2 METSÄ GROUP

Metsä Group on suomalainen metsäteollisuuskonserni, jonka liiketoiminta perustuu uusiutuviin raaka-aineisiin ja kierrätettäviin tuotteisiin. Metsä Groupin muodostaa Metsäliitto Osuuskunta, johon kuuluvat Metsä Wood ja Metsä Forest, sekä tytäryhtiöt Metsä Fibre, Metsä Board ja Metsä Tissue. Metsäliitto Osuuskunta on Metsä Groupin emoyritys, jonka jäseninä on lähes 100 000 metsänomistajaa. (Metsä Group, 2022)

Metsä Group toimii 30 eri maassa, joista kahdeksassa sillä on tuotantoa. Liiketoiminta keskittyy puunhankintaan ja metsäpalveluihin, puutuotteisiin, kartonkiin, selluun sekä pehmo- ja tiivispapereihin. Lisäksi se tuottaa puupohjaista uusiutuvaa energiaa. (Metsä Group, 2022)



Kuva 1. Metsä Group organisaatio. (Metsä Group, 2022)

3 TUHKAN MUODOSTUMINEN

Energiantuotannossa polttoprosessin sivutuotteena muodostuu palamatonta, epäorgaanista ainesta eli tuhkaa. Muodostuvan tuhkan määrä ei kuitenkaan ole suoraan verrattavissa polttoaineessa alun perin olleen epäorgaanisen aineen määrään, sillä osa mineraaleista voi hajota tai hapettua polton aikana (Jalovaara et al. 2003). Muodostuva tuhka jaetaan pohja- ja lentotuhkaan niiden sijainnin perusteella. Pohjatuhka poistetaan ulos kattilan pohjasta, kun taas lentotuhka kerätään talteen savukaasujen seasta. Tuhkan määrä ja koostumus riippuu käytetystä polttoaineesta, polttoprosessista sekä tuhkanerotustekniikasta. Polttotekniikoita on useita, joista yleisimmät ovat arina- sekä leijupoltto. (Kiviniemi et al. 2012; Pesonen, 2012)

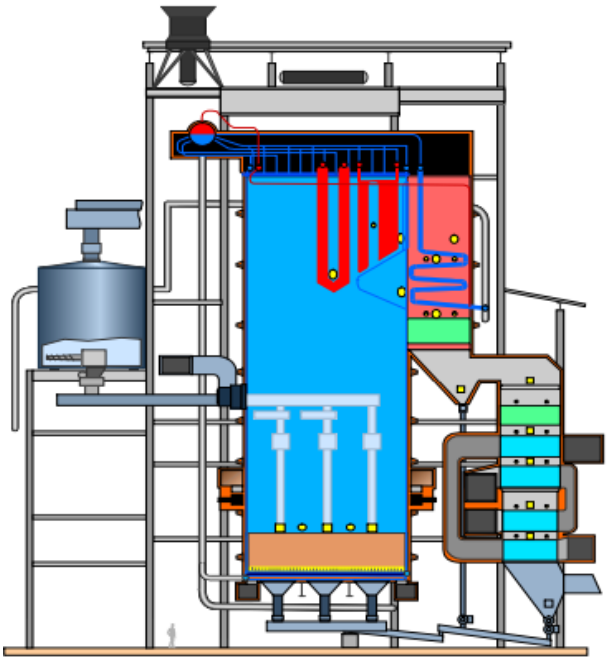
3.1 Leijukattilat

Leijupoltossa primääri-ilmaa johdetaan pedin, eli hiekan ja polttoaineesta muodostuneen tuhkan läpi. Kun ilman virtausnopeus on tarpeeksi suuri, alkaa peti leijumaan ja fluidisoitumaan. Sekundääri- ja tertiääri-ilmaa johdetaan tulipesän seiniltä. Tulipesän lämpötilaa nostamalla saadaan materiaalin liikettä entistä nopeammaksi. Ennen polttoaineen syöttöä, täytyy peti saada tarpeeksi kuumaksi (400–600 °C). Pedin lämmittämiseen voidaan käyttää starttipolttoaineena esimerkiksi kevyttä polttoöljyä tai maakaasua. Yleensä leijukattiloiden palamislämpötila on 700–1000 °C. Leijukattiloissa polttoaineen osuus on vain noin 1–5 % pedin ja polttoaineen kokonaismassasta. Koska kiinteällä petimateriaalilla on suuri lämmönjohtavuus, on polttoaineen kuivuminen nopeaa ja palamislämpötila pysyy vakaana. Leijukattiloiden hyvänä ominaisuutena voidaankin pitää niiden kykyä polttaa hyvin kosteita polttoaineita. Muita etuja ovat esimerkiksi mahdollisuus polttaa useita polttoaineita samanaikaisesti, helppo rikinpoisto sekä pienet NOx päästöt. (Vakkilainen, 2017)

Leijupolttotekniikka voidaan jakaa kahteen pääasialliseen toimintatapaan, jotka ovat kerrospetikattila (BFB) sekä kiertopetikattila (CFB) (Vakkilainen & Kaikko, 2022). Kerrospetikattilassa eli kuplapetikattilassa voidaan nähdä selkeä raja, mihin leijuva petiosuus päättyy. Murskattu polttoaine syötetään seinustalta pedin yläpuolelta, josta painavammat polttoainepartikkelit laskeutuvat leijupedin sisälle, jossa ne kuivuvat ja kaasuuntuvat. Kevyemmät polttoainepartikkelit ehtivät palamaan jo pedin yläpuolella. Palamisessa syntyvät savukaasut nousevat kattilan yläosaan tulistimille, josta ne johdetaan takavedon kautta syöttöveden ja

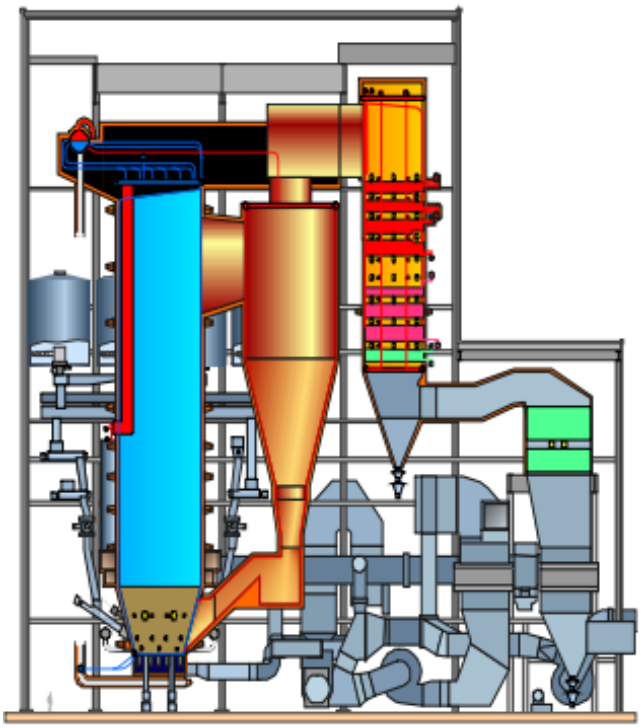
palamisilman esilämmittimille. Tämän jälkeen savukaasut johdetaan sähkösuotimelle tai letkusuotimelle, joissa niistä erotetaan lentotuhka (Vakkilainen, 2017). Savukaasuja pystytään puhdistamaan myös esimerkiksi erilaisilla savukaasupesureilla (Ohlstöm et al. 2005). Suotimilta kerätty lentotuhka ajetaan paineilman avulla lentotuhkasiiloon ja puhdistettu savukaasu jatkaa piippuun (Vakkilainen, 2017).

Leijupoltossa petimateriaalin koostumuksessa tapahtuu muutoksia. Petiin alkaa kerääntymään hiiltymiä sekä palamatonta ainesta, jolloin siitä tulee karkeampaa eikä se leiju enää samalla tavalla. Lisäksi sen lämmönsiirto-ominaisuudet muuttuvat. Karhenemisen estämiseksi kulunutta petimateriaalia poistetaan pohjan kautta tasaisin väliajoin. Samalla saadaan poistettua hiekan seassa oleva tuhka, jota kutsutaan pohjatuhkaksi. Hiekka ja sen seassa oleva tuhka poistetaan tulipesän pohjassa olevien aukkojen kautta vesijäähdytteisille ruuveille ja sieltä edelleen kuljettimien avulla tuhkakonttiin (Vakkilainen, 2017). Leijupoltossa suurin osa tuhkasta on lentotuhkaa. Lentotuhkan osuus muodostuvasta tuhkasta on 80–100 %. Loput 0–20 % on pohjatuhkaa, mutta pohjatuhkan mukana tulee myös poistettua petihiekkaa (Kiviniemi et al. 2012). Kuvassa 2 on esitetty leikkauskuva kuplapetikattilan rakenteesta.



Kuva 2. Leikkauskuva kuplapetikattilasta. (Vakkilainen & Kaikko, 2022)

Kiertopetikattilan toimintaperiaate on hieman erilainen. CFB-kattilassa ei ole tarkkaa rajaa mihin peti päättyy, vaan petimateriaali leijuu ja sekoittuu nopeammin. Suurempi leijumisnopeus saa osan hiekasta ja tuhkasta nousemaan savukaasujen mukana pois tulipesästä. CFB-kattilassa on tätä varten sykloni, joka erottaa kiinteän materiaalin savukaasusta. Syklonista kiinteä aines palautuu silmukan kautta tulipesän pohjalle ja savukaasu jatkaa kohti lämmönsiirtimiä ja sähkösuodattimia kuten BFB-kattilalla. Polttoaineen syöttö voi tapahtua seiniltä samalla tavalla kuin BFB-kattilalla tai polttoaine voidaan syöttää samaan silmukkaan, josta petimateriaali palautuu syklonista tulipesään. Sekä lento-, että pohjatuhkan keräys toteutetaan molemmissa kattiloissa samalla tavalla (Vakkilainen, 2017). Kiertopetikattilan rakenne esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Leikkauskuva kiertopetikattilasta. (Vakkilainen, 2011)

3.2 Arinakattilat

Arinapoltto on kaikista vanhin polttotapa. Se on nykypäivänäkin yleisin kattilatyyppi kiinteää biomassaa polttavilla alle 10 MWth laitoksilla. (Vakkilainen, 2017) Arinakattilassa palaminen tapahtuu polttoainekerroksessa. Arinapoltossa palamisilmaa syötetään yleensä

polttoainekerroksen läpi ja polttoaine palaa loppuun arinan päällä. Erilaisia arinatyyppejä on useita, kuten viistoarina, kekoarina ja tasoarina (Vakkilainen & Kaikko, 2022). Arinat voivat olla kiinteitä tai mekaanisia, useimmiten kiinteät arinat ovat pienempiä kooltaan. Pienemmät arinat eivät myöskään välttämättä tarvitse jäähdytystä, kun taas suurempia arinoita jäähdytetään joko ilmalla tai vedellä (Vakkilainen, 2017). Arinapoltossa etuina voidaan pitää mahdollisuutta polttaa suuria polttoainepartikkeleita, sekä alhaista omakäyttötehon tarvetta. Haittapuolia ovat esimerkiksi hidas säädettävyys, suuri palamattomien ainesten määrä sekä mekaanisen arinan runsas huoltotarve. (Jalovaara et al. 2003)

Mekaanisessa eli liikkuvassa arinassa osaa arinaraudoista liikutellaan edestakaisin, jolloin polttoaine saadaan sekoittumaan ja liikkumaan arinalla eteenpäin. Mekaanisen viistoarinan kaltevuuskulma voi tällöin olla pienempi kuin vastaavan kiinteän arinan, jossa polttoaineen liike perustuu painovoimaan (Jalovaara et al. 2003). Kiinteällä viistoarinalla kulma on tyypillisesti 30–50 °, kun taas mekaanisella viistoarinalla sopiva kulma on vain noin 15 °. Mekaaninen arina voi olla tyypiltään myös kekoarina, jossa arinoiden liike on pyörivää ja polttoaine syötetään suuren ruuvin avulla keskelle arinaa sen alta. Pyörivien arinakehien avulla polttoaine saadaan valumaan ja liikkumaan keskeltä reunoille päin (Vakkilainen, 2017). Kekoarina on hyvin soveltuva tekniikka polttamaan esimerkiksi erittäin kosteaa haketta ja purua (Jalovaara et al. 2003). Kekoarina esitetty kuvassa 4.

Kuva 4. Leikkauskuva kekoarinakattilasta. (Power Technology, 2022)

Arinapoltossa suurin osa polttoaineen sisältämästä tuhkasta poistuu arinalta tippumalla arinan alla olevaan vesitäytteiseen sammutusaltaaseen tai -kaukaloon. Arinapoltolle on tyypillistä, että tuhkan seassa sammutusaltaaseen putoaa palamiskelpoista polttoainetta (toiselta nimeltään tuhkan hehkutushäviö). Hehkutushäviö onkin arinapoltossa huomattavasti suurempaa kuin leijupoltossa (Jalovaara et al. 2003). Vedessä sammunut tuhka kerätään tuhkakuljettimella (Vakkilainen, 2017).

Arinakattiloissa muodostuu lisäksi lentotuhkaa kuten leijupetikattiloissakin, mutta arinakattiloissa niitä muodostuu suhteessa paljon vähemmän. Lentotuhkan osuus on 5–40 % ja vastaavasti pohjatuhkan osuus on 60–95 %. (Kiviniemi et al. 2012) Arinakattilassa lentotuhkan erottelemiseen savukaasusta käytetään sähkösuodattimia ja multisykloneja (Ohlström et al. 2005). Arinapoltossa palamislämpötila on korkeampi kuin leijupoltossa; tyypillisesti lämpötila nousee yli 1100 °C (Rebbling et al. 2019).

4 TUHKAN HYÖTYKÄYTÖN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Tuhkaa voidaan käyttää hyödyksi usealla eri tavalla, kuten metsä- sekä peltolannoitteena, maanrakentamisessa ja betonin tai asfaltin seosaineena. Hyötykäyttöä pyritään säätelemään ja ohjaamaan asetuksien sekä lakien avulla. Tuhkan hyötykäytöstä aiheutuu tuotantolaitokselle useimmiten kustannuksia, joten se on yksi vaikuttava tekijä hyötykäyttökohteen valinnassa. Seuraavissa kappaleissa esitetään tarkemmin tuhkan hyötykäytön kohteet sekä niitä koskevat asetukset ja lait.

4.1 Tuhkan hyötykäyttöä koskevat säädökset

Suomessa on asetettu monia lakeja sekä asetuksia, joilla tuhkan hyötykäyttöä pystytään säätelemään. Lainsäädännöllä rajoitetaan tuhkan sisältämiä haitta-aineiden enimmäispitoisuuksia ja siten varmistetaan sen turvallinen käyttö niin terveyden kuin ympäristön kannalta. Lainsäädäntöä ja asetuksia sovelletaan tuhkan käyttökohteen mukaisesti. Tuhkan hyötykäyttöä ja loppusijoittamista koskien oleellisimpina rajoitteina voidaan pitää lannoitevalmistelakia ja -asetusta, ympäristönsuojelulakia, jätelakia ja -asetusta sekä valtioneuvoston asetusta eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Maa- ja metsätalousministeriön asetuksella 24/11 annetaan tarkempia vaatimuksia lannoitevalmisteiden ominaisuuksista. Tässä työssä tarkastellaan vain tuhkasta annettuihin säännöksiin.

4.1.1 Lannoitevalmistelaki ja -asetus

Lannoitevalmistelain tavoitteena on edistää turvallisten, hyvälaatuisten ja kasvintuotantoon sopivien lannoitevalmisteiden tarjontaa ja siten turvata elintarvikkeiden, ympäristön sekä kasvintuotannon laatu. Lisäksi tavoitteena on edistää lannoitteiksi soveltuvien sivutuotteiden hyötykäyttöä ja antaa riittävät tiedot lannoitevalmisteista niiden käyttäjille ja ostajille. Laki velvoittaa, että lannoitevalmisteiden tulee olla tasalaatuisia, turvallisia ja käyttötarkoitukseensa sopivat. Lannoitevalmisteissa ei saa olla sellaista määrää haitallisia aineita, eliöitä tai tuotteita, että se voisi oikein käytettynä aiheuttaa vaaraa ihmisille, eläimille, ympäristölle tai kasveille. (Ympäristöministeriö 539/2006)

Teollisuus- tai käsittelylaitoksen sivutuotteena syntyvässä tuhkalannoitteessa on oltava riittävästi ravinteita, jotta sillä voidaan todeta olevan kasvien kasvuun edistävä vaikutus. Tuhkalannoitukseen voidaan käyttää puun, turpeen ja peltobiomassan tuhkaa sekä eläinperäistä tuhkaa. Tuhkaa tulee käsitellä siten, että sen pölyäminen saadaan minimoitua. Metsälannoitteena tai peltolannoitteena käytettävän tuhkan sisältämille haitallisille metalleille on asetettu enimmäispitoisuudet, jotka esitetään taulukossaTaulukko 1. Lisäksi metsälannoituksessa käytettävän tuhkan kuiva-aineessa on oltava kaliumin ja fosforin yhteispitoisuus vähintään 2,0 % ja kalsiumia 6,0 %. Peltolannoitukseen käytettävän tuhkan neutraloiva kyky (kalsium) on oltava vähintään 10 %. Epäorgaanisia lannoitevalmisteita saa asetuksen mukaan lisätä rakeistettuun tuhkalannoitteeseen, jotta se täyttää sille asetetut vaatimukset. Jos tuhkalannoitteeseen lisätään booria, sen levittämistä pohjavesi- sekä suojelualueille ei sallita. (Maa- ja metsätalousministeriö 24/11)

Taulukko 1. Maataloudessa ja metsätaloudessa käytettävien tuhkalannoitteiden tai niiden raaka-aineena käytettävän tuhkan haitallisten metallien enimmäispitoisuudet kuiva-aineessa. (Maa- ja metsätalousministeriön asetus 24/11)

Alkuaine	Enimmäispitoisuus peltolannoite [mg/kg]	Enimmäispitoisuus metsälannoite [mg/kg]
Arseeni	25	40
Elohopea	1	1
Kadmium	2,5	25
Kromi	300	300
Kupari	600	700
Lyijy	100	150
Nikkeli	100	150
Sinkki	1500	4500

Diplomityön aikana 16.7.2022 Suomessa tuli voimaan uusi lannoitelaki 711/2022. Lakiuudistuksen taustalla on Euroopan Unionin uusi lannoitevalmisteasetus sekä kehittämistarve kansallisen lainsäädännön uudistamiselle. Keskeisiä lannoitteen valmistamista ja markkinoille saattamista koskevia muutoksia ovat tyyppinimistä luopuminen sekä siirtyminen EU-lannoitevalmisteasetuksen kanssa samantyyliseen tuoterakenteeseen. Lannoitevalmistelain lisäksi uudistetaan lain perusteella annettavia asetuksia, joissa tulee olemaan yksityiskohtaisempia toimintaan ja tuotteisiin liittyviä vaatimuksia. Asetukset ovat tällä hetkellä vielä valmistelun alla. (Ruokavirasto, 2022)

4.1.2 Lannoitevalmisteiden valvonta

Maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa 11/12 annetaan ohjeita lannoitevalmisteiden toiminnan harjoittamisesta sekä valvonnasta. Asetuksen mukaan toiminnanharjoittajan on ilmoitettava kirjallisesti Ruokavirastolle (ent. Evira) toiminnan aloittamisesta, toiminnan oleellisista muutoksista ja lopettamisesta. Toiminnanharjoittajana asetuksessa pidetään lannoitevalmisteita ja soveltuvin osin niiden raaka-aineita valmistavia, markkinoille saattavia, maahantuovia ja varastoivia tahoja. Toiminnanharjoittajan tulee suorittaa omavalvontaa ja määrittää omavalvontasuunnitelma. Omavalvontaa tulee suorittaa toiminnasta syntyvien vaarojen vähentämiseksi ja sen toteuttamisesta tulee pitää kirjaa. Lannoitevalmisteiden turvallisuuden ja laadun varmistamiseksi dokumentoinnissa on oltava analyysitulokset tärkeimmistä valmistus- ja käsittelyvaiheista sekä poikkeamatilanteista ja niiden pohjalta tehdyistä korjaavista toimenpiteistä. Omavalvontasuunnitelmasta tulee käydä ilmi toiminnan tarkempi kuvaus kuten tuotanto- ja toimintaprosessi. Suunnitelma tulee toimittaa Ruokavirastolle ja sitä tulee päivittää, jos toiminnassa tapahtuu oleellisia muutoksia. Lannoitevalmisteiden laadun varmistamiseksi tehtävät viralliset analyysit on teetettävä Ruokaviraston hyväksymässä laboratoriossa. Ruokavirasto pitää kirjaa Suomessa rekisteröidyistä ja hyväksytyistä laitoksista, sekä toimijoista. (Maa- ja metsätalousministeriö 11/12)

4.1.3 Jätelainsäädäntö

Jätelain tavoitteena on vähentää jätteen määrää sekä haitallisuutta ja ehkäistä jätteistä aiheutuvaa vaaraa ympäristölle ja terveydelle. Lisäksi lailla pyritään edistämään luonnonvarojen kestävää käyttöä sekä kiertotaloutta, varmistamaan toimivaa jätehuolta ja ehkäisemään roskaantumista. (Ympäristöministeriö 2011/646)

Jätelaki uudistui vuonna 2021. Jätelain 5 §:ssä määritetään, että tuotantoprosessissa syntyvä esine tai asia on jätteen sijaan sivutuote, jos sen jatkokäyttö on varmistettu, sitä voidaan käyttää sellaisenaan tai teollisesti tavanomaisesti muunneltuna, se syntyy olennaisena osana tuotantoprosessia ja se täyttää suunniteltuun käyttöön vaadittavat ympäristö- ja terveydensuojelukriteerit, eikä sen käytöstä aiheudu vaaraa terveydelle eikä ympäristölle. (Ympäristöministeriö 2021/714). Näin ollen voimalaitoksissa poltosta aiheutuva tuhka voidaan

nykyisin määritellä sivutuotteeksi, jos se täyttää sille tarkoitetun jatkokäyttökohteen vaatimukset.

