

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Mervi Matilainen

KOHTI HIILINEUTRAALIA YHTEISKUNTAA: HAJAUTETUN BIO-
LÄMPÖENERGIAN TUHKAN KIERRÄTYKSEN MERKITYS JA TA-
LOUDELLISEN EKOSYSTEEMIMALLIN LUOMINEN

Opinnäytetyö
Marraskuu 2017

**OPINNÄYTETYÖ****Marraskuu 2017****Ympäristötekniikan koulutusohjelma****Ylempi ammattikorkeakoulututkinto**Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
(013) 260 6900

Tekijä

Mervi Matilainen

Nimeke

Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa: Hajautetun biolämpöenergian tuhkan kierrätyksen merkitys ja taloudellisen ekosysteemimallin luominen.

Toimeksiantaja

Apila Group Oy Ab

Tiivistelmä

Ilmastonmuutosta voidaan hillitä pysäyttämällä kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvu. Tällöin on siirryttävä kohti vähähiilistä tai jopa hiilineutraalia yhteiskuntaa. Pariisin ilmastokokouksessa päätettiin, että tähän pyritään vuoteen 2050 mennessä.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään Suomessa vuonna 2016 laadittua energia- ja ilmastostrategiaa, joka huomioi Pariisin ilmastokokouksen tavoitteet. Strategiaa ja sen taustaraportteja ja -julkaisuja tarkastellaan erityisesti puuperäisiä biomassoja polttoaineena käyttävän, hajautetun lämpöenergian tuotannon kannalta. Biomassojen polttoon perustuvassa energian tuotannossa syntyy tuhkaa, joka voidaan kierrättää takaisin metsiin lannoitevalmisteenä. Tuhkan mukana metsiin palautuu ravinteita, jolloin metsän kasvun tehostuessa niiden hiilinieluvaikeus kasvaa. Tämän oletuksen tueksi opinnäytetyössä on listattu ja tarkasteltu ensimmäistä kertaa systemaattisesti kansallisten tutkimusten tuloksia, jotka koskevat tuhkalannoituksen vaikutuksia puuston kasvuun ja toisaalta maahengitykseen.

Opinnäytetyön kehittämistyön tavoitteena oli selvittää paikallisella tasolla hajautetun biomassoihin perustuvan energian tuotannon nykytilaa sekä syntyvän tuhkan laatua ja sen hyödyntämismahdollisuuksia. Lisäksi tarkasteltiin tuhkan kierrätykseen liittyviä kustannusrakenteita. Työssä kehitettiin alueellisten toimijoiden kanssa työpajatoiminnan kautta liiketoiminnallista ekosysteemiratkaisua, jolla hajautetun energiantuotannon toimijat voisivat paikallisesti toteuttaa ravinteiden kierron periaatetta kustannustehokkaasti. Opinnäytetyön toteutuksen prosessia voidaan hyödyntää vastaavien tai paikallisesti räätälöityjen ekosysteemimallien luomisessa myös laajemmin.

Kieli
suomiSivuja 93
Liitteet 1
Liitesivumäärä 2

Asiasanat

hajautettu energiantuotanto, ravinnekierto, hiilinielu, tuhka

 Karelia UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	THESIS November 2017 Degree Programme in Environmental Technology, Master's Degree Tikkarinne 9 FI 80200 JOENSUU FINLAND +358(13) 260 600
Author Mervi Matilainen	
Title Towards Carbon Neutral Society: The Effect of Ash Recycling and Creation of Ecological Ecosystem Model for Separate Bio-Based Heat Energy Production Commissioned by Apila Group Ltd.	
Abstract Climate change can be mitigated by limiting the greenhouse gas emissions. This means that we need to shift towards low carbon or even carbon neutral society. In Paris Climate Summit, it was decided that this should be achieved by 2050. This thesis deals with Finland's current energy and climate strategy 2016, which takes into account the goals of the Paris Climate Summit. The strategy and its background publications are specifically considered noticing the separated heat energy production units using wood-based biomasses as a main source of fuel. As a result of burning the biomasses, ash is produced which can be recycled back to forests as a fertilizer. With ash, nutrients return to forests, and due to the increased forest growth, the carbon sink effect of forests is enhanced. To support this assumption, the results of national studies on the effects of ash on tree growth and on soil respiration will be listed and examined systematically for the first time. The aim of the thesis development work was to clarify the current state of separated biomass-based energy production at local level, the quality of the ash produced and its potential for utilization. In addition, the cost structures related to ash recycling were examined. The work was developed in co-operation with the regional actors through the workshop activities to create a business ecosystem solution that separated energy producers could locally implement the principle of nutrient circulation cost-effectively. The process developed during the work can be utilized to create similar or locally adjusted ecosystem models also in other regions.	
Language Finnish	Pages 93 Appendices 1 Pages of Appendices 2
Keywords separated energy production, nutrient cycle, carbon sink, ash	

Sisältö

Termit ja lyhenteet	3
1 Johdanto	5
1.1 Opinnäytetyön tarkoitus ja tehtävät	6
1.2 Opinnäytetyön menetelmälliset valinnat	7
1.3 Opinnäytetyön rakenne	8
2 Energia- ja ilmastostrategia	8
2.1 Kansallinen energia- ja ilmastostrategia	9
2.2 Puubiomassat päästölähteenä ja hiilinieluna	10
2.3 Päästövähennystavoitteet ja LULUCF	11
3 Puubiomassaan pohjautuvan hajautetun energiantuotannon nykytila	13
3.1 Energia- ja ilmastostrategia ja puubiomassat	14
3.2 Nykytila	14
3.3 Tulevaisuudennäkymät	17
4 Tuhkalannoituksen vaikutukset puuston kasvuun ja hiilen sidontaan	18
4.1 Kangasmetsät	20
4.1.1 Puusto alle 30 vuotta	21
4.1.2 Puusto 30—60 vuotta	23
4.1.3 Puusto yli 60 vuotta	25
4.2 Turvemetsät	27
4.2.1 Kasvihuonekokeet ja siemenistutukset	28
4.2.2 Taimikot ja ojitetut suot (niukkakasvuiset)	30
4.2.3 Varttunut ja yli 30 vuotias puusto	36
4.3 Tuhkalannoitus ja hiilen sidonta	38
4.3.1 Kangasmetsät	39
4.3.2 Turvemetsät	43
4.4 Yhteenveto	46
5 Kehittämistyö	48
5.1 Lähtötilakartoitus	50
5.1.1 Kyselytutkimus: Energian tuotanto ja tuhka	50
5.1.2 Haastattelu: Tuhkan hyödyntäminen lannoitevalmisteena	52
5.2 Tuhkan kierron kustannustarkastelu	54
5.2.1 Tuhkan ravinteiden kierto ja kustannusvaikutus	54
5.2.2 Puun ja tuhkan kiertokulku	55
5.2.3 Kustannustarkastelu	56
5.3 Työpaja: Tuhkan lannoitusikäyön tehostaminen	60
5.3.1 Tuhkalannoituksen yleistymisen mahdollisuudet	60
5.3.2 Hajautetun energiantuotannon toimijoiden verkostoituminen	62
5.3.3 Tuhkan käsittelyn mahdollisuudet	63
5.3.4 Työpajan yhteenveto	66
5.4 Ekosysteemimallin analysointi	67
5.4.1 Ekosysteemimalli tuhkan hyötykäytön tehostamiseksi	67
5.4.2 Tietopohja	68
5.4.3 Taloudellinen tarkastelu	70
5.4.4 Tekninen tarkastelu	72
5.4.5 Sosiaalinen tarkastelu	73
5.4.6 Yhteiskunnallinen tarkastelu	73
5.4.7 Markkinan ja toimitusketjun tarkastelu	74
6 Pohdinta	75

6.1	Energia- ja ilmastostrategia ja puubiomassat energiantuotannossa	75
6.2	Tuhkan vaikutukset metsämaassa.....	77
6.3	Hajautetun energiantuotannon tuhkan kierrätyksen tila	78
6.4	Kehittämistyön arviointi	79
6.5	Hyödynnettävyys	80
6.6	Jatkokehitysmahdollisuudet	80
6.7	Luotettavuus ja eettisyys.....	81
6.8	Ammatillinen osaaminen.....	84
7	Lähteet.....	85

Liite 1 Puutuhkan kierrätyksen ekosysteemimallin kehittäminen. Kyselylomake

Termit ja lyhenteet

BAI	Basal area increment, tietyn alueen puuston runkojen yhteenlaskettu poikkileikkauspinta-ala pinta-alayksikköä kohti. Lasketaan yleensä puun rinnankorkeuden läpimitan perusteella. Yksikkö m ² /ha.
CHP	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuantomenetelmä.
dolomiitti	(Ca,Mg(CO ₃) ₂) on kemialliselta koostumukseltaan kalsium-magnesiumkarbonaattia.
ekosysteemi	1) luonnoltaan verraten yhtenäisen alueen eliöiden ja elottomien ympäristötekijöiden muodostamaa toiminnallinen kokonaisuus; 2) nykyisin myös taloudellinen symbioosi/klusteri, jossa erilaiset taloudelliset toimijat toimivat yhteistyössä ja ovat toiminnallinen kokonaisuus.
GWP	Global warming potential, indeksi, joka kertoo jonkin aineen vaikutuksen ilmastoon lämpenemiseen. Muiden aineiden arvot verrataan hiilidioksidiin, jonka GWP-arvo on 1.0.
h	tunti
ha	hehtaari
J	joule
lipeä	Natriumhydroksidi tai kaliumhydroksidi. Lipeää saatiin ennen uuttamalla sitä puuntuhkasta.

maahengitys	Maaperän hajottajien tuottamaa hiilidioksidia. Maahengitys havaitaan maaperästä huokuvana hiilidioksidina. Maahengitys on huomattava ilmakehän hiilidioksidin lähde.
ORC	Organic Ranking Cycle. Orgaaninen aine, joka kiertää suljetussa putkistossa, höyrystetään lämmön avulla. Muuttamalla painetta saadaan turbiini tuottamaan mekaanista tehoa. Kun turbiini on kytkettynä generaattoriin, saadaan mekaaninen energia muutettua sähköksi.
superfosfaatti	Apatiitista rikkihapon avulla valmistettu, aikaisemmin yleisesti käytetty kaupallinen fosforilannoite.
t	tonni, 1000 kg
urea	Vesiliukoinen typpeä sisältävä orgaaninen yhdiste. Nisäkkäiden ja sammakkoeläinten normaalin proteiini-aineenvaihdunnan lopputuote, joksi aineenvaihdunnassa muodostuva ammoniakki muuttuu. Se poistuu elimistöstä munuaisten kautta virtsaan. Kaava: $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, Moolimassa: 60,06 g/mol.
v	vuosi
Wh	Wattitunti

1 Johdanto

Tämä raportti on opinnäytetyö hajautetun, puuperäisiä biomassoja (puubiomassoja) polttoaineena käyttävän energian tuotannon tuhkan ravinteiden kierron eli lannoitusikäytön merkityksestä, tehostamisesta ja kierrätyksen kustannusvaikutuksista. Opinnäytetyö on kehittämistyö ja se toteutettiin osana Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamaa ”Puutuhka kivennäismaiden metsien lannoituksessa (Puutuhka)” –hanketta (Tapio 2017), jota ovat toteuttamassa Tapio Oy, Suomen Ympäristökeskus, Luonnonvarakeskus, Apila Group Oy Ab ja Ecolan Oy. Työssä tehtiin yhteistyötä myös Euroopan metsäinstituutin (European Forest Institute) ”Valerie” –projektin kanssa (Valerie 2017). Työn tarpeen nosti hankkeen ohjausryhmässä esille Enon Energia Osuuskunta. Työn ohjaajana toimi lehtori Lasse Okkonen ja tarkastajana yliopettaja Ari Talkkari. Puutuhka-hankkeen ja sen rahoittajan osalta työn toteutusta seurasi hankkeen ohjausryhmä. Työn toimeksiantajana oli Apila Group Oy Ab.

Työn taustalla on puubiomassojen kasvava käyttö energian tuotannossa, erityisesti hajautetussa energiantuotannossa. Puun ja siitä muodostuvan tuhkan kiertokulkuun liittyy kuitenkin vahvasti hiilidioksidipäästöt ja sitä kautta vaikutukset ilmastonmuutokseen. Ilmastonmuutosta voidaan hillitä pysäyttämällä kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvu. Tällöin on siirryttävä kohti vähähiilistä tai jopa hiilineutraalia yhteiskuntaa. Pariisin ilmastokokouksessa päätettiin, että tähän pyritään vuoteen 2050 mennessä (Ympäristöministeriö 2016). Hallitus hyväksyi 24.11.2016 kansallisen energia- ja ilmastostrategian vuoteen 2030.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan energia- ja ilmastostrategiaa sekä sen osalta laadittuja taustaraportteja uusiutuvan energian ja erityisesti puubiomassoja polttoaineena käyttävien hajautetun energiantuotantolaitosten osalta. Linjausten mukaan toimittaessa uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta nousee yli 50 prosenttiin 2020-luvulla. Pitkän aikavälin tavoitteena on, että energiajärjestelmä muuttuu hiilineutraaliksi ja perustuu vahvasti uusiutuviin energialähteisiin. Uuden linjauksen mukaan metsähakkeen ja metsäteollisuuden si-

vutuotteiden käyttöä sähkön ja lämmön yhteistuotannossa sekä lämmön erillistuotannossa kannustetaan energiaverotuksella. Hakesähkön tuotantotukijärjestelmä edistää kustannustehokkaasti metsähakkeen käyttöä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.)

Metsähakkeen, ja yleisemmin puubiomassojen mukana metsästä poistuu ravinteita, joista osa päättyy polton yhteydessä tuhkaan. Lannoitevalmistelainsäädäntö mahdollistaa puubiomassojen poltossa sivutuotteena syntyvän tuhkan hyötykäytön lannoitevalmisteenä, mikäli se täyttää tuhkalannoitteelle asetetut ominaisuus- ja laatuvaatimukset. Lannoituskäytön myötä tuhkan sisältämät ravinteet palautuvat takaisin metsään, ja tehostavat puuston kasvua ja täten myös metsien hiilinieluvaikutusta. Opinnäytetyön teoriaosuudessa tarkastellaan ensimmäistä kertaa systemaattisesti tuhkan lannoituskäytön vaikutuksia puuston kasvuun. Tarkastelu perustuu Suomessa tehtyihin pitkäaikaistutkimuksiin, ja se huomioi laajasti sekä kangas- että turvemaidella tehdyt kokeet vuodesta 1920 eteenpäin.

Puutuhkan lannoituskäyttöön liittyy kuitenkin hajautetun energiantuotannon toimijoiden osalta käytännön esteitä, jotka hankaloittavat tuhkan ravinteiden kierron toteutumista. Opinnäytetyön toiminnallisessa osassa tarkasteltiin valitulla alueella puubiomassaa hyödyntävän hajautetun energiantuotannon nykytilaa sekä siellä syntyvän tuhkan ravinnekierron roolia kustannusperusteisesti. Kehitystyössä etsittiin käytännön ratkaisua tuhkan kierron kustannustehokkaaseen toteutukseen.

1.1 Opinnäytetyön tarkoitus ja tehtävät

Opinnäytetyön teoriaosuuden tavoitteena oli tarkastella hajautetun biomasapohjaisen energiantuotannon roolia osana kansallista energia- ja ilmastostrategiaa. Toisena tavoitteena oli arvioida puutuhkalannoituksen vaikutuksia metsien kasvuun ja tätä kautta hiilen sidontaan sekä maahengitykseen. Vaikutuksia tarkasteltiin systemaattisesti, eri-ikäisen puuston suhteen eri tyyppisissä maaperissä sekä kangas- että turvemetsien osalta. Työhön kerättiin kansallista tutkimusaineistoa laajasti.

Opinnäytetyön kehitystyön tavoitteena oli selvittää ja kehittää alueellisesti hajautetun biomassapohjaisen lämpöenergian tuotannon toimijoiden ravinteiden kierron mahdollisuuksia käytännön tasolla, sekä arvioida ravinteiden kierrätyksen merkitystä kustannustasolla.

Kehitystyön pohjaksi selvitettiin ja arvioitiin alueellisten, puutuhkaa tuottavien toimijoiden tuhkan laatu ja hyötykäyttökelpoisuus. Samassa yhteydessä toteutetun haastattelututkimuksen kautta selvitettiin toimijoiden valmiuksia ja tahtotilaa ravinteiden kierron tehostamiseksi alueellisesti. Käytännön mahdollisuuksia tarkasteltiin ja ideoitiin lähemmin toimijoille järjestetyssä työpajassa. Työpajan tulosten perusteella luotiin taloudellinen ekosysteemimalli, jolla hajautetun energiantuotannon toimijat voisivat paikallisesti toteuttaa ravinteiden kierron periaatetta kustannustehokkaasti.

1.2 Opinnäytetyön menetelmälliset valinnat

Tutkimuksellisen osan vaiheessa 1 tausta-aineistona käytettiin kansallista energia- ja ilmastostrategiaa sekä sen yhteydessä julkaistuja selvityksiä, raportteja ja skenaarioita. Hajautetun energiantuotannon nykytila perustui myös energia- ja ilmastostrategia yhteydessä julkaistuihin selvityksiin sekä olemassa oleviin tilastoihin. Aineistona ovat valmiit dokumentit, ja niitä käsiteltiin laadullisen tutkimuksen menetelmillä.

Toisessa osassa tutkimuksellinen työ tuhkalannoituksen vaikutuksista metsän kasvuun toteutettiin teoreettisen tutkimuksen menetelmillä, jossa tausta-aineisto kerättiin valmiina dokumentteina, kokonaistutkimuksena. Dokumentit olivat Suomesta ja naapurimaista kerätty tutkimuskirjallisuus pitkittäistutkimuksista tuhkan vaikutuksista puustoon. Tutkimuksissa oli tutkittu puuston muutoksia ja kehittymistä pitkän aikavälin, jopa vuosikymmenten, kuluessa.

Toiminnallisen osan kehitystyön tutkimusstrategiana oli laadullinen kokonaistutkimus, survey, jossa aineisto kerättiin kaikilta puubiomassaa hyödyntäviltä hajautetun energiantuotannon toimijoilta Pohjois-Karjalan alueella. Tiedonhankintamenetelmänä oli kysely sekä siihen liitetty haastattelu, ja näiden pohjalta tuotetut dokumentit. Analyysimenetelmänä oli luokittelu.

Toiminnallisessa osassa käytettiin myös toiminnallista strategiaa, ja sen tarkoituksena oli vaikuttaa hajautetun energiantuotannon toimijaverkostoon sekä sen toimintaan tai ympäristöön kehittävästi ja parantavasti. Toimintatutkimuksen strategiassa vaikuttaminen tapahtui tässä opinnäytetyössä tutkijan osallistumisella tutkimuskohteen toimintaan työpajatoiminnan kautta. Vaikuttamisen ja kehittämisen perustana oli edeltävä tutkimus tuhkan lannoitusikäytön kustannushyödyistä. Strategian lähtökohtana oli siten tieteellisyyden ja käytännöllisyyden yhdistäminen, ja siinä huomioitiin toimijoiden omia näkökulmia.

1.3 Opinnäytetyön rakenne

Tämän opinnäytetyön rakenne noudattaa tavoitteita, jotka esiteltiin luvussa 1.1. Tutkimuksellinen osa on esitelty kappaleissa kaksi, kolme ja neljä, ja toiminnallinen osa kappaleessa viisi. Pohdinta on esitetty kappaleessa kuusi.

2 Energia- ja ilmastostrategia

YK:n ilmastopimuksen 21. osapuolikokouksessa Pariisissa sovittiin 12. joulukuuta 2015 uudesta, kattavasta ja oikeudellisesti sitovasta ilmastopimuksesta. Sopimuksen myötä ensimmäistä kertaa lähes kaikki maailman maat ovat kertonut olevansa valmiita toimiin ilmastomuutoksen torjumiseksi. Pariisin ilmastopimuksen mukaan tavoitteena on saavuttaa maailmanlaajuisen kasvihuonekaasujen päästöjen huippu mahdollisimman pian, sekä vähentää päästöjä nopeasti sen jälkeen siten, että ihmisen aiheuttamat kasvihuonekaasujen päästöt ja

nielut ovat tasapainossa tämän vuosisadan jälkipuoliskolla. (Ympäristöministeriö 2016.)

Ilmastonmuutoksen ohjauskeinona ovat kansalliset energia- ja ilmastostrategiat. Näissä huomioitavia käytännön keinoja ovat olleet energian säästäminen, energiatehokkuuden lisääminen, uusiutuvien energiamuotojen käyttöönotto, hiilinieluista, kuten metsistä huolehtiminen sekä luonnonvarojen kestävä käyttö.

2.1 Kansallinen energia- ja ilmastostrategia

Energia- ja ilmastotavoitteista sovittiin Eurooppa-neuvostossa 23.10.2014. Sen sitova tavoite uusiutuvan energian osuuden osalta oli 27 %. Lisäksi tavoitteena oli vähintään 40 % päästövähennys vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta. (Eurooppa-neuvosto 2014.)

Sipilän hallitusohjelma 2015 sitoutui EU:n tavoitteisiin, ja yhdeksi hallituksen kärkihankkeiksi nimettiin ”Hiilettömään, puhtaaseen ja uusiutuvaan energiaan kustannustehokkaasti”. Tavoitteena on päästöttömän, uusiutuvan energian käytön kestävä lisääminen ja omavaraisuuden nostaminen yli 55 prosenttiin sisältäen mm. turpeen. Lisäksi luovutaan hiilen käytöstä energiantuotannossa. (Valtioneuvoston kanslia 2015.) Tältä pohjalta Suomessa luotiin uusi ilmastostrategia vuonna 2016 (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017).

Hallitus hyväksyi 24.11.2016 kansallisen energia- ja ilmastostrategian vuoteen 2030. Linjausten mukaan toimittaessa uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta nousee yli 50 prosenttiin 2020-luvulla. Pitkän aikavälin tavoitteena on, että energiajärjestelmä muuttuu hiilineutraaliksi ja perustuu vahvasti uusiutuviin energialähteisiin. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.)

Pöyry Management Consulting Oy:n (2017, s. 2) yhteenvedon mukaan Juha Sipilän hallitusohjelman tavoitteet uusiutuvasta energiasta (yli 50 % 2020-luvulla) ja omavaraisuudesta (yli 55 % 2020-luvulla) sähkö- ja lämpösektorilla saavute-

taan lisäämällä bioenergian käyttöä, jolla korvataan pääasiassa hiilen ja maakaasun käyttöä. Talouskasvun hitaus ja sähkön alhainen hintakehitys voivat kuitenkin jarruttaa tavoitteiden saavuttamista, ellei samanaikaisesti energiankulutus alene.

2.2 Puubiomassat päästölähteenä ja hiilinieluna

Suomen kotimainen uusiutuvan energian eli bioenergian tuotanto perustuu pääosin metsäbiomassaan, jota saadaan suoraan metsätaloudesta ja metsäteollisuuden sivuvirroista. Metsäbiomassan energiakäyttö ei kuitenkaan ole päästö-
töntä, vaan se lisää kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä ja aiheuttaa lämmittävän ilmastovaikutuksen. Ilmakehä- ja ilmastovaikutukset johtuvat siitä, että biomassan korjaaminen pois metsästä vähentää metsiin varastoitunutta hiilimäärää, ja sen polttaminen energiantuotannossa vapauttaa hiilen ilmakehään.

Kansallisen energia- ja ilmastostrategian vaikutusarvioinnin perusteella uusiutuvista energiamuodoista puuperäisen bioenergian käyttö kasvaa tulevaisuudessa eniten. Käytön lisäys kohdistuu voimakkaimmin metsähakkeeseen ja metsäteollisuuden jäteliemiin. Biopolttonesteiden tuotanto nousee skenaarioissa metsähakkeen merkittäväksi uudeksi käyttökohteeksi. (Koljonen, Soimakallio, Asikainen, Lanki, Anttila, Hildén, Honkatukia, Karvosenoja, Lehtilä, Lehtonen, Lindroos, Regina, Salminen, Savolahti, Siljander & Tiittanen 2017, 97.)

On laskettu, että Suomen metsien hakkuumahdollisuudet riittävät sekä metsä- että energiateollisuuden arvioidun raaka-ainetarpeen tyydyttämiseen. Kotimaista puunkäyttöä vastaavan hakkuulaskelman vuosittaisesta runkopuukertymästä teollisuuden ainespuuta oli 68 milj. m³, josta tukkia hieman yli 28 ja kuitua vajaat 40 milj. m³/v. Metsähakkeena ja kotitalouksien polttopuuna käytettävää runkopuuta laskelmassa oli yhteensä 12 milj. m³. Perusskenaariossa oli lisäksi arvioitu, että vuonna 2030 metsähakkeella tuotettaisiin sähköä ja lämpöä 29 TWh (104 400 TJ). Tämä vastaa noin 14,5 milj. m³ metsähaketta. (Koljonen ym. 2017, 96—97.) Biomassojen polttoaineluokituksen mukaan CO₂ oletuspäästökerroin metsäpolttoaineille ja teollisuuden puutähteille (koodi 311 ja 312) on 109,6 t/TJ.

Laskennallinen biomassojen energiakäytön CO₂ päästö vuonna 2030 olisi täten noin 11,4 milj. t CO₂-ekv./v. (Tilastokeskus 2017.)

Uusiutuvan puun kasvu kompensoi kuitenkin hiilipäästöä, sillä uuden puun kasvaessa se sitoo hiilen uudelleen ilmakehästä. Hiilidioksidia poistuu ilmakehästä puiden ja muiden kasvien sitoessa kasvaessaan ilmakehästä hiilidioksidia rakenteisiinsa. Puihin sitoutuu 0,9 tonnia hiilidioksidia jokaista puukuutiometriä kohden (Luonnonvarakeskus 2010).

Suomen metsät ovat olleet huomattava hiilinielu, joka vuositasolla on vastannut 30–60 % Suomen kokonaispäästöistä. Vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategiassa Suomen metsien hiilinielujen vähenemistä ehkäistään vahvistamalla metsien kasvua ja hiilensitomiskykyä pitkällä aikajaksolla, selvittämällä puuttomien alueiden metsittämistä sekä vähentämällä metsien raivausta yhdyskunta- ja liikenne- ja rakentamisen yhteydessä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017).

Metsät ovat jatkossakin nettohiilinielu, mutta jos kotimaisen runkopuun hakkuut kasvavat arvioiden mukaisesti, ennakoidaan hiilinielun pienenevän vuosina 2021—2030 noin puoleen nykyisestä. Laskelmien mukaan runkopuun 80 milj. m³ hakkuiden ja metsähakkeen 13,4 milj. m³ energiakäytön myötä metsien hiilinielu laskee tasolle 13,5 milj. t CO₂-ekv./v vuosina 2025–2034. On kuitenkin arvioitu, että nykyinen taso saavutettaisiin uudelleen vuoden 2035 jälkeen, mikäli hakkuutaso ei vuoden 2030 jälkeen kasvaisi. (Koljonen ym. 2017, 98.)

2.3 Päästövähennystavoitteet ja LULUCF

Eurooppa-neuvoston 2030 ilmasto- ja energiapaketissa kasvihuonekaasujen päästövähennystavoitteeksi asetettiin vähintään 40 prosenttia (vuoden 1990 tasoon verrattuna) vuoteen 2030 mennessä. Päästökauppasektorin osalta päästövähennystavoite oli 43 prosenttia ja päästökauppaan kuulumattomien alojen osalta 30 prosenttia vuoden 2005 tasosta. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017b, s. 8.)

Kesällä 2016 annettiin ehdotukset taakanjakosektorin päästöjen vähentämisestä sekä maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous sektorin (LULUCF-sektori) sisällyttämisestä EU:n vuoden 2030 ilmastotavoitteisiin. Komission ehdotuksen mukaan Suomen vuoden 2030 päästövähennysvelvoite olisi 39 prosenttia verrattuna vuoden 2005 tasoon. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017b, s. 8.)

LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) on valmisteilla oleva lainsäädäntö, jonka tarkoitus on luoda säännöt sille, miten hiilinielut otetaan huomioon päästövähennyksissä. LULUCF:n metsien laskennan pohjana on kunkin jäsenmaan asettama vertailutaso vuosille 2021–2030. Vertailutaso pohjautuu metsänhoidon käytäntöihin ja intensiteettiin kaudella 2000–2009. Koska metsien käytön taso vaihtelee merkittävästi jäsenmaiden ja eri vuosien välillä, jäsenmaat ovat keskenään eriarvoisessa asemassa. (Ympäristöministeriö 2017.)

Vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategiassa linjattiin, että EU:n maankäyttösektoria koskevaan asetusehdotukseen ja sen laskentasääntöihin vaikutetaan niin, että metsien lisääntyvä, kestävä ja monipuolinen käyttö on mahdollista, laskentasäännöt heijastelisivat todellisia nieluja ja päästöjä ja että myös metsistä syntyviä nieluyksiköitä voitaisiin käyttää rajoitetusti taakanjakosektorin veloitteen saavuttamiseen kaudella 2021–2030. Selvitetään myös sitä, miten EU:n yhteisen maatalouspolitiikan uudistuksessa voidaan kannustaa viljelijöitä lisäämään maaperän hiilivarastoja ja hidastamaan niiden vähenemistä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.)