Voimalaitoksessa syntynyt tuhka voidaan määrittää jätteeksi, jos se ei täytä sivutuotteen vaatimuksia. Tällöin jätteen haltijan on toimittava jätelain 8 §:ssä esitetyn etusijaisjärjestyksen mukaisesti. Etusijaisjärjestyksen mukaan, on ensisijaisesti vähennettävä syntyvää jätteen määrää ja sen haitallisuutta. Mikäli jätettä silti muodostuu, täytyy se valmistella uudelleen käytettäväksi tai toissijaisesti se tulee kierrättää. Mikäli kierrättäminen on mahdotonta, tulee jäte hyödyntää jollakin toisella tavalla, esimerkiksi energiana. Jos jätettä ei kyetä hyödyntämään, tulee se loppukäsitellä. (Ympäristöministeriö 2011/646)

Jos tuhka ei ominaisuuksiltaan sovi hyötykäytettäväksi ja se toimitetaan jätteenä kaatopaikalle, tulee siitä maksaa valtiolle jäteveroa. Voimalaitostuhkat kuuluvat jäteverolaissa jäteryhmään 10 01. Kaatopaikalle toimitetusta jätteestä maksetaan tällä hetkellä veroa 70 euroa/tonni. (Valtiovarainministeriö 2010/1126) Lisäksi hallitus on esittänyt eduskunnalle laiksi jäteverolain muuttamista, jossa jäteveroa nostettaisiin nykyisestä 70 eurosta 80 euroon/tonni. Lain on tarkoitus tulla voimaan 1.1.2023. (Valtiovarainministeriö, 2022).

4.1.4 Ympäristönsuojelulaki

Ympäristölain avulla pyritään muun muassa ehkäisemään ympäristön pilaantumista, ehkäisemään ja vähentämään päästöjä, edistämään luonnonvarojen kestävää käyttöä ja torjumaan ilmastonmuutosta. Ympäristölakia sovelletaan toimintaan, joka aiheuttaa tai voi aiheuttaa ympäristön pilaantumista. Lakia sovelletaan myös jätettä syntyvään toimintaan ja toimintaan, jossa jätettä käsitellään. Lain mukaan toiminnanharjoittajalla on selvilläolovelvollisuus, eli toiminnanharjoittajan tulee olla selvillä toimintansa ympäristöriskeistä ja -vaikutuksista sekä kuinka niitä hallitaan. Lisäksi tulee olla selvillä, kuinka haitallisia vaikutuksia kyetään mahdollisesti vähentämään. Toiminnanharjoittajan vastuulla on minimoida ympäristöön ja viemäriverkostoon toiminnastaan aiheutuvat päästöt. (Ympäristöministeriö 527/2014)

Toiminta, jonka harjoittamisesta aiheutuu ympäristön tai vesistön pilaantumisen vaara vaatii ympäristöluvan. Lupa vaaditaan myös esimerkiksi jätevesien johtamisesta, josta mahdollisesti aiheutuu lähteen, ojan tai noron pilaantuminen. Ympäristölain mukaan (liite 1 taulukko 1) ympäristölupa vaaditaan laitoksissa, joissa käsitellään jätteitä ammattimaisesti tai laitosmaisesti. Kuitenkin lain 32 §:ssä momentissa 2 mainitaan, ettei jätteen käsittelyyn tarvitse lupaa, kun kyseessä on haitattoman tuhkan hyötykäyttö lannoitevalmistelain 539/2006 mukaisesti. Jätteen käsittelystä tulee kuitenkin tehdä 116 §:ssä esitetty rekisteröinti-ilmoitus. Ilmoitus tehdään valtion valvontaviranomaiselle ympäristönsuojelun tietojärjestelmään rekisteröintiä varten ja ilmoitus on tehtävä ajoissa ennen jätteen käsittelyn aloittamista. (Ympäristöministeriö 527/2014)

4.1.5 MARA-asetus

Valtioneuvoston asetuksella eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarankentamisessa (MARA), pyritään edistämään jätteiden hyötykäyttöä määrittelemällä ehdot, joita noudattamalla asetuksen esittämien jätteiden käyttöön maarakentamisessa ei tarvita ympäristönsuojelulain mukaista ympäristölupaa. Asetusta sovelletaan jätteiden käyttöön useissa eri maarakennuskohteissa. Näitä kohteita ovat vallit, kentät, väylät ja näiden rakennekerrokset sekä varasto- ja teollisuusrakennusten pohjarakenteet. Lisäksi asetusta sovelletaan jätteiden väliaikaiseen varastointiin, kun varastointi ja rakentaminen perustuu lupaan, ilmoituslupaan, kunnan rakennusjärjestykseen tai lakisääteiseen suunnitelmaan. Jätteet, joita asetuksen mukaisesti voidaan hyödyntää maarakentamisessa, on esitetty asetuksen liitteessä 1. Turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkat sekä petihiekat ovat sallittujen materiaalien listalla, mutta niiden käyttö ei kuitenkaan ole sallittua valleissa. Muissa asetuksessa esitetyissä maanrakentamiskohteissa tuhkat ja petihiekat sallitaan. (Ympäristöministeriö 843/2017)

Jätteen hyödyntäminen maarakennuksessa ilman ympäristölupaa edellyttää jätelain ja ympäristösuojelulain mukaista menettelyä sekä niiden lisäksi useita kyseisen asetuksen asettamia vaatimuksia. Näitä ovat esimerkiksi jätteen enimmäiskerrospaksuus maarakentamiskohteessa, jätettä sisältävän rakenteen vähimmäisetäisyys pohjaveden enimmäiskorkeudesta ja jätteen sisältämien haitallisten aineiden liukoisuudet ja pitoisuudet tulee pysyä niille

asetetuissa raja-arvoissa (taulukko 2). Vaatimuksien täytyttyä ei jätteen hyödyntämiseksi maarakennukseen ympäristölupaa tarvita, mutta siinäkin tapauksessa on toiminnasta tehtävä rekisteröinti-ilmoitus valtion valvontaviranomaiselle. Ilmoituksen tulee sisältää mm. hyödyntämispaikan sijainti, jätteen luovuttajan yhteystiedot ja laadunvarmistusjärjestelmä, tiedot jätteen sisältämistä haitallisten aineiden pitoisuuksista ja liukoisuuksista sekä niihin liittyvä laadunhallintaraportti. (Ympäristöministeriö 843/2017)

Taulukko 2. Maarakentamiseen hyötykäytettävän jätteen enimmäisliukoisuudet, -pitoisuudet ja -kerrospaksuudet. (Ympäristöministeriö 843/2017)

Haitallinen aine	**Maarakentamiskohde**						
	Väylä [1]		Kenttä [1]		Valli	Teollisuus- ja varasto-rakennuksen pohjarakenne	Tuhkamursketie [2]
	Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Jätteen kerrospaksuus ≤ 5,0 m	Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m	Jätteen kerrospaksuus ≤ 0,2 m
Liukoisuus (mg/kg LS = 10 l/kg)	Peitetty	Päällystetty	Peitetty	Päällystetty	Peitetty		
Antimoni	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Arseeni	1	2	0,5	1,5	0,5	2	2
Barium	40	100	20	60	20	100	80
Kadmium	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06
Kromi	2	10	0,5	5	1	10	5
Kupari	10	10	2	10	10	10	10
Lyijy	0,5	2	0,5	2	0,5	2	1
Molybdeeni	1,5	6	0,5	6	1	6	2
Nikkeli	2	2	0,4	1,2	1,2	2	2
Seleeni	1	1	0,4	1	1	1	1
Sinkki	15	15	4	12	15	15	15
Vanadiini	2	3	2	3	2	3	3
Elohopea	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03
Kloridi [3]	3200	11000	800	2400	1800	11000	4700
Sulfaatti [3]	5900	18000	1200	10000	3400	18000	6500
Fluoridi [3]	50	150	10	50	30	150	100
Liuennut orgaaninen hiili (DOC)	500	500	500	500	500	500	500
Pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)							
Bentseeni	0,2	0,2	0,02	0,2	0,06	0,02	0,2
TEX [4]	25	25	25	25	25	10	25
Naftaleeni	5	5	5	5	5	5	5
PAH-yhdisteet [5]	30	30	30	30	30	30	30
Fenoliset yhdisteet [6]	10	10	5	10	10	10	10
PCB-yhdisteet [7]	1	1	1	1	1	1	1
Öljyhiilivedyt C10-C40	500	500	500	500	500	300	500

1) Asfalttirouheen ja -murskeen maksimi maarakennuskohteessa 1000 tonnia
2) Kerrospaksuutena käytetty laskennallista paksuutta
3) Raja-arvoja ei sovelleta kohteisiin, jotka täyttävät kaikki seuraavat edellytykset: sijaitsevat enimmillään 500 m etäisyydellä merestä, kohteen ja meren välillä ei sijaitse talousvedenottokaivoja sekä kohteen läpi suotautuvan veden purkautumissuunta on merelle päin
4) Etyylibentseenin, ksyleenin ja tolueenin yhteispitoisuus
5) Polyaromaattisten hiilivetyjen antraseenin, asenafteenin, asenaftyleenin, bentso(a)antraseenin, bentso(a)pyreenin, Bentso(b)fluoranteenin, bentso(g,h,i)peryleenin, bentso(k)fluoranteenin, dibento(a,h)antraseenin, fenantreenin, fluoranteenin, fluoreenin, indeno(1,2,3-cd)pyreenin, kruptoseenin, naftaleenin ja pyreenin yhteispitoisuus
6) Fenolin, o-kresolin, m-kresolin, p-kresolin ja bisfenoli-A:n yhteispitoisuus
7) Polyklooratuiden bifenyylien kongeneerien 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 yhteispitoisuus

Eri jäteryhmiin kuuluville hyödyntämiskelpoisille materiaaleille on asetuksessa annettu haitallisten aineiden raja-arvojen lisäksi muita vaatimuksia. Turpeen- ja puuperäisen aineksen poltossa syntyvien tuhkien käytöstä maarakennukseen tulee ottaa huomioon tuhkien ja rakennusmateriaalien Säteilyturvakeskuksen ohjeistamat rajoitteet radioaktiivisuuteen liittyen. Lisäksi tuhkamursketien osalta asetus rajoittaa, että tiehen käytettävässä tuhkan ja kiviainesmurskeen seoksessa tuhkan sallittu enimmäismäärä on 30 paino-%. (Ympäristöministeriö 843/2017)

Asetus vaatii, että maarakennukseen jätteet luovuttavalla taholla on laadunvarmistusjärjestelmä. Tätä järjestelmää käyttämällä voidaan yksilöidä ja jäljittää jätteen soveltuvuus sille asetettuihin vaatimuksiin. Laadunvarmistusjärjestelmällä tulee varmistua, että hyötykäyttöön tarkoitetun jätteen laadullinen valvonta on suunniteltua ja jatkuvaa, sekä laadunvalvontatutkimukset on suoritettu asetuksen vaatimalla tavalla. Lisäksi järjestelmällä tulee varmistua, että erilaiset jätejakeet on pidettävä erillään jätteen synty- ja varastointipaikalla. Järjestelmästä tulee käydä ilmi vähintään seuraavat tiedot:

- jätteet nimikkeineen sekä arvio vuosittaisesta määristä, kun kyseessä on laitosmainen tuotanto
- laadunvalvontatutkimukset, jotka sisältävät näytteenottoajankohdat, -paikat, ja -menetelmät, osa- ja kokoomanäytteiden suuruudet ja lukumäärät sekä näytteenoton laadunvarmennus
- ohjeistus jätteen käsittelystä ja varastoimisesta sekä sen vastaanotosta, jos kyseisellä laitoksella käsitellään useammasta kohteesta toimitettavaa jätettä
- vastuussa olevat henkilöt ja heidän pätevyytensä
- auditointi- ja arviointisuunnitelma
- seuranta ja raportointi, mukaan luettuna tulosten dokumentointi.

Asetuksessa ohjeistetaan myös laadunvalvontatutkimuksien suorittaminen. Tähän kuuluu asianmukainen näytteenotto. Näytteenoton suunnitteluun ja toteutukseen sovelletaan jätteiden karakterisointia käsittelevät standardin SFS-EN 14899 ja Euroopan standardoimisjärjestön (CEN) teknisten raporttien säännöksiä sekä maanrakennustoimialan sisäisiä standardeja. Kokoomanäytteiden avulla määritetään jätteen ympäristökelpoisuus. Kokoomanäytteet

koostetaan jätteen osanäytteistä, joiden raekokoa voidaan tarpeen vaatiessa pienentää jauhamalla tai murskaamalla. Turpeen- ja puuperäisen aineksen poltosta aiheutuvien tuhkien ja petihiekan kokoomanäytteiden muodostaminen ja niistä tehtävät laadunvalvonnan määritykset esitetään alla. (Ympäristöministeriö 843/2017)

Taulukko 3. Turpeen- ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkien sekä leijupetihiekan kokoomanäytteiden muodostaminen ja tehtävät määritykset (843/2017)

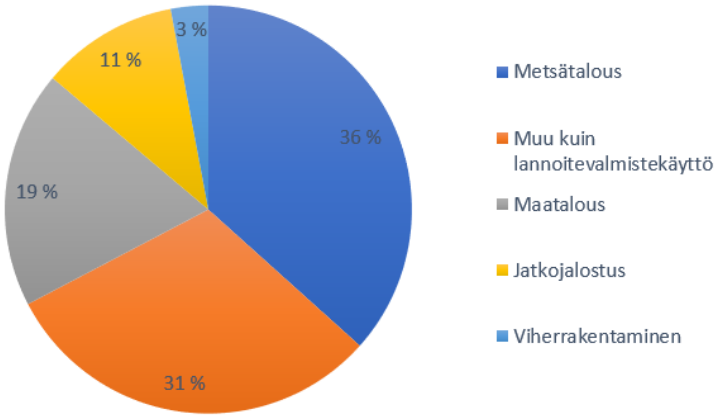
Jäte	Jätenimike	Massamäärän maksimi, joka voidaan tutkia yhdellä kokoomanäytteellä [ton]	Osanäytteiden minimimäärä yhdessä kokoomanäytteessä	Liukoisuusmääritykset	Kokonaispitoisuudet
Turpeen- ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkat sekä leijupetihiekka	10 01 01, 10 01 03, 10 01 15, 10 01 24, 19 01 12, 19 01 14, 19 01 19	5000	50	Antimoni, Arseeni, Barium, Elohopea, Kadmium, Kromi, Kupari, Lyijy, Molybdeeni, Nikkeli, Seleeni, Sinkki, Vanadiini, Fluoridi, Kloridi, Sulfaatti, Liuennut orgaaninen hiili (DOC)	PAH-yhdisteet

Laitosmaisesta tuotannosta syntyvien jätteiden ympäristökelpoisuus tulee tutkia säännöllisesti. Tutkimukset voidaan kohdentaa laitoksella syntyvään jatkuvaan jätevirtaan tai käsiteltyyn, hyötykäyttöön toimitettavaan jätteeseen. Ennen kuin jäte voidaan luovuttaa hyötykäyttöön, on sen sisältämien haitta-aineiden määritykset tehtävä vähintään yhdestä kokoomanäytteestä. Jätettä voidaan käsitellä esimerkiksi ikäännyttämällä, mikäli se ylittää sille asetetut raja-arvot. Käsittelyn jälkeen jätteen ympäristökelpoisuus on tutkittava uudelleen kokoomanäytteestä. Kokoomanäytteeseen kerätyt osanäytteet tulee ottaa siten, että näytteet edustavat koko tutkittavaa jäte-erää. (Ympäristöministeriö 843/2017)

4.2 Tuhkan hyötykäyttömahdollisuudet

Suomessa syntyy vuosittain erilaisia tuhkia yhteensä noin 1,5 miljoonaa tonnia. Energia- ja metsäteollisuudessa turpeen- ja puuperäisten polttoaineiden poltosta syntyy noin 600 000 tonnia tuhkaa vuosittain. Puu- ja turveperäiset tuhkat sisältävät käyttökelpoisia ravinteita, jotka kannattaa palauttaa metsään niin metsänkasvatuksellisesta kuin ekologisestakin

näkökulmasta ajatellen. Toinen yleinen hyötykäyttökohde puu- ja turveperäisille tuhkille on maarakentaminen (Arnkil et al. 2020). Vuonna 2015 Suomessa käytettiin tuhkalannoite typpinimen tuhkia 150 000 tonnia (Marttinen et al. 2017). Tuhkalannoitteiden käyttö eri kohteisiin esitetty kuvassa 5.



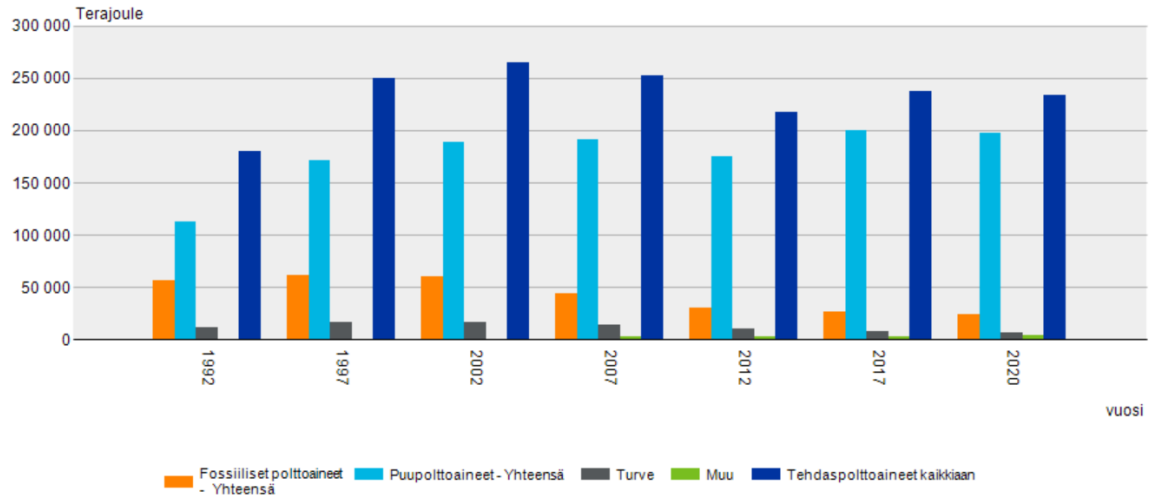
Kuva 5. Tuhkalannoitteiden käyttö Suomessa vuonna 2015. (Marttinen et al. 2017)

4.2.1 Metsälannoitteena

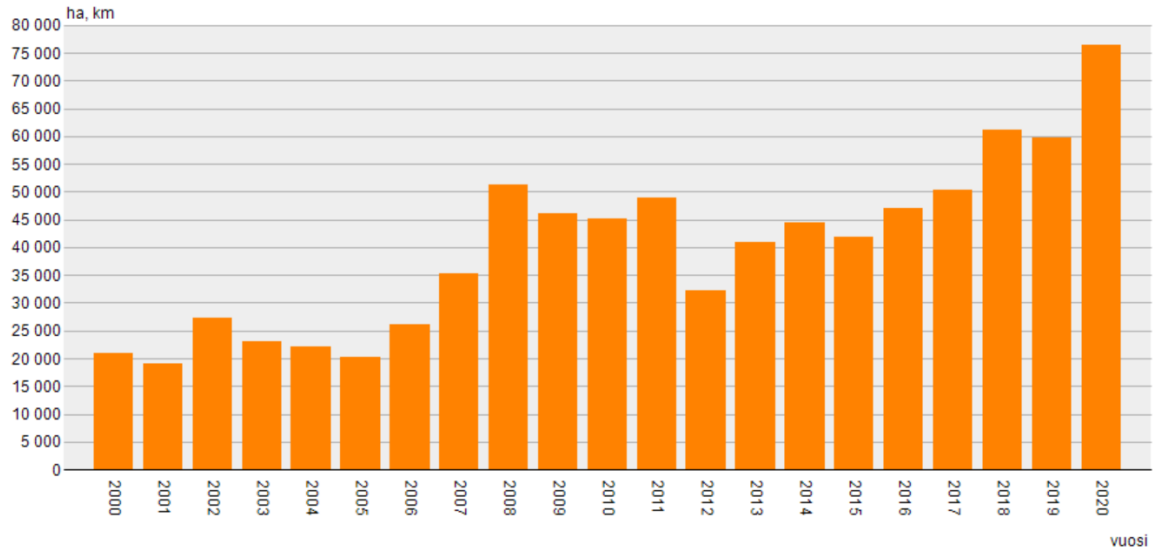
Tuhkaa on käytetty jo pitkään lannoitteena. Luonnonvarakeskus (entinen Metsäntutkimuslaitos) on tehnyt ensimmäiset tuhkalannoituskokeensa 1930-luvulla. Kokemuksien perusteella voidaan osoittaa, että tuhkalannoitus edistää puiden ravinnetilaa pitkään. Ravinnetilan muutoksiin vaikuttaa useampi tekijä, joita ovat puulaji, tuhkalannoitteen määrä sekä laatu, kasvupaikan ravinteisuus ja puiden ravinnetila ennen tuhkalannoitusta. Vaikka tuhkalannoituksen positiivisista vaikutuksista onkin tiedetty jo pitkään, on sen käytössä ollut haasteita. 1960–1980 luvulla elettiin vilkasta metsälannoitustoiminnan aikaa, mutta tuhkan saanti oli silloin satunnaista. Lisäksi tuhkaan liittyvä ohjeistus ja tieto on ollut vajavaista, jonka vuoksi mahdolliset käyttäjät ovat kokeneet epävarmuutta tuhkan hyötykäytöstä. (Arnkil et al. 2020)

1990-luvun biotalouden murroksen jälkeen Suomi alkoi siirtymään fossiilisista polttoaineista uusiutuviin, joka on vähitellen lisännyt syntyvien tuhkien määrää. Metsäteollisuuden käyttämät tehdaspolttoaineet ovat esitetty kuvassa 6. Tuhkamäärien lisäksi myös vuotuiset kokonaislannoitukset ovat kasvaneet. Nykyisin Suomessa lannoitetaan vuosittain 45 000–60

000 hehtaaria metsää, josta tuhkalannoitteen osuus on reilu 10 000 hehtaaria. (Arnkil et al. 2020). Metsien kokonaislannoitusmäärä Suomessa 2000-luvulla esitetty kuvassa 7.



Kuva 6. Metsäteollisuuden tehdaspolttoaineet Terajouleina 1992–2020. (Luonnonvarakeskus)



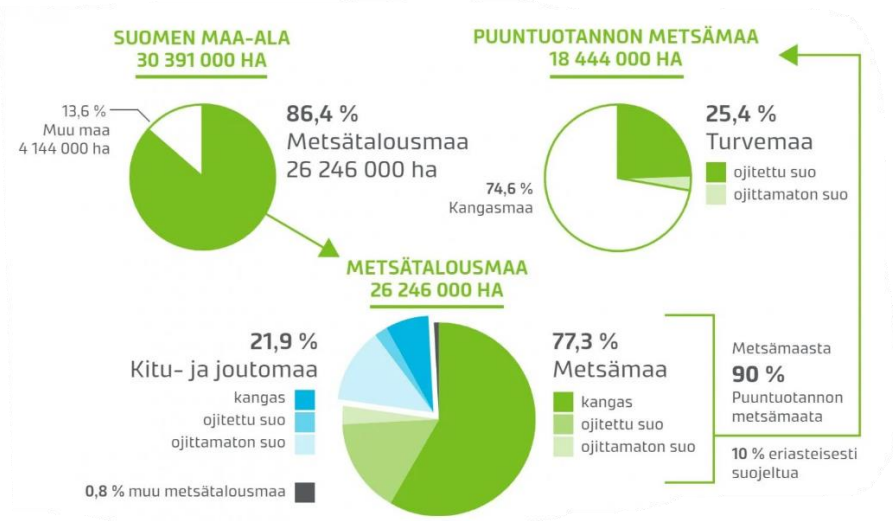
Kuva 7. Metsälannoitusten kokonaismäärä Suomessa vuosina 2000–2020. (Luonnonvarakeskus)

Puutuhkan sisältämien ravinteiden vuoksi se sopii lannoitteeksi paksuturpeisille, vähäpuustoisista- tai avosoista syntyneille mustikka- ja puolukkaturvekankaille. Puutuhka paikkaa maaperän fosfori, kalium ja hivenravinteiden puutoksia sekä kalkitsee maaperän (Äijälä et al. 2019). Puutuhkassa on yleensä 10–30 % kalsiumia, 2–6 % kaliumia ja 1–3 % fosforia kuiva-aineesta. Tuhkalannoitteessa tulisi fosforin suhde kaliumiin olla noin 1:2, jotta lannoitteella olisi ihanteellinen vaikutus puuston kasvuun (Huotari 2012). Edellä mainituiden

ravinteiden lisäksi tuhka sisältää tarpeellisia hivenaineita, kuten booria, sinkkiä ja kuparia (Moilanen 2009). Puutuhka sisältää kaikki puiden ja kasvien tarvitsemia ravinteita paitsi typpeä, joka haihtuu palamisreaktiossa savukaasujen mukana (Äijälä et al. 2019).

Turpeen tuhkassa on enimmäkseen fosforia, mikä rajoittaa sen hyötykäyttökohteita. Turpeen ja puutuhkan sekoitusta voidaan kuitenkin käyttää samoihin kohteisiin kuin pelkkää puutuhkaa (Äijälä et al. 2019). Ravinteiden lisäksi tuhkassa on rikastuneena poltettavien biomassojen sisältämiä raskasmetalleja, kuten kadmiumia, arseenia sekä nikkeliä. Puutuhkassa raskasmetallipitoisuudet ovat yleensä korkeammat kuin turvetuhkassa, pois lukien arseeni, jota on useimmiten enemmän turpeen tuhkassa. Osa raskasmetalleista on kasveille tarpeellisia hivenaineita, kun taas osa voi olla myrkyllisiä jo pieninäkin pitoisuuksina. Näitä haitallisia raskasmetalleja ovat esimerkiksi lyijy ja kadmium. (Huotari, 2012)

Tuhkalannoite sopii parhaiten ojitettuihin turvemaiden metsiin, jotka kärsivät ravinne-epätasapainosta ja kivennäisravinteiden puutoksesta. Tuhka ei sisällä typpeä, joten se sopii paksuille turvemaille, joissa ei ole typen puutosta. Näillä paikoilla puuston kasvua voi rajoittaa esimerkiksi kaliumin ja fosforin puutostila, jota lannoitetuhkalla voidaan korjata. Ravinne-epätasapainoisia maita esiintyy myös turpeennostokenttien metsitysalueilla sekä suopelloilla. (Äijälä et al. 2019) Suomen puuntuotannon metsämaan osuus muusta maa-alasta esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Suomen puuntuotannon metsämaan osuus muusta maa-alasta. (Luonnonvarakeskus; VMI12, 2014–2018)

Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, että Suomessa on puuntuotannon metsämaata n. 18 444 000 hehtaaria, josta noin neljännes on ojitettua suota. Näin ollen tuhkalannoitteelle optimaalista ojitettua suomaata on Suomessa noin 4 600 000 hehtaaria. Kuten aiemmin mainittiin, Suomessa tuhkalla lannoitetaan vuosittain noin 10 000 ha metsää. Potentiaalia tuhkalannoituksen kasvattamiseen olisi siis valtavasti.

Tuhkalannoitteen käytöllä suometsissä saattaa olla nopeakin vaikutus ravinteiden puutostilaan. Ravinnepuutoksesta näkyvät ulkoiset oireet, kuten neulasten kellertävä väri vaihtuu yleensä jo levitysvuonna tummanvihreäksi. Lannoituksen jälkeisinä vuosina neulasten massa ja elävien neulasten vuosikertojen määrä kasvavat. Kaliumin puutostila puissa korjaantuu vuoden aikana lannoituksesta ja fosforin puutostila 3–4 vuoden kuluessa lannoituksesta. Puuston kasvun voimistuminen on riippuvainen kasvupaikan typen määrästä. Vähätyppisillä kasvupaikoilla kasvu voimistuu 4–5 vuoden kuluttua, kun taas runsaasti typpeä sisältävillä kasvupaikoilla kasvun voimistuminen tapahtuu jo 2–3 vuoden sisällä. Tuhkalannoitus lisää vuodessa puuston kasvua tutkimusten mukaan 2–6 m^3 per hehtaari (Arnkil et al., 2020). Lannoitettu puusto hyötyy tuhkasta saatavista ravinteista vuosikymmeniä (Moilanen, 2009).

Kangasmailla tuhkalannoituksella ei saada niin suurta hyötyä kuin suometsissä. Kangasmaiden puiden kasvua rajoittaa eniten typen puute, joskin boorista sekä fosforistakin saattaa olla puutetta. Tästä syystä tuhkan lisäksi on kangasmetsiin levitettävä typpeä, jotta puuston kasvu vilkastuisi. Tuhkan ja typen yhteisvaikutuksen on havaittu olevan tehokkaampi verrattuna pelkkään typpilannoitukseen. Vähäravinteisilla alueilla puiden kasvu saattaa kuitenkin heikentyä tuhkalannoituksen myötä, sillä tuhkan vähentäessä maaperän happamuutta kasvualustan luontaiset typpivarat sitoutuvat hajottajaeliöstöön. Tuhkalannoituksen aiheuttamia kasvumuutoksia onkin havaittu yleensä vain viljavimmilla kangasmailla. (Arnkil et al. 2020; Moilanen, 2009)

Tuhkalannoitus vaikuttaa myönteisesti myös turvetuotannosta vapautuneiden suopohjien metsittymiseen. Lannoituksen avulla voidaan moninkertaistaa kasvilajiston määrä ja nopeuttaa etenkin hieskoivun taimien alkukehitystä. Tuhkalannoitus myötävaikuttaa lisäksi ympäristönhoitoon, sillä lannoituksen myötä nopeasti kasvanut aluskasvillisuus hidastuttaa

suopohjassa olevan hienoaineksen kulkeutumista vesistöihin. Aluskasvillisuus on myös metsän kasvun alkuvaiheessa merkittävämpi hiilinielu kuin puuntaimet. (Arnkil et al. 2020; Moilanen, 2009)

Lannoitetuhkan määrä valitaan siten, että lannoituksen tavoitteet 40–50 kg fosforia sekä 80–120 kg kaliumia per hehtaari saavutetaan. Tuhkan kosteudesta, ravinteista ja haitta-aineiden pitoisuuksista riippuen levitettävä määrä on yleensä n. 4000–8000 kg hehtaarille. Vaikka tuhkalannoitus lisääkin puuston kasvua koko kasvatusajan läpi, voi kaliumin puutos alkaa rajoittamaan kasvua, kun lannoituksesta on kulunut 20–30 vuotta. Kaliumin puutos vaikuttaa erityisesti turvekankailla, jotka ovat kehittyneet nevaisista soista. Tällöin kalisuolan tai kaliumhivenravinteen käyttö jatkolannoitteena edesauttaa puuston kasvua. (Äijälä et al. 2019)

4.2.2 Peltolannoitteena

Maatalous on toimialoista suurin yksittäinen fosforin ja typen käyttäjä sekä kierrättäjä Suomessa. Eniten ravinteita käytetään lannoitteena kasvintuotannossa (Marttinen et al. 2017). Peltojen lannoitukseen käytettävien ravinteiden määrään vaikuttaa usea tekijä, kuten viljeltävä kasvi/lajike, sadon käyttötarkoitus, tuotantojärjestelmä ja sen viljelystekniikka, lannoitussuositukset sekä viljelymaan ominaisuudet (multavuus, happamuus, maalaji ja ravinnepitoisuudet). Peltolannoitteet ja kalkitusaineet sisältävät muun muassa fosforia, typpeä, kaliumia, magnesiumia ja kalsiumia. Lisäksi Suomen viljelymaissa on osoitettu tarve boorin ja kuparin lisäykselle (Maa- ja metsätalousministeriö, 2008). Puutuhka sisältää kaikkia näitä ravinteita, pois lukien typpeä (Arnkil et al. 2020). Suomessa maaperä on luontaisesti hapanta, mikä hidastaa kasvien kasvamista ja vaikeuttaa useiden ravinteiden saatavuutta kasveille. Näistä syistä maaperän happamuus alentaa myös viljelyn kannattavuutta (Maa- ja metsätalousministeriö, 2008). Tuhka on hyvin emäksistä ja sen avulla voidaankin neutraloida happamia maaperiä (Arnkil et al., 2020; Huotari 2012).

Maataloudesta aiheutuu merkittäviä määriä typpi- ja fosforihuuhtoumia vesistöön. Fosforia on kertynyt viljelysmaille epäorgaanisten lannoitteiden ja karjanlannan mukana erityisesti 1970- ja 1980-luvuilla runsaiden fosforilannoitusten aikana (Maa- ja metsätalousministeriö, 2008). Tuhkalannoitteesta ei kuitenkaan fosforia juurikaan huuhtoudu vesistöihin. Syynä

tähän pidetään fosforin sitoutumista tiukasti tuhkassa oleviin alumiini- sekä rautayhdisteisiin. (Hynönen et al., 2008)

Peltolannoituksessa käytettävän tuhkan tulee olla puhtaampaa kuin metsässä käytetyn (Joensuu, 2018). Metsälannoitusta selkeästi alhaisemmat raja-arvot haitallisille aineille voivat estää tuhkan käytön peltolannoitteena (Pesonen 2012). Alhaisemmat raja-arvot johtuvat peltolannoituksen lyhyemmistä lannoitusväleistä sekä vaikutusajoista. Peltolannoitekäyttöön menevää tuhkaa ei rakeisteta, sillä tuhkan sisältämät ravinteet vapautuvat rakeesta turhan hitaasti (Joensuu, 2018). Parhaiten tuhka sopii lannoitteeksi pellolle, jonka maaperä on hapan ja jossa on niukasti ravinteita (Tiainen, 2014).

4.2.3 Maanrakennuksessa

Suomessa käytetään vuosittain noin 100 miljoonaa tonnia kiviainesta. Osa tästä rakentamiseen käytettävästä kiviaineksesta voidaan korvata tuhkan avulla. Tuhkat eroavat tavallisesta kiviaineksesta lujittumisominaisuuksien ja rakeiden huokoisuuden puolesta. Tuhkaa pystytään kuitenkin käyttämään maanrakentamisessa monin eri tavoin. Tuhkaa voidaan käyttää maanrakentamisessa sellaisenaan sekä seostettuna, tiivistettynä ja sideaineena. Riippuen tuhkan laadusta, sen käyttökohteita voivat olla tie-, katu- ja kenttärakenteiden eri kerrokset. (Arnkil et al. 2020; Kiviniemi et al. 2012)

Maanrakentamisessa hyötykäytettävän voimalaitostuhkan mahdollisuudet ovat laajentuneet 2000-luvulla sovellusten, teknologian ja lainsäädännön osalta (Kiviniemi et al., 2012). Nykyisin voimassa oleva MARA-asetus laajensi tuhkan käyttökohteita entiseen verrattuna; tuhkaa voidaan käyttää hyödyksi metsäteiden ja yksityisteiden rakentamisessa. Tuhkan hyötykäyttö maarakentamisessa on vielä melko uutta, eikä sitä käsitellä vielä rakentamis-, suunnittelu- tai laadunvalvontaohjeissa. Tuhkaa voidaan sijoittaa maaperään ympäristöluvalla tai MARA-asetuksen mukaisissa rajoissa. (Arnkil et al. 2020)

Tuhkasta tulisi olla selvillä maarakentamisen kannalta tärkeimmät ominaisuudet, joita ovat optimivesipitoisuus, lujittumispotentiaali, maksimikuivairtotiheys, lämmönjohtavuus,

routivuus ja rasituskestävyys jäätyessä/sulaessa. Lisäksi tuhkan haitta-ainepitoisuudet ja liukoisuudet tulee olla selvillä. (Korpijärvi et al. 2012)

Tuhkan käyttäminen metsäteillä on yksi mahdollinen käyttökohde maarakentamisessa. Tapio Oy:n toteuttamassa TuhkaTie-hankkeessa on havaittu tuhkalla olevan metsäteiden kantavuuteen ja elinikään positiivinen vaikutus. MARA-asetuksen mukaan tuhkaa voidaan ilmoitusmenettelyllä käyttää metsäteissä peitettynä patjarakenteena (kuva 9) tai murskeeseen sekoitettuna päällysrakenteessa (kuva 10). (Joensuu et al. 2020)

Kuva 9. Tuhkapatjan päällä soramursketta. (Joensuu et al. 2020)

Kuva 10. Tuhkamurskeen levitys metsätielle. (Joensuu et al. 2020)

Tuhkan käyttö rakentamisessa tulisi arvioida jo rakennushankkeen valmisteluvaiheessa. Näin voitaisiin parhaiten kohdistaa tuhkaan perustuvat ratkaisut siihen soveltuviin kokonaisuuksiin ja arvioida hyötykäytöstä mahdollisesti saatavat tekniset ja taloudelliset hyödyt. Tuhkan hyötykäytöllä rakentamisessa voidaan joissain tapauksissa saavuttaa selkeät kustannussäästöt sekä ekologisemmat ratkaisut. (Korpijärvi et al. 2012)

Uudistetun MARA-asetuksen ansiosta tuhkan hyötykäytön odotetaan lisääntyvän maarakentamisessa. Tuhkan hyötykäyttö on entistä helpompaa ja tuhkarakentamisen hankkeista saadut tulokset ovat positiivisia. Kierrätysmateriaalien käyttöä rakentamisessa voi lisätä myös neitseellisten materiaalien pitkät kuljetusmatkat kaupunkeihin. Lisätutkimuksia ja kokemuksia tuhkan käytöstä kuitenkin tarvitaan jatkossakin. (Juuma et al. 2020)

4.2.4 Muita käyttökohteita

Tuhkalle pyritään jatkuvasti kehittämään lannoituksen ja maarakennuksen lisäksi muitakin käyttökohteita. Kivihiilen tuhkaa on jo yleisesti käytetty betonin sekä asfaltin valmistuksessa seosaineena, mutta puutuhkan vastaavalle käytölle ei ole vielä olemassa ohjeita tai standardeja (Korpijärvi et al. 2009). Puutuhkan laatu vaihtelee polttoainekoostumuksen mukaan,

mikä hankaloittaa sen käyttämistä betonin valmistuksessa. Vuosina 2006–2008 järjestettiin tutkimus Finncao Oy:n toimeksi antamana puutuhkan ominaisuuksista betonin sideaineena. Projektiin osallistui useita suomalaisia metsäteollisuuden yhtiöitä sekä niiden tuotantolaitoksia. Tutkimuksessa saatiin havaintoja, kuinka puutuhkaa sisältävät betonit eroavat tavanomaisista tai kivihiilen tuhkaa sisältävistä betoneista. Puutuhkaa sisältävillä betoneilla on:

- valmistuksessa suurempi vedenkulutus
- valmiin tuotteen suurempi veden imeytyminen
- hyvä puristuslujuus
- huonompi pakkasenkestävyys
- muutoksia betonin värisävyssä.

Tutkimuksen tuloksena puutuhkan nähdään soveltuvan hyvin betonin valmistukseen, kun sen eritysominaisuudet otetaan huomioon. Potentiaalisiksi käyttökohteiksi tutkimus esittää esimerkiksi kuivien tilojen elementit, kevytsoraharkot ja valmisbetonit. (Vornanen & Penttala, 2008)

Lappeenrannan kaupungin vetämässä Urban Infra Revolution – hankkeessa vuosina 2017–2020 tutkittiin sementin korvaamista teollisuuden sivuvirroilla ja rakennusjätteillä. Lappeenrannan kaupungin lisäksi hankkeessa olivat mukana esimerkiksi LUT-yliopisto sekä useita teollisuuden yrityksiä. Hankkeessa tutkittiin eri sekundaaristen raaka-aineiden muodostamia reseptejä, joiden avulla valmistettiin betonin tyyppistä geopolymeerikomposiitti materiaalia. Materiaalin avulla voitaisiin edistää ympäristöystävällisempää rakentamista. Lentotuhkia tutkittiin yhtenä ainesosana geopolymeerikomposiitin valmistuksessa. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin kivihiilen lentotuhkan soveltuvan biopohjaista lentotuhkaa paremmin tähän tarkoitukseen. (Pihlajaniemi, 2020)

5 TUHKAN KÄSITTELYMENETELMÄT

Tuore tuhka on usein hyvin hienojakoista sekä pölyävää. Pölyävä tuhka aiheuttaa terveys- ja ympäristöriskejä. Kuljetuksen ja levityksen helpottamiseksi sekä pölyämisen estämiseksi tuhka tulee esikäsitellä eli stabiloida ennen sen käyttämistä. Stabiloimiseen on olemassa monia eri tapoja, mutta kaikki perustuvat tuhkan kostuttamiseen vedellä (Arnkil et al. 2020; Moilanen, 2009; Hynönen et al. 2008). Vesi reagoi tuhkan sisältämän kalsiumin kanssa muodostaen karbonaattia, jolloin tuhka rakeistuu (Moilanen, 2009). Erilliset rakeet muodostuvat minuuteissa, mutta tuhkan kovettuminen jatkuu vielä viikkoja kostutuksesta. Reaktio on hidas ja vastaa jotakuinkin betonin kovettumista. (Arnkil et al., 2020; Hynönen et al., 2008)

5.1 Itsekovettaminen

Itsekovettaminen on kaikista yksinkertaisin tapa stabiloida tuhkaa. Tuhka kostutetaan vedellä ja ajetaan kasaan, jossa tuhka alkaa kovettua (Hynönen et al. 2008). Sopiva vesimäärä on noin 30–35 prosenttia veden ja tuhkan yhteismassasta. Itsekovetettu tuhka näyttää hieman mullalta, jossa on erikokoisia rakeita. Kovettunut tuhkakasa murskataan ja seulotaan kauhalla ennen sen käyttöä (Arnkil et al. 2020). Tuhkassa on kovettumisen jälkeen edelleen paljon hienojaetta ja se pölisee levitettäessä, mutta ei läheskään yhtä paljon kuin kuiva irtotuhka (Arnkil et al. 2020; Moilanen, 2009).