13.10.2017 Ympäristöneuvoston istunnossa tehdyn päätöksen mukaan LULUCF sisältää jousto- eli kompensatiojärjestelmän, joka huomioi metsäisten maiden erityiskysymyksiä. Joustolla jäsenvaltiot voivat esimerkiksi kestävästi lisätä hakuaita vertailutasoon nähden ilman laskennallista taakkaa. Suomen metsänhoidon hiilidioksidipäästöihin liitetty jousto eli kompensatiomahdollisuus on päätöksen mukaan 54 miljoonaa hiilidioksiditonnia. (Ympäristöministeriö 2017.)

3 Puubiomassaan pohjautuvan hajautetun energiantuotannon nykytila

Kansallinen energia- ja ilmastostrategia (2016) huomioi metsähakkeen ja metsäteollisuuden sivutuotteiden käytön sähkön ja lämmön yhteistuotannossa sekä lämmön erillistuotannossa. Kansallisen ilmastostrategian luomisen yhteydessä on lisäksi julkaistu raportteja ja selvityksiä hajautetun energiantuotannon osalta (Peura, Hiltunen, Haapanen, Auvinen, Soukka, Törmä, Kujala, Pohjola, Mäkiranta, Välisuo, Grönman, Kumar, Rasi, Lehtonen & Anttila 2017, Pöyry Management Consulting Oy 2017 ja 2017b, Salokoski 2017)

Hajautetun energiantuotannon nykytilaa, tulevaisuutta sekä vaikutuksia ilmanlaatuun on aiemmin arvioitu mm. Suomen ympäristökeskuksen julkaisemassa raportissa (Vihanninjoki 2015). Hajautettu energiantuotanto on laaja-alainen kokonaisuus, jonka yksiselitteinen määrittely on haasteellista. Määritelmä voidaan tehdä arvioimalla tuotannon pienimuotoisuus tehollisen tai tuotannollisen raja-arvon mukaisesti, tai arvioimalla tuotannon paikallisuutta tai suhdetta energiaverkoihin ja jakelun mahdollisuuteen. Yhdistävä tekijä hajautetun energiantuotannon toimijoilla on, että ne hyödyntävät uusiutuvaa energiaa: tuulivoima, aurinkoenergia, pienvesivoima, lämpöpumput ja lämpölaitokset sekä pien-CHP. (Vihanninjoki 2015, s. 4.)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään puubiomassaa polttoaineena käyttävien ja tuhkaa lannoitekäyttöön kierrättävien lämpölaitosten nykytilaa. Täten hajautettu energiantuotanto tässä yhteydessä tarkoittaa puuta, puuperäisiä biomassoja ja/tai turvetta hyödyntäviä kaukolämpölaitoksia ja kiinteistökohtaisia lämpölaitoksia, joiden tehollinen yläraja on 1—20 MW. Vastaavaa raja-arvoa on käytetty muissakin hajautettua ja pienimuotoista energiantuotantoa käsittelevissä selvityksissä (Vihanninjoki 2015, s. 5).

Kaukolämpösektorilla tavoite vähentää hiilidioksidipäästöjä ja kasvattaa uusiutuvien osuutta perustuu lähinnä puupolttoaineiden osuuden nostamiseen. Sekä

päästökaupan että energiaverotuksen näkökulmasta kaukolämpösektorille kohdistuva ohjaus tulee hyvin todennäköisesti jatkossakin suosimaan alhaisia päästöjä ja uusiutuvaa energiaa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016.)

3.1 Energia- ja ilmastostrategia ja puubiomassat

Aiemmassa, vuoden 2013 energia- ja ilmastostrategiassa merkittävin uusiutuvien energianlähteiden käytön kasvuodotus asetettiin metsähakkeelle, jonka toteutukseksi strategiassa sitouduttiin tukemaan lämpöyrittäjyyttä sekä lisäämään hajautetun energiantuotannon osuutta uusiutuvan energian tuotannossa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013, s. 26).

Uuden linjauksen mukaan metsähakkeen ja metsäteollisuuden sivutuotteiden käyttöä sähkön ja lämmön yhteistuotannossa sekä lämmön erillistuotannossa kannustetaan energiaverotuksella. Hakesähkön tuotantotukijärjestelmä edistää kustannustehokkaasti metsähakkeen käyttöä. Järjestelmä säilytetään nykyisenä komission voimassaolevan valtiontukihyväksynnän mukaisen ajan. Sen jatkoa arvioidaan vuonna 2018. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, s. 37—38.)

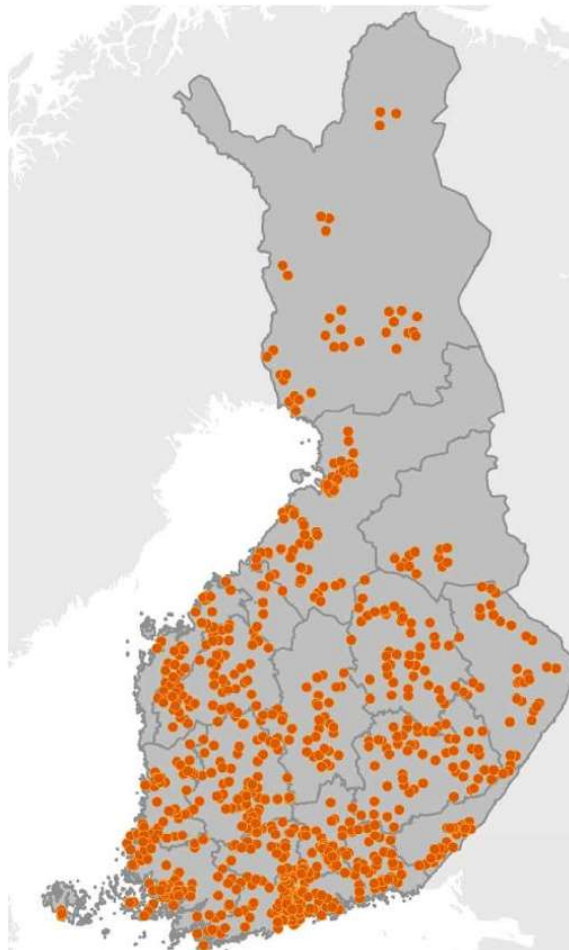
Huomioitavaa on myös, että tuontihakkeelle on asetettu linjauksia: niiden käyttömääriä seurataan, ja niillä tuotettua energiaa ei lasketa mukaan energian hankinnan omavaraisuuteen. Voimayhtiöillä on kuitenkin olennainen päätösvalta niiden käytön osalta yrittäjyyden ja työllisyyden kannalta. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, s. 38.)

3.2 Nykytila

Puupohjaisiin polttoaineisiin perustuva lämpöliiketoiminta koskee kaukolämpölaitoksia ja kiinteistökohtaisia lämpölaitoksia. Kokonaisuudessaan kaukolämpöä on tuotettu Suomessa 1950-luvun alusta lähtien, ja lähes kaikki suuret rakennukset liittyvät kaukolämpöverkkoon, jos se on mahdollista. Energiateollisuuden (2017)

tilastojen mukaan nykyisin 46,1 % asuin- ja palvelurakennusten lämmitystarpeesta katetaan kaukolämmöllä. Kaukolämmitetyissä taloissa asuu noin 2,7 miljoonaa asukasta. Suurimmissa kaupungeissa kaukolämmön markkinaosuus on jopa yli 90 %. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016, s. 12—14.)

Kuvassa 1 on esitetty Suomen kaukolämpölaitosten sijoittuminen. Kaukolämmön tuotannossa vuonna 2016 puun osuus polttoaineista oli 25,7 % ja turpeen osuus 13,1 %. (Energiateollisuus 2017.)



Kuva 1. Kaukolämmön tuotantolaitokset Suomessa (Energiateollisuus 2017).

Lämpö- ja voimalaitoksissa käytettiin kiinteitä puupolttoaineita vuonna 2016 kaikkiaan 19,5 miljoonaa kiintokuutiometriä (37,4 terawattituntia). Merkittävin laitosten käyttämä puupolttoaine oli metsähake, jonka käyttömäärä oli 7,4 miljoonaa

kuutiometriä. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa metsähaketta kului 4,5 miljoonaa kuutiometriä ja lämmöntuotannossa 2,9 miljoonaa kuutiometriä. Kuorta käytettiin 7,3 kuutiometriä, purua 2,4 kuutiometriä, teollisuuden puutähdehaketta 1,1 ja muuta puuperäistä polttoainetta 1,1 kuutiometriä. (Luonnonvarakeskus 2017a.)

TTS Työtehoseuran lämpölaitosrekisteriin kuuluvat, lämpöyrittäjäkohteita lämmitävät laitokset vaihtelevat teholtaan parista kymmenestä kilowatista muutamaan megawattiin. Lämpöyrittäjärekisterin nykyisistä kohteista noin 150 on aluelämpöverkkoja tai taajamakohteita. Lämpöyritykset ovat pieniä, tyypillisesti mikrokoko-
luokan yrityksiä, jotka vastaavat asiakkaansa kiinteistön tai aluelämpökohteen lämmittämisestä. Suomessa lämpö tuotetaan yleensä polttamalla metsähaketta kohteen yhteyteen rakennetussa lämpölaitoksessa. Suomessa on TTS Työtehoseuran teettämän selvityksen mukaan noin 330 lämpöyritykseksi laskettavaa yritystä ja ne ylläpitävät 618 biolämpölaitosta. (Korri 2017).

Lämpöyrittäjyys on noussut Suomessa yhdeksi toimintamalliksi etenkin kiinteistöjen ja pienten aluelämpöverkkojen lämmityksessä. Lämpöyrittäjä vastaa lämmöntuotannosta ja polttoaineen hankinnasta, ja voi myös omistaa lämmöntuotantolaitokset ja mahdollisesti jakeluverkoston. Lämpöyritykset ovat joko osakeyhtiöitä, yrittäjiä tai osuuskuntia ja toimivat yleisesti hyvin paikallisesti. Lämpöyrittäjät hankkivat metsähakkeen tyypillisesti 50 kilometrin säteeltä joko omista metsistä tai markkinoilta. Yleisesti lämpöyrittäjät hoitavat koko metsäpolttoaineen toimitusketjun aina lämmönjakeluun asti. Viime vuosina lämpöyrittäjien metsähakkeen käyttö on ylittänyt 1 TWh, joka vastaa noin 7—8 % Suomen metsähakkeen käytöstä. (Pöyry Management Consulting Oy 2017, s. 104.)

Alkuvuodesta 2017 valmistuneen ”Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet (HEMU)” –raportin mukaan korkeatasoinen bioenergian käyttö Suomessa on mahdollista puuenergian käyttömahdollisuuksien sekä kehittyneiden puuenergian polttotekniikoiden ansiosta (Peura ym. 2017, s. 24).

3.3 Tulevaisuudennäkymät

Lämpöyrittäjyyden lisääntymisen kannalta suurimman potentiaalisen kohteen on arvioitu olevan nykyiset öljylämmitteiset kiinteistöt (yli 300 kW öljylämmitteiset kohteet), joiden osalta tarvittava kokonaislämmöntuotantokapasiteetti on useita tuhansia megawatteja. Etenkin teollisuuskohteet ja -alueet on mainittu todennäköisimpinä potentiaalisina kohteina, koska näissä lämmön tarve on riittävän suuri ja tasainen sekä etenkin pysyvä. (Pöyry Management Consulting Oy 2017, s. 105.)

Uusien kohteiden ohella kaukolämpösektori on kuitenkin jo nyt joutunut kilpailun lisääntyessä uudistumaan, ja on etsitty uudenlaisia tekniikoita lämmöntuotantoon. Perinteisten lämmöntuotantomenetelmien ohelle on tuotu mm. suuria lämpöpumppuja. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016, s. 14.) Fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan lämmöntuotannon osalta paine siirtyä vähähiilisempiin polttoaineisiin kaukolämmön tuotannossa kasvaa, sillä tällä polttoainekäytöllä kustannusten nousu on ollut voimakkainta. Toisaalta biomassan saatavuus suurin tuotantolaitoksiin on haaste, sillä biomassalla on kysyntää muussakin käytössä, ja kysyntä on edelleen kasvussa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016, s. 16—19.)

Merkittävimpinä tulevaisuuden kehityskohteina puuenergian osalta pidetään CHP- ja ORC –tekniikoiden sekä energiapuun tuorepoltteknikoiden yleistymistä. Energiapuun tuorepoltossa käytetään kattiloita, joissa savukaasujen mukana erottuvan, tuorepuusta höyrystyneen veden kondensointi palauttaa niiden höyrystämiseen tarvittun energian. Tällä menetelmällä kattiloiden hyötysuhde on saatu kehitettyä tavanomaisia kattiloita paremmaksi. Kehityksen alla olevan tekniikan onnistuessa tuorepoltto tulee vaikuttamaan energiapuun hankintaan, varastointiin ja logistiikkaan, ja etuihin pohjaten on oletettu, että se tulisi olemaan nyky menetelmiä kannattavampaa. (Peura ym. 2017, s. 26.)

CHP, eli sähkön ja lämmön yhteistuotantoon on kolmen eri kokoluokan laitoksia, alle 50 kW (mikro-CHP), 1—5 MW (pien-CHP) ja näitä suuremmat CHP-laitokset. Uudempaa markkinoille jo tullutta teknologiaa edustavat ORC-laitokset luokitellaan pien-CHP –laitoksiksi. Toimintaperiaate vastaa höyryturbiinivoimalaitosten

toimintaa. Pien-CHP tuotantoa pidetään kuitenkin kannattamattomana nykyisillä sähkön hinnoilla. Ne soveltuvat kuitenkin yksityiseen käyttöön, esimerkiksi maataloille ja lämpöyrittäjille, ja kannattava toiminta voidaan varmistaa itse tuotetulla polttoaineella. (Peura ym. 2017, s. 26.)

Bio-CHP-laitosten ennustetaan säilyttävän markkinansa teollisuuden sähkön ja höyryn tuotannossa ja jonkin verran jopa kasvavan, kun fossiilisista polttoaineista siirrytään uusiutuviin. Sen sijaan kaupunkien keskitettyjen bio-CHP-laitosten kannattavuuden arvioidaan heikentyvän, kun rakennusten energiatehokkuus paranee ja taloista tulee 0-energiataloja ja myöhemmin jopa +energiataloja. Lämmityksen tarpeen vähentyessä siirrytään yhä enemmän hajautettuun lämmöntuotantoon. Tällöin pienet, raaka-ainepohjaltaan laajemmat bio-CHP-laitokset yleistyvät. (Salokoski 2017, s. 24.)

Lämpöyrittäjätoiminnan pullonkauloina pidetään joka tapauksessa alan kannattavuutta sekä energiapuun saatavuutta (Peura ym. 2017, s. 24). Metsäbiomassan kustannustehokkaan käytön tulevaisuudennäkymien osalta onkin esitetty, että mikäli jatkossa halutaan voimakkaammin panostaa puupohjaisten biopolttoaineiden tuotantoon Suomessa, joudutaan ottamaan käyttöön ohjauskeinoja, joilla puuta saadaan ohjattua tähän tuotantoon. Tällöin kilpailu puuaineksesta kasvaa, ja tällä on vaikutusta sekä talouspuuta, että energiapuuta käyttäviin nykyisiin toimijoihin. (Pöyry Management Consulting Oy 2017b, s. 40.)

4 Tuhkalannoituksen vaikutukset puuston kasvuun ja hiilen sidontaan

Huolellisella metsänhoidolla metsien hiilinieluvaikutusta voidaan tehostaa. Metsänhoitoon kuuluvat tällöin mm. uusien taimien istutukset nopeasti uudistushakkuun jälkeen, taimikoiden hoito sekä metsien harventaminen ja lannoittaminen. Uudistushakkuiden ajankohdalla, eli puuston kiertoajalla on myös merkitystä. (Liski 2000, Repo 2015.)

Metsissä voidaan käyttää lannoitteena myös puunpoltossa syntyvää tuhkaa. Tuhkan vaikutuksia on tutkittu useissa lannoituskokeissa Suomessa. Tulosten perusteella tuhkalannoituksen vaikutukset puuston ravinnetilaan ovat pitkäaikaisia. Toisaalta tähän vaikuttavat myös kasvupaikan ravinteisuus ja puuston ravinnetila ennen lannoitusta sekä puulaji ja levitetyn tuhkan määrä ja laatu. (Huotari 2012, Saarsalmi & Kukkola 2009).

Lannoitevalmistelainsäädännön mukaan lannoitteena käytettävän, puun ja turpeen tuhalla tarkoitetaan sivutuotetta, joka muodostuu poltettaessa turvetta, puuhaketta, kuorijätettä, ensiömassan tai massasta valmistettavan paperin tuotannon yhteydessä syntyvää kuituainetta sisältävää kasviperäistä jätettä, käsittelemätöntä puujätettä, peltobiomassoja, kuten ruokohelpi, olki, vilja, öljykasvit, paju ja järviruoko, tai näiden seosta sekä puu-, turve- tai kasvibiomassapohjaisen polttoaineen valmistuksessa syntyvää tuhkaa. Poltossa voidaan käyttää myös muita edellä mainittuihin raaka-aineisiin verrattavia puhtaita puuperäisiä aineksia. Rakeistettuun tuhkalannoitteeseen saa lisätä epäorgaanisia lannoitevalmisteita käyttökelpoisuuden lisäämiseksi tai vähimmäisvaatimusten täyttymiseksi. Kuvassa 2 on esitetty rakeistettua tuhkalannoitetta.



Kuva 2. Rakeistettua tuhkaa, 300 g. Kuva: Mervi Matilainen.

4.1 Kangasmetsät

Tuhkalannoituksen tutkimuksista kangasmailla Suomessa on julkaistu aiemmin kaksi yhteenvetoa (Huotari 2012, Saarsalmi ym. 2009). Tulosten mukaan tuhkalannoituksen vaikutus puuston kasvuun vähätyppisillä, karuilla kangasmailla on hyvin pieni, koska tuhka ei sisällä typpeä (Levula 1990, Moilanen & Issakainen 2000, Saarsalmi ym. 2004, 2005 & 2010). Tuhkalannoitus parantaakin kangasmetsissä enemmän maaperää ja sen biologista aktiivisuutta kuin puiden kasvua.

Myös ruotsalaisen tutkimuksen mukaan tuhkalannoituksen vaikutus puuston kasvuun kangasmailla riippui kasvupaikan viljavuudesta. Viljavilla, runsastyppisillä kangasmailla puuston kasvu voi hieman parantua tuhkalannoituksen jälkeen, jos maassa olevan orgaanisen typen mineralisaatio lisääntyy. Kaikkein viljavimmilla kasvupaikoilla tuhkalannoitus lisäsi puuston kasvua 4–10 % 5–11 vuoden tutkimusjakson aikana. (Jacobson 2003.)

Karuilla kasvupaikoilla tuhkalannoitus saattaa aluksi jopa heikentää puiden kasvua todennäköisesti siksi, että maan pH:n nousun myötä lisääntyvä maaperän hajottajaeliöstö sitoo itseensä entistä enemmän puille käyttökelpoisessa muodossa olevaa typpeä (Jacobson 2003). Pitkällä aikavälillä (>10 vuotta) tuhkalannoituksen aiheuttama maan hajotustoiminnan vilkastuminen voi hieman parantaa puuston kasvua myös niukkatyyppisillä kangasmailla (Saarsalmi, Mälkönen & Kukkola 2004).

Tuhkan ja typen yhteiskäytön on joissakin tapauksissa havaittu lisänneen puiden kasvua karuillakin kangasmailla pelkkää typpilannoitusta enemmän (Saarsalmi, Kukkola, Moilanen & Arola 2006). Joissakin tutkimuksissa kasvunlisäystä ei ole havaittu (Jacobson 2003, Saarsalmi, Smolander, Kukkola & Arola 2010) tai tuhkan ja typen yhteisvaikutus on hidastanut puiden kasvua (Jacobson 2003). Toisaalta on todettu, että tuhkan ja typpilannoitteen yhteisvaikutus voi kestää kauemmin kuin pelkän typpilannoitteen vaikutus (Saarsalmi ym. 2009).

Taulukoihin 1—3 on koottu kirjallisuudesta löydetty viitteet tuhkan lannoitusvai-
kutuksista kangasmaiden kohteissa, eri-ikäisten puustojen osalta. Kohteita on

tarkasteltu erityisesti havupuiden kasvuun liittyvien tulosten osalta. Tuhkalannoituksen vaikutuksia puiden kasvuun on tutkittu myös lepikoissa (Saarsalmi, Palmgren & Levula 1985 ja 1991, Hytönen & Saarsalmi 2015), mutta näiden tutkimusten tulokset on jätetty tämän selvityksen ulkopuolelle kohteiden vähäisyydestä johtuen. Taulukoissa:

- Karukkokangas: CIT = jäkälätyyppi
- Kuiva kangas (niukkaravinteinen): CT = Kanervatyypin, ECT = Variksenmarja-kanervatyypin
- Kuivahko kangas: VT = puolukkatyyppi, VCT = Puolukka-kanervatyypin
- Tuore kangas (moreeni, kostea): MT = mustikkatyypin.
- Lisäksi Ko = koivu, Mä = mänty ja Ku = kuusi.

4.1.1 Puusto alle 30 vuotta

Nuorten, alle 30-vuotiaiden puustojen tuhkalannoituksen tutkimuskohteita on perustettu tai raportoitu kymmenen Suomessa, neljä Ruotsissa (taulukko 1). Kaikkien kohteiden osalta ei ole raportoitu vaikutuksia puuston kasvuun, mutta kohteet on tästä huolimatta huomioitu katsauksessa.

Tuhka. Puhtaalla irtotuhkalla tehdyssä Metlan kokeessa 624 lannoitettiin vasta istutettua männikköä muokkaamattomalla ja muokatulla kuivahkolla kankaalla. Tulosten mukaan taimien kasvu oli hyvä, kun tuhka levitettiin muokkaamattomaan maahan. (Saarsalmi ym. 2009, Saarsalmi ja Levula 2007.) Metlan irtotuhkalannoituskokeet 801—804 on toteutettu myös nuorelle puustolle, mutta näiden osalta ei ollut löydettävissä raportoituja tuloksia kasvuvaikutuksista (Saarsalmi ym. 2001 ja 2009). Evon Nimettömän ja Tavilammen valuma-alueilla tehdyissä tuoreen kankaan tuhkalannoituksissa itsekovetetulla tuhalla varsinaisten koalueiden puusto oli vanhempaa, mutta kasvua tutkittiin analysoimalla taimikkoa, joka esiintyi alueella. Vain männyn taimilla oli nähtävissä pientä kasvun lisäystä vuosikasvun pituudessa. (Pihlström, Rummukainen & Mäkinen 2000 ja Rummukainen, Pihlström & Mäkinen 2004.)

Tuhka ja typpi. Tuhkan ja typen yhteisvaikutusta on tutkittu neljällä kohteella Ruotsissa ja kolmella nuoren puuston kohteella Suomessa. Metlan kokeessa 805 tutkittiin kuivahkolla mäntykankaalla myös lupiini-kasvin käyttöä typensitojana tuhkalannoituksen ja urealannoituksen kanssa. Lupiinia kylvettiin tuhalla ja urealla lannoitetuille aloille, ja 12 vuoden ajalta raportoidut tulokset osoittivat vaikutuksen kasvuun olevan hyvä, kun tuhkaa käytettiin 5 t/ha ja ureaa 0,22 t/ha. (Saramäki & Susila 1991.) Valkealan kohteella tuhka+typpi -lannoitusta tutkittiin sairaan taimikon ja nuoremman terveen taimikon lannoituksessa. Irtotuhkaa käytettiin 3 t/ha ja typpeä kalsiumammoniumnitraattina 0,15 t/ha ja tulosten perusteella havaittiin, että kasvu taimikoissa lisääntyi vähän (Tamminen 1998). Ruotsalaisten kokeissa kostutettua ja murskattua tuhkaa käytettiin 5 t/ha ja kaupallinen lisäravinne (NP, YARA) lisättiin maaperän tarpeen mukaan joka toinen vuosi. Typen tarve määritettiin neulasten ja maaveden pitoisuuksien perusteella. Tulosten perusteella vaikutus kasvuun oli merkittävä ainakin 15 vuoden ajan, ja vastasi teholtaan jopa kemiallista lannoitusta, joka toistettiin joka toinen vuosi. (Bergh, Nilsson, Grip, Hedwall & Lundmark 2008.)

Taulukko 1. Tutkimuskohteiden tietoja ja tuloksia kangasmailla Suomessa ja Ruotsissa. Puusto alle 30 vuotta. Sanallinen kuvaus kasvun lisäyksen osalta annettu, kun numeerista vertailutietoa ei saatavissa.

Kohde	Koe	Maa-perä	Puu-laji	Ikä	Lannoitus t/ha	Vaikutus	VIITE
Ruokolahti 1990	624	VT	Mänty	0	2,5 ja 5	hyvä (ei muok)	Saarsalmi ym. 2009
Keuruu 1982	801	VT	Mänty	6	3	ei tietoja	Saarsalmi ym. 2001
Keuruu 1982	802	CT	Mänty	5	3		
Janakkala 1982	803	MT	Mänty	6	3		
Janakkala 1982	804	MT	Kuusi	5	3		
Nimetön 1998		MT	Kuusi	tai-mikko	6,4	ei vaik.	Pihlström ym. 2000
Tavilampi 1998		MT	Mänty		6,4	vähän	
Tavilampi 1998		MT	Kuusi	tai-mikko	6,4	ei vaik.	Rummukainen ym. 2004
Ruokolahti 1978	805	VT	Mänty	21	1, 2,5 ja 5 + N ¹ 0,22 + lupiini	hyvä	Saramäki ym. 1991
Valkeala 1989		VCT VCT	Mänty Mänty	14-26 8-15	3 + N ² 0,15	vähän vähän	Tamminen 1998
Ebbegårde 1991	G29	Podsoli	Kuusi	11	5	merkittävä	Bergh ym. 2008
Mölndalen	G26			14	+ N 0,38-	merkittävä	
Grängshammar	G24			14	0,43	merkittävä	
Valbo 1988	G24			14	+ P 0,09 ³	merkittävä	

¹ Urea, ² Kalsiumammoniumnitraatti, ³ Määrät maaperäanalyyysin perusteella, kaupallinen lannoitevalmiste (YARA)

Yhteenvetona voidaan todeta, että nuorten puustojen kohteissa tulokset lyhyillä tarkastelujaksoilla ovat olleet vähäiset, mutta tuhkan ja typen yhteislannoituksella on ainakin Ruotsissa saatu merkittävää kasvuvaikutusta, kun typen (ja fosforin) tarve on määritetty analyysin. Osaa kokeista ei ole raportoitu kasvuvaikutusten osalta lainkaan.

4.1.2 Puusto 30—60 vuotta

30—60 vuotiaan puuston osalta on raportoitu tutkimustuloksia tuhkan vaikutuksesta puuston kasvuun koekohteilta sekä Suomesta että Ruotsista (taulukko 2). Raporteissa annetut tiedot ovat melko hajanaisia, mutta tiettyjä johtopäätöksiä voidaan kuitenkin tehdä.

Tuhka. Oulussa ja Lapissa tehdyissä puhtaan pölytuhkan lannoituskokeissa (Metla 16, 18 ja 19) ei ollut nähtävissä positiivisia vaikutuksia männyn kasvuun kuivahkolla kankaalla; vaikutus oli jopa kasvua hidastava. (Moilanen ym. 2000.) 50—60 vuotiaan ECT-männikön kokeessa kuivalla kankaalla käytettiin rakeistettua ja itsekovetettua tuhkaa. Molemmilla tuhkillä saatiin toisaalta pieni positiivinen vaste 13 vuoden tarkastelujaksolla: puiden tyvipinta-ala (BAI, m²/ha) kasvoi keskimäärin 8 %. Suurimmillaan vaikutus oli yhdeksän vuotta lannoituksen jälkeen. VMT-männikössä vaikutukset olivat kasvun osalta pääasiassa negatiivisia. (Moilanen, Saarsalmi, Kukkola & Issakainen 2013.)

Ruotsissa toteutetuissa puhtaan tuhkan (rakeistettu, itsekovetettu ja murskattu tai pelletöity) kokeissa vaikutus männyn kasvuun karussa maaperässä oli pääasiassa negatiivinen. Kuusen osalta kokeessa 182 oli kuitenkin nähtävissä kasvun lisäystä 1,2 m³/ha/v (8 %) tuhkalannoituksen (rakeistettu tuhka) ansiosta yhdentoista vuoden tarkastelujakson aikana. (Jacobson 2003.)