5.2 Vanhentaminen

Kostutettua tuhkaa voidaan myös ikäännyttää eli vanhentaa kasassa. Tällöin tuhkassa tapahtuu mineralisoitumista, joka sitoo joitakin haitta-aineita, kuten bariumia ja fluoridia niukkaliukoisempaan muotoon (Kiviniemi et al. 2010). Haitta-aineiden liukoisuudet voivat muuttua merkittävästi vanhentamisen myötä, vaikutus on kuitenkin hyvin tuhkakohtaista. Ympäristöministeriön toteuttamassa lentotuhkien vanhentamistutkimuksessa havaittiin etenkin sulfaatin mutta lisäksi myös molybdeenin, kromin ja seleenin liukoisuuksien pienentymistä vanhentamisen myötä. Tuhka on tuoreeltaan hyvin emäksistä, mutta tutkimuksessa havaittiin pH:n laskevan tuhkan ja hiilidioksidin ollessa tasapainotilassa tasolle 8,5. Tutkimuksessa todetaankin, että haitta-aineiden liukoisuuksien muutokset on tunnettava jokaiselle tuhkalle erikseen tasapainotilan pH:ssa. Ikääntymisaika tutkimuksessa oli 2,5 kk, joka on suhteellisen

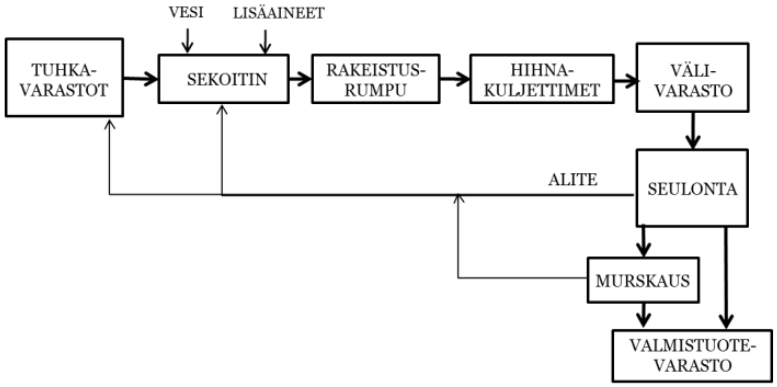
lyhyt. Näin lyhyen ikäännyttämisen ei nähdä pienentävän tarpeeksi kriittisten haitta-aineiden liukoisuuksia, jotta haitta-aineet laskisivat MARA-asetuksen raja-arvojen alle. Ikäännyttämistä voidaan kuitenkin pidentää, jolloin haitta-aineiden liukoisuuksien uskotaan laskevan entisestään. Lentotuhkia säilytettiin ja kostutettiin tutkimuksessa suljetussa astiassa, jonka kannessa oli reikiä. Suljetusta astiasta ei haitta-aineet pääse huuhtoutumaan, kun taas kenttäolosuhteissa sadevesi saattaa huuhtoa helpoimmin liukenevia haitta-aineita peittämättömästä kasasta. (Lindroos et al. 2016) Kuvassa 11 on esitetty tuhkan vanhentamista/itsekovettamista kasassa.

Kuva 11. Tuhkan vanhentamista/itsekovettamista kasassa. (Majamäki, 2022)

5.3 Rakeistaminen

Tuhkan rakeistamisella saadaan tehokkaasti vähennettyä tuhkan pöllyämistä ja hidastettua sen liukoisuutta. Rakeistusmenetelmiä on erilaisia, mutta kaikki perustuvat kuivan tuhkan kostuttamisesta vedellä sekä sekoittamisesta, jolloin tuhka rakeistuu. Optimaalinen raekoko on halkaisijaltaan hieman alle senttimetri. Rakeiden koko kuitenkin vaihtelee (Hynönen et al. 2008; Arnkil et al. 2020). Tuhkan tulee olla lämmintä, jotta rakeistus onnistuu kunnolla (Hynönen et al. 2008). Lisäksi tuhkan tulee olla kuivaa rakeistukseen tullessaan, jotta se reagoi veden kanssa (Jykylä, haastattelu, 2022). Rakeistusprosessissa tuhka kovettuu nopeammin kuin itsekovettumalla, mutta se on myös kalliimpi tapa. Toisaalta rakeistetussa tuhkassa on vähemmän vettä, jolloin se on kevyempää kuin itsekovetettu tuhka. Näin ollen kuljetus- sekä levityskustannukset ovat pienemmät rakeistetulla tuhkalla. Pienemmästä

vesipitoisuudesta huolimatta rakeistettu tuhka pölyää vähemmän kuin itsekovetettu (Hynönen et al. 2008; Arnkil et al. 2020). Rakeistettu tuhka sopii sekä lentolevitykseen, että maalevitykseen. Itsekovetettu tuhka sopii vain maalevitykseen (Jykylä, haastattelu, 2022; Hynönen et al. 2008; Matilainen 2017). Kuvassa 12 on esitetty esimerkki tuhkarakeistuksen prosessista.



Kuva 12. Rakeistusprosessi tuhkalle. (Ecolan Oy, 2017)

Hytönen & Hökkä (2020) vertailivat rakeistetun tuhkan ja irtotuhkan vaikutuksia lannoituksessa. Runsastyppisellä suolla irtotuhkalla oli tutkimuksessa suurempi vaikutus puuston kasvuun kuin rakeistetulla tuhkalla. Rakeistetun tuhkan hitaan liukenemisen vuoksi sillä saattaa kuitenkin olla pidempi vaikutusaika kuin irtotuhkalla.

5.4 Pelletöinti

Pelletöinnissä, niin kuin muissakin tuhkan esikäsittelymenetelmissä tuhkaa kostutetaan vedellä, jonka jälkeen massa puristetaan reikälevyn läpi. Laite voi toimia periaatteeltaan samalla tavoin kuin lihamylly, tai siinä voi olla toisiaan vasten pyörivät rei’itetyt sylinterit. Ongelmaksi pelletöinnissä kuitenkin muodostuu tuhkan kuluttava sekä syövyttävä vaikutus, jolloin voimakkaassa puristuksessa reikälevyt ja muut osat kuluvat (Korpilahti, 2003; Arnkil et al. 2020). Toiseksi ongelmaksi muodostuu tuhkan jähmettyminen, mikä aiheuttaa reikien tukkeutumista (Korpilahti, 2003). Tuhkan pelletöinti ei ole Suomessa käytössä isommassa mittakaavassa, vaan menetelmä sopii paremmin pienempään toimintaan, jossa tuhkan määrä on vähäistä (Arnkil et al. 2020).

6 TUHKAN LAATUUN VAIKUTTAMINEN

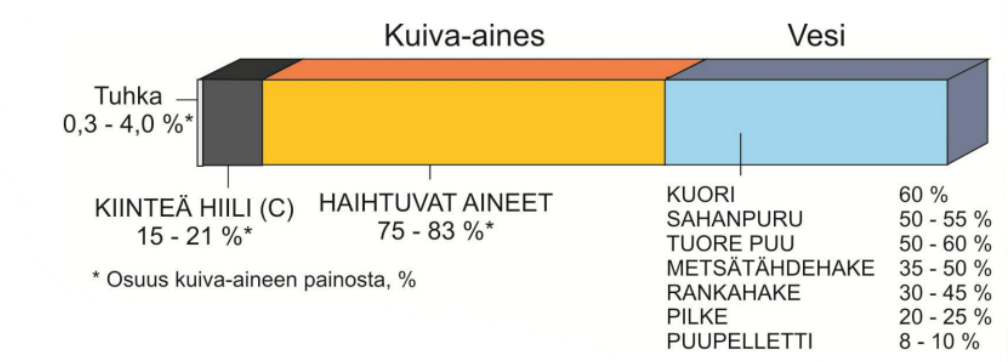
Polttoprosessissa muodostuvan tuhkan laatuun voidaan vaikuttaa käytetyllä polttoaineella, polttoprosessilla sekä tuhkanerotustekniikalla (Kiviniemi et al. 2012). Lisäksi tuhkaa pystytään pesemään tai käsittelemään termisesti, jotta siitä saataisiin hyötykäyttökelpoista. Tässä kappaleessa esitellään tarkemmin tuhkan laatuun vaikuttavat osa-alueet.

6.1 Polttoaineella

Tässä työssä tarkasteltavat tuhkat ovat muodostuneet laitoksilta, joiden energiantuotantoon käytetään pääosin erilaisia biomassoja sekä hieman kierrätyspolttoainetta ja turvetta (Metsä Group sisäinen lähde). Biomassapohjaisiksi polttoaineiksi luetaan esimerkiksi erilaiset maa- ja metsätalouden tuotteet, kuten puu, metsätähteet ja energiakäyttöön viljellyt kasvit (Raiko et al. 2002). Biomassa muodostuu kasvien yhteyttämisprosessissa, kun kasvin lehdet valmistavat auringon energian sekä ilmakehän hiilidioksidin avulla sokereita. Näistä sokereista kasvin solut muokkaavat erilaisia monimutkaisia yhdisteitä, jotka koostuvat pääasiassa hiilestä (C), hapesta (O) sekä vedystä (H). Lisäksi biomassa sisältää hieman typpeä (N) ja eri mineraaliaineita. Esimerkiksi puun kuiva-aineen massasta noin 99 % koostuu hiilestä, vedystä ja hapesta. Puun typpipitoisuus on 0,5–2,3 %. (Alakangas et al. 2016)

6.1.1 Puupolttoaineet

Eri puulajit ovat hyvin samankaltaisia alkuainekoostumuksiltaan. Puu koostuu vedestä sekä kuiva-aineesta, joka jakautuu haihtuviin aineisiin, kiinteään hiileen sekä tuhkaan. Kiinteä hiili tarkoittaa hiiltä, joka ei poistu poltettaessa haihtuvien aineiden mukana, vaan se jää hiiltojäännökseksi. Puun tuhkapitoisuus vaihtelee hieman puulajeittain, lehtipuissa on enemmän tuhkaa kuin havupuissa. Haavan, koivun, männyn ja kuusen runkopuissa on keskimäärin 0,46 % tuhkaa. Keskimääräinen tuhkapitoisuus kuorissa on 2,97 %, kuorellisissa oksissa 1,52 % ja lehdissä 4,97 %. Eniten tuhkaa esiintyy siis puiden lehdissä sekä kuoressa. Puun tuhkapitoisuus on useimmiten matalampi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden (Alakangas et al. 2016). Suomessa lämpö- ja voimalaitoksilla on käytössä useita eri kiinteitä puupolttoaineita, joista eniten käytetään metsähaketta sekä kuorta. Muita käytössä olevia puupolttoaineita ovat esimerkiksi kierrätyspuu sekä metsäteollisuuden sivutuotepuut kuten puru (Luke, 2021). Puun koostumus on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Puun koostumus (Alakangas et al. 2016).

Polttoaineen kemiallinen koostumus ja tuhkapitoisuus vaikuttavat muodostuvan tuhkan laatuun sekä määrään (Alakangas et al. 2016). Tuhkan sisältämiin haitta-ainepitoisuuksiin vaikuttaa merkittävästi polttoaineessa alun perin olleiden haitallisten aineiden pitoisuus. Tämän vuoksi esimerkiksi runsaasti kadmiumia sisältävien polttoaineiden tuhkia on hyvin haastavaa saada raja-arvoiltaan tiukkaan peltolannoitekäyttöön. Käytetyllä polttoaineella on siis suuri vaikutus siitä muodostuvan tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksiin (Gango & Kuokkanen, 2018). Puupolttoaineiden käytön on todettu lisäävän kadmiumin, kalsiumin, mangaanin, sinkin ja sulfaatin pitoisuuksia tuhkassa (Laine-Ylijoki et al. 2002). Metallipitoisuudet ovat suuremmat puun kuoressa ja oksissa kuin runkopuussa. Puutuhkan laatuun vaikuttaa myös maaperä mistä puu on peräisin (Korpijärvi et al. 2009). Eri puupolttoaineiden raskasmetallipitoisuuksia esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Puupolttoaineiden raskasmetallipitoisuuksia. (Obernberger et al. 2006)

Raskasmetalli [mg/kg] kuiva-aineessa	Runkopuu		Kuori		Hakkuutähde	
	Havupuu	Lehtipuu	Havupuu	Lehtipuu	Havupuu	Lehtipuu
Arseeni	<0,1	<0,1	1		0,3	
Kadmium	0,1	0,1	0,5	0,5	0,2	0,1
Kromi	1	1	5	5		
Kupari	2	2	5	5		
Elohopea	0,02	0,02	0,05	<0,05	0,03	0,02
Nikkeli	0,5	0,5	10	10		
Lyijy	2	2	4	5	3	5
Sinkki	10	10	100	50		

Taulukosta voidaan havaita, että puun kuoressa on selkeästi suuremmat raskasmetallipitoisuudet kuin runkopuulla. Esimerkiksi edellä mainittua kadmiumia on kuoressa viisinkertainen määrä runkopuuhun nähden. Hakkuutähteiden raskasmetallipitoisuuksista on ilmoitettu vain muutama. Hakkuutähteiden pitoisuudet sijoittuvat runkopuun ja kuoren arvojen väliin. Havu- ja lehtipuun välillä ei ole runkopuun raskasmetalleissa eroja, mutta kuoren osalta eroavaisuuksia löytyy; esimerkiksi havupuun kuoressa on sinkkiä huomattavasti enemmän kuin lehtipuun kuoressa.

Puutuhka sopii hyvin metsälannoitteeksi sen sisältämien ravinteiden vuoksi. Lannoitekäyttöä varten tärkeitä mineraaleja ovat esimerkiksi kalsium, kalium ja fosfori. Lisäksi puutuhkassa on tärkeitä hivenaineita, kuten booria. Niin kuin haitta-aineetkin, myös ravinteet esiintyvät tuhkassa miltei samassa suhteessa kuin poltettavassa materiaalissa (Moilanen, 2009). Havu- ja lehtipuiden eri osien sisältämiä mineraali- ja hivenainepitoisuuksia esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Eri puulajien ja puun osien mineraalipitoisuuksia. (Alakangas et al. 2016)

	Päämineraali [p-%] kuiva-aineessa				Hivenainepitoisuus [mg/kg] kuiva-aineessa				
Puulaji/osa	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	B	Cu
Havupuu									
Runkopuu	0,01	0,06	0,12	0,02	147	41	13	3	2
Kuori	0,08	0,29	0,85	0,08	507	60	75	12	4
Oksat	0,04	0,18	0,34	0,05	251	101	44	7	4
Neulaset	0,16	0,6	0,5	0,09	748	94	75	9	6
Koko puu	0,03	0,15	0,28	0,05	296	85	30	6	4
Lehtipuu									
Runkopuu	0,02	0,08	0,08	0,02	34	20	16	2	2
Kuori	0,09	0,37	0,85	0,07	190	191	131	17	13
Oksat	0,06	0,21	0,41	0,05	120	47	52	7	4
Lehdet	0,21	1,17	1,1	0,19	867	135	269	21	10
Koko puu	0,05	0,21	0,25	0,04	83	27	39	6	5

Kuten taulukosta nähdään, eniten mineraaleja ja hivenaineita esiintyy havupuun neulasissa sekä lehtipuun lehdissä. Seuraavaksi eniten ravinteita esiintyy puiden kuoressa ja oksissa. Molemmissa tapauksissa ravinteita on vähiten itse runkopuussa. Koko puuta tarkasteltaessa voidaan havaita pitoisuuksien olevan samaa suuruusluokkaa lehti- ja havupuulla. Havupuussa on kuitenkin huomattavasti enemmän mangaania ja rautaa kuin lehtipuussa, kun taas

lehtipuussa on hieman enemmän lannoituskäytön kannalta tärkeitä ravinteita fosforia sekä kaliumia.

6.1.2 Lietteet

Metsäteollisuudessa syntyy myös erilaisia lietteitä, joita voidaan käyttää laitoksilla polttoaineena. Vuonna 2014 metsäteollisuudessa syntyi lietteitä 537 000 tonnia, josta energiakäyttöön meni 332 000 tonnia. Muodostuvia lietteitä ovat muun muassa primääriliete, siistausliete ja bioliete. Primäärilietteellä tarkoitetaan esiselkeytyksestä saatavaa lietettä, joka sisältää kuitu-, täyte-, kuori ja lisäaineita sekä pigmenttejä. Primärilietteen laatu on riippuvainen useista tekijöistä, kuten tuotantoprosessista (Alakangas et al. 2016).

Biolietettä syntyy jäteveden biologisessa puhdistuksessa. Bioliete sisältää mikrobimassaa, puun uuteaineita, adsorboituneita klooriorgaanisia yhdisteitä sekä ligniiniyhdisteitä (Lohiniva et al. 2001). Bioliete kerätään talteen jälkiselkeytyksestä. Näiden kahden lietetyypin, eli primärilietteen ja biolietteen sekoitusta kutsutaan sekalietteeksi. (Ojanen, 2001)

Siistauslietettä syntyy siistausprosessissa, jossa jätepaperista poistetaan painoväri- ja kuitupartikkelit sekä täyteaineet. Jäljelle jäävä uusiokuitu sisältää hieman raskasmetalleja, jotka ovat jäänteitä paperissa olevista painoväreistä, täyteaine- ja päällystysmateriaaleista sekä prosessilaitteistosta ja puun kuiduista. (Lohiniva et al. 2001)

Lietteiden tuhkapitoisuus ja tuhkan koostumus vaihtelevat huomattavasti esimerkiksi käytössä olevan prosessin mukaan (Lohiniva et al. 2001). Lietteet ovat hyvin kosteita; primääri- sekä biolietteen kuiva-ainepitoisuudet ovat vain parin prosentin luokkaa. Siistauslietteen kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin yli 40 %. Korkeiden kosteuspitoisuuksiensa vuoksi lietteistä voidaan erotella vettä ennen niiden polttoa. Käytettyjä vedenerotusmenetelmiä ovat esimerkiksi suotonauha- sekä ruuvipuristimet. Poltettaessa kosteaa lietettä tarvitaan rinnalle usein kuivempaa apupolttoainetta. Lietteenpoltossa aiheutuukin ongelmia, jos lietteen kuiva-aineen osuutta ei saada yli 30 % tai jos sen osuus poltossa on liian suuri. Metsäteollisuuslietteitä poltetaan yleensä kuoren ja hakkeen sekä turpeen seassa kuorikattilassa, joka on yleisimmin leijupetikattila. Leijupetikattilat eivät ole niin herkkiä kosteille polttoaineille

kuin arinakattilat, joissa kostea polttoaine aiheuttaa suuria lämpötilan vaihteluja tulipesässä (Ojanen, 2001). Metsäteollisuuden lietteissä on jonkin verran ravinteita, mutta vähemmän kuin yhdyskuntalietteessä (Lohiniva et al. 2001). Erilaisten lietteiden raskasmetallipitoisuuksia ja tuhkapitoisuuksia esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Lietteiden raskasmetalli- sekä tuhkapitoisuuksia. (Lohiniva et al. 2001)

Raskasmetallit [mg/kg] kuiva-aineessa	Primääriliete	Bioliete	Sellutehtaan sekaliete	Siistausliete
Kadmium	0–2,5	0,6–0,9		0,03–0,1
Kromi		16–22	38,4	17–116
Kupari	3,4–31	15–43	22,9	38–253
Elohopea	0–0,2	0,6	0,09	<1,0
Nikkeli	7,0–26,7	6–11		10–231
Lyijy	0–15,5	0,3–4,3	13,5	1,2–5,5
Tuhka [p-%] kuiva-aineessa	25–60	16	13–21	30–60

Kuten taulukosta voidaan havaita, useat raskasmetallipitoisuudet ovat korkeammat lietteissä kuin aiemmin esitetyissä puupolttoaineissa. Erityisesti jätepaperin puhdistuksesta syntyvä siistausliete on korkea raskasmetallipitoisuuksiltaan. Merkille pantavaa on myös, että lietteiden tuhkapitoisuudet ovat todella korkeita. Puupolttoaineisiin verrattuna lietteiden tuhkapitoisuudet ovat moninkertaisia. Esimerkiksi primäärilietteessä ja siistauslietteessä voi tuhkaa olla jopa yli puolet niiden kuiva-aineesta.

Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että biolietteen polttaminen muiden polttoaineiden seassa ei huononna tuhkan laatua. Lietteen korkean tuhkapitoisuuden ja reagoimattoman koostumuksensa vuoksi se voi laimentaa seospoltossa syntyvää tuhkaa, eli lietteen käyttö seospolttoaineena vähentää tuhkan haitta-ainepitoisuuksia sekä liukoisuuksia (Laine-Ylijoki et al. 2002). Samanlaista käyttäytymistä voidaan olettaa myös primäärilietteelle sekä sekalietteelle, sillä niiden raskasmetallipitoisuudet ovat samankaltaiset biolietteen kanssa. Siistauslietteellä on selvästi suuremmat raskasmetallipitoisuudet kuin biolietteellä, mutta toisaalta sen tuhkapitoisuus on myös huomattavasti suurempi.

Lietteissä on jonkin verran lannoitekäyttöön soveltuvia ravinteita. Matilainen et al. (2014) tutkivat kolmen eri biolietettä sisältävän sekalietteen koostumusta. Yhdessä sekalietteessä

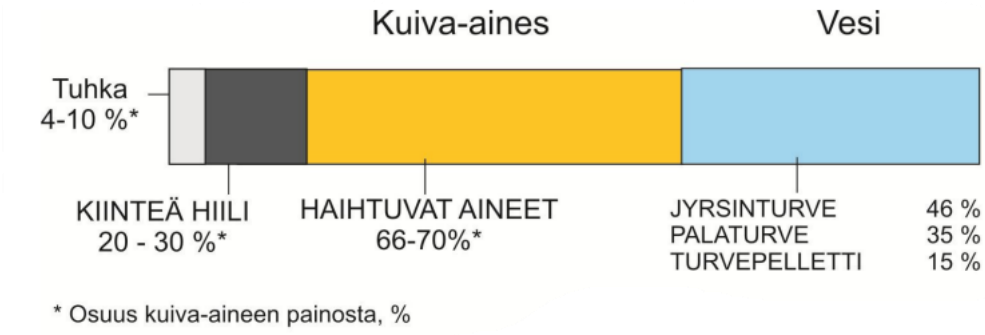
fosforin pitoisuus oli 0,13 % kuiva-aineesta, kun kahden muun sekalietteen fosforipitoisuudet jäivät alle 0,1 %. Kaliumia ei lietteissä juurikaan ole (Lohiniva et al. 2001).