Tuhka ja typpi. Tuhkan ja typen yhteislannoituksella saavutettiin hyvä tai jopa merkittävä kasvuvaikutus. Metlan toteuttamassa kokeessa 20 kuivalla kankaalla

hyviä tuloksia oli nähtävissä kymmenen vuoden kuluttua lannoituksesta: tarkastelujaksojen 11—15 ja 16—20 vuotta aikana suhteellinen tilavuuskasvu oli noin 135 % verrattuna kontrolliin, 100 %. (Moilanen ym. 2000, 32.)

Taulukko 2. Tutkimuskohteiden tietoja ja tuloksia kangasmailla Suomessa ja Ruotsissa. Puusto 30—60 vuotta. Sanallinen kuvaus kasvun lisäyksen osalta annettu, kun numeerista vertailutietoa ei saatavissa.

Kohde	Koe	Maaperä	Puu-laji	Ikä	Lannoitus t/ha	Vaikutus m ³ /ha/v	VIITE
Oulu/Lappi 9-52 vuotta sitten	19	VT	Mä	?	3,6 ja 7,2	0,5	Moilanen ym. 2000
	18	VT	Mä			negat.	
	16	VT	Mä		4 ja 12	-0,5	
	20	ECT	Mä		+ N	hyvä	
Oulu 1997	Site 1	ECT	Mä	50-60 v	3 ja 9	ei vaik.	Moilanen, Saarsalmi, Kukkola & Is- sakainen 2013
	Site 2	VMT			3 ja 9	negat.	
Uddevalla 1988	182	Sandy-siltty till	Ku	35-60 v	1 1+ N ¹ 0,15	1,2 2,8	Jacobson 2003
Torup 1991	241			40 v	1, 3, 6 ja 3 + N ² 0,15	0,5 1,4	
Åled 1995	244			65 v	3	1,1	
Asa 1988	183	Silt-sand	Mä	35 v	1 1 + N ¹ 0,15	0,6 1,2	negat. ja
Vindeln 1992	242			40 v	1, 3, 6 ja 3 + N ² 0,15	1,6	
Riddarhyttan '95	250			50 v	3, 6, 9 ja 3 + N ² 0,15	0 4,1	
Älvsbyn 1995	251			60 v	3 ja 3 + N ² 0,15	0 2,6	
Sonkajärvi 1993	415	VT	Mä	31 v	3 ja 3 + N ³ 0,15	3 (1) 0,5 (2) 0 (3)	Saarsalmi ym. 2004, 2009 & 2010
					3 ja 3 + N ³ 0,15	2 (1) 2 (2) 2,2 (3)	
Jämsä 1993	416	MT	Ku	45 v			Helmisaari ym. 2004 & 2009
Ruovesi Siikakan- gas 1980	-	VT	Mä	50 v	2 ja 2 + 2xN ³ 0,18	2,5	Levula 1990

¹ Ammoniumnitraatti, ² Dolomiittiammoniumnitraatti, ³ Oulunsalpietari.

Metlan kokeita 415 ja 416 on seurattu 15 vuoden ajan, ja tuloksia on raportoitu viiden vuoden välein. Tulosten perusteella oulunsalpietarina annetun typpilisän (0,15 t N/ha) avulla puun irtotuhka antoi vähintään yhtä hyvän kasvulisäyksen kuin pelkkä typpikäsittely (SSF, stand specific fertilization). (Saarsalmi, Derome & Levula 2005.) Kuivahkon kankaan kohteella 415 irtotuhkalannoituksen vaikutus mäntyjen kasvuun näytti kestävän 10 vuotta. Ensimmäisellä viisivuotiskaudella tilavuuskasvun lisäys kontrolliin verrattuna oli noin 3 m³/ha/v, ja toisella kaudella

enää noin $0,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$. Tuoreella kankaalla 416 kuusen kasvun parannusta esiintyi tutkittujen 15 vuoden ajan; vaikutus tilavuuskasvuun oli noin $2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$ parempi kuin kontrollilla. (Saarsalmi ym. 2009 ja 2010.)

50-vuotiaan kuivahkon kankaan männikön lannoituksessa on tutkittu kahta kaupallista Y-lannosta, oulunsalpietaria ja tuhka+oulunsalpietari -yhdistelmää. Yhdeksän vuoden ajalla kasvun lisäystä esiintyi lannoituksella selvästi enemmän kuin ilman, keskimäärin $2,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$. Kasvussa näkyi selvä parannus viidennen vuoden jälkeen, kun puustoa harvennettiin. (Levula 1990.)

Ruotsissa toteutetuissa kokeissa havaittiin 5—11 vuoden tarkastelujaksolla merkittävä parannus kasvussa typpilisän ansiosta, etenkin hiekkapohjaisessa männikössä (koe 250 ja 251) 3 t/ha murskattua tuhkaa dolomiittiammoniumnitraattina annetun typpilisän ($0,15 \text{ t N/ha}$) kanssa antoi 60 % vuotuisen kasvulisäyksen ($4,1$ ja $2,6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$ enemmän kuin kontrollialalla). Huomioitavaa on, että kohteilla typpilisä annettiin eri aikaan tuhkaan nähden ammoniumin haihtumisen ehkäisemiseksi. (Jacobson 2003.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että 30—60 vuotiaassa puustossa on ollut selkeästi nähtävissä puhtaan tuhkan ja tuhka+typpi – lannoituksen ero: ilman typpeä kasvuvaikutus voi olla jopa negatiivinen. Kaikilla tutkituilla typpilannoitteilla on saatu positiivinen kasvuvaikutus, ja riittävä typen määrä on ollut noin 150 kg/ha . Positiiviset vaikutukset ovat näkyneet jopa alle kymmenen vuoden seurannassa.

4.1.3 Puusto yli 60 vuotta

Yli 60 vuotta vanhan puuston tuhkalannoitusten kasvuvaikutuksista on raportoitu tuloksia viiden kohteen osalta (taulukko 3).

Tuhka. Kuivan, niukkaravinteisen kankaan puhtaat irtotuhkalannoituskokeet 402 ja 408, joissa puuston ikä oli 64 ja 69 vuotta, tuhkan vaikutus kasvuun oli 10 vuoden tarkastelujaksolla vähäinen kontrolliin verrattuna. Kokeessa 402 saatiin toisaalta hyvä kasvuvaikutus, 25 % ($1 \text{ m}^3/\text{ha}$ enemmän) vuosien 11—15 ja 11 %

(0,6 m³/ha/v) vuosien 16—20 aikana. (Saarsalmi ym. 2004, 2009 & 2014.) Kokeessa 660, jossa puuston ikä oli 100 vuotta mutta kangas kuivahko, vaikutusta ei ollut lainkaan nähtävissä (Saarsalmi ym. 2005).

Tuhka+typpi. Kokeessa 407, jossa kangas oli jäkälätyypin karukko, 75 vuotiaan puuston irtotuhkan (3 t/ha) ja typen (0,12 t/ha oulunsalpietarina) yhteislannoituksella saatiin ensimmäisellä tarkastelujaksolla merkittävä positiivinen kasvuvaikutus tilavuuskasvussa, 60—71 %. Vuotuinen kasvu kontrollikohteella oli 2,5, tuhkalannoituksella 4,3 ja typpikäsittelyllä 4,1 m³/ha/v (SSF). (Saarsalmi ym. 2004 & 2009 & 2014.)

Kuivan kankaan kokeessa 557 60-vuotiaan männikön tuhka (1, 2,5 tai 5 t/ha) ja urea-typpi (185 kg/ha) -lannoitus annoksella 2,5 t/ha antoi merkittävän positiivisen kasvituloksen jo kymmenen vuoden seurannan jälkeen, ja vaikutus säilyi 30 vuoden ajan. Lopullinen kasvuvaikutus (30 vuotta) tuhka-annoksella 1 t/ha oli 1,3, annoksella 2,5 t/ha 1,6 ja annoksella 5 t/ha 0,6 m³/ha/v parempi kuin kontrollilla. (Saramäki ym. 1991, Saarsalmi ym. 2006 ja 2012.)

Taulukko 3. Tutkimuskohteiden tietoja ja tuloksia kangasmailla Suomessa ja Ruotsissa. Puusto yli 60 vuotta.

Kohde	Koe	Maaperä	Puu-laji	Ikä	Lannoitus t/ha	Vaikutus m ³ /ha/v	VIITE
Valkeala 1990	402	CT	Mä	64	3	0 (1 jakso) 0,5 (2) 1 (3) 0,6 (4)	Saarsalmi ym. 2004 (2 jaksoa), 2009 (3 jaksoa) & 2014 (4 jaksoa)
Rovajärvi 1990	407	CIT	Mä	75	3 + N ¹ 0,12	1,8 (1) 1 (2) 0,3 (3) 0,5 (4) 0,2 (1—4)	
Ylikiiminki 1991	408	ECT	Mä	69	3	0,2 (1—4)	
Kuorevesi 1990	660	VT	Mä	100	1, 2,5 ja 5	ei vaik.	
Muhos 1978	557	ECT	Mä	60	1 + N ² 0,185	1,3	Saramäki ym. 1991
				60	2,5 + N ² 0,185	1,6	Saarsalmi ym. 2006
				60	5 + N ² 0,185	0,6	Saarsalmi ym. 2012

¹ Oulunsalpietari, ² Urea.

Vanhemman puuston osalta voidaan todeta, että tuhkan (2,5—3 t/ha) ja typen (0,120—0,185 t/ha) yhteislannoitus on tehokkaampi kuin pelkkä tuhkalannoitus. Kummallakin tutkitulla typpilannoitteilla, sekä oulunsalpietarilla että urealla on saatu hyvä vaste. Lannoituksen kasvuvaikutus on ollut suurin lannoituksen jälkeisinä vuosina, enimmillään 1,8 m³/ha/v kontrolliin verrattuna. Toisaalta vaikutus näytti päättyneen puustojen saavuttaessa 90—100 vuoden iän.

4.2 Turvemetsät

Tuhkalannoituksen vaikutuksista turvemaiden puuston kasvuun on paljon tutkimustuloksia, ja vaikutukset on hyvin raportoitu. Näiden pohjalta on kirjoitettu myös yhteenveto Tapion julkaisemassa tuhkalannoitusoppaassa (Makkonen 2008). Yleisesti on todettu, että tuhka lisää puuston kasvua hitaammin kuin tavanomaiset kaupalliset PK-lannoitteet, mutta pitkällä aikavälillä tuhkalannoituksella (sekä irtotuhka, itsekovetettu että rakeistettu) saadaan jopa parempi, pitkäkestoinen ja voimakas kasvureaktio (Silfverberg 1996, Moilanen ym. 2000, 2004 ja 2005, Sikström ym. 2010, Silfverberg & Huikari 1985).

Tuhkalannoitus lisää puuston kasvua sitä enemmän ja nopeammin, mitä enemmän turpeessa on typpeä. Runsastyyppisillä kasvupaikoilla puuston kasvun on havaittu lisääntyvän keskimäärin 2—3 vuoden kuluttua levityksestä, ja kasvun lisäys on ollut keskimäärin 2—6 m³/ha/v, käyttömäärän ollessa 16 t/ha. (Moilanen ym. 2000.) Niukkatyyppisillä kasvupaikoilla vaikutus alkaa noin 7—8 vuoden kuluttua tuhkan levityksestä, ja kasvun lisäys on noin 1—3 m³/ha/v (16 t/ha) kiertoajan kuluessa (Moilanen ym. 2000, 2004 & 2005).

Puutuhkalannoituksen on lisäksi havaittu lisäävän koivun ja pajun biomassan tuottoa suopohjien energiapuuviljelmillä (Hytönen & Kaunisto 1999); jo pienet puutuhkamäärät (4—5 t/ha) ovat edistäneet hieskoivutiheikön alkukehitystä jopa tehokkaammin kuin kaupallinen PK-lannoite (Huotari ym. 2008, 2011).

Taulukoihin 4—6 on koottu kirjallisuudesta löydetyt kokeet tuhkan lannoitusvaikutuksista eri turvemaiden kohteissa. Kohteiden puusto on ollut pääasiassa

koivu- ja havupuuvaltaista, mutta yksittäinen koe on toteutettu myös lepällä (Hyttönen & Saarsalmi 2015). Tässä kokeessa havaittiin, ettei tuhkalannoituksella ollut vaikutusta lepän taimien kasvuun lepikon avohakkuualueella.

Taulukoissa ilmoitetut suotyyppit on kerätty julkaisuista, ja selitykset lyhenteille (suotyypeissä) ovat:

-N = neva	-R = räme	-K = karu tai korpi
-L = letto	I- = isovarpuinen	K- = kalvakka-
Lk- = lyhytkortinen	M- = mustikka	Mol- = molinia-
Mr- = muurain	R-, Ra- = rahka-	Ram- = rahkamätäs
Rh- = ruohoinen-	Ri- = rimpi-	Ps- = piensara-
Ss- = suursara-	T- = tupasvilla-	TKg = turvekangas

Lisäksi j = ojitettu, mu = muokattu, Ko = koivu, Mä = mänty ja Ku = kuusi.

4.2.1 Kasvihuonekokeet ja siemenistutukset

Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto sekä yksityiskohdat tutkimuksista. Turvealustoilla on toteutettu tuhkalannoituskokeita puun kuorituhkalla myös kasvihuoneissa. Kokeissa annettiin erilaisia voimakkaita tuhka-annoksia, 6, 12, 24 ja 96 tonnia/ha tyypillisän (kalsiumammoniumnitraatti, 150 kg/ha) kanssa istukas-koivuille turvekasvualustalla. Tulosten perusteella suurin tuhka-annos tappoi taimet, ja 6 t/ha antoi parhaan tuloksen: kasvu oli 10–16 –kertainen lannoittamattomaan kontrolliin verrattuna. Lisäksi koesarjan perusteella havaittiin kasvun lisääntyvän pH:n ja fosforin määrän noustessa tuhkalannoituksen myötä. (Ferm 1990.)

Toisessa koesarjassa annettiin tuhkaa 3, 6, 9 tai 12 t/ha annoksella typpi, fosfori ja/tai kaliumlisän kanssa nuorille koivuille turvekasvualustalla (taulukko 4). Kolmen kuukauden seurannan tuloksena kokonaismassan määritysten perusteella annos 3 t/ha oli paras, ja jo puhdas tuhka kasvatti puumassan 2—3 kertaiseksi. Parhaat kasvutulokset, yli kymmenkertainen kasvutulos kontrolliin verrattuna

saatiin, kun samaan määrään tuhkaa lisättiin typpeä ja fosforia. Suuremmilla tuhkamäärillä pelkkä typpilisa riitti. (Ferm 1990.)

Muhoksen kolmelle ojitetulle suolle istutettiin männyn siemeniä, jotka lannoitettiin tuhalla (5 t/ha). Männyn taimien määrää ja pituuskasvua tutkittiin kuusi vuotta myöhemmin. Tulosten perusteella männyn taimien määrä kohteilla tuplaantui tuhkalannoituksen vaikutuksesta ja pituuskasvu parantui vähän. (Silfverberg 1995 & 1996.)

Neljännessä Muhokselle 1985 perustetussa kokeessa samana keväänä päätehakatulle entiselle mänty- ja koivuvaltaiselle ojitetulle rämeelle istutettiin männyn siemeniä ja kohdetta lannoitettiin irtotuhalla. Puutuhkalannoituksella ei tässä kokeessa näyttänyt olevan vaikutusta männyn taimien määrään kuuden vuoden tarkastelujaksolla. (Silfverberg, Huotari & Kokkonen 2010.)

Taulukko 4. Tutkimuskohteiden tiedot ja tulokset turvemaidella Suomessa ja Ruotsissa; kasvihuonekokeet ja siemenistutukset. Sanallinen kuvaus kasvun lisäyksen osalta annettu, kun numeerista vertailutietoa ei saatavissa.

Kohde	Koe	Maaperä	Puu-laji	Ikä	Lannoitus t/ha	Vaikutus	VIITE
Kasvihuone, Kannus 1986		Tur- vealusta	Ko	0	6, 12, 24, 96 + N ¹ 0,15	merkittävä	Ferm 1990 (julk. VIII)
		Tur- vealusta	Ko	0	3, 6, 9, 12 + N ¹ 0,15 + P ² 0,10 + K ³ 0,15	merkittävä	
Liminka, Hirvineva 2001		Ent. turve- kenttä	Ko	0	7,9 ja 6,3 ⁴	merkittävä	Huotari ym. 2008, Huotari 2011
Muhos, Häikiö 1985 Muhos, Siri 1985 Muhos, Iso Ansasaari 1985		TR-PsR Ram TR TR-PsR	Mä	0	5	vähän/ hyvä	Silfverberg 1995, 1996 (väitös-kirja)
Muhos 1985		RuSsR	Mä+Ko	0	5 ja 20	ei vaik.	Silfverberg ym. 2010

¹ Kalsiumammoniumnitraatti, ² Superfosfaatti, ³ Kaliumsulfaatti, ⁴ Puu- ja turvetuhkan seos.

Siemenistutuksia tehtiin myös entiselle turpeennostoalueelle, jonka turvepaksuus oli 20—50 cm. Kohteella tutkittiin puhdasta puutuhkaa 7,9 t/ha sekä turvepuutuhka-seosta 6,3 t/ha (62 m-% puutuhkaa ja 38 % turvetuhkaa). Lannoitus lisäsi selvästi itäneiden koivuntaimien määrää, ja kolmen vuoden kuluttua, 2004, puutuhka-aloilla oli lopulta eniten taimia. Vaikutus taimien pituuteen oli myös merkittävä: puu- ja sekatuhkakoealoilla taimien pituus oli 50—67 cm, ja lannoittamattomalla vain 11 cm. Männyn taimiin vaikutus oli vähäisempi. (Huotari ym. 2008, Huotari 2011.)

4.2.2 Taimikot ja ojitetut suot (niukkakasvuiset)

Tuhkalannoituksen vaikutuksia puuston kasvuun on tutkittu useilla taimikoilla ja ojitetuilla soilla, joissa puusto ei ole lähtenyt luontaisesti eikä istutusten kautta kasvuun. Kokeet on taulukoitu taulukossa 5.

Vuosina 1937—53 perustettiin useita ojitettuja suokohteita, joita tarkasteltiin 30 vuotta lannoituksen jälkeen. Kaakkosuon kohteessa lannoituksen vaikutuksesta koivikko oli kasvanut nopeasti, mutta 30 vuoden jälkeen se oli kuolemassa pysyyn. Jaakkoin-suolla tuhkalannoituksella oli merkittävä vaikutus puuston kasvuun. Pirttinevalla kontrolliruudulla ei kasvanut juuri lainkaan puustoa, mutta tuhkalannoitetuilla ruuduilla runsaasti. Viheriäisennevilla luontaisesti metsittynyt, ojitettu suoalue lannoitettiin tuhalla, ja myöhemmin kohteelle lisättiin typpeä (oulunsalpietari 0,4 t/ha). Tuhkalannoituksen vaikutuksesta puuston kokonaistuotos lisääntyi kaksin- tai kolminkertaisesti. Paras vaste on saatu 2 t/ha lannoituksella. (Merisaari 1981.)

Muhoksen Leppiniemen kohteella (turvepaksuus 70—150+ cm) tuhkalannoitukseen kuivalla tuhalla oli ryhdytty vuonna 1947, 14 vuotta ojituksen jälkeen, kun istutettujen puiden kasvu ei ollut onnistunut. 41 kasvukauden jälkeen tuhka-aloilla saatiinkin vuotuinen kasvu 8,1 (8 t/ha) ja 9,9 (16 t/ha) m³/ha/v, kun se kontrollialalla oli 0,4 m³/ha/v. (Silfverberg & Hotanen 1989.) Vuonna 1994 toistetun seu-

rannan perusteella lannoitusaloilla puun kasvu oli edelleen merkittävää, tilavuuskasvu 1947—1994 tuhka-aloilla 6,9 ja 10,9 m³/ha/v, ja lannoittamattomalla 1,2 m³/ha/v. (Moilanen, Silfverberg & Hokkanen 2002.)

Vuosien 1937—59 ojitettujen suoalueiden (turvepaksuus pääsääntöisesti 100+ cm) 19 koealalta kontrolloi- ja tuhkalannoitusalueiden puuston kokonaistilavuuskasvu määritettiin 21—46 vuotta lannoituksen jälkeen. Lähtötilassa puuston määrä kaikilla kohteilla oli vähäinen, tai alueet olivat käytännössä puuttomia. Tuotoksissa esiintyi huomattavaa vaihtelua, mutta ainoastaan kahdella kohteella kasvulisäystä lannoittamattomaan ei oltu saatu. Keskimääräinen vuotuinen tuotoksen lisäys oli noin 4 m³/ha/v, suurimmillaan lähes 8 m³/ha/v. Tuotoksen määrä ei ollut suoraan riippuvainen tuhkan määrästä, mutta useimmat parhaista tuotoksista saavutettiin käytettäessä yli 7 t/ha tuhkamääriä. (Silfverberg ym. 1985, Silfverberg 1996.)

Kauniston tutkimuksissa ojitetuille soille istutetut männyt saivat istutuksen aikaan peruslannoituksen (PK tai NPK, taulukko 5), ja koekohteita lannoitettiin uudelleen myös puutuhkalla (0,5—5 t/ha) noin 10 vuotta myöhemmin. Tulosten perusteella puutuhkalla ei ollut merkittävää vaikutusta puiden pituuskasvuun viiden vuoden tarkastelujaksolla. Tuhkan laadulla ja siten ravinnepitoisuuksilla oli suurempi merkitys. (Kaunisto 1987.)

Keski-Suomalaisen turvemaan nuorta tuhkalannoitettua (tuoretuhka, kosteus 40%) männikköä seurattiin 13 vuoden ajan. Paras tulos tukkipuun kasvussa saatiin suurimmalla annoksella 20 t/ha. Vaikutuksia ilmeni myös aluskasvillisuuteen ja maaperän laatuun. (Ferm, Flokkanen, Moilanen & Issakainen 1992.)

Aitonevan turvetuotantokentältä, jossa 18—54 cm turvekerros, oli kaadettu pois 16-vuotias koivikko ennen lannoituksia. Tuhkalannoitukset (5 t/ha) eivät vaikuttaneet uusien taimien määrään tai lajistoon, mutta se lisäsi merkittävästi rauduskoivun pituuskasvua ja halkaisijaa. Hieskoivulla ei ollut nähtävissä vaikutusta. Maanpäällisen biomassan määrä oli tuhkalannoituksen ansiosta merkittävästi suurempi kuin ilman lannoitusta. Vaikutus PK-lannoitukseen nähden oli hitaampi

mutta tarkastelujakson päättyessä kokonaisuudessaan yhtä suuri. (Hytönen ym. 1999, 2012 & 2013.)

Viljelylle turvemaalle (30—70 cm orgaaninen kerros) perustettiin myös neljä kohdetta. Tuhkalannoitus (irtotuhka ja Kyyjärvellä rakeistettu tuhka) vaikutti vain vähän männyntaimien pituuskasvuun. Parhaat tulokset yhdeksän vuoden tarkastelujaksolla saavutettiin nuorimmilla istutuksilla (1—5 vuotta); pituuden kasvun lisäys oli 50—100 cm lannoittamattomaan verrattuna. Tuhkan rakeistamisella ei ollut kasvuun vaikutusta 24-vuotiaan puuston kohteella. (Hytönen 2003.)

Ruotsalaisessa tutkimuksessa ojitettu turvekenttä, jolla kasvoi männyntaimia, lannoitettiin v. 1982 tuhalla (2,5 t/ha) sekä kaupallisella PK- ja NPK-lannoitteella (taulukko 5). Vuonna 2007 tehdyn analyysin mukaan puutiheys kasvoi lannoituksen vaikutuksesta merkittävästi, 81—143 %. Myös puiden pituuskasvu parantui 26-vuoden tarkastelujaksolla; tuhkalannoitetut taimet olivat noin 6 metrin mittaisia, kun lannoittamattoman alueen puut olivat 1,7 metrin mittaisia. Runkopuun tilavuusmäärä oli keskimäärin 1,6—1,9 m³/ha/v lannoitetulla alueella, ja vain 0,04 m³/ha/v lannoittamattomalla. (Sikström ym. 2010.)

4 ja 7 metrin männiköissä (turvepaksuus 100+ cm) tuhkalannoitus lisäsi 5 vuoden tarkastelujaksolla tilastollisesti merkittävästi puiden pituuskasvu, ja kasvu jatkui seurantajakson jälkeenkin. Esimerkiksi Tuulisuon (2/97) 7-metrinen puiden pituuskasvu oli keskimäärin kaksinkertainen lannoittamattomiin vertailupuihin nähden. Lannoituksessa oli käytetty kokeesta riippuen irtotuhkaa, rakeistettua tai itsekovetettua tuhkaa. Pölytuhkalla saatiin tässä kohteessa parempi vaikutus pituuskasvuun, mutta tuhkan laadulla oli selkeämpi merkitys. Vanhemmissa kokeissa (mm. Ruukki 2AB, Kolari Suntio 1/80, Rovaniemi Ropsajoki 1/80, Sodankylä Kalliolampi 1/79) 5-metrinen puuston kasvun kehitystä arvioitiin vuotuisen tilavuuskasvun perusteella. 20 vuoden tarkastelujaksolla kontrollialueen kasvu lisääntyi hitaammin kuin lannoitetuilla kohteilla: tarkastelujakson lopulla lannoitetut kohteet tuottivat lisäpuuta huomattavan määrän (3,75 m³/ha/v) lannoittamattomaan (1,5 m³/ha/v) verrattuna. (Moilanen & Issakainen 2004.)

Seitsemällä ojitetulla suolla (joista Ruukki 2AB, Rovaniemi Ropsajoki 1/80 ja Soudankylä Kalliolampi 1/79 myös edellisessä julkaisussa), joiden turvepaksuudet vaihtelivat 60 senttimetristä yli metriin, verrattiin pienen ja suuren tuhka-annoksen vaikutusta puuston kasvuun nuorissa männiköissä. Irtotuhkaa levitettiin käsin erilaisia annoksia. Kasvuvaikutusten osalta havaittiin, että pienemmillä annoksilla tilastollisesti merkittävä kasvuvaikutus kontrolliin nähden oli havaittavissa seitsemäntenä vuonna lannoituksen jälkeen (tuhkalannoituksella kasvu 2,3 ja kontrollilla 1,9 m³/ha/v), kun se korkeammilla annoksilla näkyi jo toisena vuonna lannoituksesta (tuhkalannoitus 1,5 ja kontrolli 1,0 m³/ha/v). Kasvuvaikutus kasvoi 15 vuoden tutkimusjakson aikana; viimeisenä vuonna kontrollialueella kasvu oli noin 2, pienillä tuhka-annoksilla 3 ja suurilla annoksilla 5 m³/ha/v. (Moilanen 2005.)

Ouluun perustettiin kaksi koealaa nuoreen männikköön ojitetulla suolla (turvepakkuus 150+ cm), ja lannoituksessa käytettiin itsekovetettua sekä rakeistettua tuhkaa. Kohde 3 oli ravinteista köyhempi. Kasvuvaikutus (Basal Area Increment BAI) oli kuitenkin molemmissa kohteissa merkittävä. Kohteessa 3 vaikutus alkoi kolmen vuoden jälkeen parannus, ollen lopussa 190 %. Kohteessa 4 vaikutus oli heti 20—50 % ja lopussa 500 %. Suurempi tuhka-annos 15 t/ha toimi lähes kaksi kertaa paremmin kuin pienempi 5 t/ha. (Moilanen, Saarsalmi, Kukkola & Issakainen 2013.)

Muhoksella 6—8 metrin pituisessa männikössä ojitetulla rämeellä tuhkan vaikutus näkyi puustossa voimakkaana. Pienempi tuhka-annos (5 t/ha) kolminkertaisti ja suurempi tuhka-annos (15 t/ha) seitsenkertaisti puuston tilavuuskasvun. Tutkimusjakson lopussa vuotuinen kasvu oli vertailulla 2 m³/ha/v ja tuhka-aloilla 11—13 m³/ha/v. (Moilanen, Hytönen & Leppälä 2013a.)

Nimettömän kuusikkoon, jota kuvailtiin ylipuustoisena taimikkona, levitettiin itsekovetettu tuhka (6,4 t/ha). Pituuskasvu lannoitusta seuranneina vuosina oli parempi, kuin kontrollilla. Tavilammen kitukasvuisen kuusikon kasvutulokset erotuivat selvästi lannoitusta seuranneina vuosina vastaavista kontrollialueiden tuloksista, ja ne parantuivat kolmivuotisen seurannan loppua kohti. (Rummukainen ym. 2004.)

Taulukko 5. Tutkimuskohteiden tiedot ja tulokset turvemailla Suomessa ja Ruot-
sissa; taimikot ja ojitetut, niukkakasvuiset suot. Sanallinen kuvaus an-
nettu, kun numeerista vertailutietoa ei saatavissa.