6.1.3 Turve

Kasviaines muodostaa maatuessaan turvetta, joka on fossiilista polttoainetta (Raiko et al. 2002; Alakangas et al. 2016). Hapettomassa ja kosteissa olosuhteissa suolla kasvien jäänteet hajoavat heikosti, jolloin syntyy jatkuvasti kasvava turvekerrostuma. Turpeessa on epäsäännöllinen määrä maatumattomia tai vain osittain maatuneita kasvinosia. (Alakangas et al. 2016). Suomessa turvetta käytetään sähkön ja lämmön erillis- sekä yhteistuotannossa. Turpeen käyttö energiantuotannossa alkoi 1800-luvun jälkipuoliskolla. 1900-luvun alkupuoliskolla turpeen energiakäyttö lisääntyi ja turvetta alettiin käyttämään muissakin käyttökohteissa, kuten rakennusten lämmöneristeenä sekä kuivikemateriaalina käymälöissä. Laajamittainen turpeen käyttö energiantuotannossa alkoi 1970-luvulla ja käytön huippuvuodet osuivat vuosien 2003 ja 2010 välille. Vuonna 2010 turpeella tuotettiin 27 TWh energiaa, joka vastasi 6,7 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. 2010-luvulla turpeen energiakäytön trendi on ollut laskeva (Soimakallio et al. 2020). Suomen hallitusohjelma (2019) asetti tavoitteeksi saada Suomi hiilineutraaliksi vuoteen 2035 mennessä (Ympäristöministeriö, 2022). Tämän jälkeen turpeen energiakäyttö on laskenut valtavasti; päästökauppasektorilla käyttö laski vuonna 2020 n. 25 % edellisvuoden tasosta ja edelleen yli 13 % vuonna 2021 (Energiavirasto, 2022).

Voimalaitoksien energiantuotannossa käytetään jyrsinturvetta ja palaturvetta. Yli 90 % energiaturpeen tuotannosta on jyrsinturvetta. Tuotantomenetelmässä turvekentän pinnasta jyrsitään ohut kerros turvetta, joka jätetään aurinkoon kuivumaan. Kuivumista voidaan edesauttaa pyrkimällä saamaan suurta raekokoa jyrsintävaiheessa sekä kääntämällä kuivaamassa olevaa jyrsöstä. Kuivattu turve kasataan auman keskelle ja kerätään talteen. Palaturpeen tuotannossa turvekenttään jyrsitään ura, josta turve irrotetaan, muovataan, tiivistetään ja puristetaan nimensä mukaisesti paloiksi. Tuotetulla palakoolla on merkitystä, sillä suurempaa palaa tehdessä saanto on parempi, kun taas pienemmällä palalla turve kuivuu paremmin. (Alakangas et al. 2016)

Turpeet luokitellaan Suomessa kasvitieteellisen koostumuksensa mukaan kolmeen päälajiin, jotka ovat rahkaturve, saraturve ja ruskosammalturve. Turpeet voivat olla yhtä lajiketta tai useamman lajikkeen sekoitusta. Suurin osa turpeesta on hiiltä (46–59 %), hiilipitoisuus vaihtelee sekä turvelajikkeen että sen mukaan, kuinka hyvin se on maatunut. Happea turpeessa on 30–40 %, vetyä 5–6,5 %, typpeä 0,2–3,1 % ja rikkiä vähemmän kuin 0,3 % (Alakangas et al. 2016). Turpeen koostumus on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Turpeen koostumus. (Alakangas et al. 2016)

Turpeen tuhkapitoisuus on Suomessa yleensä 3–10 %, mikä on huomattavasti suurempi kuin puupolttoaineella. Suomalaisen turpeen pH on 5–6, joten turve on polttoaineena hapanta (Alakangas et al. 2016). Turvetta ja puuta poltetaan useimmiten seospolttona leijukerroskattiloissa (Alakangas et al. 2011). Polttoturpeen raskasmetallipitoisuuksia esitetty taulukossa 7.

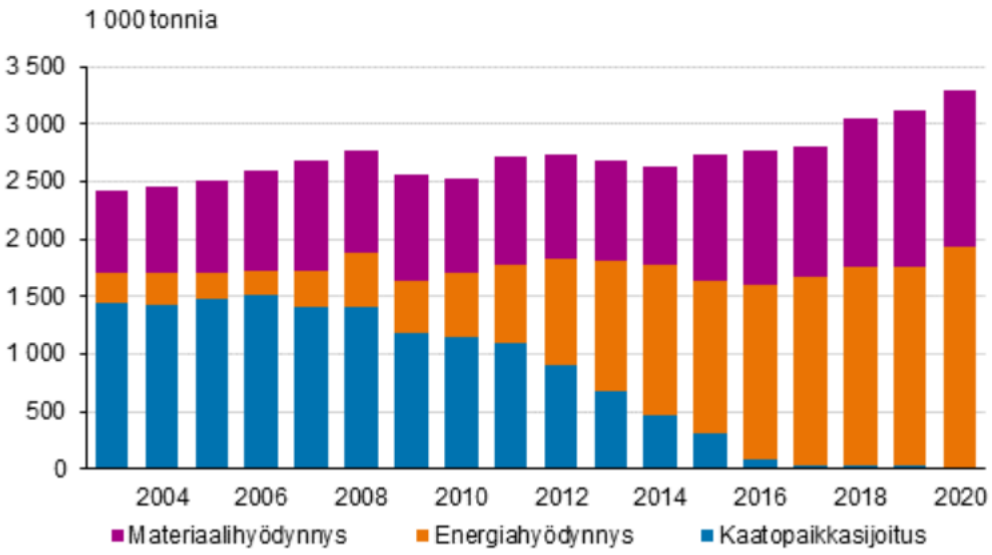
Taulukko 7. Polttoturpeen raskasmetallipitoisuuksia. (Vähä-Savo et al. 2016)

Raskasmetallit [mg/kg] kuiva-aineessa	Keskiarvo	Mediaani
Arseeni	3,3	3,1
Kadmium	0,13	0,12
Kromi	6,14	5,5
Kupari	7,7	6,95
Nikkeli	4,37	4,0
Lyijy	3,74	3,4
Sinkki	7,5	7,23
Elohopea	0,056	0,05
Vanadiini	8,7	8,3
Molybdeeni	1,07	1,0

Taulukon perusteella turpeessa on joitakin raskasmetalleja (esim. arseenia) suurempia pitoisuuksia kuin puun kuoressa. Turpeen arseenipitoisuus ja vähäinen ravinteiden määrä ovatkin yleensä rajoittavat tekijät turvetuhkan lannoitehyötykäyttöä ajatellen (Alakangas et al. 2016).

6.1.4 Kierrätyspolttoaine

Lyhenteillä SRF (Solid Recovered Fuel) ja REF (Recovered Fuel) tarkoitetaan syntypaikkalajitellusta jätteestä valmistettua polttoainetta, eli kierrätyspolttoainetta (Ranta & Wahlström, 2002). Vuonna 2020 Suomessa kertyi yhdyskuntajätettä n. 3,3 miljoonaa tonnia ja sen määrä kasvoi edellisvuoteen verrattuna yli 5 %. Yhdyskuntajätteisiin luetaan kotitalouksien, kaupan, teollisuuden sekä palveluiden jätteet. Energiahyödynnys on suurin käsittelytapa yhdyskuntajätteille, vuonna 2020 sen osuus oli 58 %. Energiahyödyntämisessä yhdyskuntajätteestä tuotetaan sähköä ja lämpöä polttoprosessissa. Muita käsittelytapoja ovat materiaalihyödynnys sekä kaatopaikkasijoittaminen. Yhdyskuntajätteiden käsittelytavan jakautuminen esitetty kuvassa 15. Kuvasta voidaan havaita, että energiahyödyntämisen osuus on kasvanut merkittävästi 2000-luvulla. Kaatopaikkasijoittaminen on ollut suurin käsittelytapa 2000-luvun alussa, mutta vuonna 2020 sen osuus oli enää 0,5 %. (Tilastokeskus, 2020)



Kuva 15. Yhdyskuntajätteen käsittelytapojen osuudet vuosina 2003–2020. (Tilastokeskus, 2020)

Energiakäyttöön soveltuu parhaiten teollisuuden ja kaupan paperi-, pakkaus- ja muovijätteet sekä rakentamisesta syntyvät jätteet. Yhdyskuntajätteistä kuiva osuus sopii poltettavaksi lasi- ja metallijätteen erottamisen jälkeen. Märkä biojäte voidaan esimerkiksi kompostoida tai siitä voidaan valmistaa biokaasua (Alakangas et al. 2016). Jäteperäisiä polttoaineita voidaan polttaa jätteenpolttolaitoksissa tai rinnakkaispolttolaitoksissa. Jätteenpolttolaitokset polttavat nimensä mukaisesti pelkkää jätettä, kun taas rinnakkaispolttolaitoksessa jätteen poltto tapahtuu muiden polttoaineiden kuten puupolttoaineiden seassa. Esikäsittelemätöntä ja sekalaista jätettä, kuten yhdyskuntajätettä voidaan polttaa ainoastaan arinakattiloilla. Arinapoltossa käytetään yleisimmin mekaanista arinaa, jolloin jäte saadaan liikkumaan ja palaminen on tasaista. Poltossa syntyvää lämpöä voidaan käyttää lähinnä kaukolämmön ja sähkön tuotantoon (Laine-Ylijoki et al. 2018). Suomessa on tällä hetkellä yhdeksän jätteenpolttolaitosta (Bröckl et al. 2021).

Rinnakkaispoltossa esikäsiteltyä jätettä poltetaan useimmiten BFB tai CFB kattiloissa. Esikäsittely sisältää jätteen murskausta ja seulontaa, jossa jätteestä erotellaan lasia, metallia ja muuta epäorgaanista ainesta. Rinnakkaispoltossa kierrätyspolttoaine on vain siis yksi osa käytetystä polttoaineseoksesta (Laine-Ylijoki et al. 2018). Jätteen lisäksi poltossa voi olla esimerkiksi turvetta tai puupolttoaineita. Usein rinnakkaispoltossa käytetäänkin usean eri polttoaineen seosta (Ranta & Wahlström, 2002). Suomessa on tällä hetkellä 24 laitosta, jotka toimivat rinnakkaispoltolla (Bröckl et al. 2021).

Kierrätyspolttoaineen laatuun vaikuttaa sen alkuperä ja materiaali. Useimmiten kierrätyspolttoaineet koostuvat useasta eri jätemateriaalista, kuten puusta, muovista ja pakkausmateriaalista. Esimerkiksi suuri määrä muovia nostaa polttoaineen lämpöarvoa ja sen kosteus on alhainen. Puun suuri määrä vastaavasti nostaa kosteutta, kun taas lämpöarvo on matalampi. Kierrätyspolttoaine voi sisältää myös korkeampia kalium-, natrium- sekä alumiinipitoisuuksia, jolloin sen käyttö saattaa aiheuttaa kattilassa likaantumista. Lisäksi joidenkin raskasmetallien pitoisuudet saattavat olla rinnakkaispolton lentotuhkassa korkeammat kuin biopolttoaineiden. (Alakangas et al. 2016)

VTT:n tutkimuksessa (Ranta & Wahlström, 2002) vertailtiin kierrätyspolttoaineiden rinnakkaispolton tuhkia muiden polttoaineiden tuhkiin. Kierrätyspolttoaineen osuus

polttoaineseoksesta oli tutkittavilla laitoksilla 10 %. SRF-polttoaineen koostumus vaihteli teollisuuden-, kaupan- sekä kotitalouksien jätteistä. Tutkittavat tuhkat olivat yhden arinakattilan pohjatuhka, sekä kolmen leijukerroskattilan petihiekka ja lentotuhka. Arinakattilassa pääpolttoaineena toimi vaneriteollisuuden jäte. SRF-polttoaine oli kerätty teollisuudesta sekä suurista kiinteistöistä. Pohjatuhkan kuparipitoisuus oli moninkertainen (850 mg/kg kuiva-aineessa) verrattuna tavanomaisten polttoaineiden tuhkiin. Myös kromi- ja molybdeenipitoisuudet olivat keskiarvoa korkeampia. Kolmella leijukerroskattilalla poltettiin tutkimuksessa hieman eri kierrätyspolttoaineita. Kahdella laitoksella poltettiin laitoksien omia jätteitä, kun yhdellä poltettiin eri kunnista kerättyjä jätteitä. Näistä kolmesta laitoksesta eniten raskasmetalleja esiintyi laitoksella, jonka kierrätyspolttoaine oli kerätty kunnista. Kyseisellä laitoksella oli tuhkassa koholla kuparin, lyijyn, sinkin, kadmiumin ja kromin pitoisuudet. Suurimmat pitoisuudet esiintyivät lentotuhkassa. Laitoksilla, joilla poltettiin vain laitoksen sisäisiä jätteitä ei nähty juurikaan eroja tavanomaisten polttoaineiden tuhkiin verrattuna. Tutkimuksessa todetaan, että kierrätyspolttoainetta käyttävän laitoksen tuhkan laatuun vaikuttaa kierrätyspolttoaineen laatu, kierrätyspolttoaineen osuus polttoaineseoksen kokonaismäärästä (10–100 %), polttoaineseoksen pääpolttoaine ja sen ominaisuudet, laitoksen polttotekniikka sekä tuhkan ja tuhkapölyn erotustekniikka. Kierrätyspolttoaineesta muodostuva tuhka sekoittuu prosessissa pääpolttoaineen tuhkiin. Tuhkan laatu ei välttämättä laske merkittävästi, jos kierrätyspolttoaineen tuhkapitoisuus on kohtuullinen ja sen laatu on hyvä. SRF-polttoaineiden tuhkapitoisuudet vaihtelevat 5 ja 15 % välillä. (Ranta & Wahlström, 2002)

Kierrätyspolttoaineen rinnakkaispoltossa muodostuvien tuhkien ja petihiekkojen hyötykäyttö on haastavaa, sillä ne eivät sisälly Mara-asetuksen piiriin. Jätteenpolton tuhkia ei myöskään voi käyttää tuhkalannoitteena. (Laine-Ylijoki et al. 2018)

Kirjallisuudesta löytyy hieman eriäviä tietoja polttoaineiden koostumuksista. Monet tutkimukset ovat useita vuosikymmeniä vanhoja ja tulokset vaihtelevat hyvinkin paljon saman polttoaineen sisällä. Toisaalta kirjallisuudessa mainitaan, että biopolttoaineet ja erityisesti puuperäiset polttoaineet ovat epähomogeenisiä polttoaineita, jolloin niiden laadussa voi olla suuriakin eroavaisuuksia. Puun ominaisuuksiin vaikuttaa sen alkuperä, puulaji sekä ikä (Alakangas et al. 2016; Vakkilainen, 2017). Tämä voisi osaltaan selittää eroavaisuudet tuhkien

haitta-ainepitoisuuksissa eri tutkimuksissa. Lisäksi polttoaineiden sisältämät epäpuhtaudet, kuten kyllästetty puu, pigmentit, maalit ja metallit voivat nostavaa huomattavastikin tuhkien haitta-ainepitoisuuksia (Korpijärvi et al. 2009). Eri polttoaineista muodostuneiden tuhkien raskasmetallipitoisuuksia esitetty taulukossa 8 mukaillen Nilsson & Timm 1983, Isännäinen & Huotari 1994, Wahlström & Pohjola 1987, Laine-Ylijoki et al. 2002.

Taulukko 8. Eri polttoaineista muodostuneiden tuhkien raskasmetallipitoisuuksia [mg/kg] kuiva-aineessa. (Korpijärvi et al. 2009)

Ominaisuus	Turpeen ja puun seostuhka	Puun tuhka	Puunkuori-lietelentotuhka*
Arseeni, As	30–120	1–60	11–12
Barium, B	150–2 200	200–300	
Kadmium, Cd	0,5–5,0	6–40	3,7–14,0
Koboltti, Co	10–50	3–200	
Kromi, Cr	43–130	40–250	50–230
Kupari, Cu	60–200	50–300	52–85
Elohopea, Hg	0,3–2,0	0,02–1,00	0,004–1,1
Molybdeeni, Mo	10–50	15	
Nikkeli, Ni	30–700	20–100	38–89
Lyijy, Pb	85–1 000	3–1 100	34–72
Seleeni, Se	< 10–26		
Vanadiini, V	20–500	20–30	
Sinkki, Zn	50–2 200	200–2 000	790–3 700

*Liete tarkoittaa biolietettä, jonka seassa on mahdollisesti kuorimo- ja kuitulietettä.

Taulukon perusteella voidaan olettaa, että puutuhkan raskasmetallipitoisuudet ovat keskimäärin suuremmat kuin turpeen ja puun seospoltossa muodostuvissa tuhkissa. Varsinkin kadmiumia, joka on lannoitekäytössä kriittinen raskasmetalli, on puutuhkassa selkeästi suurempina pitoisuuksina kuin muissa vertailtavissa tuhkissa. Kuten aikaisemmin todettiin, on puun kuoressa enemmän raskasmetalleja kuin runkopuussa. Lietteiden raskasmetallipitoisuudet ovat niin ikään korkeammat kuin runkopuun. Näistä huolimatta kuoren ja lietteen seospoltossa syntyvä tuhka on kuitenkin raskasmetallipitoisuuksiltaan puhtaampaa kuin puutuhka. Tämä johtunee aiemmin mainitusta lietteen laimentavasta vaikutuksesta tuhkan haitta-aine pitoisuuksiin.

6.2 Polttoprosessilla

Käytössä oleva polttotekniikka vaikuttaa tuhkan koostumukseen. Yleisimmät kattilatyypit voimalaitoksilla ovat arina- ja leijupetikattilat. Näiden kahden polttotekniikan tuhkilla on eroavaisuuksia (Moilanen, 2009). Kuten työssä on aiemmin mainittu, leijupoltossa pohjatuhkan poiston yhteydessä poistetaan petimateriaalia. Näin ollen leijupolton pohjatuhka on sekaisin hiekan kanssa (Kiviniemi et al. 2012). Suuren hiekkapitoisuutensa takia leijupolton pohjatuhka ei sovellu lannoitekäyttöön (Arnkil et al. 2020). Leijupoltossa ja arinapoltossa muodostuu tuhkia myös eri suhteella. Leijupoltossa lentotuhkaa muodostuu 80–100 % kaikesta tuhkasta ja vastaavasti pohjatuhkaa 0–20 %. Arinapoltossa lentotuhkaa muodostuu vain 5–40 % kun taas pohjatuhkan osuus on 60–95 % (Kiviniemi et al. 2012). Leijupolton etuna on pienempi palamattomien osuus tuhkassa, sillä leijupoltossa polttoaine sekoittuu kattilassa tasaisemmin kuin arinapoltossa (Laine-Ylijoki, 2002; Arnkil et al. 2020). Arinakattiloista poistettava pohjatuhka on usein märkää, sillä se pudotetaan useimmiten arinalta sammutusaltaaseen (Arnkil et al. 2020). Leijupoltossa petihiekka ja pohjatuhka poistetaan vesijäähdytteisillä tuhkaruuveilla, jolloin pohjatuhka saadaan poistettua kuivana (Vakkilainen, 2017; Jalovaara et al. 2003). Märkää tuhkaa on helpompi käsitellä laitoksella, mutta kuiva tuhka on parempaa jatkojalostusta ajatellen (Arnkil et al. 2020).

Poltto-olosuhteista erityisesti lämpötilalla on vaikutusta tuhkan koostumukseen (Lindroos et al. 2016). Haitalliset aineet voidaan jakaa kolmeen ryhmään, niiden höyrystymis- ja sitoutumisominaisuuksiensa mukaan. Ensimmäinen ryhmä koostuu höyrystyvistä aineista, jotka ovat höyrymuodossa vielä savukaasujen ulosmenolämpötilassa ja näin ollen poistuvat niiden mukana. Toinen ryhmä koostuu raskasmetalleista, jotka höyrystyvät polttoprosessissa mutta tiivistyvät takaisin kiinteisiin hiukkasiin. Kolmas ryhmä koostuu aineista, jotka eivät höyrysty lainkaan polton aikana vaan kiinnittyvät tuhkan suurempiin hiukkasiin. (Korpijärvi et al. 2009) Haitta-aineiden olomuodot BFB-kattilassa, sekä niiden höyrystymislämpötiloja esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Haitta-aineiden olomuodot BFB-kattilassa (lämpötila 800–850 °C), sekä höyrystymislämpötiloja ilman klooria ja kloorin kanssa. (Savola, 2000)

Haitta-aine	Olomuoto kuplivassa leijupetikattilassa (800–850 °C, ei Cl)	Höyrystymislämpötila[1] (°C) Ei klooria polttoaineessa	Höyrystymislämpötila[1] (°C) 10 % klooria polttoaineessa
Antimoni, Sb	Höyrystyy / tiivistyy	660	660
Arseeni, As	Höyrystyy / tiivistyy	32	32
Elohopea, Hg	Höyrystyy	14	14
Kadmium, Cd	Höyrystyy / tiivistyy	214	214
Kromi, Cr	Kiinteä	1 613	1 610
Kupari, Cu	Kiinteä	950–1 050	–
Lyijy, Pb	Höyrystyy / tiivistyy	627	–15
Nikkeli, Ni	Kiinteä	1210	693
Seleeni, Se	Höyrystyy / tiivistyy	318	318
Sinkki, Zn	Höyrystyy / tiivistyy	600–700	–
Tallium, Tl	Höyrystyy / tiivistyy	721	138

[1]Laskettu tasapainolaskelmilla olettaen, että ko. metalliyhdisteen osapaine kaasussa on 10^{-6} atm.

Taulukon perusteella voidaan todeta, että esimerkiksi usein lannoitekäyttöä rajoittava kadmium kuuluu ryhmään, joka höyrystyy poltossa ja tiivistyy myöhemmin kiinteisiin hiukkasiin. Korkeamman höyrystymislämpötilan omaavat kromi, kupari ja nikkeli pysyvät kiinteässä olomuodossa BFB-kattilassa. Taulukon mukaan polttoaineen klooripitoisuudella on merkitystä joidenkin haitta-aineiden höyrystymislämpötilaan; esimerkiksi lyijy höyrystyy huomattavasti matalammassa lämpötilassa, kun polttoaine sisältää klooria.

Leijupetikattiloissa palamislämpötilat ovat alhaisia, jolloin haitta-aineiden höyrystyminen on vähäisempää. Tämän takia suuri osa haitta-aineista jää leijupoltossa pohjatuhkaan. Leijupetikattiloiden pohjatuhkien suuren hiekkapitoisuuden vuoksi jää haitta-ainepitoisuudet kuitenkin niissä alhaisiksi. Arinakattiloissa palamislämpötilat ovat yleisesti korkeammat kuin leijupetikattiloissa, jolloin arinakattilan lentotuhka on haitta-ainepitoisuuksiltaan korkeampi. Koska arinapoltossa suuri osa haitta-aineista höyrystyy, jää pohjatuhkaan vähemmän raskasmetalleja kuin lentotuhkaan. (Kalliokoski, 2015) Tyypilliset raskasmetallipitoisuudet puupolttoaineiden tuhkassa esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Tyypilliset raskasmetallipitoisuudet puupolttoaineiden tuhkassa. (Vakkilainen, 2017)

Raskasmetallit [mg/kg] kuiva-aineessa	Pohjatuhka	Lentotuhka
Arseeni	0,2–0,3	1–60
Kadmium	0,4–0,7	6–40
Koboltti	0–7	3–200
Kromi	40–60	40–250
Kupari	15–300	100–600
Elohopea	0–0,4	0–1
Nikkeli	40–250	20–100
Lyijy	15–60	40–1000
Seleeni	0–8	5–15
Vanadiini	10–120	20–30
Sinkki	15–1000	40–70

Kuten taulukosta voidaan havaita, useimmat haitta-aineet esiintyvät suurempina pitoisuuksina lentotuhkassa kuin pohjatuhkassa. Jotkin raskasmetallit, kuten nikkeli ja sinkki voivat esiintyä suurina pitoisuuksina pohjatuhkassa. Tämä johtunee niiden korkeahkoista höyrystymislämpötiloista (taulukko 9).

Lämpötilan lisäksi muillakin palamisen parametreillä, kuten palamisilmalla ja -nopeudella on vaikutusta tuhkan koostumukseen (Soininen et al. 2010). Myös kattilakuormituksella on todettu olevan vaikutusta ainakin molybdeenin liukoisuuteen seospolton tuhkissa. Kuormituksen kasvaessa myös molybdeenin liukoisuus kasvaa. (Korpijärvi et al. 2009)

6.3 Tuhkanerotustekniikalla

Tuhkanerotustekniikalla on vaikutusta tuhkan laatuun. Raskasmetallit rikastuvat usein hienoimpaan lentotuhkaan, jolloin tuhkanerotuksella savukaasuista on merkittävä vaikutus siihen, kuinka suuri osa raskasmetalleista saadaan talteen (Orava et al. 2006). Savukaasuja pystytään puhdistamaan monella eri tekniikalla, joita ovat dynaamiset erottimet, sähkösuodattimet, kuitusuodattimet sekä märkäerottimet (Ohlström et al 2005). Tässä työssä tutkittavilla laitoksilla on käytössä kaikkia edellä mainittuja puhdistuslaitteistoja.

6.3.1 Sähkösuodattimet

Sähkösuodattimet ovat yleisin tapa hiukkasten erottamiselle kiinteiden polttoaineiden laitoksissa. Sähkösuodattimet muodostuvat kolmesta kentästä, joiden suodatus perustuu sähköiseen varaukseen. Savukaasu johdetaan ensimmäiseen kenttään reikälevyn läpi, jolloin virtaus leviää kenttään tasaisesti. Kentän sisällä savukaasussa olevat hiukkaset varataan sähköisesti koronavaraajalla, jonka jälkeen hiukkaset kerääntyvät vastakkaismerkkisesti varatulle keräinlevylle. Levyt puhdistetaan hiukkasista aika ajoin ravistimilla, jolloin hiukkaset tippuvat levyiltä pölysäiliöihin (Ohlström et al. 2005; Jalovaara et al. 2003). Ensimmäiset kaksi kenttää ottavat talteen suurimman osan hiukkasista (n. 95–98 %) ja kolmas kenttä loput, jolloin kokonaiserotusaste sähkösuotimella nousee yli 99 %:iin (Orava et al. 2006; Ohlström et al. 2005). Sähkösuotimien hyvinä ominaisuuksina voidaankin pitää esimerkiksi sen korkeaa erotusastetta, pieniä käyttö- ja kunnossapitokustannuksia, luotettavuutta ja vähäistä huoltotarvetta. Huonona puolena voidaan pitää sähkösuodattimien verrattain korkeita investointikustannuksia. (Jalovaara et al. 2003)

6.3.2 Kuitusuodattimet

Kuitusuodattimia käytetään yleensä vain suuremmissa voimalaitoksissa. Useimmiten syynä kuitusuodattimien käyttöön ovat savukaasuissa vaikeasti erottuvat hiukkaset ja todella tiukat ilmansuojeluvaatimukset. Kuitusuodattimilla saadaan savukaasuista talteen myös pienimpiä hiukkasia (Jalovaara et al. 2003). Kuitusuodattimet voidaan jakaa niiden materiaalin ja rakenteen perusteella tiiviisiin patjoihin, kuitupatjoihin sekä kudottuihin kankaisiin. Kangassuodattimet ovat voimalaitoksien yleisin kuitusuodatintyyppi. Voimalaitoksissa käytettävät kangassuodattimet ovat niin kutsuttuja letkusuodattimia, jotka ovat yleensä pitkiä ja onttoja sylinterimäisiä putkiloja. Letkusuodattimessa voi olla tuhansia letkuja, joiden halkaisijat ovat yleensä 12–40 senttimetriä ja korkeus 3–10 metriä, joten letkusuodattimet ovat siis suuria kokonaisuuksia. Savukaasu ohjataan kankaisten letkujen läpi, jolloin hiukkaset kiinnittyvät kuituihin hitausvoiman, pidätyksen sekä diffuusion ansiosta. Kankaat puhdistetaan ravistelulla, vastakkaissuuntaisella virtauksella tai painepulssilla (Ohlström et al. 2005). Investointikustannukset ovat samaa suuruusluokkaa sähkösuodattimien kanssa, mutta kunnossapito on selvästi kalliimpaa; letkut joudutaan vaihtamaan 2–4 vuoden välein. Letkusuodattimet ovat alttiita polttoaineen palamattomille partikkeleille, sillä hehkuvat hiukkaset

saattavat polttaa reikiä kankaisiin (Jalovaara et al. 2003). Tämän vuoksi letkusuotimet eivät yleensä sovellu arinakattiloille (Ohlström et al. 2005). Kiinteiden polttoaineiden laitoksilla letkusuodattimilla saadaan myös yli 99 %:in erotusaste (Jalovaara et al. 2003; Ohlström et al. 2005).

6.3.3 Mekaaniset erottimet

Mekaaniset eli toisin sanoen dynaamiset erottimet ovat pienten ja keskisuurien kattiloiden savukaasupuhdistimia. Ne ovat tekniikaltaan yksinkertaisia ja investointikustannuksiltaan halpoja. Lisäksi niiden käyttäminen ja huoltaminen on yksinkertaista. Haittapuolina on kuitenkin heikompi erotusaste kuin sähkö- ja kuitusuodattimilla sekä painehäviöstä aiheutuvat kustannukset. Tyypillinen mekaaninen erotin on sykloni, jonka toiminta perustuu keskipakoisvoimaan. Savukaasu ohjataan sykloniin joko aksiaalisesti tai tangentiaalisesti ja se kulkeutuu spiraalin muotoisesti kohti syklonin pohjaa. Savukaasussa olevat hiukkaset törmäävät keskipakoisvoiman seurauksena syklonin pintoihin ja tippuvat pohjalle. Puhdistettu savukaasu imetään ulos syklonin keskeltä. Syklonit voivat olla eri kokoisia; pienentämällä syklonin halkaisijaa voidaan parantaa erotuskykyä. Sykloneita voidaan asentaa myös useita rinnakkain, jolloin puhutaan multisyklonista. Kiinteillä polttoaineilla mekaanisilla erottimilla saadaan maksimissaan 90 % erotusaste. Sykloneja ja multisykloneja käytetään pienillä (alle 10 MW) arina- ja leijupetikattiloilla sekä kaikenkokoisilla raskasta polttoöljyä polttavilla kattiloilla. (Jalovaara et al. 2003)

6.3.4 Savukaasupesurit

Savukaasupesurit eli märkäerottimet jaetaan kolmeen ryhmään; rikinpoiston pesurit, lämmön talteenottoon tarkoitetut pesurit sekä hiukkasten poistoon suunnitellut pesurit (Ohlström et al. 2005). Savukaasua kostutetaan vedellä ennen pesuriin menoa, jolloin sen lämpötila laskee 150–200 °C:sta jopa 60–70 °C:een. Savukaasun pesu tapahtuu pesurin alaosassa suuttimien avulla ja mahdollinen lämmön talteenotto pesurin yläosassa. Lämmön talteenotolla pystytään parantamaan pesurin käyttötaloutta ja sitä kautta hyötysuhdetta. Pisaranerottimilla nimensä mukaisesti erotellaan savukaasuista pisarat ennen kuin se johdetaan savupiippuun. Niin kutsutun märkäsavupiipun avulla savukaasu voidaan ohjata piippuun ilman sen lämmittämistä; tavalliseen savupiippuun savukaasu tulee jälkilämmittää pesurin

jälkeen. Kuten mekaaniset erottimet, ei myöskään savukaasupesurit ole yhtä tehokkaita erotusasteeltaan kuin sähkö- ja kuitusuodattimet. Savukaasupesureiden erotusaste on noin 90–95 % kiinteiden polttoaineiden laitoksilla ja reilusti alhaisempi laitoksilla, joilla poltetaan öljyä. (Jalovaara et al. 2003)

6.4 Tuhkan fraktioinnilla

Lentotuhkan raskasmetallipitoisuuksiin voidaan vaikuttaa myös sähkösuotimen avulla. Orava et al. (2006) tutkivat kuinka raskasmetallipitoisuudet jakautuvat sähkösuotimen eri kenttiin. Tutkimuksessa tarkasteltiin neljän eri tuotantolaitoksen lentotuhkia sähkösuotimien kaikista kolmesta kentästä. Tuloksina havaittiin, että kaikkien tutkimuksessa mitattujen raskasmetallien (lyijy, kupari, sinkki, nikkeli, arseeni ja kadmium) pitoisuudet olivat pienimmät ensimmäisessä kentässä ja suurimmat viimeisessä kentässä. Tämä johtuu siitä, että raskasmetallit rikastuvat eniten pienimpiin hiukkasiin, jotka jäävät sähkösuodattimen viimeiseen kenttään. Tuhkien raskasmetallipitoisuuksiin havaittiin vaikuttavan sähkösuodattimen jännite, polttoaineen laatu sekä savukaasun virtausnopeus. Tutkimuksessa tuhkaa fraktioimalla sähkösuodattimen kenttien avulla kadmiumin pitoisuutta pystyttiin vähentämään jopa 70 %. Muiden raskasmetallien poistaminen ei kuitenkaan ollut yhtä tehokasta.

6.5 Tuhkan pesulla

Tuhkan liukoisten aineiden poistamiseen on kehitelty erilaisia pesumenetelmiä. Helposti liukenevat suolat erottuvat helposti veden avulla, mutta vaikeasti liukenevia yhdisteitä kuten raskasmetalleja ei saada eroteltua kunnolla edes suurilla vesimäärillä. Raskasmetallien liuottaminen tuhkasta voidaan toteuttaa happopesulla. Tuhkan korkean pH:n takia sen neutralointi vaatii kuitenkin paljon happoa, mikä nostaa kustannuksia. Tuhkaa pestessä tulee huomioida myös pesusta syntyvät jätevedet. (Korpijärvi et al. 2009)

6.6 Termisellä käsittelyllä

Termisellä käsittelyllä on potentiaalia tehokkaaseen raskasmetallien poistoon lentotuhkasta. Jokiniemi et al. (2019) tutkivat puupellettien poltossa muodostuneiden pohja- ja

lentotuhkien kadmiumin- ja kromipitoisuuksien vähentämistä termisellä käsittelyllä. Tuhkat olivat peräisin sekä arina- että kiertopetikattiloilta. Tutkittavia tuhkia kuumennettiin uunissa 1000 °C lämpötilassa eri kaasukehissä, joita olivat ilma, typpi sekä vety/typpi seos. Kadmiumin havaittiin haihtuvan tuhkasta pelkistävissä olosuhteissa. Kromin kokonaispitoisuuteen ei käsittelyllä ollut vaikutusta, mutta kromi saatiin liukenemattomaan muotoon. Samaisessa tutkimuksessa tutkittiin myös jätteenpolton lentotuhkia. Näistä tuhkista tutkittiin useampien aineiden pitoisuuksien muutoksia. Tuhkaa kuumennettaessa ilman avulla 1000 °C lämpötilassa tuhkasta poistui mm. kadmiumista 70–90 % ja lyijystä 80–90 %. Tuhkasta poistui kuitenkin myös lannoitekäytön kannalta tärkeästä kaliumista 60–80 %. Termiset tuhkan puhdistusmenetelmät ovat yleisesti ottaen kalliita niiden suuren energiankulutuksensa vuoksi (Korpijärvi et al. 2009).

7 METSÄ GROUP TARKASTELTAVAT TUHKAT

Tässä työssä tarkastellaan Metsä Groupin Suomessa sijaitsevien 13:n eri tuotantolaitoksen kattiloilta muodostuvia tuhkia. Tarkasteltavilla laitoksilla muodostuvat tuhkat ovat peräisin biomassan polttavien kattiloiden, sekä lisäksi yhden jätettä rinnakkaispolttava. Työhön on kerätty tietoa haastattelemalla tuotantolaitoksien henkilökuntaa ja tuhkan toimittajaa sekä tutkimalla Metsä Groupin aiemmin tuottamia aineistoja tuhkista.

7.1 Kattilatyypit

Työssä tarkasteltavat tuhkat ovat arinakattiloiden lento- ja pohjatuhkat sekä kiertopeti- (CFB) ja kuplapetikattiloilta (BFB) muodostuvat lentotuhkat ja petihiekat. Tarkasteltavat kattilat, niiden polttoainetehot ja savukaasun puhdistusmenetelmät esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Työssä tarkasteltavat laitokset, niiden polttoainetehot ja savukaasun puhdistusmenetelmät.

Tuotantolaitos	Kattilatyyppi	Polttoaineteho [MW]	Savukaasun puhdistus
Lappeenranta	Keko- ja viistoarina	9 + 8	Keko: sykloona + sähkösuodatin, viisto: sykloona + pesuri
Renko	Kekoarina	11,5	Sähkösuodatin
Vilppula	Kekoarina x2	16,5 + 9	Sähkösuodatin
Punkaharju	Viistoarina	30	Sähkösuodatin
Merikarvia	Kekoarina	9	Sykloona
Suolahti	Viistoarina + kiertopeti	28 + 23	Sähkösuodatin
Äänekoski	Kuplapeti	174	Sähkösuodatin
Simpele	Kuplapeti	127	Sähkösuodatin
Mänttä	Kuplapeti	95	Letkusuodatin + pesuri
Kyro	Kuplapeti	88	Letkusuodatin
Kaskinen	Kuplapeti	86	Sähkösuodatin
Kemi	Kuplapeti	98	Sähkösuodatin
Lohja	Kuplapeti	26	Sähkösuodatin

Taulukosta voidaan havaita, että tarkasteltavista tuotantolaitosten kattiloista 8 kappaletta on arinakattiloita, 7 kappaletta kuplapetikattiloita sekä yksi kiertopetikattila. Arinakattilat ovat

polttoaineteholtaan max 30 MW. Suurin kattila, jonka tuhkia työssä tarkastellaan, on Äänekosken BFB kattila, jonka polttoaineteho on 174 MW. Savukaasun puhdistusmenetelmistä sähkösuodin on yleisin menetelmä; se on käytössä kaikilla muilla paitsi Merikarvian, Mäntän ja Kyron tehtailla. Näillä tehtailla savukaasun puhdistukseen käytetään joitain vaihtoehtoisia menetelmiä, kuten syklonia tai letkusuodatinta. Lisäksi Lappeenrannan tehtaan viistoarinakattilalla on käytössä sykloni ja savukaasupesuri, kun taas kekoarinan savukaasut johdetaan syklonin sekä sähkösuotimen läpi.

7.1.1 Tuhkan määrä

Syntyvän tuhkan määrä vaihtelee huomattavasti eri tuotantolaitosten välillä. Vuodessa muodostuvat keskimääräiset tuhkamäärät ja petihiekat on esitetty tuotantolaitoksittain taulukossa 12. Tuhkamäärät eivät vaihtele merkittävästi vuositasolla.

Taulukko 12. Vuosittain muodostuvat tuhka- ja petihiekkamäärät tuotantolaitoksittain.

Tuotantolaitos	Tuhka [t/a]	Peti-hiekka [t/a]
Lappeenranta	1000	
Renko	900	
Vilppula	1700	
Punkaharju	1400	
Merikarvia	500	
Suolahti	900	160
Äänekoski	4200	3200
Simpele	4800	1000
Mänttä	5000	800
Kyro	5800	1400
Kaskinen	3000	1000
Kemi	3000	1000
Lohja	350	200
yht.	32550	8760

Taulukosta voidaan havaita, että yleisesti vähiten tuhkia muodostuu tuotantolaitoksilta, joilla on käytössä arinakattilat. Eniten tuhkaa muodostuu Äänekosken, Simpeleen, Mäntän ja Hämeenkyrön tehtailla. Kaikilla näillä vuotuinen tuhkamäärä ylittää 4000 tonnia. Yhteensä tarkasteltavilta laitoksilta muodostuu vuosittain tuhkaa noin 32 600 tonnia ja petihiekkaa noin 8800 tonnia.

7.1.2 Tuhkan laatu

Metsä Groupin laitokset teettävät säännöllisesti analyysejä tuhkistaan. Analyysien avulla voidaan kohdistaa tuhkat niille sopiviin hyötykäyttökohteiseen. Tuhka-analyysejä tehdään niin lannoitus-, maanrakennus kuin kaatopaikkakäyttöä varten. Kuten edellä mainitussa tuhkan määrässäkin, on myös niiden laaduissa huomattavia eroja eri tuotantolaitosten välillä. Lisäksi tuhkan laatu vaihtelee jonkin verran myös yksittäisten tuotantolaitosten sisällä, riippuen silloisista poltto-olosuhteista sekä polttoaineen koostumuksista. Tuhka-analyysien sekä haastattelujen perusteella koottu taulukko tuhkien mahdollisista hyötykäyttökohteista esitetty alla.

Taulukko 13. Vuosien 2021–2022 mahdolliset hyötykäyttökohteet tuotantolaitoksittain. (Metsä Group sisäinen lähde)

Tuotantolaitos	Metsälannoite	Peltolannoite	MARA	Tavanomaisen jätteen kaatopaikka
Lappeenranta	x		x(1	
Renko	x		x(1	x
Vilppula	x	x(2	x(1	x
Punkaharju	x	x(2	x(1	x(3
Merikarvia	x		x	
Suolahti	x		x(1	x(3
Äänekoski	x		x(1	x(3
Simpele	x		x(1	x
Mänttä		x	x(1	x
Kyro			x	
Kaskinen	x		x	x
Kemi	x		x(1	x
Lohja	x		x(1	x

Selitteet:

(1 Tuhka täyttää osan MARA-kohteiden raja-arvot

(2 Vain pohjatuhka täyttää peltolannoitteen raja-arvot

(3 Vain petihiekka/pohjatuhka täyttää tavanomaisen jätteen kaatopaikka raja-arvot

Taulukosta havaitaan, että tarkasteltavista tuhkista melkein jokainen täyttää jo nykyisellään metsälannoituksen kriteerit. Ainoat tuotantolaitokset, joiden pohja- sekä lentotuhkat eivät kumpikaan täytä raja-arvoja ovat Mänttä ja Kyro. Näiden lisäksi Lappeenrannan, Rengon, Vilppulan sekä Merikarvian tuhkien metsälannoitekäyttöä rajoittaa käytännön haasteet,

joista lisää myöhemmin kappaleessa 8.2. Tällä hetkellä metsälannoitukseen soveltuvan tuhkan määrä saadaan, kun vähennetään edellä mainittujen tuotantolaitosten vuotuiset tuhkamäärät kaikkien tarkasteltavien laitosten tuhkista. Näin ollen vuosittain muodostuvan metsälannoituskelpoisen tuhkan määräksi saadaan 17 650 tonnia. Tämä vastaa noin 54 %:n osuutta kaikesta muodostuvasta tuhkasta.