Kohde	Koe	Maaperä	Puulaji	Ikä tai pituus	Lannoitus t/ha	Vaikutus m ³ /ha/v	VIITE
Pirttineva 1949— 53		KN, KSN, TSN, KTSN	Mä	15 v**	5 ja 7	3,9 ja 3,7	Merisaari 1981
Viheriäisenneva 1948/1970		LkN, LkKN	Mä	17 v	2, 4 ja 6 + N ¹ 0,40	1—1,6	
Jaakkoinen 1937 ja 49		IR, ITR	Mä	20—30 v	5, 8 ja 10	3,2	
Kaakkosuo 1937		RhRiN	Ko+Mä	6 v	7,2	hyvä	
Muhos, Leppi- niemi 1947	21a c	MeKaN TKN	Mä	**	8 16	5,7 9,7	Silfverberg ym. 1989 & 1996 Moilanen ym. 2002 Moilanen ym. 2004a
Ähtäri, Majasuo 1959		TKN	Mä	taimi	4	hyvä	Silfverberg ym. 1985
Alajärvi, Matoneva 1950		RiSsN	Ko Mä		3, 5, 7, 9 8	merkittävä merkittävä	(1975— 1984)
Kuru, Pirttineva 1949-54		PsKN	Mä		5, 7	merkittävä	& 1996 (väi- töskirja)
Suomusjärvi, Ket- tula 1953		ITR	Mä	**	4, 6	ei vaik.	
Ruovesi, Vihe- riäisenn. 1948		PsN, TN	Mä	**	4, 6	vähän	
Yläne, Leijansuo 1952		SsN	Mä	**	5	negat.	
Parkano, Liesneva 1950		TKN	Mä	**	7	merkittävä	
Vantaa, Korso 1948		ITR	Mä		4, 5, 6	vähän	
Sippola, Kaihlasuo 1948		KN RamTR	Mä	**	4, 8 2, 4, 6, 8	merkittävä vähän	
Tohmajärvi, Kar- jala 1939		SsN	Mä	**	10	merkittävä	
Vilppula, Jaak- koinen 1937		ITR RiSsN	Mä Ko	**	5, 10 7	hyvä merkittävä	
Vilppula, Kaakko- suo 1937							
Rovaniemi, Hirvas 1958		PsR	Mä	**	5	vähän	
Sotkamo, Heini- suo 1951		MolKN	Mä	**	10	vähän	
Itkusuo 1946		TKN	Mä		3	merkittävä	
Rovaniemi, Alajär- vens. 1952		RiN	Mä	**	3, 5, 8	vähän	
Hyrnsalmi, Petronj. 1952		MolKN	Mä	**	8	merkittävä	
Oulu, Isosuo 1952		TN	Mä	**	1, 2 4, 6, 8	negat. merkittävä	
Sievi 1949		RN	Mä	**	3, 4, 5, 6	ei vaik.	

Taulukko 5. Jatkuu.

Housulampi 1979	9	TR-LkN-VSN	Mä	10 v	PK 0,50 + 0,7 ja 3,5	ei vaik.	Kaunisto 1987
Jauli 1979	10	TR-LkN-VSN		10 v	P 0,043, K 0,075 + 0,7 ja 3,5	vähän	
Kaunisvesi 1980	12	LkN/VSN		11 v	PK 0,60 + 0,5, 1, 2 ja 5	vähän	
Särkkä 1981—82	13	VSN/RhS N VSN/LkN LkN/RN		11 v	NPK 30 g/taimi + 2 ja 5 *	ei vaik.	
Keski-Suomi		Turvemaa	Mä	nuori	1, 2, 5, 10, 20	4,3	Ferm ym. 1992
		Ojitettu suo	Mä		5—16	3,1—12,1	Lauhanen 1997
Aitoneva 1981		Turve	Ko	0 v	5	pituuskasvu merkittävä	Hytönen ym. 1999, 2012, 2013
Muhos, Jylkynrimpi 1980	253	LkN SsN oj	Mä	0 v	5 ja 0,5 * + PK 0,40 + N ³ 0,093	pituuskasvu merkittävä	Silfverberg ym. 2001
Kälviä, Kaunisvesi 1980-81	1/80	TR – SsR mu	Mä	6 v	0,5 + PK 0,40 + N ³ 0,08	pituuskasvu vähän	
Vaala		Viljelty suo	Mä	1 v	5	vähän	Hytönen 2003
Vuolijoki Kannus Kyyjärvi				1 v 24 v 5 v	5 5 ja 5 4,3 ja 8,6	hyvä ei vaik. vähän	
Muhos Tuulisuo 1997	2/97	TR	Mä	7 m	5 ja 15	0,5—3,5	Moilanen ym. 2004a, Moilanen 2005
Muhos Resula 1997	1/97	RhsR		4 m	5 ja 15		
Ruukki 1985	2AB	VSR		5 m	4,5		
Kolari Suntio 1982	1/80	oj		5 m	4,5 ja 9		
Rovaniemi	1/80	VSR-RhSR		5 m	4,5 ja 9		
Ropsajoki 1982	1/79	VSR		5 m	1,1, 2,25 ja 4,5		
Sodankylä Kallioli. 1981							
Muhos 1982	257	PsR-VSR	Mä	taimi,	4,5	0,5—1,4	Moilanen 2005
Paltamo 1980	1/80	TR-PsR		riuku 5—9 m	1,5, 3 ja 6***		
Keminmaa 1978		VSR-RhSR			4,25 ja 8,5		Moilanen ym. 2004b
Lestijärvi 1979	1/79	TR-PsR			3,5 ja 7	2	
Perstorp 1982	168	Oj turvetkent.	Mä	taimi	2,5 + P 0,04 K 0,08 + P 0,04 K 0,08 N ² 0,10 + P 0,02 K 0,04 N ² 0,10	1,2—1,5	Sikström 2010
Oulu 1997	3 4	PsN RhsL	Mä	5 m 7 m	5 ja 15 5 ja 15	1—3 3—9	Moilanen ym. 2013b
Muhos Pelsonsuo 1997		RhsR/MT Kg	Mä	6—8m	5 ja 15	9—11	Moilanen ym. 2013a
Nimetön 1998		TKg	Ku	26 v	6,4	vähän	Rummukainen ym. 2004
Tavilampi 1998		MrK, RhK	Ku	taimi	6,4	pituuskasvu merkittävä	

¹ Oulunsalpietari, ² Ammoniumnitraatti, ³ Urea, * huonolaatuinen tuhka, ** alue käytännössä puuton, *** myös turvetuhkaa.

4.2.3 Varttunut ja yli 30 vuotias puusto

Taulukossa 6 on esitetty tuhkalannoitusten koekohteet, joiden puuston on ilmoitettu olevan kooltaan varttunutta tai yli 4 metristä, tai joiden ikä on ollut yli 30 vuotta. Oulun ja Lapin läänissä oli 28 kohdetta, joissa irtotuhkan levityksestä oli 9—52 vuotta, ja käsittelyt oli toistettu 2—5 kertaa. Hehtaariannokset kohteilla olivat 0,5—15 tonnia, ja annettu usein porrastettuna. Viljavilla rämeillä tulokset kasvuun olivat yleensä merkittäviä, ja myös karuilla rämeillä esiintyi yksittäisiä hyviä tuloksia. Taimikoissa tutkittiin pituuskasvua, varttuneemmilla puilla runkopuun kehitystä. Puuntuhka lisäsi suomännikön vuotuista kasvua parhaimmillaan n. 6 m³/ha. Annostuksella ei ollut niin suurta merkitystä kuin kasvupaikalla ja tuhkan laadulla. (Moilanen ym. 2000.)

Osmanginsuon 15-vuotiaalla mäntyä ja koivua kasvavalla kohteella tuhkaa levitettiin 2 t/ha. Puutuhka lisäsi rauduskoivun kasvua mutta vaikutukset pituuskasvuun eivät olleet merkitseviä (noin 20 %). Piispannevalla 5 t/ha turpeen pinnalle levitettynä lisäsi männyn ja rauduskoivun istutuspuukasvustojen pituuskasvua varsin selvästi, noin 30 %. Aitonevalla 5 t/ha tuhkamäärä ei antanut positiivista tulosta 25 vuotiaan koivikon runkopuun tuotokseen kontrolliin verrattuna. Tutkimuksessa havaittiin, että turpeeseen sekoitettuna tuhka aiheuttaa voimakasta typen mineralisoitumista ja on siten haitallinen puuston kehitykselle. (Aro & Kauristo 1995.)

Pohjanmaalla ja Etelä-Lapissa toteutetussa koesarjassa tutkittiin kymmenellä ojitetulla suokohteella (turvepaksuus 45—100+ cm), kuinka puhdas tuhkalannoitus (irtotuhka, 0,2—20 t/ha) tai tuhkan ja kaupallisen PK-lannoitteen (irtotuhka 0,5—2 t/ha, PK-lannoite 0,4 tai 0,5 t/ha) ja/tai tuhka+PK+urea -yhdistelmät (tuhka 0—1,6 t/ha, PK-lannoite 0,4 tai 0,5 t/ha ja urea 0,1—0,3 t/ha) vaikuttaa puuston pituuskasvuun. Kohteiden puiden iät vaihtelivat rinnankorkeusiän perusteella 25 vuodesta 50 vuoteen. Kahdella kohteella puusto oli nuorempaa (taulukko 6). Pituuskasvun perusteella tuhka lisäsi männyn pituuskasvua tilastollisesti merkittävästi neljällä kohteella. Jo pienet määrät tuhkaa lisäsivät kasvua. Pienten puutuhkamäärien (0,2—2 t/ha) lisääminen PK- tai PK+U lannoitukseen paransi kasvua merkitsevästi vain Muhoksen kohteella. (Silfverberg ym. 2001.)

Taulukko 6. Tutkimuskohteiden tiedot ja tulokset turvemaiden Suomessa; varttunut ja yli 30-vuotias puusto. Vaikutus runkopuun tuottoon kontrolliin verrattuna. Sanallinen kuvaus annettu, jos tilavuuskasvua ei määritetty.

Kohde	Koe	Maaperä	Puu-laji	Ikä	Lannoitus t/ha	Vaikutus m ³ /ha/v	VIITE
Oulun ja Lapin lääni	1	Viljava räme	Mä	varttunut	2,25	merk	Moilanen ym. 2000 (yht. 28 koetta)
	2				4,5	merk	
	3				11,9	hyvä	
	5				3,6	hyvä	
	7				4,5	merk	
	10	Karu räme	Mä		11,9	ei vaik.	
	14				4,5	0,5--3	
	8				4,75	1—2	
	11				6	vähän	
	15				7	merk	
Kihniö Aitoneva 1980 Kiuruvesi Osmanginsuo 1980 Haapavesi Piispanneva 1980	9	Turve	Ko	25	5	ei vaik.	Aro ym. 1995
	1			15	2	vähän	
			Mä+Ko		5	pit. merk	
Sodankylä Kalliolampi 1981	1/79	PsR -	Mä	45	0,5, 5 ja	vaikutus	Silfverberg ym. 2001
Rovaniemi Ropsajoki 1982	1/80	SsR oj	Mä	42	0,5 + PK 0,5	pituus-	
Lestijärvi Niskankorpi 1979	1/79	(RhR)mu	Mä	47	1 + PK 0,5	kasvuun merkittävä	
Kannus Plankkukangas 1981		TR oj	Mä	27	2, 20 ja	vaikutusta	
Muhos Oksansuo 1981		SsR oj	Mä	27	2 + PK 0,5		
					1, 10 ja		
Paltamo Matkala 1980	6	PsR -	Mä	50	1 + PK 0,4 ja	pituus-	
Sievi Eteläsydänmaa 1979		SsR mu	Mä		1 + PK 0,4 + U	kasvuun	
					0,20	vähän	
	7	TR -	Mä	40	0,8 + PK		
	8	PsR mu	Mä	ei tietoa	0,2 + PK0,4		
		SsR mu	Mä		0,4 + PK0,4		
					0,8 + PK0,4		
					0,2 + PK0,4 + U0,2		
					0,4 + PK0,4 + U0,2		
					0,8 + PK0,4 + U0,2		
Kälviä Kaunisvesi 1980-81	10	PsR -	Mä	25	0,4 + PK0,4 + U0,3		
		SsR mu	Mä		0,8 + PK0,4 + U0,3		
					1,6 + PK0,4 + U0,3		
Oulu Kempele 1982	251	IR	Mä	30	4,8	1	Saarsalmi 2014
Oulu Siikajoki 1985		SsL	Mä	30—50	4,5 4,5 + N ¹ 0,11	1,3—6	Moilanen 2015

U = urea, 0,2 t/ha vastaa 93 kg N/ha ja 0,3 t/ha vastaa 139 kg N/ha, ¹ Ammoniumnitraatti+kalkki.

Kempeleen ojitetun karukkosuon (turvepaksuus 25—55 cm) 30-vuotias männikkö lannoitettiin irtotuhkalla, 4,8 t/ha. 16 ensimmäistä vuotta tuhkan kasvuvai-
kutukset parantui, ja 25 vuoden tutkimusjakson päätyttyä kokonaistilavuuskasvu 169
m³/ha oli parempi kuin kontrollilla 145 m³/ha. (Saarsalmi ym. 2014.)

Oulun Siikajoella vuonna 1985 30—50 -vuotiaat, 6—7 metrin mittaiset männyt ojitetulla suolla (turvepaksuus yli 100 cm) lannoitettiin irtotuhkalla, PK-lannoitteella, sekä apatiitin ja biotiitin seoksella. Lisäksi kokeiltiin ammoniumnitraatin ja kalkin antamista yhdessä jokaisen lannoitteen kanssa. Lannoitteet annosteltiin siten, että ravinnemäärät olivat: N 110 kg/ha, P 54—135 kg/ha, K 102—225 kg/ha ja B 1,8 kg/ha. Ohjeistusten mukaan fosforia tulisi antaa 40—50 kg/ha ja kaliumia 90—110 kg/ha, joten niitä annettiin selvästi ohjeistusta enemmän. Kasvuvaikutuksia tarkasteltiin 26 kasvukauden jälkeen. Tuhkalla kasvuvaikutus alkoi kolmannelta kasvukaudelta lannoituksen jälkeen, ja tilavuuskasvu 3—9,2 m³/ha/v kontrolliin 1,7—3,2 m³/ha/v nähden oli merkittävä, ja neljännessä vuodesta lähtien parempi kuin PK-lannoitteella (max. 6,7 m³/ha/v). (Moilanen ym. 2015.)

4.3 Tuhkalannoitus ja hiilen sidonta

On todettu, että tuhkalannoitus lisää maaperän orgaanisen aineksen mineralisointumista, ja tätä kautta se lisää myös maaperästä vapautuvien kasvihuonekaasujen määrää. Merkittävää kasvua esimerkiksi CO₂-päästöissä on kuitenkin havaittu vain orgaanisella maaperällä (turvemaidella) ja pitkällä aikavälillä, ja toisaalta puuston kasvun tehostuminen tuhkalannoituksen vaikutuksesta kompensoi hiilipäästöä. (Augusto, Baker & Meredieu 2008.)

Suomessa on tehty vastaavia havaintoja pitkäaikaistutkimuksissa (14—50 vuotta) turve- ja kivennäismaiden kaasuvirtoihin. Tuhkalannoitus oli lisännyt sekä turve- että kivennäismaan hiilidioksidipäästöjä. Tuhkan käytön kannalta positiivista oli, että dityppioksidipäästöt eivät lisääntyneet ja metaanin nielu jopa lisääntyi. (Martikainen, Nykänen & Maljanen 1998.) Seuraavassa on esitetty päästötietoja sekä kangasmailla että turvemaidella tehdyissä tuhkalannoituskokeissa. Numeeriset tiedot on muutettu tarpeen mukaan siten, että ne edustavat aina hiilidioksidipäästöä (CO₂) grammoina (g) per vuosi.

4.3.1 Kangasmetsät

Kangasmetsissä on tutkittu puutuhkan vaikutusta maahengitykseen eli hiilidioksidin vapautumiseen. Yksikkönä on tässä käytetty vuotuista CO₂ -määrää graminoina per m² tai kg orgaanista ainesta. Tulokset on listattu taulukkoon 7.

Suomessa Vanhaan VT-männikköön tehtiin tuhkalannoituksia 1990-luvun alussa, ja maaperää analysoitiin kaksi vuotta myöhemmin. Tuhkamäärät olivat 1, 2,5 ja 5 tonnia hehtaarille. Tulosten perusteella tuhkalannoitus lisäsi vapautuvan hiilidioksidin määrää, mutta eri tuhkamäärillä lannoitettujen alueiden välillä ei ollut merkittäviä eroja: lannoitetut 222 – 249 ja kontrolli 216 g CO₂/v/kg orgaanista ainesta. Syynä lievään kasvuun pidettiin orgaanisen aineksen mineralisaation lisääntymistä tuhkalannoituksen vaikutuksesta. (Fritze, H., Smolander, A., Levula, T., Kitunen, V., Mälkönen, E. 1994.)

Muhoksella puukuoresta saatua irtotuhkaa käytettiin viidellä eri koealalla. Kylmälän CT-männikkö oli lannoitettu 4,5 t/ha annoksella vuonna 1979. Paljakan MT-kankaalla (kuusi) käytettiin kuorituhkaa 10 t/ha vuonna 1981. Sadinselän VMT-männikköön ja Lummelammen CIT-ECT ja ECT -männiköihin käytettiin Metsä-Botnian Äänekosken tehtaan irtotuhkaa 3 t/ha vuonna 1997. Tuhkan ravinnepitoisuudet vaihtelivat hieman lähteestä johtuen, mutta esimerkiksi fosforin määräksi tuli 80 g/ha Kylmälässä ja 30 g/ha muissa kohteissa. Saatujen tulosten (1998) perusteella vanhoilla koealueilla noin 17 vuotta aiemmin tehty tuhkalannoitus näkyi nyt hieman kohonneina CO₂-päästöinä: lannoitettu 2137—2382, kontrolli 1883 g CO₂/m²/v. Uusilla alueilla vuosi lannoituksen jälkeen päästöt olivat lannoitetuilla kohteilla 3381—4213 g CO₂/m²/v, ja jopa alhaisemmat kuin kontrollilla, 3530—4398 g CO₂/m²/v. Typpipäästöihin tuhkalannoituksella ei ollut merkittävää vaikutusta, mutta maaperän kyky sitoa metaania väheni. (Maljanen, M., Nykänen, H., Moilanen, M. ja Martikainen, P. 1999.)

Vastaaviin tuloksiin Maljanen on päätenyt myös myöhemmin toteutetuissa koeksissa 2000—2003, joissa laboratoriossa ja koekentillä tutkittiin puutuhkan 7 t/ha lannoitusmäärän vaikutusta haplisen podsolin maaperän kuusikon maahengitykseen. Tulosten mukaan maastokokeissa tuhkalannoitus ei lisännyt CO₂- eikä N₂

-päästöjä, ja myöskään laboratoriokokeissa merkittävää vaikutusta CO₂:n vapautumiseen ei havaittu: kontrollinäytteessä 5352 g CO₂/m²/v ja tuhkalannoitetussa 4669 g CO₂/m²/v. Kokeessa oli mukana myös tuhka+typpi –lannoituskoe (ammoniumnitraatti), jossa maahengitys oli pelkkää tuhkalannoitusta alhaisempi. (Maljanen, M., Jokinen, H., Saari, A., Strömmer, R. & Martikainen, P. J. 2006.)

Systemaattisessa tutkimuksessa Muhoksen Lummelammella ECT-männikössä ja Oulun Sadinselällä VMT-männikössä tutkittiin tuhkalannoituksen lyhytkestoisia vaikutuksia maaperän mikrobiologisiin ominaisuuksiin. Seurannassa vertailtiin irtotuhkan ja kovetetun tuhkan vaikutuksia kahdella eri lannoitusmäärällä ja näytteitä otettiin lannoituksen jälkeen kolmena vuonna. Tuhkalannoitus kiihdytti maahengitystä: kontrollialojen CO₂-päästöt olivat 225—547, kun tuhkalannoituksilla ne olivat 257—836 g/v/kg orgaanista ainesta. VMT-männikössä suurempi annos irtotuhkaa vaikutti maahengitykseen eniten, CO₂-päästön ollessa kolmen vuoden aikana 547—836 g/v/kg orgaanista ainesta (kontrolli 321—482). (Perkiömäki, J. & Fritze, H. 2002.)

Saman tutkimuksen yhteydessä Keuruun Vuorisjärvellä CT-männikössä, Yltiän VT-männikössä ja Janakkalan Harvialan MT-männikössä ja OMT-kuusikossa suoritettiin pitkäkestoisten vaikutusten tutkimuksia, joissa käytettiin irtotuhkaa 3 t/ha, ja näytteet haettiin 18 vuoden kuluttua lannoituksesta. OMT-kuusikossa ja MT-männiköissä tuhkalannoitus ei enää vaikuttanut maahengitykseen. Sen sijaan CO₂-päästö oli VT- ja CT-männiköissä tuhkalannoitusaloilla 707 ja 804 g/v/kg orgaanista ainesta, olivat suurempia kuin kontrollialoilla, 482 g/v/kg orgaanista ainesta. (Perkiömäki 2002.)

Taulukko 7. Tuhkalannoituksen vaikutus maahengitykseen kangasmetsissä.

Kohde	Tuhka-annos t/ha	Aika v	Maahengitys	Lisäys	Yksikkö	Viite
VT-männikkö	0	2	216		g CO ₂ /v/kg org. ainesta	Fritze ym. 1994
	1		241			
	2,5		222			
	5		249			
CT-männikkö	0	19	1883		g CO ₂ /m ² /v	Maljanen ym. 1999
	4,5		2137	254		
MT-kuusikko	0	17	1883		499	
	10		2383			
VMT-männikkö	0	1	4398		-184	
	3		4212			
CIT-ECT-männikkö	0	1	3758		-377	
	3		3381			
ECT-männikkö	0	1	3530		70	
	3		3600			
Hapl.podsoli-kuusikko	0	3	5352		g CO ₂ /m ² /v	Maljanen ym. 2006
	7		4669	-683		
	7 + 0,2		4520	-832		
	N ¹					
ECT-männikkö	0	1—3	225—547		g CO ₂ /v/kg org. ainesta	Perkiönmäki ym. 2002
	3		321—547			
	3 kov		289—643			
	9		482—643			
VMT-männikkö	0	1—3	289—643			
	3		321—482			
	3 kov		289—804			
	9		418—611			
CT-männikkö	0	18	547—836			
	3		418—804			
	3 kov		482			
	9		804			
VT-männikkö	0	18	482			
	3		707			
MT-männikkö	0	18	611			
	3		643			
OMT-kuusikko	0	18	514			
	3		514			
Männikkö	0	4	183		g CO ₂ /v/kg org. ainesta	Bååth ym. 1994
	2		286			
	5		467			
VT/VCT-kuusikko	0	12	385+275		g CO ₂ /m ² /v	Rosenberg ym. 2010
	1		404+294	37		
	3		440+294	74		
	6		477+367	184		
VT/VCT-männikkö	0	12	257+220			
	1		165+239	-73		
	3		202+220	-55		
	6		202+220	-55		

¹ ammoniumnitraatti

Ruotsissa toteutettiin myös vastaavia tutkimuksia 1990-luvun alkupuolella. Ko-keissa männikköä lannoitettiin puutuhkan annoksilla 2 ja 5 t/ha sekä dolomiitin annoksilla 3 ja 7,5 t/ha. Neljä vuotta myöhemmin tehtyjen analyysien perusteella maahengitys lisääntyi lineaarisesti kaikissa koeruuduissa maaperän pH arvon noustessa, eli lannoiteannoksen kasvaessa. Tuhkalannoituksissa CO₂ -päästöt

olivat noin 286 ja 467 g/v, kun kontrollialalla se oli 183 g/v kilosta orgaanista aineesta. (Bååth, E. & Arnebrant, K. 1994.)

Ruotsin Torupissa ja Vindelnissä toteutettiin tutkimus, jossa lannoitettiin kahta metsää, kuivahkon kankaan kuusikkoa ja männikköä, samoilla tuhkamäärillä, 1, 3 ja 6 t/ha. CO₂-päästöt sekä typen mineralisaatio mitattiin humus- ja maanäytteistä (0 ja 5 cm syvyydeltä) 12 vuotta lannoituksen jälkeen. Tulosten mukaan tuhkalannoitus lisäsi hiilen määrää maaperässä, mutta myös sen vapautumista lämpimän ilmaston kuusivaltaisessa metsässä: CO₂-päästö humuksesta tuhkalannoituksella oli 404—477 g/m², kontrollialalla 385 g/m²/v. (Rosenberg, O., Persson, T., Högbom, L. & Jacobson, S. 2010.)

Kylmemmän ilmaston mäntyvaltaisessa tyyppiköyhässä metsässä CO₂-päästö humuskerroksesta oli tuhkalannoituksella jopa alhaisempi, 165—201, kuin kontrollialalla, 257 g/m²/v. Syvemmän maakerroksen CO₂-päästö oli vain suurimmalla tuhkalannoituksella suurempi, 367 g/m²/v kuin vastaavan lannoittamattoman kohteen päästö 275 g/m²/v. (Rosenberg, O., Persson, T., Högbom, L. & Jacobson, S. 2010.)

Torupin VT/VCT-kuusikkokohteen osalta on aiemmin esitetty, että yhden tuhkakäsittelyn jälkeen puuston kasvu lisääntyi 0,9 m³/ha/v verrattuna lannoittamattomaan alueeseen (Jacobson, S. 2003). Tällöin puuston kasvu sitoisi hiiltä 330 kg/ha/v eli hiilidioksidia 1211 kg/ha/v tai 121 g/m²/v. Lannoittamattoman kohteen CO₂-päästö on yhteensä 661 g/m²/v ja lannoitetun 883 g/m²/v. Lannoituksen vaikutuksesta hiilidioksidipäästö lisääntyy täten 172 g/m²/v. Tässä tapauksessa puun kasvu kykenee sitomaan siitä vain 121 g, jolloin tuhkalannoituksen aiheuttama CO₂ nettopäästölisyys on 51 g/m²/v. (Rosenberg ym. 2010.) Laskelma on karkea arvio yhdelle kohteelle yhden vuoden kasvun osalta, mutta osoittaa, että maahengityksen huomioiminen on oleellista.

4.3.2 Turvemetsät

Myös turvemaan metsissä on tutkittu puutuhkan vaikutusta maahengitykseen eli hiilidioksidin vapautumiseen. Vertailun helpottamiseksi raporteissa ilmoitetut tulokset on muutettu muotoon vuotuinen CO₂ -määrää grammoina per m². Tulokset on listattu taulukkoon 8.

Suomalaisessa tutkimuksessa seurattiin tuhkalannoituksen vaikutusta kasvi-huonekaasujen vapautumiseen viidellä eri-ikäisellä turve-kohteella. Osa alueista lannoitettiin tutkimuksen aikana 1997, yksi alue oli lannoitettu jo v. 1947 ja kaksi aluetta 80-luvun alussa. Eri alueilla käytettyjen tuhkien ravinnepitoisuuksissa oli eroja. Vanhoilla koealueilla tuhkalannoitus lisäsi CO₂-päästöjä 604—1025 g/m²/v, uusista alueista ainoastaan karulla rämeellä 929 g/m²/v. N₂O-päästöihin ei merkittävää vaikutusta, maaperän kyky sitoa CH₄:ää väheni. (Maljanen ym. 1999.)

Kuivatuilla paksuturpeisilla rämeillä (Muhos) tehdyistä kokeista Leppiniemen ko-keessa tuhkaa oli levitetty 0, 8 tai 16 tonnia hehtaarille vuonna 1947 puuttomalle ojitetulle suolle, ja turpeen hajoamista tutkittiin vuonna 1997. Leppiniemellä ha-vaittiin, että tuhkalannoitus lisäsi merkittävästi orgaanisen aineen hajoamista 12 kuukauden tarkastelujaksolla. Tutkituissa kerroksissa (pinta, 7,5 cm ja 15 cm) lannoittamattoman alan turpeen massan vähenemä oli 2—15 %, kun se tuhka-lannoitusaloilla oli 15—72 % (8 t/ha) ja 24—82 % (16 t/ha). Tämän perusteella myös hiilidioksidin vapautuminen maaperästä oli suurempaa tuhkalannoitus-aloilla; lisäys 1445 g/m²/v. Typpioksidin vapautuminen maaperästä sen sijaan vä-heni tuhkan määrän lisääntyessä. (Moilanen ym. 2002.)

Pelsonsuolla tuhkaa levitettiin alkukesällä 1997 0, 5 tai 15 tonnia (per ha) 6—8 metriseen männikköön, ja sitä analysoitiin vuonna 2000. Pelsonsuolla puutuhka-käsittelyt (rakeistettu tai itsekovetettu tuhka) 5 ja 15 t/ha lisäsivät turpeen ravin-nemääriä ja vähensivät happamuutta 1,5–2 pH-yksikköä. Turpeen hajoamisno-peus oli tuhka-aloilla noin kaksinkertainen lannoittamattomaan vertailuun näh-den: vuotuiset CO₂-emission lisäykset tuhka-aloilla olivat 668 ja 870 g/m²/v. (Moi-lanen, Hytönen & Leppälä 2013a.)