Mäntän tuhkien rajoittavana tekijänä on liian alhainen kaliumin ja fosforin yhteispitoisuus, jotta se täyttäisi metsälannoitukselle asetetut kriteerit. Ravinteiden lisäksi haitallisten aineiden pitoisuudet ovat Mäntän tehtaalla alhaiset. Tästä syystä se onkin yksi kolmesta laitoksesta, joiden tuhkat täyttävät peltolannoitteen vaatimukset. Tuhkan ravinnepitoisuuksille ei ole samanlaisia raja-arvoja peltolannoitteena kuin metsälannoitteena, mutta sen haitallisten aineiden raja-arvot ovat metsälannoitteiden raja-arvoja alhaisemmat. Peltolannoitehyötykäyttöön soveltumattomien tuhkien käytön rajoitteena onkin joko kadmiumin, sinkin tai niiden molempien pitoisuudet.

Maanrakentamisen hyötykäyttömahdollisuudet ovat Metsä Groupin tuhkilla hyvät. Kaikkien tarkasteltavien laitosten tuhkat soveltuvat ainakin osittain maanrakennuskäyttöön. Lisäksi melkein kaikki tuhkat soveltuvat tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Näitä hyötykäyttöjä rajoittaa useat eri aineiden pitoisuudet ja liukoisuudet, kuten kromi, barium, kloridi ja sulfaatti.

7.1.3 Tuhkan käsittely tehtailla

Työssä tarkasteltavien tuotantolaitosten tuhkien käsittelyssä on joitain eroavaisuuksia. Eroavaisuudet koskevat lähinnä tuhkan käsittelyyn joko märkänä tai kuivana. Kaikilla työssä tarkasteltavilla arinakattiloilla pohjatuhka on märkää, kun taas BFB ja CFB kattiloilla pohjatuhka/petihiekka poistetaan prosessista kuivana. Joillakin arinakattiloilla kuiva lentotuhka ajetaan samaan konttiin märän pohjatuhkan kanssa, jolloin muodostuu niin sanottua sekatuhkaa. Eri tuhkajakeiden, eli lentotuhkan ja pohjatuhkan prosessista poistotapa esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Tuhkajakeiden prosessista poistotapa. (Metsä Group sisäinen lähde)

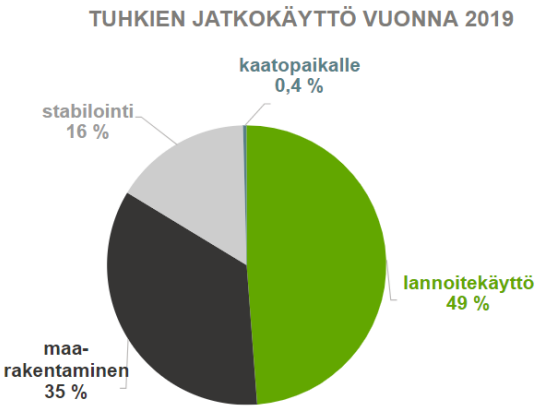
Tuotantolaitos	Tuhkajakeet erillään	Tuhkajakeet yhdessä
Lappeenranta		x
Renko		x
Vilppula		x
Punkaharju	x	
Merikarvia		x
Suolahti		x
Äänekoski	x	
Simpele	x	
Mänttä	x	
Kyro	x	
Kaskinen	x	
Kemi	x	
Lohja	x	

Sekatuhkan haittapuolena on, ettei sen jakeiden laatua pystytä analysoimaan erikseen, jolloin jotkin hyötykäyttökohteet voivat karsiutua pois. Lentotuhkaa ei tarvitse tässä menetelmässä erikseen kostuttaa, sillä sen pölyävät ominaisuudet häviävät sen sekoittuessa märkään pohjatuhkaan.

Metsä Group on tutkinut aiemmin tuhkan rakeistamista Äänekosken lentotuhkilla. Rakeistus jäi kuitenkin kokeelliselle tasolle, sillä se ei ollut taloudellisesti kannattavaa. Tällä hetkellä ainoastaan Lohjan lentotuhkia rakeistetaan Forest Vitalin toimesta. Rakeistettavan tuhkan määrä on vähäistä, joten kustannukset eivät nouse suuriksi. Forest Vitalin mukaan rakeistaminen maksaa laitokselle n. 20–40 €/tonni tuhkaa. Tarkasteltavien tuotantolaitosten tuhkat useimmiten läjitetään ja annetaan vanheta sekä itsekovettua. Lisäksi BFB ja CFB kattiloiden lentotuhka voidaan purkaa tuhkasiilosta ja kuljettaa suoraan hyötykäyttökohteisiin yhteistyökumppaneiden toimesta.

7.1.4 Tuhkan hyötykäytön nykytilanne

Tuhkan hyötykäyttöä on tutkittu Metsä Groupilla aikaisemminkin. Hyötykäyttö on kohdistunut pääasiassa stabilointiin, maanrakennukseen sekä lannoitekäyttöön. Metsä Groupin Suomen tehtaiden tuhkien hyötykäytön jakautuminen vuonna 2019 esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Metsä Groupin Suomen tehtaiden tuhkien käyttökohteet vuonna 2019. (Metsä Group sisäinen lähde)

Kuvasta voidaan havaita, että Metsä Group käyttää hyödyksi melkein kaiken tuottamansa tuhkan. Vuonna 2019 noin puolet tuotetusta tuhkasta käytettiin lannoitteena ja vain 0,4 % tuhkasta päätyi kaatopaikalle. Kuvassa esitetty stabilointi sisällyttää esimerkiksi sellutehtailla muodostuvan viherlipeäsakan stabilointiin käytettyä tuhkaa. Stabilointia tehdään Äänekosken sekä Kemin sellutehtaiden soodasakalle. Tuhkaa menee tuotantolaitosten omiin maarakentamiskohteisiin kuin myös laitosten ulkopuolelle.

8 METSÄLANNOITUKSEN LISÄÄMISEN MAHDOLLISUUDET

Tutkittavat tuhkat soveltuvat suurimmalta osin jo tällä hetkellä hyvin metsälannoitukseen lannoitevalmisteasetuksen mukaisesti. Kuten aiemmin todettiin vain kahden tuotantolaitoksen tuhkat eivät nykyisellään täytä lannoiteasetuksen vaatimuksia metsälannoitteena. Tuhkalla voi kuitenkin olla lannoiteasetuksen ulkopuolisia käytännön rajoitteita sen hyödyntämiseksi. Tässä kappaleessa käydään läpi mahdolliset toimenpiteet, jotta tuhkia saataisiin ohjattua entistä enemmän metsälannoitteeksi.

8.1 Polttoaineen muutoksilla

Ainoat tuotantolaitokset, joiden tuhkat eivät täytä lannoiteasetuksen vaatimuksia ovat Mänttä ja Kyro. Näistä jälkimmäisen kohdalla lannoitehyötykäytön estää yksinkertaisesti se, että yhtenä polttoainejakeena on käytössä SRF-kierrätyspolttoaine. Metsä Groupin kestävän kehityksen tavoitteet 2030 sisältävät fossiilista polttoaineista luopumisen, joten Kyron SRF-kierrätyspolttoaineesta tullaan luopumaan lähivuosina. Tämän jälkeen lannoitekäyttö on mahdollista, jos tuhkat muuten täyttävät lannoiteasetuksen asettamat vaatimukset. Mäntän tuhka ei täytä lannoiteasetuksen asettamaa alarajaa (2 % kuiva-aineesta) fosforin ja kaliumin yhteispitoisuudelle. Tämä johtunee Mäntässä käytössä olevista polttoainesta; puupolttoaineiden lisäksi Mäntässä poltetaan siistauslietettä, biolietettä sekä hylkypaperia. Lietteet sisältävät jonkin verran ravinteita, mutta niiden suuren tuhkapitoisuuden vuoksi tuhka ikään kuin laimenee. Jotta Mäntän tuhka täyttäisi lannoiteasetuksen raja-arvot, tulisi sen polttoaineseosta muuttaa. Puupolttoaineiden osuutta tulisi nostaa ja vastaavasti lietteiden määrää vähentää, jotta tuhkan ravinnepitoisuudet nousisivat riittävälle tasolle.

Näillä edellä mainittujen polttoaineiden muutoksilla metsälannoitekelpoisen tuhkan määrää saataisiin kasvatettua huomattavasti, sillä Mäntän ja Kyron tuotantolaitoksilla muodostuvat tuhkamäärät ovat verrattain suuria. Polttoaineiden muutoksilla metsälannoituskäyttöön soveltuvaa tuhkaa saataisiin lisättyä näiltä kahdelta tuotantolaitokselta 10 800 tonnilla per vuosi. Tämä tarkoittaisi kaikkien tarkasteltavien tuhkien metsälannoitekelpoisuuden määrän kasvavan 28 450 tonniin. Tällöin metsälannoitteeksi soveltuvan tuhkan osuus nousisi nykyisestä 54 %:sta noin 87 %:iin. Tässäkin tapauksessa laskuista on jätetty pois leijupetikattiloiden petihiekat.

Raskasmetallit eivät juurikaan rajoita tarkasteltavien tuotantolaitosten tuhkien hyötykäyttöä metsälannoitteena. Lappeenrannan kekoarinan lentotuhkassa kadmium pitoisuus ylittää kuitenkin sille asetetun ylärajan. Suuri kadmiumpitoisuus johtunee kuoren suuresta osuudesta polttoaineseoksessa. Kadmiumpitoisuutta pystyttäisiin teoriassa laskemaan vähentämällä kuoren osuutta poltossa ja lisäämällä hakkeen osuutta. Tarkempi analysointi vaatisi kuitenkin koeajoja sekä tuhkan käsittelyn muutoksia, sillä tällä hetkellä Lappeenrannassa tuhkajakeet sekoitetaan keskenään.

8.2 Tuhkan käsittelyn muutokset

Taulukko 13 perusteella 11:n laitoksen tuhkat sopivat metsälannoitukseen raja-arvojen mukaisesti. Kuten työssä aiemmin todettiin, metsälannoitteeksi lannoiteasetuksen mukaan soveltuvien tuhkien joukossa on kuitenkin neljä tuotantolaitosta (Lappeenranta, Renko, Vilppula ja Merikarvia), joiden tuhkien hyödyntämien metsälannoitteeksi on käytännön tasolla hyvin haastavaa. Haasteet johtuvat edellä mainittujen tuotantolaitosten tuhkien hyvin korkeista kosteuspitoisuuksista. Haastateltaessa metsälannoitukseen erikoistuneen ForestVital Oy:n toimitusjohtajaa Petri Jykylää, kävi ilmi, että tuhkan kosteuspitoisuuden tulisi olla alle 25 %, jotta se olisi vielä levityskelpoista. Sitä kosteammat tuhkat eivät sovellu kalkinlevityslaitteistolle, sillä hyvin kostea tuhka tukkii levityslaitteiston. Lisäksi tuhkan maalevityksen ajoittuminen talviaikaan saattaa aiheuttaa tuhkan jäätymisen levityskalustoon. Hyvin kostean tuhkan kuljettaminen ei myöskään ole kustannustehokasta, sillä iso osa kuormasta on tällöin pelkkää vettä. Korkeat kosteuspitoisuudet johtuvat kyseisten tehtaiden polttotekniikasta; kekoarinalta pohjatuhka tippuu vesitäyttöiseen sammutusaltaaseen, josta se nostetaan märkätuhkakuljettimella konttiin. Tällöin se ehtii sitomaan itseensä suuria määriä vettä. Kekoarinoiden pohjatuhkan kosteus on tällä hetkellä n. 60 %. Pohjatuhka tulisi saada poistettu kekoarinoilta huomattavasti kuivempana, jotta se täyttäisi Forest Vitalin raja-arvot levityskelpoiselle tuhkalle. Kekoarinan alla olevan sammutusvesialtaan veden määrää ei pystytä vähentämään, sillä vedenpinnan laskeminen aiheuttaisi häiriöitä primääri-ilman syötössä. Toisin sanoen kekoarinoiden pohjatuhkan korkeaa kosteuspitoisuutta ei voida nykytiedolla ennaltaehkäistä. Tuhka tulisi siis saada kuivemmaksi kattilasta poistamisen jälkeen. Yksi mahdollinen tapa saada märkä pohjatuhka kuivemmaksi olisi käyttää jonkinlaista

teollista kuivainta. Esimerkiksi SFTec Oy valmistaa teollista kuivainta, jolla pystytään kuivaamaan hukkalämmön avulla erilaisia materiaaleja kuten esimerkiksi biolietettä ja tuhkaa.

Kekoarinakattiloiden pohjatuhkien kosteuspitoisuutta vähentämällä tuhka saataisiin levityskelpoiseksi metsiin. Tällä saataisiin lisättyä Metsä Groupin metsälannoitekelpoisen tuhkan määrää merkittävästi, mutta vaikutus kokonaismäärään on pienempi kuin polttoaineiden muutoksilla johtuen arinakattiloiden pienemmistä tuhkamääristä. Jos kaikkien kekoarinoiden pohjatuhkat saataisiin riittävän kuivaksi, lisäisi se metsälannoitekelpoisen tuhkan määrää 4100 tonnia per vuosi, mikä nostaisi metsälannoitteeksi soveltuvien tuhkien osuutta nykyisestä 54 %:sta noin 67 %:iin.

Lisäksi kappaleessa 6.4 esitetyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että lannoitekäyttöön tarkoitettu tuhka kannattaisi kerätä sähkösuotimen ensimmäisestä kentästä, sillä siinä kadmiumpitoisuudet sekä muiden raskasmetallien pitoisuudet ovat pienimmät. Fraktiointi vaatisi investointeja, sillä tällä hetkellä Metsä Groupin tuotantolaitoksilla tuhkat johdetaan sähkösuotimien kaikilta kentiltä samaan konttiin/siiloon. Tutkituista lentotuhkista vain Lappeenrannan tuotantolaitoksen lentotuhka ylitti metsälannoituksen raja-arvon, joten siellä fraktioinnin mahdollisuutta voisi tulevaisuudessa tarkastella. Tämä tulisi ajankohtaiseksi, jos tuhkajakeita alettaisiin käsittelemään erillään.

8.3 Muita mahdollisia tapoja

Tarkasteltavissa tuhkissa on metsälannoitekelpoisia lentotuhkia, joita kuitenkin käytetään muihin hyötykäyttökohteisiin. Esimerkiksi Kemin lentotuhka on ominaisuuksiltaan hyvää lannoitetta, mutta sitä käytetään tällä hetkellä tehtaan toisen sivuvirran eli soodasakan stabilointiin. Jotta kyseinen tuhka saataisiin käytettyä metsälannoitteena, tulisi stabilointiin löytää korvaava tuhka. Korvaava tuhka tulisi olla lähellä Kemin tehdasaluetta, jotta sen kuljetuskustannukset pysyvät kohtuullisina. Simpeleen lentotuhka on niin ikään hyvää metsälannoitetuhkaa, mutta se menee tällä hetkellä kaatopaikan maisemointiin. Lentotuhkaa tullaan lähitulevaisuudessa käyttämään teollisuuskaatopaikan sulkemiseen. Se ei kuitenkaan poissulje metsälannoituskäyttöä, vaan jos sopivia lannoituskohteita löytyy, voidaan tuhkaa käyttää hyödyksi myös lannoitteena. Tuhkien hyötykäyttö tulee siis kohdentaa tuhkakohtaisesti,

jotta niiden potentiaali saataisiin hyödynnettyä parhaalla mahdollisella tavalla. Tätä varten onkin erityisen tärkeää, että tuhkista teetetään analyysejä säännöllisin väliajoin ja riittävän usein. Tuhka-analyysien säilyttäminen yhteisessä tietokannassa helpottaa tuhkien vertailua keskenään sekä mahdollistaa yhteistyön Metsä Groupin eri liiketoimintojen välillä. Tuhkan toimitusketjun organisointiin tulee myös kiinnittää huomiota, jotta jokainen tuhkan parissa toimiva tietää omat vastuualueensa ja osaa toimia sen mukaan. Lisäksi yksi mahdollinen kehityskohde olisi tuhkien raportointikäytäntöjen yhtenäistäminen. Tämä helpottaisi tuhkien tarkastelua sekä ohjaamista potentiaalisiin hyötykäyttökohteisiin.

Tuhkan rakeistaminen ei ole tällä hetkellä tarpeellista, sillä tuhkat on saatu levitettyä maateitse. Rakeistamista tulee harkita siinä vaiheessa, jos tuhkalannoitusta on tarpeen tehdä kesäaikaan tai tuhkan maalevitykselle ei ole riittävästi kysyntää. Tuhkan rakeistaminen voi lisäksi tulla kyseeseen, jos tuhkan varastointitila ei syystä tai toisesta riitä ja tuhkaa täytyy varastointitilan loppuessa saada toimitettua eteenpäin. Rakeistaminen vaatisi kuitenkin tuhkan käsittelyn kuivana, joten arinakattiloiden pohjatuhkat eivät siihen sovellu. Arinakattiloiden lentotuhkaa voitaisiin periaatteessa rakeistaa, mutta se vaatisi lentotuhkan käsittelyä erillään pohjatuhkasta. Tällä hetkellä rakeistukseen soveltuisi parhaiten leijupetikattiloiden lentotuhkat.

Tuhkan laadulla on vaikutusta sen kuljettamisen kannattavuuteen. Haastateltaessa Forest Vitalin toimitusjohtajaa Petri Jykylää kävi ilmi, että runsaasti ravinteita sisältävää tuhkaa kannattaa kuljettaa pitkiäkin matkoja lannoitekäyttöön. Petri kertoi esimerkissään, että Forest Vital on parhaillaan kuljettanut hyvää metsälannoitetuhkaa jopa 500 kilometrin päähän. Tuhkalannoituksen taloudelliselta kannalta Metsä Groupin kannattaakin jatkossa etsiä mahdollisia lannoituskohteita ravinnerikkaille tuhkilleen kauempaa kuin vähemmän ravinteikkaille tuhkille. Tällaisia ravinteiltaan parhaiten lannoitteiksi soveltuvia tuhkia ovat Äänekosken, Kemin ja Kaskisten lentotuhkat.

9 MUUN HYÖTYKÄYTÖN LISÄÄMISEN MAHDOLLISUUDET

Kuten työssä on aikaisemmin todettu, Metsä Group hyödyntää tuhkaa metsälannoituksen lisäksi myös peltolannoitteena sekä maanrakennuksessa. Maanrakentamiseen soveltuu parhaiten leijupetikattiloiden petihiekka. Myös arinakattiloiden sekatuhkissa on potentiaalia maanrakentamiseen. Maanrakentamista rajoittaa eri aineiden pitoisuudet/liukoisuudet, joihin pystyttäisiin mahdollisesti vaikuttamaan tuhkaa vanhentamalla.

Tämän diplomityön aikana Punkaharjun tuotantolaitoksen tuhkille tehtiin vanhentamiskoe. Kokeessa teetettiin aluksi tuhka-analyysit tuoreista lento- ja pohjatuhkista. Tämän jälkeen tuhkia vanhennettiin kasalla noin kaksi kuukautta, jonka jälkeen niistä teetettiin uudet analyysit. Analyysejä vertailemalla havaittiin, että joidenkin aineiden kuten molybdeenin, kromin ja fluoridin liukoisuudet pienenivät. Kuitenkin joidenkin aineiden osalta liukoisuudet myös kasvoivat vanhentamisen myötä. Tällaisia aineita olivat esimerkiksi kloridi ja sulfaatti. Tämä havainto tukee kirjallisuudesta saatua tietoa. Toisin sanoen tuhkaa vanhentamalla se voidaan saada täyttämään MARA-asetuksen raja-arvot, mutta vanhentamisen vaikutuksia tulee analysoida laitos- ja tuhkakohtaisesti.

Tuhkien peltolannoitekäyttöä pystyttäisiin mahdollisesti lisäämään merkittävästi nykyisestä. Arinakattiloiden pohjatuhkat vaikuttaisivat soveltuvan varsin hyvin ominaisuuksiltaan peltolannoitteeksi niiden vähäisten raskasmetallipitoisuuksiensa vuoksi. Lisäksi peltolannoitekäytössä tuhkan korkea kosteuspitoisuus ei välttämättä aiheuta ongelmia sen levityksessä. Peltolannoitekäytön esteenä näiden kattiloiden tuhkien osalta on kuitenkin tuhkien nykyinen käsittely. Kekoarinakattiloilla pohja- ja lentotuhkia käsitellään tällä hetkellä yhdessä, jolloin niiden hyötykäyttäminen erikseen ei ole mahdollista. Osan kohdalla tuhkat pystyttäisiin käsittelemään erillään nykyisillä laitteistoilla mutta osan kohdalla tuhkajakeiden poistaminen erillään prosessista vaatisi suuriakin investointeja. Tätä mahdollisuutta tulee kuitenkin tarkastella, mikäli tuhkan peltolannoitekäytölle nähdään jatkossa tarvetta. Lisäksi tuhkajakeiden erikseen käsittelyllä lentotuhkat pysyisivät kuivana, jolloin niiden levittäminen metsälannoitteena olisi helpompaa. Raskasmetallipitoisuudet ovat kuitenkin korkeammat lentotuhkissa, joten niiden soveltuvuus metsälannoitteeksi tulisi varmistaa analyysien avulla. Lentotuhkien osuus arinakattiloiden kaikista tuhkista on vähäinen, joten tämä ei nostaisi merkittävästi metsälannoitukseen soveltuvan tuhkan kokonaismäärää.

Yksi mahdollinen keino lisätä tuhkan hyötykäyttöä esimerkiksi maanrakentamisessa on Motivan ylläpitämä Materiaalitori-verkkopalvelu. Maksuton verkkopalvelu on tehty yritysten ja organisaatioiden jätteiden ja sivuvirtojen kauppapaikaksi helpottamaan materiaalien kierrätystä. Materiaalitorin kautta voitaisiin löytää mahdollisia toimijoita, jotka tarvitsisivat tuhkaa tai vaihtoehtoisesti tuhkia voitaisiin itse tarjota. Työssä tehtyjen haastatteluiden perusteella Materiaalitori on monelle Metsä Groupin työntekijälle vielä tuntematon palvelu.

Kivihiilen tuhkia on yleisesti käytetty betonin ja asfaltin seosaineena. Biotuhkien käytölle näihin tarkoituksiin ei ole vielä standardeja, mutta mahdollisuuksia on tutkittu. Biotuhkien ominaisuudet eivät tutkimusten mukaan ole yhtä hyvät seosaineeksi kuin kivihiilen tuhkat, mutta niissä on havaittu kuitenkin potentiaalia. Fossiilisten polttoaineiden käytön jatkuva vähentäminen saattaa tulevaisuudessa aiheuttaa lisää kiinnostusta biotuhkia kohtaan myös betonin ja asfaltin seosaineena.

Edellä mainittujen keinojen lisäksi eräs yhteistyökumppani on ilmoittanut olevansa kiinnostunut Metsä Groupin leijupetihiekoista, joita se voisi mahdollisesti käyttää kasvualustojen raaka-aineena. Tulevaisuudessa tämän tyyppisten uusien hyötykäyttökohteiden löytäminen voi tulla tarpeelliseksi, kun kaikki sivuvirrat halutaan hyödyntää.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Metsä Groupin yksi strategisista kestävän kehityksen tavoitteista on, että se pystyy hyötykäyttämään 100 % tuotannon sivuvirroista vuoteen 2030 mennessä. Tuhka on yksi tuotannossa syntyvistä sivuvirroista, joten sen hyötykäyttöä ja ominaisuuksia haluttiin tutkia tarkemmin Metsä Groupin toimesta. Tässä työssä tutkittiin Metsä Groupin Suomessa sijaitsevilta tuotantolaitoksilta muodostuvien tuhkien määriä ja laatuja, nykyistä tuhkien hyötykäyttöä sekä keinoja lisätä tuhkan hyödyntämistä erityisesti metsälannoitteena. Lisäksi työssä tarkasteltiin tuhkan muiden hyötykäyttökohteiden mahdollisuuksia. Tuhkan hyötykäytössä tulee kuitenkin muistaa, että siitä aiheutuu tuotantolaitoksille useimmiten kustannuksia. Tämä vaikuttaa hyötykäyttökohteen valintaan; esimerkiksi kaatopaikan maisemointi tai maarakentaminen saattavat olla varteenotettavia vaihtoehtoja, vaikka tuhka olisikin metsälannoitekelpoista.

Työssä tarkasteltiin 13 eri tuotantolaitoksen kattiloilta muodostuvia tuhkia, jotka ovat muodostuneet puupolttoaineiden, turpeen, lietteen sekä SRF-kierrätyspolttoaineen poltosta. Puupolttoaineet ovat selvästi käytetyin polttoaine. Tarkasteltavat tuhkat muodostuvat keko- ja viistoarinoilta, kuplapetikattiloilta sekä yhdeltä kiertopetikattilalta. Metsä Groupin Suomen tuotantolaitoksilta tuhkaa muodostuu vuosittain noin 32 600 tonnia ja petihiekkaa noin 8800 tonnia. Tuhkia käytetään tällä hetkellä metsä- ja peltolannoitteena sekä maarakentamisessa. Kaatopaikalle loppusijoitukseen tuhkaa ei juurikaan mene; vuonna 2019 sijoitettavaksi meni 0,4 % tuhkasta. Suurin osa tuhkista soveltuu metsälannoituskäyttöön jo tällä hetkellä, mutta osuutta pystytään tietyin keinoin myös lisäämään.

Tuhkan hyödyntämistä eri käyttökohteissa säädellään asetuksien ja lakien muodossa. Lannoiteasetuksen asettamat vaatimukset metsälannoitteelle eivät täyty Mäntän sekä Kyron tuotantolaitosten tuhkissa. Kyron polttoaineseoksessa on yhtenä jakeena SRF-kierrätyspolttoaine, jonka käyttö estää tuhkan lannoitekäytön. SRF-polttoaineesta tullaan luopumaan vuoteen 2030 mennessä, jolloin tuhka voidaan hyödyntää metsälannoitteena. Mäntän tuotantolaitoksen tuhkissa ei ole lannoiteasetuksen vaatimusten mukaisesti tarpeeksi ravinteita. Mäntän polttoaineseoksessa lietteiden osuus on kohtalaisen suuri, joka aiheuttaa tuhkan ”laimenemisen”. Ravinteiden määrää voitaisiin teoriassa lisätä vähentämällä lietteiden osuutta, sekä vastaavasti kasvattamalla puupolttoaineiden osuutta polttoaineseoksessa. Näillä

polttoainemuutoksilla metsälannoitekelpoisen tuhkan osuutta voitaisiin nostaa nykyisestä 54 %:sta 87 %:iin. Tämä vaatisi kuitenkin koeajoja, jotta asia voitaisiin varmistaa käytännössä.

Kekoarinoiden pohjatuhkan korkea kosteuspitoisuus rajoittaa sen levittämistä metsiin. Kosteuden vähentäminen polttoprosessin muutoksilla ei nykytiedon mukaan ole mahdollista. Tuhkan kosteuspitoisuuden vähentäminen vaatisi teollista kuivainta, jonka avulla kuiva-ainepitoisuus saataisiin riittävän suureksi. Kyseisiä kuivaimia on valmistettu ja koekäytetty tuhkalle, joten yhtenä mahdollisuutena metsälannoitteen lisäämiseksi olisi tutkia kuivainten soveltuvuutta Metsä Groupin tuotantolaitoksilla. Kekoarinoilla muodostuvien tuhkien saattaminen riittävän kuivaksi nostaisi metsälannoitekelpoisten tuhkien osuutta nykyisestä 54 %:sta 67 %:iin.

Arinakattiloiden pohjatuhkat ovat potentiaalisia tuhkia peltolannoitekäyttöön. Useimmiten arinakattiloiden lentotuhka kuitenkin sekoitetaan pohjatuhkiin, jolloin muodostuu sekatuhkaa. Lentotuhkan korkeampien haitta-ainepitoisuuksien vuoksi sekatuhka ei täytä peltolannoitteen kriteerejä. Jotta pohjatuhkat voitaisiin hyödyntää peltolannoitteena, tulisi pohja- ja lentotuhka käsitellä erikseen. Tämä voidaan toteuttaa osalla tuotantolaitoksista ilman investointeja.

Maarakennuskäyttöön soveltuu parhaiten leijupetikattiloiden petihiekat. Petihiekkojen lisäksi arinakattiloiden sekatuhkissa olisi potentiaalia maarakennuskäyttöön. Käyttöä kuitenkin rajoittaa eri aineiden pitoisuudet ja liukoisuudet, joita voitaisiin mahdollisesti vähentää tuhkaa vanhentamalla. Tuhkan vanhentamisen vaikutukset ovat kuitenkin yksilöllisiä, joten vanhentamista tulisi kokeilla tuotantolaitoskohtaisesti.

Kivihiilen tuhkia käytetään yleisesti betonin ja asfaltin valmistuksessa. Biopolttoaineiden poltossa muodostuneita tuhkia näihin käyttökohteisiin on tutkittu, mutta niiden käyttämiseen ei ole olemassa vielä standardeja. Kivihiilen käytön vähentäminen lisännee tulevaisuudessa kiinnostusta biotuhkien käyttämiseen näihin tarkoituksiin. Tämä saattaa avata uusia mahdollisuuksia myös Metsä Groupin tuhkien hyötykäytölle.

Sujuvalla organisoinnilla voidaan edesauttaa tuhkien hyötykäyttöä yleisesti Metsä Groupissa. Konsernin tuhkatiedon kokoaminen mahdollisimman ajantasaisesti yhteen järjestelmään ja sitä kautta näkyväksi tuominen edesauttaisi tuhkan mahdollisimman sujuvaa hyötykäyttöohjaamista. Tiedon digitalisointi ja yhteen kokoaminen helpottaisi yleisellä tasolla Metsä Groupin ja tuhkatoimittajien välistä yhteistyötä. Tuhkatoimittajien verkostoa olisi lisäksi hyvä kartoittaa, jotta esimerkiksi kosteampiakin tuhkia voitaisiin saada metsälannoituskäyttöön yksittäisten metsänomistajien toimesta. Metsä Groupin tuhkien hyötykäyttö metsälannoitteena on kaiken kaikkiaan hyvällä tasolla. Tämä työ kuitenkin osoitti, että metsälannoituksen osuutta voidaan tietyin muutoksin lisätä. Polttoaineiden sekä polttoprosessin vaikutusta tuhkan laatuun olisi suositeltavaa tutkia tarkemmin koeajojen muodossa. Tämän avulla saataisiin tukea tässä työssä esitettyihin näkemyksiin.

LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. ISBN 978-951-38-8418-5. Saatavilla: http://www.vtt.fi/julkaisut

Alakangas, E., Hölttä, P., Juntunen, M., Vesisenaho, T. 2011. Energiaturpeen tuotantotekniikka. Koulutusaineisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja. ISBN 978-951-830-195-3.

Arnkil, N., Joensuu, S., Kauppila, M., Kontinen, K. Kotiharju, A., Lahti, E. & Tenhola, T. 2020. Tuhka osana kestävää liiketoimintaa – Opas tuhkan tuottajille ja käyttäjille. Tapion raportteja 42. Tapio Oy. ISBN 978-952-5632-93-4ISSN 2342-804X(pdf)

Blomberg, P. 2005. Kattilalaitoksen polttotekniikat ja ilmajärjestelmät. Tampereen ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Kone- ja laiteautomaatio. Tutkintotyö.

Bröckl, M., Kiuru, H., Heads, S., Kämäräinen, K., Patronen, J., Luoma-Aho, K., Armila, N., Sipilä, E., Semkin, N. 2021. Jätteenpolton kiertotalousja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjauskeinoin. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:8. ISBN 978-952-383-093-6. ISSN 2342-6799. Saatavilla: http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-093-6

Ecolan Oy. 2017. Tuhkan rakeistamislaitos. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/EcolaninNokiantuhkarakeistamoYVA

Energiavirasto. 2022. Päästökaupan julkaisut. Merkittävämpien polttoaineiden kulutus päästökauppasektorilla 2013-2021. Saatavilla: https://energiavirasto.fi/paastokaupan-julkaisut

Gango, A. & Kuokkanen, E. 2018. Biopohjaisen lentotuhkan hyötykäyttö lannoitteena. Erotustekniikan tutkimuskeskus -hankkeen loppuraportti. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. ISBN: 978-952-344-092-0 (PDF). ISSN 2489-3102 (verkkojulkaisu).

Hynönen, T., Moilanen, M., Makkonen, T., Äijälä, O., Häggman, B. 2008. Tuhkalannoitus. ISBN 978-952-5694-36-9. Saatavilla: https://docplayer.fi/69012316-Tuhkalannoitus-hyvan-metsanhoidon-opassarja.html

Hytönen, J., Hökkä, H. 2020. Rakeistetun tuhkan ja irtotuhkan vertailu suomännikön lannoituksessa. Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2020 artikkeli id 10348. Saatavilla https://doi.org/10.14214/ma.10348

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

Jalovaara, J., Aho, J., Hietamäki, E. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ym.päristökeskus. ISBN 952-11-1489-4 (PDF). ISSN 1238-7312.

Joensuu Samuli. 2018. Puutuhka kivennäismaametsien lannoituksessa – pilotointi – Loppuraportti 2016-2018. Saatavilla: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Puutuhka-kivennaismaametsien-lannoituksessa-loppuraportti-2016-2018.pdf

Joensuu, S., Greis, I., Kotiharju, A., Antila, J., Kauppila, M. 2020. Metsäteiden tuhkarakentaminen ja tuhkarakenteet. Tapio Oy.

Jokiniemi, J., Lane, D., Sippula, O., Lähde, A., Koponen, H. 2019. Arvometallien talteenotto ja hyödyntäminen sekä haitallisten komponenttien poistaminen jätteenpolton tuhkista ja kuonasta. Itä-Suomen yliopisto. Ympäristö- ja biotieteiden laitos. Saatavilla: https://energia.fi/files/4649/2019_Arvometalli_Loppuraportti_julkinen03122019.pdf

Juuma, H., Kauhanen, S., Kontas, K-M., Korhonen, M., Lehtoväre, J., Leskelä, K., Liisanantti, H., Luiro, S., Mikkola, J., Nurmela, T., Ohtamaa, H., Ohtamaa, S., Ojamaa, M.,

Palola, J., Vähärautio, J., Snäkin, J-P. 2020. Tuhkat kiertotaloudessa. Tutkimusraportti tuhkan tuottajille ja käyttäjille. Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 27/2020. ISBN 978-952-316-382-9 (pdf). Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/356053/B%2027%202020%20Soppela%20et%20al.pdf?sequence=2

Jykylä, P. 2022. Toimitusjohtaja, Forest Vital. Videohaastattelu, haastattelijana Matias Majamäki.

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

Korpijärvi, K., Mroueh, U-M., Merta, E., Laine-Ylijoki, J., Kivikoski, H., Järvelä, E., Wahlström, M., Mäkelä, E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. VTT Tiedotteita – Research Notes 2499.

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P., Forsman, J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Verkkojulkaisu. Saatavilla: https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Korpilahti, A. 2003. Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. Metsätehon raportti 143.

Laine-Ylijoki, J., 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. ISBN: 978-952-11-4812-5.

Laine-Ylijoki, J., Wahlström, M., Peltola, K., Pihlajaniemi, M., Mäkela, E. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. VTT Tiedotteita 2141. ISBN 951-38-5891-X. ISSN 1235-0605.

Lindroos, N., Ronkainen, M., Järvinen, K. 2016. Metsä- ja energiateollisuuden jätejakeiden ympäristökelpoisuus maarakentamisessa. Tutkimusraportti. Ympäristöministeriön raportteja 8/2016. ISBN 978-952-11-4591-9 (PDF). ISSN 1796-170X (verkkoj.)

Lohiniva, E., Mäkinen, T., Sipilä, K. 2001. Lietteiden käsittely. Uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Energia. ISBN 951–38–5796–4. ISSN 1455–0865.

Luonnonvarakeskus. 2021. Puun energiakäyttö 2020. Saatavilla: https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-energiakaytto/puun-energiakaytto-2020
Luonnonvarakeskus. Suometsät. Saatavilla: https://www.luke.fi/fi/ajankohtaista/teemat-ja-kampanjat/suometsat/suometsat

Luonnonvarakeskus. Tilastotietokanta. Metsänhoito- ja metsänparannustöiden työmäärät (ha)1950-. Saatavilla: https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__02%20Rakenne%20ja%20tuotanto__12%20Metsanhoito-%20ja%20metsanparannustyot/06a_tyomaarat_1950.px/chart/chartViewColumn/

Luonnonvarakeskus. Tilastotietokanta. Metsäteollisuuden tehdaspolttoaineet Suomessa. Saatavilla: https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__08%20Muut__Energia/10.08_Metsateollisuuden_tehdaspolttoaineet_Suom.px/chart/chartViewColumn/

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. 2011. Asetus nro 24/11.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2006. Lannoitevalmistelaki. 539/2006.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2008. Lannoitevalmistesektorin tulevaisuuskatsaus vuosille 2009 – 2013. Työryhmämuistio mmm 2009:1. Saatavilla: https://mmm.fi/documents/1410837/1708293/lannoitevalmistesektorin_tulevaisuuskatsaus_2009_2013.pdf/b06f8cc3-d3b9-42f5-b403-35498ba2560a/lannoitevalmistesektorin_tulevaisuuskatsaus_2009_2013.pdf

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteita koskevan toiminnan harjoittamisesta ja sen valvonnasta. 2012. Asetus nro 11/12.

Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2021:2. Metsätalouden kannustejärjestelmä 2020-luvulla: Työryhmän muistio. ISBN: 978-952-366-397-8.

Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiaho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A., zu Castell-Rüdenhausen, M. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 46 s. ISBN: 978-952-326-437-3.

Matilainen, M. 2017. Opinnäytetyö. Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa: Hajautetun biolämpöenergian tuhkan kierrätyksen merkitys ja taloudellisen ekosysteemimallin luominen.

Metsä Group. 2022. Verkkosivut. Saatavilla: https://www.metsagroup.com/fi/

Moilanen, M. 2009. Metsätuhkan ravinteet takaisin metsään. Motiva.
Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. 2006. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. Institute for Resource Efficient and Sustainable Systems, Graz University of Technology. ISSN: 0961-9534.

Nilsson, J., Timm, B. 1983. Miljöeffekter av ved- och torvbränning. Statens naturvårdsverk. PM 1708.

Ohlström, M., Tsupari, E., Lehtilä, A., Raunemaa, T. 2005. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset. VTT Tiedotteita - 2300. ISBN 951-38-6721-8. ISSN 1455-0865.

Ojanen, P. 2001. Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus. ISBN: 952-11-2153-X. ISSN: 1238-8610.

Orava, H., Nordman, T., Kuopanportti, H. 2006. Increase the utilisation of fly ash with electrostatic precipitation. Minerals engineering, 2006, Vol.19 (15), p.1596-1602. ISSN: 0892-6875 .

Pesonen, J. 2012. Oulun biotuhkien fraktiointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali. Fysikaalisen kemian Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto. Kemian laitos.

Pihlajaniemi, E. 2020. Urban Infra Revolution. Kohti kestävää ja innovatiivista rakentamista.

Power Technology. 2022. KPA Unicon. Water and Steam Boiler Plants for Heat and Steam Production. Saatavilla: https://www.power-technology.com/contractors/energy-and-utilities/kpa/

Ranta, J & Wahlström, M. 2002. Tuhkien laatu REF-seospoltossa. VTT Tiedotteita 2138. ISBN: 951-38-5885-5. ISSN: 1235-0605.

Rebbling, A., Fagerström, J., Steinvall, E., Carlborg, M., Öhman, M., Boman, C. 2019. Reduction of Alkali Release by Two Fuel Additives at Different Bed Temperatures during Grate Combustion of Woody Biomass. Energy & fuels. [Verkkojulkaisu] 33 (11), 11041–11048.

Ruokavirasto. 2022. Lannoitelain keskeiset uudet asiat. Verkkojulkaisu. Saatavilla: https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/uusi-lannoitelaki/

Soimakallio, S., Sankelo, P., Kopsakangas-Savolainen, M., Sederholm, C., Auvinen, K., Heinonen, T., Johansson, A., Judl, J., Karhinen, S., Lehtoranta, S., Räsänen, S.,

Savolainen, H. 2020. Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa. Sitra. ISBN: 978-952-347-186-3.

Soininen, H., Mäkelä, L., Kyyhkynen, A., Muukkonen, E. 2010. Biopolttoaineita käyttävien energiantuotantolaitosten tuhkien hyötykäyttö- ja logistiikkavirrat Itä-Suomessa. Mikkelin ammattikorkeakoulu. ISBN: 978-951-588-304-9. ISSN 1795-9438.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkojulkaisu]. Yhdyskuntajätteet 2020. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN: 1798-3339. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/jate/2020/13/jate_2020_13_2021-12-09_tie_001_fi.html

Tiainen Mikko. 2014. Opinnäytetyö. Voimalaitostuhkan hyödyntämismahdollisuudet. Case: Kouvolan seutu.

Vakkilainen, E & Kaikko, J. 2022. Poltto- ja kattilatekniikan perusteet. Luentomateriaali. LUT.

Vakkilainen, E. 2011. Höyrykattilatekniikka. Luentomateriaali. LUT.

Vakkilainen, E. 2017. Steam Generation from Biomass - Construction and Design of Large Boilers. Elsevier. Saatavilla: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSGBCDLBC/steam-generation-from/steam-generation-from

Valtakunnan metsien investointi. VMI12: Korhonen, K.T., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Ihalainen, A., Melin, M., Pitkänen, J., Räty, M., Sirviö, M., Strandström, M. 2021. Forests of Finland 2014–2018 and their development 1921–2018. Silva Fennica vol. 55 no. 5 article id 10662.

Valtiovarainministeriö. 2022. Lausuntokierros Jäteverolain veropohjaan muutoksia. Verkkojulkaisu. Saatavilla: https://vm.fi/-/jateverolaki-uudistuu

Valtiovarainministeriö. 2010. Jäteverolaki. 1126/2010.

Vornanen, C. & Penttala, V. 2008. Puuperäisestä lentotuhkasta uusi betonin seosaine.

Vähä-Savo, N., Salonen, M., Lehtovaara, J. 2016. Heavy metal content in fuel peat. Proceedings of the 15th International Peat Congress, Kuching, Sarawak, Malaysia, 15–19 August 2016.

Wahlström, M., Pohjola, V. 1987. Utlakning av metaller ur torflygaska. Espoo: VTT Tutkimuksia 483. 91 s. + liitt. 52 s.

Ympäristöministeriö. 2022. Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Verkkojulkaisu. Saatavilla: https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035

Ympäristöministeriö. 2021. Jätelaki. 714/2021.

Ympäristöministeriö. 2017. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 843/2017.

Ympäristöministeriö. 2014. Ympäristönsuojelulaki. 527/2014.

Ympäristöministeriö. 2011. Jätelaki. 646/2011.

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja. ISBN 978-952-5632-75-0 Julkaistu verkossa 31.5.2019