Tuhkan vaikutus näkyi kuitenkin puustossa voimakkaana: pienempi tuhka-annos kolminkertaisti ja isompi tuhka-annos seitsenkertaisti puuston tilavuuskasvun. Hiilidioksidin nettopäästöä laskettaessa turpeesta vapautuneesta hiilidioksidista vähennettiin puuston sitoman hiilidioksidin osuus. Tuhkalannoitetuilla aloilla puustoon sitoutui 1362 ja 1560 g CO₂/m²/v, jolloin nettopäästöt 180 ja 213 g/CO₂/m²/v. Kontrollialalla puustoon sitoutui hiilidioksidia vain 125 g/m²/v, jolloin turpeen ja puuston yhteinen nettopäästö oli 749 g CO₂/m²/v. (Moilanen, Hytönen & Leppälä 2013a.) Nettopäästövaikutus oli täten tuhkalannoitusalueilla alhaisempi.

Poikkeus edellisiin tuloksiin oli Länsi-Suomessa tehty lannoituskoe, jossa tutkittiin rakeistetun tuhkan (annos 5 t/ha) vaikutusta maahengitykseen. Kolmella turvekankaalla havaittiin, että lannoituksella ei ollut vaikutusta maahengitykseen lisäävästi, ja maahengitys oli muutenkin alhaisempaa kuin muilla aiemmin tutkituilla kohteilla. (Maljanen, Liimatainen, Hytönen & Martikainen 2014.)

Myös **Ruotsissa** on toteutettu muutamia tutkimuksia tuhkalannoituksen vaikutuksista maaperän hiilidioksidipäästöihin. Viisivuotisessa (2003—2008) tutkimuksessa oli kolme tutkimusaluetta, joilla yhteensä 5 kasvukoetta. Kuivatulla nevalle (T) 3,1 t/ha tuhkalannoitus lisäsi kahden vuoden tarkastelujaksolla hieman maahengitystä; vuositasolla CO₂-päästö lisääntyi alueella 139 g/m²/v. Mustikka-puolukka tyyppin nevalle puutuhkalannoitukset tehtiin kasvavaan metsään 3,3 ja 6,6 t/ha annoksilla. Tutkimuksessa havaittiin, että puutuhkalannoitus lisäsi puuston kasvua, mutta lannoituksen määrällä ei ollut vaikutusta maaperän CO₂-päästöihin. (Ernfors, Sikström, Nilsson & Klemedtsson 2010.)

Vastaavanlaisen mustikka-puolukka tyyppin kuusikko-kohteen tilaa 1 ja 2 sekä 4 ja 5 vuotta tuhkalannoituksen jälkeen analysoitiin vuosina 2006—2007 ja 2009—2011 (Klemedtsson, Ernfors, Björk, Weslien, Rütting, Crill & Sikström 2010 ja Rütting, Björk, Meyer, Klemedtsson & Sikström 2014). Tällä kohteella lannoitus vähensi kasvihuonekaasupäästöjä ja nosti maaperän pH:ta. 3,3 t/ha annoksella lannoitetun koealan vuotuinen CO₂-päästön muutos kontrollikohteen päästöihin

nähdessä oli -180 g/m²/v ja 6,6 t/ha annoksella -235 g/m²/v. (Klemedtsson ym. 2010 ja Rütting ym. 2014.)

Taulukko 8. Tuhkalannoituksen vaikutus maahengitykseen turvemaidella.

Kohdetyyppi	Tuhka t/ha	Aika v	Maahengitys /v	Lisäys /v	Yksikkö	Viite
Rh-suo, j	0 7,2	50	2523 3127	604	CO ₂ g/m ² /v	Maljanen ym. 1999
Ss-suo, j	0 4,5	16	3434 4459	1025		
Tn-suo P	0 4,5	15	2567 3504	937		
TR-suo	0 5	1	2208 3136	929		
VRiN-suo	0 5	1	3592 3460	-131		
L-männikkö	0 8	50	2584 4029	1445	CO ₂ g/m ² /v	Moilanen ym. 2002
M-Tkg II män- nikkö	0 5 12	12—13	873 1541 1743	668 870	CO ₂ g/m ² /v	Moilanen ym. 2013a
Puolukka-Tkg	0 5	1 ja 2	525 ja 863 474 ja 858	-28	CO ₂ g/m ² /v	Maljanen ym. 2014
Puolukka-Tkg	0 5	1 ja 2	36 ja 19 25 ja 18	-6		
Jäkälä-Tkg	0 5	2	45 48	3		
M ja puolukka valt. N	0 3,3 6,6	1,2 ja 4- 5	667, 933 ja 1242 657, 968 ja 1178 642, 937 ja 1110	-9,5 -38	CO ₂ g/m ² /v	Ernfors ym. 2010
T valt. N (kuiv)	0 3,1	1 ja 2	1119 ja 1483 1338 ja 1543	139		
M valt. L (kuiv)	0 3,3 6,6	1 ja 2 4 ja 5	1700 ja 1760 1370 ja 1530 1410 ja 1470 1200 ja 1560 1380 ja 1350 1180 ja 1510	-180 -235		Klemedtsson ym. 2010 ja Rütting ym. 2014
Turvekenttä	0 3,3 0 + mät. 3,3 + mät. + tasointus 3,3 + mät.	1 ja 2	1051 ja 876 1664 ja 1489 1577 ja 1139 2104 ja 2104 2014 ja 1664	613 394 1139 876		Silvan & Hytönen 2016

Kokeissa ilmenneiden CO₂-päästöjen vähenemisen taustalla saattaa olla se, että tuhkalannoitus vaikuttaa puuston kasvun lisäämisen ohella myös muun kasvillisuuden hiilen sitomisen kykyyn. **Suomessa** toteutetussa tutkimuksessa viiden eri lannoiteseoksen (puutuhka 7,9 t/ha, puu-turvetuhka 6,3 t/ha, turvetuhka 4,8 t/ha, turvetuhka-biotiitti 6,3 t/ha ja PK-lannoite 0,6 t/ha) vaikutuksia tutkittiin hieskoivun

istutusalueella korjatulla turvesuolla. Neljän kasvukauden jälkeen pohjakasvillisuus korjattiin, ja karikkeen, kasvillisuuden ja taimien hiilen varastointi määritettiin massaperusteisesti. Keskeisenä tuloksena pohjakasvillisuuden todettiin olevan metsän kasvun alkuvaiheessa tärkeämpi hiilinielu kuin itse puuntaimien. Tehokain hiilen sidontavaikutus oli kontrolliin verrattuna tuhkalannoitusalueella, jossa puut ja muu kasvillisuus ja karike sitoivat hiilidioksidia yhteensä 1025 g/m²/v, kun kontrollialalla hiilidioksidia sitoutui 294 g/m²/v. (Huotari, Tillman-Sutela, & Kubin 2009.)

Toisessa vastaavassa kokeessa tutkittiin myös tuhkalannoituksen (3,3 t/ha) ja mätästyksen vaikutuksia käytöstä poistetun turvesuon (Piispanneva) CO₂-päästöihin ja kasvillisuuden palaamiseen. Koealueiden maaperä käsiteltiin eri tavoin ensimmäisenä tutkimusvuonna. Toisena vuonna niille kylvettiin tai istutettiin erilaisia energiapuulajeja. Kasvillisuuden lisääntymistä koealueilla seurattiin ja maaperästä vapautuvaa CO₂:ta mitattiin. Kasvillisuuden määrän perusteella arvioitiin laskennallisesti maahengityksen CO₂-tasoa. Tulosten perusteella todettiin, että tuhkalannoitus ja mätästys lisäsivät maaperästä vapautuvaa CO₂:ta, ja suurin lisäys oli, kun koealalla toteutettiin sekä lannoitus, mätästys että tasoitus: 1139 g CO₂/m²/v. Toisaalta tuhkalannoitus myös tehosti kasvillisuuden palaamista alueelle, jolloin maahengityksen tuottama CO₂ väheni. (Silvan ym. 2016.)

4.4 Yhteenveto

Selvityksen perusteella tuhkalannoitus 1—5 t/ha levitysmäärällä parantaa kangasmetsissä maaperän laatua ja biologista aktiivisuutta. Useimmiten tuhka on ollut irtotuhkaa (vanhemmat kokeet), mutta myös rakeistettua ja/tai itsekovetettua tuhkaa on käytetty. Yksittäisissä kokeissa on saatu positiivinen kasvuvaikutus myös puhtailla tuhkillä taimikoissa ja varttuneillakin puilla, mutta selkeämmin positiivinen kasvuvaikutus on saatu, kun tuhkaa on hyödynnetty yhdessä typen kanssa. Tulosten mukaan vaikutus on ollut jopa parempi, kuin pelkällä typpilannoituksella. Typpilannoitteen tyypillä (kemikaali) ei ole ollut näkyvää merkitystä, ja soveltuva typpiannos on ollut noin 150—400 kg/ha. 15-vuotisessa tutkimuk-

sessä tuhka-annos 3 t/ha typpilisällä antoi yli 60 % tilavuuskasvun lisäyksen vuositain lannoittamattomaan verrattuna ensimmäisellä viisivuotis-tarkastelujaksolla. Vastaavaan tulokseen on päästy myös Ruotsalaisessa tutkimuksessa. Kangasmetsissä toteutettujen kokeiden määrä on kuitenkin vähäinen, ja lisää tutkimusta tarvitaan tulosten vahvistamiseksi. Maaperäanalyysillä määritetty metsämaan ravinnetarve voi olla hyvä indikaattori valittaessa typpi- ja fosforilannoitteiden määriä.

Tuhkalannoituksen (0,5—20 t/ha) vaikutuksista turvemaiden puuston kasvuun on paljon tutkimustuloksia, ja vaikutukset on hyvin raportoitu. Tuhka on joissain koh-teissa lisännyt puuston kasvua hitaammin kuin kaupallinen PK-lannoite (0,4—0,5 t/ha, kertalannoitus), mutta pitkällä aikavälillä tuhkalannoituksella saadaan jopa parempi, pitkäkestoinen ja voimakas kasvureaktio. Merkittävimmät tulokset on saatu ojitetuilla soilla, joissa ojituksen jälkeen puiden kasvu ei ole käynnistynyt luontaisesti eikä istutusten avulla. Tuhkalannoituksen jälkeen kasvu on käynnistynyt ja jatkunut hyvänä pitkään. Tuhkalannoituksen vaikutus kasvuun on ollut tilastollisesti merkittävä lähestulkoon kaikilla koealoilla, runkopuun vuosituotos-ten lisäyksen vaihdellessa 1—11 m³/ha/v.

Tuhkalannoituksella on myös osoitettu olevan vaikutusta maahengitykseen eli hiilidioksidin vapautumiseen maaperästä. Tuhkalannoitus kiihdyttää maaperän mineralisoitumista ja orgaanisen aineksen hajoamista, lisäten näin hiilidioksidipäästöjä samaan aikaan kun se tehostaa kasvillisuuden lisääntymistä. Kangasmetsien osalta summana voidaan todeta, että maahengitys lisääntyy tuhkalannoituksen vaikutuksesta selvemmin lämpimillä alueilla, mitä enemmän maaperässä on orgaanista ainesta. Sitä tapahtuu enemmän myös, kun maaperässä ei ole typpeä; myös typpilisäys tuhkalannoituksen yhteydessä vähensi vaikutusta maahengitykseen. Tulosten perusteella näyttää myös siltä, että mitä enemmän tuhkaa käytetään, ja erityisesti jos se on irtotuhkaa, maaperän pH nousee selvemmin, ja tällöin maahengitys lisääntyy. Kohtuullinen määrä rakeistettua tuhkaa typpilisällä viileän ilmaston kuivahkoihin kangasmetsiin lisää maahengitystä vähiten, ja samalla lisää myös puuston kasvua, joka kompensoi hiilidioksidipäästöä.

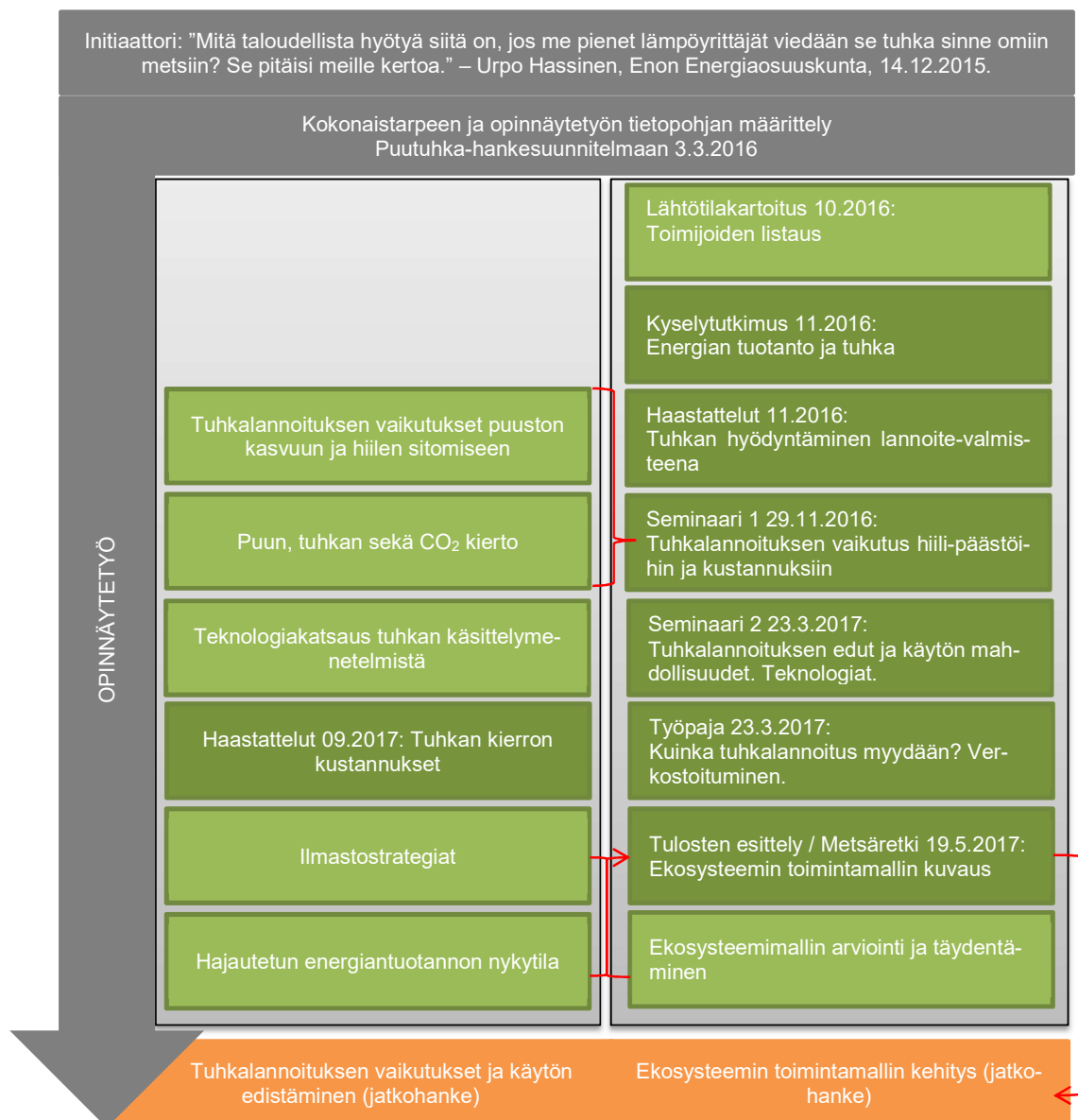
Turvemetsien maahengityksen osalta johtopäätöksiä ei voida tehdä toistojen ja systemaattisten tulosten puuttuessa. Ruotsissa saadut tutkimukset viittaavat siihen, että maahengitys ei lisäänny tuhkalannoituksen vaikutuksesta, ja vastaaviin tuloksiin päästiin kuivemmilla turvekankailla. On myös kokeilla osoitettu, että puiden ja myös muun kasvillisuuden lisääntyminen kompensoivat maahengitystä tehokkaasti. Laskelmien mukaan numeerinen hiilidioksidipäästön lisäys ei toisaalta ole vertailukelpoinen suure, sillä se ei huomioi suoraan tätä vaikutusta kasvillisuuden lisääntymiseen. Tehtyjen laskelmien mukaan puun kasvun lisäyksen ansiosta lannoitetun kohteen nettohiilipäästö on ollut alhaisempi kuin lannoittamattomalla kohteella.

5 Kehittämistyö

Kehittämistyön tarve määrittyi Puutuhka-hankkeen seminaarissa 14.12.2015, jossa Enon Energiaosuuskunnan edustaja esitti, että tulisi selvittää, mitkä ovat ne taloudelliset edut, jotka puutuhkan käyttö metsälannoituksessa voi tuoda yksityiselle metsänomistajalle ja hajautetun energiantuotannon edustajalle. Tämän kysymyksen innoittamana suunniteltiin ne toimenpiteet ja työvaiheet, jotka tarvitaan, jotta kysymykseen voidaan vastata, ja jotta tuhkan käyttöä voidaan lisätä tulevaisuudessa myös pienten tuhkan tuottajien osalta. Suunniteltu ja toteutettu prosessi on esitetty kaavakuvassa 3.

Kuvassa vaaleamman vihreällä pohjalla on esitetty ne toimenpiteet, jotka toteutettiin erillisinä selvityksinä käytännön kehittämistyön tukemiseksi. Tummemman vihreällä pohjalla on ne käytännön toimenpiteet, joissa tehtiin vuorovaikutusta sidosryhmien kanssa.

Seminaarissa 1 esiteltiin kohderyhmille tämän opinnäytetyön teoriaosuuden tuloksia, sekä kehittämistyön alussa toteutetun haastattelun tuloksia. Tuhkan ravinteiden sekä hiilidioksidin kierron prosessia ja kustannusrakenteita kuvattiin havainnollisella kuvalla. Tavoitteena oli aktivoida kohderyhmiä sekä lisätä heidän tietoisuuttaan aihepiiriin.



Kuva 3. Opinnäytetyön kehittämistyön prosessi.

Seminaarissa 2 esiteltiin käytännön tasolla teknologioita, joita tarvitaan tai voidaan hyödyntää tuhkan rakeistamisessa. Tietoa käytettiin pohjalla työpajassa, joka järjestettiin seminaarin 2 yhteydessä. Seminaarien esitysten sisältöä ei tarkastella lähemmin tässä opinnäytetyössä. Ne ovat saatavilla ”Puutuhka kivennäismaiden metsien lannoituksessa” -hankkeen internet-sivuilla (Tapio 2017).

5.1 Lähtötilakartoitus

Alueelliset lämpölaitostoimijat kartoitettiin Eviran lannoitevalmistajien rekisteristä. Tämän lisäksi etsittiin toimijoita yrityshakemistoista. Toimijoita varten laadittiin haastattelulomake (liite 1), jossa kysyttiin numeerisia tietoja polttoaineisiin, tuotantoon ja tuhkaan liittyen. Lisäksi keskustelun avauksina oli kysymyksiä tuhkan hyödyntämisen nykytilaan liittyen.

Haastattelut toteutettiin puhelimitse sekä muutamien vastaajien osalta saatiin tuloksena kirjallisesti täytetyt lomakkeet. Kaikkiaan 33 puuta polttoaineena käyttävää laitosta alueellisista 46 laitoksesta vastasi kyselyyn. Tulosten perusteella laadittiin taulukkomuodossa yhteenveto laitosten hyödyntämistä polttoaineista sekä tuhkan laadusta. Lisäksi laadittiin yhteenveto toimijoiden käsityksistä tuhkan kiertäykseen liittyen.

5.1.1 Kyselytutkimus: Energian tuotanto ja tuhka

Kyselyyn vastanneista laitoksista 21 oli alle 5 MW laitoksia, ja ainoastaan yksi oli suuruudeltaan yli 20 MW laitos. 21 laitosta hyödynsi polttoaineenaan ainoastaan puuperäisiä polttoaineita, ja 12 laitoksella puupolttoaineiden ohella käytettiin polttoaineena turvetta. Taulukossa 9 on esitetty yhteenlasketut polttoaineiden tonnimäärät (ilmoitettu tai laskennallinen) 33 laitoksen osalta, sekä myös ilmoitettujen tai laskennallisten tuhkan massamäärien prosentuaalinen osuus polttoaineiden massamäärästä. Tulokset ovat vain suuntaa-antavia, sillä laitokset ilmoittivat polttoaineiden määrät noin-arvoina ja eri yksiköissä, ilman kosteustietoja. Irtokuutioiden ilmoitetut hakemäärät muutettiin tonnimääräisiksi kertoimella 0,3. Irtokuutioiden ilmoitettu tuhkan määrä muutettiin tonnimääräiseksi kertoimella 1,2.

Tuloksista nähdään, että alueellisesti käytetyistä polttoaineista hake ja kuori ovat merkittävimmät, yhteenlaskettuna 59 % osuudella. Toiseksi eniten energian tuotannossa hyödynnetään turvetta, lähes 30 %. Puupurun osuus oli noin 12 %, ja purusta valmistettua pellettiä hyödynnettiin ainoastaan kahdella laitoksella.

Taulukko 9. Käytetyt polttoaineet haastatelluissa laitoksissa, sekä syntyvän tuhkan määrä.

Polttoaineet	Tonnia/vuosi	%
Hake, kuori	119 923	42,9
Puutähde, puru	33 991	12,2
Pelletti	258	0,10
Kuori	45 005	16,1
Turve	80 365	28,7
Tuhka	5129	1,83 %

Alueellisesti syntyvän tuhkan laatua arvioitiin 24 laitoksen toimittamien analyysitulosten perusteella. Tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 10. Tulosten perusteella nähdään, että verrattaessa maksimipitoisuuksia lannoitevalmistelainsäädännön raja-arvoihin, yksittäisiä tapauksia esiintyy, joissa arseenin, kromin tai sinkin pitoisuus saattaa ylittää annetun raja-arvon metsäkäytössä. Laitoksista 33 hyödynsi tuhkaa lannoitevalmisteenä. Neljä laitosta ilmoitti, että tuhkaa on hyödynnetty myös maarakentamisen kohteissa.

Taulukko 10. Hajautetun energiantuotannon kyselytutkimuksessa saatujen analyysitietojen yhteenveto. Haitallisten aineiden sekä ravinteiden minimi- ja maksimipitoisuudet sekä lainsäädännön raja-arvot.

	Min mg/kg ka	Max mg/kg ka	Metsäkäyttö mg/kg ka	Muu käyttö mg/kg ka
Arseeni (As)	<0,1	20 / 44	40	25
Elohopea (Hg)	<0,1	0,1 / 0,49	1	1
Kadmium (Cd)	<0,1	23	25	2,5
Kromi (Cr)	11	210 / 820	300	300
Kupari (Cu)	22	210	700	600
Lyijy (Pb)	0	120	150	100
Nikkeli (Ni)	13	110 / 130	150	100
Sinkki (Zn)	40	1700 / 10000	4500	1500
Boori	74	360		
Kalsium	43	238		
Kalium	0	81		
Fosfori	1,8	54		
TOC	0,00	38		
Neutraaloiva kyky Ca %	6,40	35		

5.1.2 Haastattelu: Tuhkan hyödyntäminen lannoitevalmisteenä

Haastattelun kysymykset olivat:

1. Mitkä ovat suurimmat haasteet tuhkan lannoitevalmistekäytössä omasta näkökulmasta?
2. Onko lähellä toimijoita, joiden kanssa olisi kiinnostusta/mahdollisuus ryhtyä yhteistyöhön?
3. Tiedättekö, onko alueella kiinnostusta tuhkan käytölle?
4. Kuinka suureksi arvioitte vuosittaisen tuhkan käyttömahdollisuuden lähi-alueilla (tonnia)?
5. Kuinka paljon olisitte valmis Investoimaan esim. käsittelylaitteistoihin ja kaupallistamisen vaatimiin muihin toimenpiteisiin tuhkan kierrätyksen tehostamiseksi?
6. Muita ajatuksia (esim. oma näkemys lannoitusvaikutuksista)?

Suurimpina haasteina lannoitevalmistekäytölle vastaajat pitivät käytännön ongelmia liittyen tuhkan keräämiseen ja noutamiseen säännöllisesti sekä levittämiseen (irtotuhka). Jos tuhkaa on vähän, sitä tulisi kerätä pidemmältä aikaa ja välivarastoida laitoksella, mutta varastointi vaatisi investointeja. Myöskään eri toimijoiden tухkien yhdistäminen ei ole mahdollista. Suora toimitus asiakkaille ei myöskään ole onnistunut.

Myös olemassa olevia levitystekniikoita pidettiin haasteena: irtotuhka pölisee ja levittäminen ei ole taloudellisesti järkevällä hintatasolla. Toisaalta todettiin, että käyttöön liittyvät haasteet koskevat lähinnä niitä toimijoita, jotka ylipäänsä huolehtivat lannoituskäytöstä käytännön tasolla. Tällöin haasteena on myös tuotteen kaupallistaminen. Toisaalta toimitus esim. kaupallisille jalostajille ei ole tuhkan tuottajalle kannattavaa kuljetuskustannusten ja porttimaksujen takia.

Tuhkan laatuun liittyvinä haasteina todettiin liian alhaiset ravinnepitoisuudet tuhkassa, jossa on turpeen tuhkaa mukana. Myös korkeammat bariumin ja kadmiumin pitoisuudet tuhkassa ovat olleet joillekin toimijoille haasteena. Tämä tarkoittaa, että raja-arvot eivät pidä, ja tuhkaa ei toisinaan hyväksytä lannoitevalmisteksi.

Useissa vastauksissa tuotiin esille myös taloudelliset haasteet ja kustannus-hyödyn näkökulma: laitoksen saama hyöty on minimaalinen vaadittuun panokseen nähden. Tuhkan käyttö lannoitevalmisteenä edellyttää tuhan tuottajalta ajankäyttöä, resursseja, taloudellista sitoutumista (analyysit, käytännön kustannukset) sekä ylimääräisiä paperitöitä.

Yhteistyön osalta todettiin, että jo tällä hetkellä yhteistyötä tehdään osuuskuntien sisällä tai paikallisten metsänomistajien kanssa. Yhteistyökumppaneiksi toivottiin löytyvän esimerkiksi julkisen puolen metsänomistajia. Toisaalta todettiin, että yhteistyössä tulisi olla käytännön järkeä mukana, ja yhteistyötahojen täytyisi sijaita toisiinsa nähden lähekkäin.

Kiinnostusta tuhkan lannoituskäyttöön tiedetään toisaalta olevan, sillä kyselijöitä on ollut. Tuhkaa on kyselty etenkin metsälannoitteeksi. Tietoa käytettävissä olevista määristä eli alueellisesta metsäpinta-alasta, jolle tuhkaa voisi levittää, ei toisaalta osattu antaa arviota.

Lämpöyrittäjistä osa oli kiinnostunut investoimaan esimerkiksi käsittelylaitteistoihin ja kaupallistamisen vaatimiin muihin toimenpiteisiin tuhkan kierrätyksen tehostamiseksi noin 1000—2000 euroa. Investoinnin osalta tulisi kuitenkin kyetä esittämään se käytännön hyöty, joka investoinnilla on saavutettavissa. Osalla ei ollut lainkaan investointihalukkuutta, vaan ennemmin toivottiin löytyvän ulkopuolinen toimija, joka huolehtisi käytännön ratkaisuista.

Kaikkiaan toimijat olivat kuitenkin sitä mieltä, että olisi tärkeää saada tuhka käyttöön. Käyttäjiä tulisi olla lisää; tulisi muistaa, että tuhkalannoitus on metsänhoidossa yksi kannattavimmista investoinneista. Tuhka on hyvä terveyslannoite etenkin turvekankaille. Tämän johdosta tuhkan tuottajat toivoisivat, että tuhkasta voitaisiin jopa maksaa heille.

5.2 Tuhkan kierron kustannustarkastelu

Ravinnekierron kannalta on tärkeää, että keinotekoisien lannoitevalmisteiden ohella lannoitevalmistemarkkinoille ja metsänhoitoon käytettäväksi pääsevät myös teollisuuden ja energian tuotannon sivuvirrat, joiden sisältämät ravinteet ovat peräisin luonnosta. Näitä sivuvirtoja ovat puun ja turpeen sekä muiden biomassojen poltossa syntyvät tuhkat.

Sitran tilaamassa raportissa *Ravinteiden kierron taloudellinen arvo ja mahdollisuudet Suomelle* (Aho, Pursula, Saario, Miller, Kumpulainen, Päällysaho, Kontio-kari, Autio, Hillgren, Descombes 2015, 4) kirjoitetaan:

Ruoka- ja rehukasvien tai puun korjaaminen poistaa ravinteita, joiden korvaamista tehdään teollisesti valmistetuilla lannoitteilla. -- Kierrätysravinteiden käytöllä voidaan korvata mineraalisia lannoitteita ja tehostaa niukkenevien ravinnevarojen käyttöä. Kun ravinnekiertoa suljetaan, vähenevät myös hukasta ja ravinteiden kertymisestä syntyvien valumien aiheuttamat ympäristöhaitat, kuten vesistöjen rehevöityminen.

5.2.1 Tuhkan ravinteiden kierto ja kustannusvaikutus

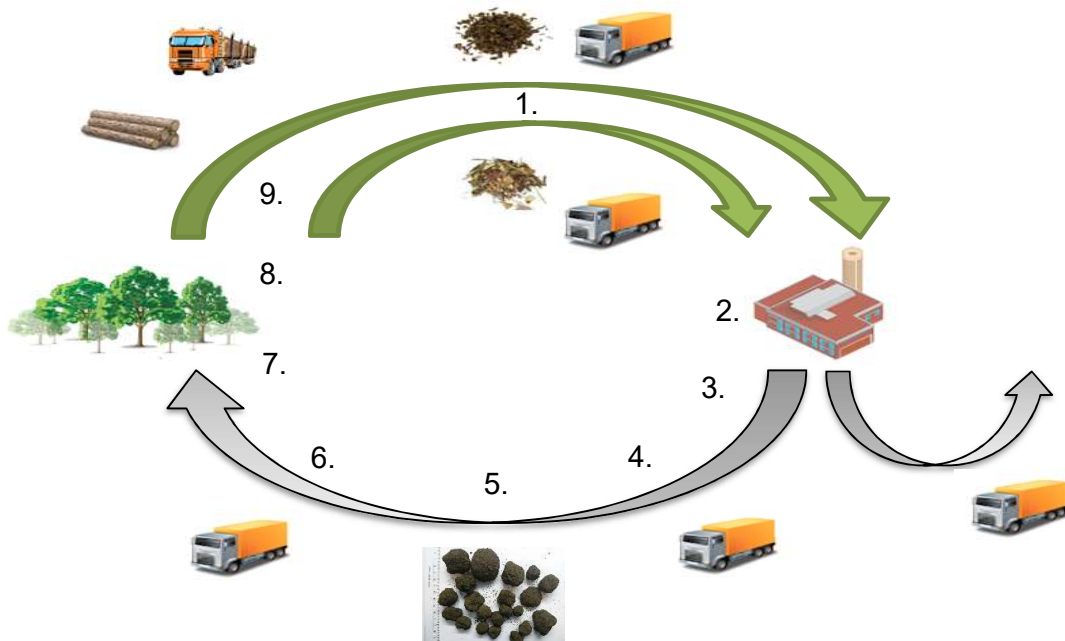
Uusiutuvan energian tuotannon synnyttämien seostuhkien vuosittainen määrä on 2010 arvion mukaan ollut 620 000 tonnia (Ympäristöministeriö 2011, 67). Toimijoille tämä on merkittävä kustannuserä kaatopaikoille sijoitettuna. Energiantuotantolaitokset, joilla syntyvän tuhkan määrä on suuri, ovat kyenneet tuotteistamaan tuhkinsa joko itse rakeistamalla tai kaupallisten toimijoiden kautta (Esim. Ecolan Oy, Tuhkahukka Oy, Rakeistus Oy jne.).

Pienemmille toimijoille, käytännössä hajautetun energiantuotannon toimijoille, sivutuotteena syntynyt tuhka on kuitenkin hankalaa kierrättää: pienten määrien kuljetus ja lannoituskäytön edellyttämä rakeistaminen on kallista ja kannattamatonta. Yleinen käsitys on, että tuhkan levittäminen on myös hankalaa.

Mikäli hajautetun energiantuotannon tuhkat voitaisiin kierrättää tehokkaammin takaisin metsään tai pelloille, lannoituksen vaikutuksesta kasvillisuuden kasvu tehostuu, ja tämä kompensoi tuhkan käsittelyn kustannuksia. Merkittävää on myös puuston lisäkasvun myötä kasvava hiilen sitoutuminen metsäbiomassaan.

5.2.2 Puun ja tuhkan kiertokulku

Kiertoprosessi voidaan kuvata listaamalla tuhkan muodostumisen ja hyötykäyttöön saattamisen sekä käytön vaiheet. Prosessissa on huomioitu puun sekä tuhkan täysi kierto. Kierto on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Puun ja tuhkan kierto.

Puun ja tuhkan kierron vaiheet ovat:

1. Energiapuun toimitus energialaitokselle, CO₂ päästö
2. Energian tuotanto ja tuhkan muodostuminen, CO₂ päästö
3. Koonti ja varastointi
4. Lastaus, kuljetus ja purku, CO₂ päästö

5. Jalostustoimenpiteet
6. Lastaus, kuljetus ja purku, CO₂ päästö
7. Hyödyntämistoimenpiteet
8. Vaikutukset, CO₂ sidonta
9. Puukauppa (talous- ja energiapuu)

5.2.3 Kustannustarkastelu

Kustannustarkastelun pohjalle valittiin skenaario, jossa tarkastellaan kiertoprosessin toteutumista kahden erikokoisen lämpölaitoksen osalta. Tässä skenaariossa esitetään koko ketjun hintarakenne, ja kuinka se suhtautuu toisaalta tuhkan tuottajaan ja toisaalta tuhkan hyödyntäjään. Tuhkan tuottajan kannalta tarkastelujaksona on yksi vuosi. Tuhkan hyödyntäjän kannalta kustannuksia on järkevintä tarkastella sen ajanjakson osalta, kun tuhka vaikuttaa metsämaassa ennen uutta lannoitusta tai hakkuuta, 30 vuotta. Hintarakenne on esitetty taulukossa 11.

Tuhkan tuottajan osalta hyödyntämisen kustannuksen verroiksi on annettu tuhkan sijoittelu kaatopaikalle, ja tälle hinnaksi on laskelmassa annettu 130 €/t. Tuhkan vastaanoton listahinnat alueella vaihtelevat välillä 126,37 €/t (Puhas Oy 2017) ja 158,20 €/t (Jätekukko Oy 2017). Hinnassa ei ole huomioitu mahdollisia muita läjitykseen liittyviä kuluja. Kuljetuskustannus on laskettu kuljetusliikkeen laskurilla (Sandholm 2017) noin 50 km kuljetusmatkalle. Kustannus on 360 €/20t eli 18 €/t.

Laitos 1 on pienikokoinen lämpölaitos, sillä näiden tuhkan kierrätykseen liittyy tällä hetkellä eniten haasteita: tuhkaa ei voida varastoida ja pienten erien kuljetus on hankalaa. Se on kokoluokaltaan 2 MW laitos, ja käyttää energiantuotannossaan puhdasta metsähaketta. Muodostuvan tuhkan määrä on noin 30 i-m³ eli 40 tonnia vuodessa. Tuhka toimitetaan kaksi kertaa vuodessa vastaanottavalle taholle, yhden erän suuruus 20 tonnia. Aktiivisen lämmityskauden ollessa syyskuu—huhtikuu, tuhkan varastointiaika on kohtuullinen 4 kk ja ensimmäinen toimitus sijoittuu tuhkan lannoituksen kannalta sopivaan aikaan tammikuulle. Sama 20

tonnin määrä soveltuu noin 5 ha suuruisen alueen kertalannoitukseen maalevityksellä. Kaikkiaan tämän suuruiselta laitokselta tuhkaa syntyy vuosittain noin 10 ha alueen lannoittamiseen.

Laitos 2 on kooltaan suurempi. Suurilla lämpölaitoksilla tuhkaa muodostuu enemmän, ja tyypillisesti sen varastointi on valmiiksi organisoitu. Tuhka voidaan toimittaa suuremmissa erissä ja jopa säiliöautoilla vastaanottaviin kohteisiin. Lämpölaitoksen 2 koko on 10 MW, ja energiantuotannossa syntyvän tuhkan määrä on 200 tonnia. Tuhka toimitetaan vastaanottavalle taholle säiliöautolla á 38 tonnia (maksimikuorma, kuusi kuljetusta) tai kappalekuljetuksina á 20 tonnia (10 kuljetusta). Kaikkiaan laitoksella muodostuva tuhka riittää noin 50 ha metsäalan lannoitukseen.

Tuhkan kuljetuksesta vastaanottavalle taholle vastaa kaupallinen toimija. Kustannuslaskelmassa hinnat kuljetuksille on laskettu kuljetusliikkeen toimittamalla laskurilla (Sandholm 2017). Tuhkan vastaanottoon skenaariossa on kaksi toimijaa, jotka sijaitsevat 100 ja 400 km etäisyydellä tuhkan tuottajasta. 20 tonnin kuljetettavan määrän rahtihinta 100 km matkalla on 360 € eli 18 €/tonni ja 400 km matkalla 650 € eli 32,5 €/tonni. Täysperävaunulla 38 tonnin kertakuljetus 400 km päähän maksaa 970 € eli 25,5 €/tonni.

Toimijoiden vastaanottohintana on käytetty laskelmassa 15 ja 35 euroa kummallakin etäisyydellä. Toimijoiden tuottaman palvelun hintaan kuuluu tuotteen hyväksyntään liittyvät paperityöt ja tuotemerkinnät, sekä tuotteen myynti ja markkinointi. Hinnoissa ei ole huomioitu mahdollisia säiliökuljetuksiin liittyviä hinnanalennuksia tai tuhkan kosteuspuhtaisuuteen liittyviä hinnankorotuksia.

Kaikissa tapauksessa metsälevityksen huolehtii kolmas osapuoli, joka laskuttaa työstä metsänomistajaa. Tuhka voidaan levittää maalevityksenä, jolloin sen hinta vaihtelee 250—500 €/ha. Yli 10 ha aloille tuhka voidaan levittää lentolevityksenä, kopterilla, ja tällöin hinta vaihtelee 420—550 €/ha. (Nousiainen 2017.)

Taulukko 11. Lämpölaitostoimijan kustannusrakenne, €/v, ja metsänomistajan ja tuhkan hyödyntäjän kustannusrakenne, €/30 v (alv 0 %). Kulut merkitty miinusmerkkisinä.

Lämpölaitoksen kustannusrakenne								
	Lämpölaitos 1				Lämpölaitos 2			
Teho	2 MW				10 MW			
Hake t/v	4000				20 000			
Tuhka t/v	40				200			
Analyyysi € ¹	-273,50				-273,50			
Tuhkan toimitus jätteenä								
Kuljetus € ²	-720				-3600			
Vastaanotto € ³	-5200				-26 000			
NETTO €/v	-6193,5				-29 873,5			
Tuhkan toimitus lannoitevalmisteeksi								
Etäisyys km	100		400		100		400	
Kuljetus € ⁴	-720		-1300		-3600		-5820	
Vastaanotto €								
15 €/t ja 35 €/t	-600	-1400	-600	-1400	-3000	-7000	-3000	-7000
NETTO €/v	-1320	-2120	-1900	-2700	-6600	-10600	-8820	-12820
Metsänomistajan eli tuhkan hyödyntäjän kustannusrakenne 30 v ajanjaksolla								
Metsäala	10 ha				50 ha			
Ei lannoitusta								
Runkopuun kasvu m ³ /30v ⁵	3000				15 000			
Tuotto €/30v ⁶	141 000				705 000			
Tuhkalannoitus								
Kuljetus €	Sisältyy käytön hintaan							
Levitysala (4 t/ha)	10 ha				50 ha			
Levitystapa	maalevitys		kopteri		maalevitys		kopteri	
Levityskustannus €/30v ⁷	-3500		-5000		-17 500		-25 000	
Runkopuun lisäys m ³ /30v ⁸	600				3000			
Arvon lisäys €/30v ⁶	28 200		28 200		141 000		141 000	
NETTO €/30v	24 700		23 200		123 500		116 000	

¹ Hinnasto: Eurofins Viljavuuspalvelu 2017.

² Laskuri: Sandholm 2017, 20 t erissä, matka 50 km.

³ Hinnastot: Keskimääräinen jätekeskusten vastaanottohinta 130 €/t.

⁴ Laskuri: Sandholm 2017, muut 20 t erissä, lämpölaitoksen 2 toimitus 400 km päähän 38 t kuljetuserissä (6 kpl).

⁵ Keskimääräinen puun tuotto ilman lannoitusta 10 m³/ha/v, laskenta levitysalan osalta 30 vuodessa.

⁶ Tilasto: Luonnonvarakeskus 2017b. Teollisuuspuun kantohinta, Savo-Karjala 2016: tukkipuu 47 €/m³ (keskiarvo).

⁷ Levityshinta laskelmassa maalevitykselle 350 €/ha ja kopterilevitykselle 500 €/ha.

⁸ Keskimääräinen kasvun lisäys 2 m³/ha/v, laskenta levitysalan osalta 30 vuodessa.

Lämpölaitosten osalta on tässä kustannusrakenteessa mielekästä huomioida ai-noastaan tuhkan käsittelyyn ja toimittamiseen liittyvät kustannukset. Pienem-mällä lämpölaitoksella tuhkan lannoituskäyttöön toimittamisen keskimääräinen vuotuinen kustannus (neljän eri toimitustavan keskiarvo) on 2010 euroa, joka on 1,20 % energiapuun hankintahinnasta 168 000 €/v (hintaa perustuu tilastoon:

Luonnonvarakeskus 2017a). Suuremmalla laitoksella tuhkan hyödyntämisen vuotuinen kustannus on keskimäärin 9710 euroa, joka on 1,16 % puun hankintahinnasta 840 000 €/v (tilasto: Luonnonvarakeskus 2017a).

Tuhkan vastaanoton ja jalostuksen hinnat ovat puhelinhaastattelujen perusteella saatuja arvioita nykyisten toimijoiden hintatasosta. Kilpailutilanteesta johtuen tarkempaa erittelyä tai haastateltujen nimitietoja ei voida antaa. On mahdollista, että hinta on kahden välisissä sopimuksissa alhaisempi tai korkeampi. Tuhkan jalostajan osalta ei myöskään voida antaa tarkempaa kustannusrakennetta, sillä toimintatavat voivat poiketa toisistaan merkittävästi. Jalostukseen voi kuulua tuhkan itsekovetus ja murskaus tai vaihtoehtoisesti rakeistus erillisellä rakeistimella. Tuhkalannoitteen laatua saatetaan myös parantaa lisäämällä siihen lain mukaan sallittuja ravinteita.

Metsänomistajalle hinta on sama, osti hän tuhkalannoituksen keneltä toimijalta tahansa. Puun tuoton osalta on tässä tehty karkea laskelma sekä lannoittamattoman että lannoitetun metsän tukkipuun 30 vuoden tuoton osalta. Ilman lannoitusta tukin kasvu on laskelmassa $10 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$. Tuhkalannoituksen vaikutus eli lisäys runkopuun määrään on $2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$. Runkopuun arvona on käytetty teollisuuspuun kaupan tukkipuun kantohintojen (kaikki lajit ja hakkuut) keskiarvoa 47 €/m³ vuodelta 2016 (Luonnonvarakeskus 2017b). Runkopuun ohella puustosta saadaan myös kuitupuuta ja lisäksi metsästä on kerättävissä mahdollisesti myös energia-aineksia. Tämän määrää ja arvoa ei ole huomioitu laskelmassa.

Tuloksesta nähdään, että runkopuun tuoton lisäys tuottaa kaikissa tapauksissa metsänomistajalle 30 vuoden tarkastelujaksolla merkittävän lisätuoton, noin 2400 €/ha. Jos metsä kasvaa ilman lannoitusta keskimäärin $10 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$, eli $300 \text{ m}^3/\text{ha}/30\text{v}$ ja tuotto 14 100 €/ha/30v, tämä tarkoittaa noin 17 % lisätuottoa hehtaaria kohti.

5.3 Työpaja: Tuhkan lannoituskäytön tehostaminen

Tuhkan lannoituskäytön tehostamisen mahdollisuuksien selvittämiseksi järjestettiin työpaja. Työpajassa alueelliset hajautetun energiantuotannon toimijat sekä muut sidosryhmät ideoivat ja suunnittelivat paikallista ratkaisua tältä osin. Samalla pohdittiin yhdessä lannoituskäytön haasteita ja myynnin edistämistä.

Työpajaan osallistui 12 henkilöä tutkimusorganisaatioista tai konsultoinnista, kuusi henkilöä hajautetun energiantuotannon alalta, neljä henkilöä metsänhoidon organisaatioista sekä kolme henkilöä tuhkan käsittelyyn ja hyötykäyttöön erikoistuneista yrityksistä. Puutuhka-työpaja toteutettiin osana Puutuhka-seminaaria, joka järjestettiin Joensuussa 23.3.2017. Työpaja toteutettiin world café –metodilla.

Työpajassa osallistujat jakautuivat kolmeen eri pöytään, joissa oli kussakin eri pääteema, ja sen alla kysymykset. Ryhmät kiersivät työpajassa kaikki kolme pöytää. Jokaiselle ryhmälle täytettiin lomake keskustelun kuluessa, ja tulokset yhdistettiin. Työpajan tuloksista laadittiin yhteenveto. Lisäksi laadittiin syntyneen yhteistyömallin perusteella liiketoiminnallisen ekosysteemin runkoa, ja arvioitiin sen toteuttamisen mahdollisuuksia. Yhteenvetona saatu ratkaisumalli on alueellinen.

5.3.1 Tuhkalannoituksen yleistymisen mahdollisuudet

Työpajassa keskusteltiin yhtenä aiheena tuhkalannoituksen arkiseksi tuomisen mahdollisuuksista. Kun pohdittiin, *miten tieto parhaiten jalkautuu kentälle*, osallistujat totesivat, että tarvitaan kokonaisvaltaista lannoituspalvelua, erityisesti ei-aktiivisille metsänomistajille. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi salkunomistajia, jotka eivät itse huolehdi käytännössä metsänhoidosta, vaan joutuvat tilaamaan tähän palvelun. Tietoa metsänomistajille voisi välittää puukauppaa tehtäessä: puun ostajat toimisivat tiedon välittäjinä. Suora kontakti asiakkaisiin (maanomistajiin ja metsänhoitoyhdistyksiin) on mahdollinen myös urakoitsijoiden ja metsäpalvelujen tuottajien kautta. Uusi Luonnonvarakeskuksen julkaisema Biomassa-Atlas voisi toimia tietolähteenä.

Käytännön työn suunnittelu voi tapahtua ojitus- ja harvennussuunnitelmia tehtäessä, ja suomaiden uudistamisten yhteydessä. Näissä työvaiheissa on myös lannoitusta tehtävissä. Varsinaisen palvelun tuottajina voisivat toimia esimerkiksi metsä- ja maarakennusurakoitsijat: metsänhoito voisi tulevaisuudessa olla maarakennusurakoitsijoille uusi liiketoiminnan muoto kevättalvelle, jolloin heidän oma sesonkinsa on hiljaisempaa. Tähän liittyvän haasteen todettiin kuitenkin olevan se, että puuston harvennusta tehdään kesällä, jolloin maapohja ei kestä mahdollista lisärasitusta. Lisäksi, metsäurakoitsijoilla on kiire oman bisneksen kanssa, ja heitä ei välttämättä kiinnosta aihe joka vie huomion ydinbisneksestä

Lämpövoimalaitoksille tulisi luoda tuhkalannoitteesta sivutuote: tuhka pitää ajatella tuotteena, jolla on lisäarvoa. Tuhka tulee myös saada tuotteeksi, jota voi ostaa tavanomaisen lannoitesäkin vierestä. *Myyntiargumentteina* metsänomistajien suuntaan pidettiin tuhkan kiistattomia kasvuvaikutuksia: tuhka on tuottava lannoite etenkin turvemailla. Tältä osin pohdintaa aiheuttaa kuitenkin se, voidaanko tuhkalannoitusta pitää kannattavana investointina kivennäismailla.

Investoinnin osalta todettiin, että tuhkalannoituksen kertakustannus on melko suuri. Helposti ajatellaan, että tuhkan hintaa tulisi tässä käytössä laskea, koska se on nykyisin tuhkan tuottajille lähinnä kuluera, ja tällä perusteella tuhkalannoitetta myyville tahoille raaka-ainetta pitäisi olla saatavilla edullisesti.

Toisaalta todettiin, että tuhka on huoltovapaa lannoite, jolla on tasainen lannoitusvaikutus 30 vuoden ajan; keinotekoisia lannoitevalmisteita käytettäessä lannoitus on uusittava 10 vuoden välein. Työpajassa esitettiin myös mahdollisuus, että puut tottuisivat keinolannoitukseen: keinotekoinen lannoite menettää tehonsa kun puut oppivat vaatimaan sitä enemmän. Tämä nostaisi keinotekoisien lannoituksen kustannuksia.

Täten lannoitevalmisteen levityksen kertakustannus verrattuna kiertoaikaan johtaa joka tapauksessa siihen, että tuhkalannoitus on taloudellisesti kannattavampaa. Lisäksi, tuhkalannoituksen investointi voidaan helposti perustella sillä lisätuotolla jonka metsänomistaja investoinnista myöhemmin saa. Näiden seikkojen

perusteella voidaan laskea myös takaisinmaksuaikaa ja ansaintalogiikkaa lannoitusinvestoinnille.

Tärkeänä myyntiargumenttina pidettiin myös sitä, että tuhka on paras/ylivertainen saatavissa oleva luomukelpoinen lannoite: puutuhka kelpaa lannoitevalmisteeksi metsiin, jotka on tarkoituksena sertifioida luomukeruualueiksi. Todettiin, että keräilyalueiden luomusertifiointi tulee olemaan varmasti myyntivaltti myös puutuhkan käytölle. Tämä tuo kaivattua jalostusarvoa tuotteelle. On kuitenkin selvitetävää, onko puutuhkaa saatavilla tähän tarkoitukseen riittävästi, ja tuotetaanko tähän käyttöön soveltuvaa puutuhkaa luomusertifioitujen keräilyalueiden lähellä. Kaivataan myös tarkempaa tietoa siitä, miten tuhka vaikuttaa esimerkiksi luomukeruualueilta kerättäviin puolukoihin.

Tuhkalannoituksen myötä metsään palautuvat ne ravinteet ja hivenaineet, jotka ovat maaperästä puun kasvun yhteydessä siirtyneet puuainekseen ja korjuun myötä poistuneet. Tuhkan lannoituskäyttö on tärkeä osa ravinteiden luonnollista kiertokulkua. Tuhkalla voidaan edistää myös kokonaisvaltaista maanparannusta sen kalkitsevan vaikutuksen ansiosta. Tuhkaan voidaan myös lisätä booria ja kaliumia, jotka nostavat sen käyttöarvoa.

5.3.2 Hajautetun energiantuotannon toimijoiden verkostoituminen

Hajautetun energiantuotannon toimijoiden valmiuksia verkostoitumiseen arvioitiin työpajan keskusteluissa. Keskustelussa lähdettiin liikkeelle pohtimalla mahdollisuuksia lämpöyrittäjien keskinäiselle yhteistyölle. Todettiin, että perinteitä tältä osin on olemassa, esimerkiksi öljynostoringit, joissa tarjoukset toimittajilta pyydettiin yhdessä. Vastaavasti yhteisiä tarjouspyyntöjä voitaisiin jättää porttimaksujen osalta.

Uutena mahdollisuutena pidettiin yhteistä kanavaa, jonka kautta tuhkan myynti tapahtuisi metsänomistajille. Todettiin, että yhteistyön pohjalle tarvitaan palvelukonsepti, jossa palvelun tuottaja huolehtii mm. paperityöt ja tuhkan hyväksynnän. Tuhkan tuotteistaminen ja tarjolle tuominen on tärkeässä roolissa, ja työpajassa

pohdittiinkin, onko tämä vaihe edelleen kesken. Vaikka tuhka on paras tai jopa ainoa vaihtoehto suometsiin, joiden lannoituksen osalta ei ole kilpailua, näkemys on, että myynti ja kysyntä eivät tältä osin kohtaa.

Käytännössä yhteinen toimituskanava toteutuisi niin, että ulkopuolinen urakoitsija tulisi toteuttamaan työtä. Kannattavan liiketoiminnan takaamiseksi tuhka olisi lähtökohtaisesti annettava urakoitsijalle ilmaiseksi tai pientä korvausta vastaan; maksimihinnan vertailupohjana pidettiin kaatopaikkatoimituksen vastaanoton hintaa. Tuottajilla on tältä osin maksuhalukkuus olemassa, erityisesti vaikeammin kierrätettävän märkätuhkan osalta. Oletettiin, että myös käyttäjä olisi valmis maksamaan lannoitevalmisteesta.

Kannattavan ja sujuvan toiminnan takaamiseksi olisi urakoitsijan kanssa kyettävä tekemään 3—5 vuoden sopimukset, ja kuljetuskustannukset tulisi pitää kohtuullisina. Tämä tarkoittaa, että olisi löydettävä alueellinen ratkaisu, jossa toimijat sijaitsevat logistisesti lähekkäin. Myös sopiva urakoitsija olisi löydettävä.

Metsänhoidon organisaatiot olisi myös saatava toimintaan mukaan puhumaan käyttäjille tuhkalannoituksen puolesta. Tämä ei saisi muodostua toiminnan pulonkaulaksi. Kunnostushankkeiden lisääntyessä etenkin pitkäaikaisten metsänhoidon asiakkaiden katsottiin olevan potentiaalisia suoramyynnin kohteita. Alueellisten metsänhoidon roolia tulisikin pohtia jatkossa.

Pienemmille toimijoille, esimerkiksi osuuskuntamuotoisille energiayhtiöille on tällä hetkellä kuitenkin edullisinta toimittaa tuhkaa suoraan energiapuuta toimittavien, omien jäsenten metsiin.

5.3.3 Tuhkan käsittelyn mahdollisuudet

Kolmas aihepiiri työpajassa oli uudet mahdollisuudet tuhkan käsittelyyn. Pienillä, toisistaan kaukana sijaitsevilla toimijoilla on tunnetusti haasteena ollut saada kilpailukykyisiä tarjouksia olemassa olevilta kaupallisilta toimijoilta, jotka vastaavat

tuhkan noudosta, rakeistamisesta ja myynnistä. Pienten tuhkaerien kuljettaminen on kallista.

Tuhkan rakeistus on kuitenkin käytännössä kannattavaa: rakeistetun tuhkan levitys on helpompaa kuin irtotuhkan. Lentolevitykseen kelpaa ainoastaan rakeistettu tuhka. Ravinteet liukenevat rakeista hitaammin. Rakeiden varastointi on helpompaa. Kompaktoimalla rakeistetun tuhkan kosteuspitoisuus on sen verran alhainen, että se ei edes jäädy.

Osallistujien kokemusten mukaan Suomessa on vahvaa osaamista tuhkan rakeistamiseen; jopa ulkomailla ollaan kiinnostuneita suomalaisista tekniikoista. Tällä hetkellä käytössä olevia teknologioita ovat esimerkiksi rumpu- ja lautasrakeistin. Rakeistimia valmistavat mm. Joensuulaiseen Techwill-konserniin kuuluva Techwill Granulators Oy sekä Oululainen Rakeistus Oy. Rakeistus Oy:n ohella käytännössä tuhkan rakeistamista palveluna tuottaa Ecolan Oy.

Vaihtoehtona nykyisille laitteille esitettiin mm. peltobiomassojen pelletöintiin käytettyjä laitteita. Hajautetun energiantuotannon toimijoille voisi soveltua myös laboratoriomittakaavan edullinen pelletöintilaitte, jonka kapasiteetti on 30—50 kg/h. Muita mielenkiintoisia ideoita rakeistuksen osalta olivat mm. rakeistus yksinkertaisella puristimella, suoraan polttoprosessin jälkeisen kuljetushihnan yhteydessä, jolloin hihnalta saataisiin suoraan säkitettävää tavaraa. Hajautetun energiantuotannon toimijoille käytännöllisin ratkaisu lienee kuitenkin tuhkan itsekoveutus sekä murskaus Allu-kauhalla, joka on tavanomaiseen traktoriin liitettävä seu-lova kauhaosa.

Mielenkiintoisia olisivat myös erilaiset rakeistettavat seokset, joissa tuhka sekoitettaisiin kosteaan tuhkaan tai ravinnepitoiseen lietteeseen. Tällöin oikealla sekoitussuhteella voitaisiin vaikuttaa myös lopullisen lannoitevalmisteen ravinnepitoisuuksiin. Tällöin on kuitenkin huomioitava lannoitevalmiste-lainsäädäntö, joka sallii ainoastaan lainsäädännön vaatimusten täyttävien sivutuotteiden sekoittamisen.

Lannoitevalmisteita valmistettaessa sekoittamalla yhtä tai useampaa lannoitevalmistetta keskenään, tulee kunkin raaka-aineen täyttää lannoitevalmistelle tässä asetuksessa asetetut yleiset laatuvaatimukset -- (Maa- ja metsätalousministeriö 2011.)

Sekoittamista ei saa tehdä esimerkiksi haitallisten aineiden pitoisuuksien laimentamiseksi. Sen sijaan keskusteluun noussut tuhkan ja savukaasujen laatuun vaikuttaminen prosessiolosuhteita hallinnoimalla tai tuhkan ravinteiden tai haitta-aineiden erottaminen hyödyntämisen edistämiseksi oli eri tahoja kiinnostava näkökulma.

Yhtenä ratkaisuna pienemmille toimijoille esitettiin, että tuhka kuljetettaisiin lämpölaitoksilta yhteiselle kokoomapaikalle, terminaalille, josta eri tuottajien tuhkat vietäisiin kerralla käsittelylaitokselle. Toinen vaihtoehto olisi, että terminaalilla olisi pysyvä yhteinen rakeistamo. Terminaalin voisi myös perustaa johonkin tyhjilleen jääneeseen toimitilaan, jolle ei ole enää muuta järkevää käyttöä.

Toisaalta, irtotuhkan varastoiminen ja kuljettaminen on hankalaa ja kallista, joten tuhkan kuljetusta pitkien matkojen päähän ei pidetty järkevänä. Tuhkan kuljettamisella olisi myös haitalliset vaikutukset puunpolton ja tuhkan hyötykäytön CO₂-taseeseen. Tämän perusteella mobiilia laitetta, joka kiertäisi lämpölaitokselta toiselle, pidettiin yleisesti parempana vaihtoehtona. Käytännössä tämä tarkoittaisi yrittäjä, jolla olisi mobiili rakeistuslaitteisto ja joka hoitaisi myös lannoitukset. Pohdittavaksi jäi, tarvitaanko käytännön toteutukseen erillinen imuauto, tuhkan keräykseen ja kuljetukseen.

Tuhkan levityksen osalta pidettiin mielenkiintoisena vaihtoehtona yhteistä kuljettavaa levityslaitteistoa, joka kiertäisi lannoitettavalta alueelta toiselle. Todettiin myös kokemukseräisesti, että jos kyseessä on pieni alue, lannoitus voidaan helposti toteuttaa moottorikelkan perään kiinnitetystä säiliöstä lapioimalla.

Haasteellisena todettiin joka tapauksessa tuhkalannoitteen myynti: tuhkan tulisi olla myynnissä kuluttajille säkkitavarana esim. huoltoasemilla. Jos tuhkan paperit olisivat kunnossa, ostajat olisi helppo tavoittaa. Byrokratia tarvittavien lupien ja papereiden saamiseksi koettiin kuitenkin haasteellisena ja hidastavana tekijänä. Samoin tuhkien vaihteleva laatu haitta-aineiden ja ravinteiden osalta on haaste.

5.3.4 Työpajan yhteenveto

Tuhkan myyntiä tulisi edelleen tehostaa, ja työpajan tulosten perusteella vahvimpia argumentteja olisivat:

- *Kokonaisvaltaisella, huoltovapaalla luomulannoituksella kiistattomat kasvuvaikutukset puustoon erityisesti turvemaalla.*
- *Ylivertainen ja kustannustehokas, perinteinen tapa palauttaa puun ravinteet metsään.*

Työpajan tulosten perusteella luotiin liiketoiminnallinen ekosysteemimalli. Yhteinen käytännön toimintamuoto voidaan laatia logistisesti toisiinsa nähden lähelläkin sijaitseville lämpölaitoksille, joiden yhteenlaskettu tuhkamäärä on noin 1000—1500 tonnia vuodessa. Tällöin on kannattavaa hankkia esim. yhteinen tai mobiili rakeistuslaitos.

Lämpölaitokset eivät itse ole halukkaita työn käytännön toteutukseen, vaan he toivovat ulkopuolista palveluntarjoajaa, joka vastaa tuhkan rakeistamisesta ja kaupallistamisesta, myös levittämisestä. Lisäksi tukea tarvitaan metsänhoitoon erikoistuneilta toimijoilta, jotka ovat kontaktissa metsänomistajiin, ja toimivat näin tuhkan myyjinä. Liiketoiminnallista ekosysteemimallia voidaan eri toimijoiden suhteessa ja käytännön toimenpiteiden osalta kuvata kaavion 4 mukaisesti.



Kuva 4. Alueellinen ekosysteemimalli tuhkan kierrätyksen tehostamiseksi.

5.4 Ekosysteemimallin analysointi

Kehittämistyön tuloksena laadittiin ekosysteemimalli hajautetun energiantuotannon toimijoiden puutuhkan hyödyntämiseksi. Liiketoiminnallista ekosysteemimallia arvioitiin soveltaen eurooppalaista lomakepohjaa innovaatioiden arvioimiseksi. Arvioinnissa tarkasteltiin ekosysteemimallia eri näkökulmista. Case-tarkastelun työnimenä oli *Puutuhka lannoitevalmisteenä metsissä*.

5.4.1 Ekosysteemimalli tuhkan hyötykäytön tehostamiseksi

Taloudellinen, ekologinen symbioosi, ekosysteemi, muodostetaan siten, että se koostuu (1) urakoitsijasta, joka palvelee ryhmää (2) hajautetun, pienen mittakaavan energiantuotantolaitoksia (tuottajat), jotka ovat sijoittuneet lähelle toisiaan. Lisäksi, (3) metsänhoito-organisaatio osallistuu symbioosiin tuottaen oleellista

tietoa puutuhkan lannoituskäytön mahdollisuuksista (4) metsänomistajille, joka on neljäs symbioosin jäsenryhmä.

Taloudellinen liiketoimintamalli luodaan urakoitsijalle (1). Urakoitsija voi olla olemassa oleva metsäurakoitsija, joka tällä hetkellä toimittaa puuta polttoaineeksi tuottajille. Liiketoimintamallissa urakoitsija tuottaa palveluita koko ekosysteemille. Yksi palvelu on energian tuotannossa syntyvän tuhkan rakeistaminen joko siirrettävällä rakeistimella (irtotuhkalle) tai murskaimella (itsekovetetulle tuhkalta). Tarpeen mukaan urakoitsija tarjoaa tuhkatuotteille myös varastointitilaa (suursäkit tai siilo), valmistelee tarvittavat tuotemerkinnät sekä kaupallistaa rakeistetun materiaalin. Urakoitsijalla on myös tarvittava välineistö tuhkan metsälevityksiin, joka voidaan toteuttaa samanaikaisesti metsän hakkuun tai energiapuun korjuun yhteydessä.

5.4.2 Tietopohja

Palvelun tuottajat

Ekosysteemimallin idea luotiin työpajassa. Keskustelu tuottajien ja muiden sidosryhmien edustajien välillä käytiin aluksi pienryhmäkeskusteluina ja lopuksi yhteisenä keskusteluna. Suurin osa osallistuneista, Pohjois-Karjalan hajautetun energiantuotannon toimijoista oli jo entuudestaan ehdotetun mallin kannalla, pitäen sitä ratkaisuna tuhkan hyötykäytölle: yhteinen urakoitsija, jolla olisi liikuteltava rakeistin ja joka liikkuisi tuottajan luota toisen luo.

Käytännön toteutuksen osalta esiteltiin tietoa työpajan johdantopuheenvuoroissa. Puheenvuorot käsittelivät tuhkan rakeistamiseen soveltuvia tekniikoita, levitystekniikoita sekä rahoitusmahdollisuuksia. Tarkempaa tietoa on saatavissa helposti kaupallisilta toimijoilta ja myös esimerkiksi internetistä.

Hahmoteltu ekosysteemi kuvailtiin julkisessa työpajan yhteenvetoraportissa, ja se toimitettiin kaikille osallistuneille sidosryhmille, sekä julkaistiin kansallisesti. Liiketoimintamalli perustuu taloudelliseen alustaan, jonka päälle luodaan symbioo-

siverkosto, ekosysteemi. Ekosysteemiin kuuluu edunsaajia useista ryhmistä. Tarkennettu tieto ekosysteemimallin suunnitelmasta ja toteutuksen vaatimuksista välitetään sidosryhmille, edunsaajille ja ekosysteemin jäsenille mahdollisten sopimusneuvottelujen aikana.

Ekosysteemi luo lisäarvoa jokaiselle jäsenelleen. Kaikki työpajaan osallistuneet sidosryhmien edustajat kykenivät ymmärtämään ekosysteemimallin edut, ja olivat halukkaita luomaan mukaan tuotavalle urakoitsijalle taloudellisesti kannattavan liiketoiminnan pohjan. Ekosysteemin toimintoja voidaan myös pilotoida. Paikallinen ammattikorkeakoulu sekä muutamat paikalliset lämpölaitokset ideoivat jo työpajassa pilot-koetta. Tiedossa oli myös urakoitsija, joka sopisi mukaan toteuttavaksi tahoksi.

Palvelun käyttäjät

Puutuhkan käyttö metsälannoituksessa on edelleen hyvin minimaalista. Työpajan aikana pohdittiin tästä syystä myös puutuhkalannoituksen käytännön haasteita sekä myynnin edistämisen mahdollisuuksia. Todettiin, että metsänomistajat ovat tietoisia mahdollisuudesta hyödyntää puutuhkaa lannoitevalmisteena. Tähän liittyvä oleellinen tieto on saatavissa mm. metsänhoidon palveluita tarjoavilta yrityksiltä sekä myös internetin kautta.

Keskustelujen perusteella voitiin todeta, että lisäpalvelut ja ohjaus ovat tarpeen. Tätä palvelua voivat tarjota metsänhoidon organisaatiot yhteistyössä käytännön työtä metsässä tekevän urakoitsijan kanssa. Tietoa tuhkalannoituksen eduista tulee tarjota, sekä tämän ohella laskelmia siitä, kuinka paljon erilaiset metsätyypit ja metsämaat tarvitsevat lannoitevalmisteita parhaan tuoton saamiseksi. Lannoitevalmisteen valinta (tuhka ja boori tai typi) tulee myös tapahtua ammattilaisten eli metsänhoidon asiantuntija-organisaatioiden toimesta.

Muut sidosryhmät

Kaikki työpajaan osallistuneet sidosryhmien edustajat kokivat ratkaisun asianmukaisena. Jonkinlaista kilpailua sidosryhmien välille voi syntyä: uusi ekosysteemimalli valtaa markkina-alaa nykyisiltä tuhkalannoitetoimijoilta ja palveluntuottajilta (edustajat mukana työpajassa). Toisaalta, nykyiset palvelut eivät ole kyenneet

täyttämään tuottajien tarpeita, ja vain reilu kilpailu voi edistää pienten energiayhtiöiden tuottavuutta ja kannattavuutta. Yhteistyö olemassa olevien toimijoiden kanssa on myös mahdollista.

Työpajassa arvioitiin, että ekosysteemiin valittava urakoitsija ei ollut kukaan työpajaan osallistuvista tahoista. Tästä syystä on erityisen tärkeää, että kun ekosysteemi toteutuu, urakoitsija ja muut osallistuvat tahot hyväksyvät toisensa.

5.4.3 Taloudellinen tarkastelu

Palvelun tuottajat

Nykyiset tuhkan hyötykäyttöön liittyvät kustannukset ovat suhteellisen alhaiset, koska pienet tuhkamäärät voidaan teknisesti hyödyntää monilla eri tavoilla. Tuhka on kuitenkin ongelma joillekin hajautetun energiantuotannon toimijoille. Irrotuhkan käsittely soveltuvaan muotoon, varastointi ja kuljetus ovat kalliita toimenpiteitä, ja lannoitevalmistekseen soveltuvan tuhkan levittäminen on hankalaa ja hidasta, erityisesti jos se toteutetaan miestyövoimalla.

Urakoitsija, joka huolehtii tuhkan rakeistamisesta, varastoinnista ja levityksestä kohtuullisessa ajassa, helpottaa tuhkan tuottajien työtä ja säästää heidän aikaansa. Tuhkan tuottajien kustannukset pienenevät; epäsuora etu on nähtävissä mahdollisesti tuotetun energian hinnassa. Ratkaisu voi soveltua myös helpottamaan tuhkan hyötykäyttöön liittyvää byrokratiaa, jotta hyötykäyttö tehostuu.

Tuottajille ja tuhkan käyttäjille palvelusta aiheutuvat kustannukset riippuvat urakoitsijan todellisista kustannuksista: logistiikka ja miestyövoima. Kustannuksista täytyy sopia liiketoimintasuunnitelman ja ekosysteemin tarkentuessa siten, että ne tyydyttävät kaikkia ekosysteemin osapuolia. Tuloksena tulee olla kustannusmalli, joka ei merkittävästi lisää hajautetun energiantuotannon toimijoiden kustannuksia nykyisistä. Liiketoiminnallisen vastuun kantavan urakoitsijan investoinnit voidaan myös pitää maltillisina, ja niihin (liiketoiminnan kehitykseen) on saatavissa julkista rahoitusta.

On todennäköistä, että ekosysteemimallin toteutuessa irtotuhkan varastoinnin ja käsittelyn kustannukset alentuvat. Rakeistetun tuhkan hinnan lannoitevalmisteen tulee olla kilpailukykyinen vastaavien lannoitevalmisteiden hinnan kanssa. Urakoitsijan tuottamien palveluiden ja lopputuotteiden hinta voi kohota liian korkeaksi, mikäli todelliset kustannukset ovat urakoitsijalle korkeat, johtuen esimerkiksi pitkistä etäisyyksistä. Kustannukset täytyy arvioida ja niistä täytyy neuvotella etukäteen riskin minimoimiseksi. Palvelut tulee myös hinnoitella siten, että ne eivät ole liian korkeat tuhkan tuottajalle, mutta voivat silti taata kannattavaa liiketoimintaa urakoitsijalle.

Ekosysteemi hyödyttää urakoitsijaa, kun lähtökohtana on luoda toiminnoiltaan tavanomaista laajempi, kestävä liiketoiminnallinen alusta tunnettujen, sopimusperusteisten asiakkaiden kanssa. Ekosysteemimallissa, joka koostuu kiinteästä ryhmästä toimijoita, taloudellisia riskejä urakoitsijan kannalta ovat i) yksittäisen tuhkan tuottajan irtaantuminen ekosysteemistä ja ii) liian pieni tuhkalannoitteen käyttäjäkunta (alhainen kysyntä).

Lisäksi, tuhkalannoitteen laatu riippuu kunkin polttolaitoksen käyttämän puupolttoaineen laadusta. Mikäli jonkin ekosysteemin tuotantolaitoksen tuhkaerää ei voida hyödyntää lannoitevalmisteenä, on urakoitsijan kustannusten kattamiseksi oltava vaihtoehtoinen käyttökohde sen hyödyntämiseksi.

Palvelun käyttäjät

Metsänomistajat hyötyvät ekosysteemimallista taloudellisesti, mikäli tuhka voidaan levittää metsään samanaikaisesti puutavaran korjuun tai muun metsänhoidollisen toimenpiteen yhteydessä. Tuhkan levityskustannukset voivat ekosysteemin sopimusperusteisen mallin myötä olla kilpaileviin tuotteisiin nähden alhaisemmat, ja tuhkan metsän kasvua kiihdyttävän vaikutuksen myötä on saatavissa epäsuoria taloudellisia etuja. Tuhkalannoitteen hinta voidaan myös pitää kilpailukykyisenä muihin lannoitevalmisteisiin nähden.

Ympäristön kannalta etuna voidaan pitää myös sitä, että tuhka korvaa metsässä keinotekoisia lannoitevalmisteita. Tuhkan hyödyntäminen lannoitevalmisteenä

tukee myös puun tuotannon kiertotaloutta, ja auttaa kompensoimaan hiilipäästöjä, jotka syntyvät puuta poltettaessa.

5.4.4 Tekninen tarkastelu

Nykyiset toimintamallit, yhteensopivuus

Ekosysteemimalli on suunniteltu nykyisen metsänhoidon ja energiantuotannon toimijaverkoston toiminnot huomioiden, ja uusia toimijoita sen muodostamiseksi ei tarvita. Ekosysteemin toteuttamiseen tarvittava teknologia on olemassa.

Ekosysteemimallin mukaan toimittaessa edistetään metsätaloutta: metsämaasta puiden mukana korjuun yhteydessä poistuneet ravinteet saadaan palautettua takaisin metsään. Useissa pitkäaikaisissa tutkimuksissa on myös osoitettu, että puutuhkan käytöllä on positiivinen vaikutus metsän kasvuun.

Nykyiset teknologiat, osaaminen

Urakoitsijalla on vastuu tuhkan rakeistimen ja levityslaitteen käytöstä niin, että työ hoituu asianmukaisesti. Urakoitsijan on hankittava uusi laite (rakeistin), jonka käyttö saattaa olla vierasta. Yksinkertaisin tarvittava laite, niin kutsuttu Allukauha, on traktoriin kytkettävä ja helppokäyttöinen. Mikäli urakoitsijalla on kokemusta maanviljelyyn tai metsänhoitoon tarvittavista laitteista, kykenee hän todennäköisesti käyttämään myös tätä lisäosaa.

Tuhkalevitykseen käytettävät laitteet ovat myös tekniikaltaan yksinkertaisia, traktoriin kytkettäviä lisälaitteita. Metsänhoitoon erikoistuneiden palveluntuottajien tulee olla tietoisia tuhkan lannoitusvaikutuksista sekä myös säädöksistä koskien niiden hyödyntämistä. Toimijat ovat vastuussa myös kunkin metsämaan ravinnetarpeen tunnistamisesta.

5.4.5 Sosiaalinen tarkastelu

Sidosryhmien arvot, perinteet ja motivaatio

Irtotuhkan hyödyntämisen esteet ovat sen tuottajille haaste, ja ekosysteemimallin luoma lisäarvo tuhkan hyödyntämisen tehostamiseksi ymmärretään ja tunnustetaan laajasti eri sidosryhmissä. Suomessa on pitkäaikaiset perinteet tuhkan hyödyntämiseksi lannoitevalmisteenä. Tuhkan tuottajat ovat odottaneet toimivaa ja kustannustehokasta ratkaisua tuhkan hyödyntämiseksi. Toimijoilla, joilla syntyvän tuhkan määrä on hyvin pieni, on olemassa olevat käytännöt syntyvien tuhkien hyödyntämiseksi, ja he eivät välttämättä tarvitse tai eivät ole valmiita investoimaan uuteen ratkaisuun.

Tukiverkostot ja yhteistyömahdollisuudet

Suomessa on julkaistu paljon tutkimustietoa sekä käytännön ohjeistusta tuhkalannoituksen osalta. Teknologian ja tutkimustiedon osalta eri toimijoita on tavoitettavissa lisätiedon saamiseksi. Yritykset ja urakoitsijat, jotka toteuttavat pienimuotoisesti tuhkan rakeistamista ja levitystä, ovat tyypillisesti halukkaita kertomaan toiminnastaan ja kokemuksistaan. Joillakin tuhkan tuottajilla on myös kokemusperäistä tietoa tuhkan metsälevityksistä.

Ekosysteemi tulee luoda tuhkan tuottajien, urakoitsijan ja metsänhoidon organisaatioiden toimesta. Kaikki tarvittava tieto ja osaaminen on tässä toimijaverkostossa, ja se on helposti hyödynnettävissä. Ekosysteemin eri toimijoiden tulee kannustaa ja tukea urakoitsijaa, kun toimintoja ollaan käynnistämässä. Tuhkan tuottajien etu on, mikäli toiminnot saadaan käynnistymään sujuvasti ja ilman ongelmia.

5.4.6 Yhteiskunnallinen tarkastelu

Lainsäädännön merkitys

Metsälannoitteena käytettäväksi tarkoitetun tuhkan tuotantoon ja laatuun liittyy lainsäädännöllistä ohjausta. Tuottajat vastaavat muun muassa tuotehyväksyn-

nästä. Eri tuottajilta tulevat tuhkat on kukin analysoitava erikseen ennen kaupallistamista. Tuhkia ei saa sekoittaa, mikäli ne eivät kukin erikseen täytä lannoitevalmistelainsäädännön vaatimuksia. Yleisesti ottaen puhdas puutuhka täyttää yleensä vaatimukset, ja poikkeamilta voidaan välttyä valvomalla polttoaineen laatua.

Tarvittavat palvelut

Tällä hetkellä tuhkan tuottajat vastaavat itse tuhkan kelpoisuudesta ja sen todentamisesta. Akkreditoidut laboratoriot vastaavat tuhkien analysoinnista. Ekosysteemimallissa tieto on toimitettava myös urakoitsijalle, jonka on oltava selvillä lannoitevalmisteenä käytettävien tuhkien kelpoisuudesta.

Metsänomistajille suunnattuja palveluita on tarjolla yleisesti (metsänhoito-organisaatiot). Jonkin verran puolesta puhumista saatetaan kuitenkin tarvita ratkaisun myymiseksi eli tuhkan käytön edistämiseksi. Toisaalta metsänhoidon alalla toimivien organisaatioiden on oltava selvillä tuhkalannoitteita koskevista vaatimuksista ja käytettävissä olevista tuhkalannoite-eristä.

5.4.7 Markkinan ja toimitusketjun tarkastelu

Nykytila, sopimukset ja kilpailu

Sopiva urakoitsija on sellainen, joka toimii jo tällä hetkellä yhteistyössä ekosysteemin polttolaitosten kanssa, esimerkiksi polttoaineena käytettävän hakkeen toimittaja. Jos ekosysteemin polttolaitostoimijoiden sopimuskumppaneina on joku muu haketoimittaja, neuvotteluja on käytävä sopimusten päällekkäisyyden ehkäisemiseksi. Aliurakointisopimukset ovat mahdollisia.

Nykyisin tuhkan tuottajat ovat itse levittäneet tuhkinsa omiin metsiinsä tai antaneet tuhkaa ilmaiseksi metsänomistajille tai pientä korvausta vastaan. Ekosysteemin luomisen yhteydessä luodaan urakoitsijan ja tuottajien sekä urakoitsijan ja metsänomistajien välille sopimusmallit ja käytännöt, joiden avulla taataan tuhkalalle, sen rakeistukselle ja levitykselle hinnat.

Koska rakeistettu tuhka ei ole hinnaltaan korkeaa, se ei vaikuta tuottajille myytävän puupolttoaineen hintaan. Jos edullisen, rakeistetun tuhkan käyttö metsälannoituksessa yleistyy, se saattaa kilpailuasetelman kautta vaikuttaa keinotekoisien lannoitevalmisteiden markkinaosuuteen ja hintaan laskevasti.

Nykytila, toimitusketju

Toimitusketjun arvioidaan olevan ekosysteemiä tukeva, mikäli yhteistyömalli huomioi mahdollisimman hyvin olemassa olevat toimijat ja näiden roolit. Puupolttoaineen toimittajat, jotka eivät osallistu ekosysteemiin urakoitsijan roolissa, saattavat menettää osan liiketoiminnastaan tai toimitussopimuksistaan, ellei heitä huomioida mallissa aliurakoitsijoina.

Metsänomistajat ja tuottajat tukevat todennäköisesti ekosysteemiä, koska se on heille edullinen: metsänomistajat saavat ekologisen lannoitevalmisteen, jonka metsän kasvua edistävä vaikutus on osoitettu. Tuottajat saavat tuhkinsa tehokkaammin kiertoon.

6 Pohdinta

6.1 Energia- ja ilmastostrategia ja puubiomassat energiantuotannossa

Suomen taloudessa ja energia- ja ilmastopolitiikassa pohjaututaan voimakkaasti metsään ja metsien hyödyntämiseen sekä uusiutuvan energian hyödyntämiseen. Bioenergia ry, joka toimii lämpöyrittäjyyden edunvalvojana Suomessa, on ottanut kantaa energia- ja ilmastostrategiaan lausunnossaan 13.2.2017. Lausunnon (2017) mukaan Bioenergia ry kannattaa metsähakesähkön tuotantotukijärjestelmää, sillä metsähakkeen käyttö yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa edellyttää nykytilanteessa tukea. Samoin lausunto toteaa, että nykyinen puupolttoainevoimalaitosten tuotantotukijärjestelmä ei ollut onnistunut; tuen pienuuden takia ainoastaan yksi laitos on sen myötä saatu Suomeen.

Yhdistys toteaa toisaalta, että toteutuneen kehityksen ja ennustetun trendin valossa strategian metsähakkeen käytön skenaariot näyttävät epätodennäköisiltä. Strategian skenaarioissa (sekä perus- että politiikkaskenaario) metsähakkeen käytön oletetaan olennaisesti kasvavan ja saavuttavan 13,5 miljoonan m³ tason vuonna 2020. Metsähakkeen käyttö olisi kuitenkin ollut neljän viime vuoden ajan 8,0—8,2 milj. m³ tasolla (lausunnossa toteutuma 2014—2015 ja ennuste 2016—2017).

Tämä skenaario on tärkeä, koska se heijastuu myös hiilinelupolitiikkaan. LU-LUCF-päätös tuntuu olevan kriittinen, jotta Energia- ja ilmastostrategiassa esitetyt metsähakkuut 80 milj. m³ voidaan toteuttaa (Ympäristöministeriö 2017). Tämä puumäärä käytetään pääasiassa talouspuuna, jolloin hiili varastoidaan, mutta suuri osa käytetään myös energian tuotantoon, jolloin syntyy päästöjä. Bioenergia kommentoi lausunnossaan (2017) myös nelupolitiikkaa. Lausunnon mukaan Suomella on hyvät edellytykset saavuttaa 2050 mennessä tilanne, jossa hiilinelut ovat päästöjä suuremmat. Toisaalta lausunto kritisoi strategian vaikutusarviossa tehtyä herkkyyksianalyysiä.

Uusiutuvan energian käytön ja hakkuiden lisäämisen osalta merkittävää on, että tulevaisuudessa pidetään vahvana vaihtoehtona biopolttoaineiden kehittymistä. Energiapuu saattaa jatkossa ohjautua tänne, eikä enää perinteiseen lämmön tuotantoon. (Koljonen ym. 2017, 96—97.) Tämä on mielenkiintoista etenkin kiinteistökohtaisessa lämmöntuotannossa, mikäli jossain vaiheessa vanhoissa öljykattiloissa voidaan hyödyntää uusia biopohjaisia polttoaineita. Hajautettuun, puun polttoon perustuvaan lämmöntuotantoon tällä on kuitenkin todennäköisesti haitallinen vaikutus, ja näiden toimijoiden tulee kehittää toimintaansa vastatakseen muuttuvaan tilanteeseen.

Toisaalta, puun energian hyödyntämisen muoto ei poista ongelmaa tuhkasta. Öljyn poltossa tuhkaa ei synny, mutta jossain bioöljyn tuotantoprosessin vaiheessa puuaineksesta on joka tapauksessa erotettu puun sisältämät epäorgaaniset yhdisteet, jotka poltossa päätyvät tuhkaan. Ilmastostrategian taustaraportit eivät ota kantaa energian tuotannon sivutuotteisiin. Tätä olisi kuitenkin hyvä selvittää, jottei käsissä ole pian uusi, erilainen ongelma ja hankalasti kierrätettävä materiaali.

6.2 Tuhkan vaikutukset metsämaassa

Tässä työssä käytiin läpi ensimmäistä kertaa systemaattisesti tutkimusaineistoa koskien puutuhkan vaikutuksia metsän kasvuun. Aiemmin on julkaistu suppeampia yhteenvetoja tutkimusten tehneiden organisaatioiden toimesta, ja nämä on julkaistu osana tuhkalannoitusoppaita (mm. Makkonen 2008, Huotari 2012 ja Saarsalmi ym. 2009).

Aiemmin julkaistujen yhteenvetojen perusteella kangasmetsissä on todettu saavan selvempi kasvuvaikutus tuhkan ja typen yhteiskäytöllä (Huotari 2012, Saarsalmi & Kukkola 2009). Myös tehty systemaattinen tarkastelu tukee tätä tulosta. Tyypillisellä saatiin parhaat tulokset 30—60 vuotiaalle puustolle tehdyissä lannoituksissa, ja kasvuvaikutus oli 1—2 m³/ha/v. Kangasmetsissä tuhkan käyttö ei juurikaan lisännyt maahengitystä.

Turvemetsien osalta on Tuhkaoppaassa raportoitu, että tuhka lisää puuston kasvua hitaammin kuin tavanomaiset kaupalliset PK-lannoitteet, mutta pitkällä aikavälillä tuhkalannoituksella (sekä irtotuhka, itsekovetettu että rakeistettu) saadaan jopa parempi, pitkäkestoinen ja voimakas kasvureaktio, 1—6 m³/ha/v (Makkonen 2008). Systemaattinen tarkastelu vahvistaa nämä tulokset. Toisaalta havaittiin, että tuhkalannoituksen vaikutus kasvuun oli tilastollisesti merkittävä lähes kaikilla koealoilla, runkopuun vuosituotosten lisäyksen vaihdellessa 1—11 m³/ha/v. Toisaalta tuhkalannoitus lisäsi selvästi turvemetsien maahengitystä, mutta laskelmien mukaan puun kasvun lisäyksen ansiosta lannoitetun kohteen nettohiilipäästö voi olla alhaisempi kuin lannoittamattomalla kohteella.

Tehdyn tarkastelun perusteella voidaan havaita, että tutkimusmenetelmät ja erityisesti niiden tarkkuus on muuttunut vuosien aikana. Tähän on luonnollisesti syynä teknologian kehittyminen: datan käsittely ja raportointi on nykyisin tarkempaa ja helpompaa kuin sata vuotta sitten, kun ensimmäiset tuhkalannoituskokeet on perustettu. Tarkastelu on kuitenkin tärkeä kooste, joka voi toimia luettelona ja lähdelistana. Kohdetietojen listaus ja liittäminen viitteisiin on hyvä pohja, jota kannattaa hyödyntää ja täydentää jatkossa alan eri tutkimusorganisaatioiden toi-

mesta. Erityisesti tuhka-typpilannoituksen käyttöä kangasmetsissä on tämän selvityksen perusteella kannattavaa tutkia ja toteuttaa käytännön tasolla jatkossa enemmän. Turvemaiden osalta on kannattavaa jatkaa tutkimuksia maaperän nettohiilipäästöjen määrittämiseksi; puuston istuttamista ja kasvun tehostamista tuhkalannoituksella voidaan myös hyödyntää niukkakasvuisten turvemaiden ja soiden luontaisten päästöjen hillitsemisessä.

6.3 Hajautetun energiantuotannon tuhkan kierrätyksen tila

Kehittämistyön aikana kävi ilmi, että aihe herättää runsaasti keskustelua. Alueen toimijoita haastateltaessa tuli selvästi esille, että hajautetun energiantuotannon toimijat pitävät tuhkaa turhana kulueränä, ja sen hyödyntämiseen liittyy liikaa byrokratiaa. Tuhkan analysointi on yksinkertainen toimenpide, mutta muut tuottajan velvollisuudet vaativat liikaa aikaa ja paperitöitä. Pienet toimijat eivät näe tuhkaan liittyviä ostopalveluita kannattavina, sillä pieniä tuhkaeriä on kallista kuljettaa, ja suurien määrien varastointi kuljetusta varten on hankalaa. Suuremmilla toimijoilla tiheämmät kuljetukset onnistuvat, mutta palveluiden toivottaisiin olevan lähempänä.

Tuhkan jalostajia askarruttaa tuhkan laatuun ja saatavuuteen liittyvät tekijät. Myös kilpailu muiden lannoitevalmisteiden kanssa on hankalaa: levityskustannus on samaa suuruusluokkaa, mutta tuhkalannoitukseen on tietyin ehdoin mahdollista hakea KEMERA-tukea (30 %). Tuki on houkutteleva instrumentti, joten sitä haetaan usein jopa kokeilumielessä. Sen hakeminen on kuitenkin joidenkin kokemusten perusteella byrokraattista ja päätösten tulo kestää; pahimmillaan kielteinen tukipäätös on kaatanut kokonaisia tuhkalannoitushankkeita. Täten tuki saattaa vääristää lannoitevalmisteiden kilpailuasetelmaa.

Metsänomistajille tuhkan käyttö olisi helppoa ja myös kustannustehokasta, säävutettava hyöty puun tuoton osalta on osoitettu useissa tutkimuksissa. Se on myös ainoa lannoitusvaihtoehto turvemaille sekä luomukeruualueille.

Havaittavissa oli kuitenkin, että eri toimijoiden tarpeiden yhteensovittaminen on mahdollista. Ratkaisuna voi olla ulkopuolinen neuvottelijataho, joka kuulee kaikkia sidosryhmiä ja auttaa luomaan yhteisen, konkreettisen kompromissiehdotuksen. Tuhkan kilpailutilannetta muiden lannoitevalmisteiden kanssa olisi kuitenkin selkeytettävä, ja mahdollisista, tilannetta vääristävistä tukirakenteista luovuttava.

6.4 Kehittämistyön arviointi

Työn varsinainen toteutus oli looginen, ja se on myös helposti monistettavissa. Tausta-aineiston keruu haastattelujen ja tilastojen kautta loi selkeän pohjakuvan alueellisesta tilanteesta. Haastattelujen yhteydessä voitiin myös aktivoida toimijoita seuraaviin kehitystyön vaiheisiin, seminaareihin, metsäretkille ja työpajaan.

Käytännössä tilaisuuksiin ei osallistunut hajautetun energiantuotannon toimijoita kuin muutamia, mutta koska mukana oli lopulta laajemmin eri sidosryhmien edustajia, kyettiin tavoiteltu ekosysteemimalli luomaan niin, että toimijoiden verkosto oli lähes valmis, ja eri tahojen näkemykset huomioitu kattavasti. Ekosysteemimallin luominen tapahtui lopulta vahvasti toimijoiden itsensä ohjaamana. Tällöin, kun tahtotila kohtaa tavoitteenasetannan, lopputulos on kaikkia osapuolia tyydyttävä. Työn toteuttajan roolina oli ainoastaan kirjata ylös ajatukset ja toiveet, ja kannustaa toimijoita eteenpäin.

Kehittämisosprosessi onnistui kaiken kaikkiaan hyvin. Sen tulosten perusteella kirjoitetut aineistot, luodun ekosysteemimallin kuvaus ja analysointi, ovat saaneet myönteistä palautetta kansallisesti ja myös kansainvälisesti. Kehittämistyön tuloksena syntyneen ekosysteemimallin ohella myös tuloksen syntymiseksi suunniteltua ja toteutettua kehittämistyön prosessia voidaan itsessään pitää tuloksena. Tarkasteltaessa Suomen eri alueita ja niiden toimijoita hajautetun energiantuotannon tuhkien kierrätyksen osalta, tarpeet ja mahdollisuudet ovat erilaisia. Opinnäytetyössä hyödynnetty prosessi on hyvä työkalu alueelliset ominaisuudet huomioivien ekosysteemimallien luomiseksi. Luotua mallia pidetään loogisena ja toteuttamiskelpoisena, ja on esitetty, että sen luomisessa käytetty prosessi tulisi toteuttaa kansallisesti eri puolilla Suomea.

6.5 Hyödynnettävyys

On tärkeää, että hajautetun energiantuotannon lannoitevalmistekelpoiset tuhkat päätyvät hyötykäyttöön. Kirjallisen tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tuhkalannoitus lisää selvästi puuston kasvua turvemaalla, ja typpilannoitukseen yhdistettynä myös kivennäismaalla. Tämän perusteella tuhkan ravinteiden kiertäys metsiin parantaa hajautetun energiantuotannon ja metsänhoidon kannattavuutta. Toisaalta, hiilinieluvaikutuksen ylläpitämiseksi on otettava huomioon tulokset tuhkalannoituksen vaikutuksista maahengitykseen: tietyillä maaperätyypeillä, tietyissä olosuhteissa on mahdollista, että tuhkan vaikutus puun kasvuun ei kokonaan kompensoi sen vaikutusta maahengityksen lisääntymiseen. Tässä työssä kerätty aineisto mahdollistaa, että tällaiset kohteet on helpompi tunnistaa.

Tässä työssä luotiin yhdessä eri toimijoiden kanssa liiketoiminnallinen malli, joka mahdollistaa sen, että tuhkalannoitus on toteutettavissa kustannustehokkaasti yritysryhmän yhteisenä toimintana. Liiketoimintamalli voi arvioiden mukaan lisätä toteutuessaan tuhkan käyttöastetta ja vähentää loppusijoitukseen päätyvän tuhkan määrää.

6.6 Jatkokehitysmahdollisuudet

Tapio Oy:n Puutuhka-hanke jatkuu vuoteen 2018 saakka. Hankkeessa toteutettiin lannoituskokeita kangasmailla Pohjois-Karjalassa vuonna 2016 (rakeistettu tuhka), ja uudet kokeet perustettiin vuonna 2017 siten, että niissä hyödynnetään rakeistamatonta tuhkaa. Tämä hankittiin hajautetun energiantuotannon edustajilta, joita haastateltiin tässä opinnäytetyössä.

Hankkeen suunnitelmissa on myös selvittää jatkossa, kuinka muuttuva lannoitevalmistelainsäädäntö (2018) vaikuttaa hajautetun energiantuotannon toimijoiden tuhkan kiertoon. Lainsäädäntö mahdollistaa lannoitevalmisteiden raaka-aineiden CE-merkinnän, ja siten myös viennin. Tässä yhteydessä voidaan huomioida myös uudentyyppisten bioöljylaitosten tuhka.

Myös jätelainsäädäntö on muuttumassa. Jätelainsäädännön muutos saattaa mahdollistaa sen, että jätteen hyödyntäminen maa- ja tierakentamisessa (back-filling) on jatkossa kierrätystä, ja tällöin jäte ei enää automaattisesti ole jätettä. Tämä saattaa helpottaa jätteen hyödyntämiseen tällä hetkellä liittyvää ympäristölupaprosessia, joka tuhkan osalta toteutuu ilmoituslupamenettelyllä MARA-asetuksen mukaisesti (Suomen ympäristökeskus 2015).

Paikallisen ekosysteemirakenteen luomiseksi on tunnistettava alueen eri sidosryhmät ja järjestettävä vastaavia työpajoja toimijaverkostojen luomiseksi. Pohjois-Karjalan alueella verkoston luominen jatkuu Apila Groupin, Karelia AMK:n sekä paikallisten lämpöyrittäjien yhteistyönä.

Pilotointihanketta, jossa vastaavan toiminnan mahdollisuuksia selvitetään eri paikkakunnilla ympäri Suomen, *Puutuhka Roadshow*, on esitetty toteutettavaksi yhteistyössä Apila Groupin ja Tapion kesken. Hankkeelle ollaan hakemassa rahoitusta helmikuussa 2018.

6.7 Luotettavuus ja eettisyys

Työ toteutettiin monimenetelmäisenä, jolloin jokaisella työn osalle valittiin aineiston ja tavoitteiden kannalta luotettavin tiedonkeruu ja -analysointimenetelmä. Tutkimuksellisen osan 1 osalta voidaan todeta, että kansainvälinen ilmastostrategia on koko ajan muuttuva ja elävä. Pariisin ilmastokokouksen strategia on luotu vuoteen 2050 asti, mutta kansallinen strategia on tyypillisesti lyhyemmän aikajänteen suunnitelma, ja se on tarkentunut useammin, esimerkiksi hallituksen vaihtuessa. Uusin kansallinen strategia julkaistiin loppuvuodesta 2016. Tästä syystä opinnäytetyön ensimmäisen vaiheen luotettavuus on sidottu aikaan, ja tieto voi vanhentua nopeallakin aikataululla. Myös hajautetun energiantuotannon nykytilan osalta annetaan tässä työssä aikaan sidottuja, tilastollisia tietoja.

Osassa 2 tutkimuksellinen työ tuhkalannoituksen vaikutuksista metsän kasvuun toteutettiin teoreettisen tutkimuksen menetelmillä, jossa tausta-aineisto kerättiin

valmiina dokumentteina, kokonaistutkimuksena. Tutkimuksen luotettavuus varmistettiin keräämällä laaja ja kattava aineisto tuhkan vaikutuksista puuston kasvuun ja hiilidioksidin sidontaan rajatulta alueelta. Pääpaino oli kansallisissa tutkimuksissa, mutta myös Ruotsissa ja metsävaltaisissa Euroopan maissa julkaistuja tuloksia huomioitiin, mikäli ne olivat relevantteja ja toivat lisää tietoa aihepiiriin (hiilen sitoutuminen ja/tai vapautuminen).

Aineistoon valittiin puuston tuhkalannoituksen kasvuvaikutusten osalta tehdyt pitkittäistutkimukset, joissa oli tutkittu lannoituskohteiden muutosta ja kehittymistä pitkän aikavälin, jopa vuosikymmenten, kuluessa. Luotettavuus perustui toisaalta kunkin osatutkimuksen toteutuksen luotettavuuteen. Selvitys toteutettiin osana hanketyötä, johon osallistuivat alan asiantuntijat Suomessa (LUKE, SYKE, Tapio Oy). Luotettavuutta voitiin tällöin arvioida yhteistyökumppaneiden kokemuksen perusteella. Tuloksiin voitiin toisaalta luottaa myös julkaisulähteen laadun perusteella: kun julkaisu oli esitetty arvostetussa lehdessä, ja se oli käynyt läpi asiantuntija-arvioinnin (referee) ennen julkaisua, tuloksia voitiin pitää luotettavina.

Toisaalta, tutkimusaineistoon perehdyttäessä havaittiin, että koska tutkimusta oli tehty jo vuodesta 1920 lähtien, tutkimuksen kirjaamisen periaatteet, teknologiat ja tavat olivat muuttuneet. Numeerisia tuloksia ilmoitettiin erilaisilla yksiköillä, jolloin vertailtavuus oli hankalaa. Osa tuloksista oli myös ilmoitettu ainoastaan graafisina esityksinä, mikä saattoi johtaa vääriin tulkintoihin. Oma haasteensa on myös luonnon erilaisten ekosysteemien monimuotoisuus: yleistäviä johtopäätöksiä ei voida tehdä, koska jokainen kohde on ainutlaatuinen. Näistä syistä johtuen tutkimuksen muoto on luettelomainen, ja vedetyt johtopäätökset hataria. Työ toiminee parhaiten luettelona ja tietolähteenä jatkotutkimuksia ajatellen. Joka tapauksessa se on systemaattinen, ja viitteiden osalta mittava.

Totuudellisuuden osalta voidaan todeta, että haasteet tuhkan hyötykäytön tehostamisessa perustuivat tässä työssä käytännössä todettuihin ongelmiin. Tavoitteena oli saada haastatteluun osallistumaan koko hajautetun energiantuotannon toimijoiden joukko Pohjois-Karjalassa, jolloin kyse olisi ollut kokonaistutkimuksesta. Haastatteluun vastasi kuitenkin ainoastaan 33 toimijaa 46 toimijasta. Toimijoiden kannanotot ja vastaukset olivat samansuuntaisia, jolloin voidaan olettaa,

että haasteet ja ongelmat koetaan myös kyselyyn vastaamattomien tahojen osalta samankaltaisina.

Toteutuksen pohjaksi suoritettiin strukturoitu survey-haastattelu (edustava otanta), jossa osa kerätyistä tiedoista oli energiantuotannon toimijoiden toimintaan liittyviä tilastotietoja. Haastatteluissa saadut kommentit ovat luonnollisestikin subjektiivisia, mutta vuorovaikutteisella osallistumisella voitiin varmistaa saatujen kommenttien totuudellisuus (laadullinen analyysi). Tietoja täydennettiin toimintatutkimuksissa, työpajoissa, joiden tarkoituksena oli myös vaikuttaa toimijoihin, niiden toimintaan tai ympäristöön niitä kehittävästi ja parantavasti. Tässä onnistuttiin hyvin.

Siirrettävyys ja sovellettavuus. Hajautetun energiantuotannon toimijoita on ympäri Suomea, ja toimijoiden haasteet tuhkan kierrätyksen osalta ovat yhteisiä. Toiminnallinen osa voitiin täten toteuttaa myös laadullisena, eli haastattelujen tulosten kautta voidaan ymmärtää paremmin koko hajautetun energiantuotannon toimijakentän ominaisuuksia, merkityksiä sekä haasteita kokonaisvaltaisesti. Tulosten perusteella voidaan täten luoda ratkaisumalleja koko Suomen kattavasti.

Vahvistettavuus. Toimijoilta kerättävät tilastotiedot ovat löydettävissä myös julkisista lähteistä (mm. laitosten koko, käytetyt polttoaineet). Subjektiivisten kysymysten (esim. "Mitä mieltä olette") osalta vastauksia voidaan arvioida aiemmin toteutettujen, vastaavien kyselyiden tuloksiin. Toimijoita eri sektoreilta on haastateltu ennenkin, ja samat haasteet ovat esiintyneet vuodesta toiseen. Kehitettävän ratkaisuehdotuksen toiminnan varmistaminen voidaan toteuttaa ainoastaan kokeilemalla.

Uskottavuus. Subjektiivisten kysymysten käsittelyyn ja uskottavuuden lisäämiseen hyödynnettiin työpajoja. Osallistamalla toimijat työpajatoimintaan itse ratkaisemaan ongelmia, voitiin varmistaa, että tulokset olivat uskottavia, eivätkä ainoastaan "ylhäältä annettuja". Työpajojen pohjustuksissa tuotiin myös esille tutkimustietoa, joiden avulla voitiin lisätä yksittäisten toimijoiden ennakkotietojen määrää. Tämän jälkeen keskustelujen kautta voitiin luoda ryhmän sisällä uskottavia, uusia lähestymiskulmia ongelmiin.

6.8 Ammatillinen osaaminen

Olen tehnyt töitä metsäteollisuuden erilaisten sivuvirtojen parissa jo vuodesta 2006 lähtien. Vuosina 2006—2009 tutkin Itä-Suomen yliopiston VISA-hankkeessa mahdollisuuksia sellutehtaiden kiinteän jätteen, soodasakan (viherlipeäsakka) käsittelemiseksi ja hyödyntämiseksi. Tämän jälkeen olen toteuttanut Apila Group Oy Ab:n palveluksessa useita selvityksiä liittyen metsäteollisuuden sivuvirtojen ja erityisesti tuhkan hyödyntämisen mahdollisuuksiin. Näiden tutkimusten myötä opin ymmärtämään jätteiden, ja etenkin puuperäisten jätteiden kemiallaa, ja havaitsin, että jäte on aina komponenttiensa summa, kemikaalien yhdistelmä.

Sen osaamisen puitteissa olen kyennyt myös myöhemmin tarttumaan erilaisiin jäteseoksiin luottavaisin mielin. Tässä opinnäytetyössä otin kuitenkin uudenlaisen näkökulman, biologian ja metsätieteet, apuvälineeksi. Kirjallisuudessa kävin läpi laajan aineistopohjan, ja tulkitsin sitä napakasti ja pyrkien aukottomiin johtopäätöksiin. Luonnon kyseessä ollessa on kuitenkin mahdotonta vetää yksiselitteisiä johtopäätöksiä, sillä monet asiat vaikuttavat lopputulokseen. Laboratoriossa tuloksia saadaan parhaimmillaan päivässä, pahimmillaan vasta kuukauden kuluttua. Vastakohtana tälle metsä kasvaa ja tuloksia saadaan vasta vuosikymmenten kuluessa. Samoin on vaikeaa hallita niitä muuttuvia olosuhteita, joita luonnossa esiintyy. Jokainen metsä, jokainen maaperä ja jokainen vuosi on erilainen. Kun tähän epävarmuuteen ja ennakoimattomuuteen tuodaan tutkittava kemikaalien seos, puutuhka, ja saadaan kaikesta epävarmuudesta huolimatta toistettavia tuloksia, on se merkittävä asia.

Tämän työn aikana on myös noussut voimakkaammin esiin se ihmetys, joka luonnon monimuotoisuuteen ja kasvien kasvuun liittyy. Aurinko, hiilidioksidi ja vesi yhdessä ravinteiden kanssa muodostavat kaiken elollisen kasvillisuuden ympärillämme. Uusimmat uutiset kertovat, että sähkön avulla on nyt voitu tuottaa proteiinia ilmasta (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2017). Tutkijan ja kehittäjän mieleni saa jälleen uusia virikkeitä. Mihin kaikkeen hiilidioksidin voisikaan valjastaa teknologian avulla sen sijaan, että se tuhoaa arvokasta otsonia ja aiheuttaa meille ilmastomuutoksen?

7 Lähteet

- Aho, M., Pursula, T., Saario, M., Miller, T., Kumpulainen, A., Päällysaho, M., Kontiokari, V., Autio, M., Hillgren, A., Descombes, L. (Gaia Consulting). 2015. Ravinteiden kierron taloudellinen arvo ja mahdollisuudet Suomelle. Sitran selvityksiä 99. Helsinki. <https://media.sitra.fi/2017/02/27174934/Selvityksia99-2.pdf> 14.11.2017
- Aro, L. ja Kaunisto, S. 1995. Tuhkalannoitus eräillä suonpohjien metsityskokeilla. Metsäntutkimuspäivä Porissa 1995 (toim. Laiho, O. ja Luoto, T), Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 593, 1996, 31-41. ISBN 951-40-1502-9. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1502-9> 14.11.2017
- Augusto, L., Baker, M.R., ja Meredieu, C. 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks. *Plant Soil* 306, 181–198. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9570-z> 14.11.2017
- Bergh, J., Nilsson, U., Grip, H., Hedwall, P.-O. ja Lundmark, T. 2008. Effects of frequency of fertilization on production, foliar chemistry and nutrient leaching in young Norway spruce stands in Sweden. *Silva Fennica* 42 (5), 721–733. <https://silvafennica.fi/pdf/article225.pdf> 14.11.2017
- Bioenergia ry. 2017. Lausunto: VNS 7/2016 vp Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 13.2.2017 <http://www.bioenergia.fi/GetItem.asp?item=dmsfile:527041;2520¶ms=open:gallery> 16.11.2017
- Bååth, E., Arnebrant, K. 1994. Growth Rate and Response of Bacterial Communities to pH in Limed and Ash Treated Forest Soil. *Soil Biol. Biochem.* 26 (8), 995–1001. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90114-7) 14.11.2017
- Ekholm, T., Honkatukia, J., Koljonen, T., Laturi, J., Lintunen, J., Pohjola, J., Uusivuori, J. 2015. EU:n 2030 ilmasto- ja energiakehys – arvio LULUCF-sektorin sisällyttämisen mahdollisuuksista ja ristiriidoista Suomelle. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 6/2015. <http://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=8308> 14.11.2017
- Energiatoteellisuus. 2017. Energiavuosi 2016. Kaukolämpö. Esitys 29.3.2017. https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot 18.10.2017
- Ernfors, M., Sikström, U., Nilsson, M. ja Klemetsson, L. 2010. Effects of wood ash fertilization on forest floor greenhouse gas emissions and tree growth in nutrient poor drained peatland forests. *Sci. Total Environ.* 408 (20), 4580–90. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.024> 14.11.2017
- Eurofins Viljavuuspalvelu 2017. Hinnasto 1.4.2017 alkaen. http://viljavuuspalvelu.fi/sites/default/files/sites/default/files/eurofins_viljavuuspalvelu_viherviljavuuspalvelu_hinnasto_2017.pdf 17.10.2017.
- Eurooppa-neuvosto. 2014. Ilmasto- ja energiapolitiikan puitteet 2030. <http://www.consilium.europa.eu/fi/templates/content.aspx?id=19494> 14.11.2017
- Ferm, A. 1990. Coppicing, aboveground woody biomass production and nutritional aspects of birch with specific reference to *Betula pubescens*.

- Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 348, 1990. ISBN 951-40-1089-2. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1089-2> 14.11.2017
- Ferm, A., Flokkanen, T., Moilanen, M. ja Issakainen, J. 1992. Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. *Plant and Soil* 147, 305–316. <https://doi.org/10.1007/BF00029082> 14.11.2017
- Fritze, H., Smolander, A., Levula, T., Kitunen, V., Mälkönen, E. 1994. Wood-ash fertilization and fire treatments in a Scots pine forest stand: Effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biol Fertil Soils* 17, 57–63. <https://doi.org/10.1007/BF00418673> 14.11.2017
- Helmisaari, H.-S., Kukkola, M., Ostonen, I. ja Lohmus, K. 2004. Tuhka-biolieteseoksen vaikutukset kangasmailla. Tutkimussopimuksen loppuraportti, Metsäntutkimuslaitos ja Tarton yliopisto. <https://ju-kuri.luke.fi/handle/10024/503647> 14.11.2017
- Helmisaari, H.-S., Saarsalmi, A. ja Kukkola, M. 2009. Effects of wood ash and nitrogen fertilization on fine root biomass and soil and foliage nutrients in a Norway spruce stand in Finland. *Plant and Soil* 314 (1–2), 121–132. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9711-4> 14.11.2017
- Huotari, N. 2011. Recycling of wood- and peat-ash – a successful way to establish full plant cover and dense birch stand on a cut-away peatland. *Acta Universitatis Ouluensis. Series A, Scientiae rerum naturalium*, A576, 2011. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789514295324.pdf> 14.11.2017
- Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. 2. päivitetty painos. Metsäntutkimuslaitos. Vammalan kirjapaino Oy 2012. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2371-2> 14.11.2017
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E. ja Kubin, E. 2009. Ground vegetation exceeds tree seedlings in early biomass production and carbon stock on an ash-fertilized cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* 33 (9), 1108–1115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.009> 14.11.2017
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Pasanen, J. ja Kubin, E. 2008. Ash-fertilization improves germination and early establishment of birch (*Betula pubescens* Ehrh.) seedlings on a cut-away peatland. *Forest Ecology and Management* 255 (7), 2870–2875. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.062> 14.11.2017
- Hytönen, J. 2003. Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. *Silva Fennica* 37 (2), 219–234. <https://doi.org/10.14214/sf.503> 14.11.2017
- Hytönen, J. ja Aro, L. 2012. Biomass and nutrition of naturally regenerated and coppiced birch on cutaway peatland during 37 years. *Silva Fennica* 46 (3), 377–394. <https://silvafennica.fi/pdf/article48.pdf> 14.11.2017
- Hytönen, J. ja Aro, L. 2013. Puutuhkalannoitus lisää koivikon biomassatuotosta suonpohjalla. Teoksessa Leppälammi-Kujansuu, J., Soinne, H., Merilä, P., Rankinen, K., Salo, T. ja Hänninen, P. (toim.) Maankäytön kestävyys. VII Maaperätieteiden päivien abstraktit. 55–56. <http://docplayer.fi/8128549-Pro-terra-no-61-2013-vii-maaperatieteiden-paivien-abstraktit.html> 14.11.2017
- Hytönen, J. ja Kaunisto, S. 1999. Effect of fertilization on the biomass production of coppiced mixed birch and willow stands on a cut-away peatland.

- Biomass and Bioenergy 17 (6), 455-469. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00061-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00061-6) 14.11.2017
- Hytönen J. ja Saarsalmi A. 2015. Biomass production of coppiced grey alder and the effect of fertilization. *Silva Fennica* 49 (1), 1—16. <https://silvafennica.fi/pdf/article1260.pdf> 14.11.2017
- Jacobson, S. 2003. Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations. *Silva Fennica* 37 (4), 437—450. <https://silvafennica.fi/pdf/article483.pdf> 14.11.2017
- Jätekuukko Oy. 2017. Kuopion jätekeskuksen vastaanottohinnat. Kuopion jätekeskushinnasto 2017. <http://www.jatekuukko.fi/hinnat/kuopion-jatekeskus.html> 17.10.2017
- Kaunisto, S. 1987. Effect of refertilization on the development and foliar nutrient contents of young Scots pine stands on drained mires of different nitrogen status. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 140. ISBN 951-40-0772-7. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0772-7> 14.11.2017
- Klemedtsson, L., Ernfors, M., Björk, R. G., Weslien, P., Rütting, T., Crill, P. ja Sikström, U. 2010. Reduction of greenhouse gas emissions by wood ash application to a *Picea abies* (L.) Karst. forest on a drained organic soil. *European Journal of Soil Science* 61 (5), 734–744. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.2010.01279.x/abstract> 14.11.2017
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Asikainen, A., Lanki, T., Anttila, P., Hildén, M., Honkatukia, J., Karvosenoja, N., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Lindroos, T.J., Regina, K., Salminen, O., Savolahti, M., Siljander R. & Tiittanen, P. 2017. Energia ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017, Valtioneuvoston kanslia 2017. <http://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=16902> 14.11.2017
- Korri, J. 2017. Lämpöyrittäjäkohteiden määrä on kasvanut. *BioEnergia* 1/2017, 14—15. <http://www.lampoyrittajat.fi/default.asp?item=dms-file;526846;2520¶ms=open;gallery> 19.10.2017
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2017. Sähköstä tuotettu proteiini lievittää maailman nälänhätää. *Uutinen* 19.7.2017. https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/sahkosta-tuotettu-proteiini-lievittamaan-maailman-nalanhataa 16.11.2017
- Lauhanen, R., Moilanen, M., Silfverberg, K., Takamaa, H. ja Issakainen, J. 1997. Puutuhkalannoituksen kannattavuus eräissä ojitusaluemännikoissä. *Suo* 48 (3), 71-82. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ELE-532129> 14.11.2017
- Levula, T. 1990. Tuhkalannoitus kangasmaalla. Teoksessa Laiho, O. ja Kilponen, T. (toim.) *Metsäntutkimuspäivä Nurmossa 1990*, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 394. 49-59. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1180-5> 14.11.2017
- Liski, J. 2000. Millainen kiertoaika eduksi metsien hiilitaloudelle? *Tieteen tori. Metsätieteen aikakauskirja* 4/2000. 639-642. <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff00/ff004639.pdf> 6.1.2017
- Luonnonvarakeskus. 2010. Pohjoinen mänty – laadukas ja monikäyttöinen. Internet-sivu. <http://www.metla.fi/metinfo/northernpine/ilmastovaikutukset-ja-hiilensidonta.html> 6.1.2017

- Luonnonvarakeskus. 2017a. Puun energiakäyttö 2016. 26.05.2017. http://stat.luke.fi/puun-energiak%C3%A4ytt%C3%B6-2016_fi 22.10.2017.
- Luonnonvarakeskus. 2017b. Teollisuuspuun kauppa 2016. 22.02.2017. http://stat.luke.fi/teollisuuspuun-kauppa-2016_fi 22.10.2017
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2011. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lan-
noitevalmisteista 24/2011. [http://www.finlex.fi/fi/viranomai-
set/normi/400001/37638](http://www.finlex.fi/fi/viranomai-
set/normi/400001/37638) 14.11.2017
- Makkonen, T. (toim.) 2008. Tuhkalannoitus. Metsätalouden kehittämiskeskus Ta-
pio. [https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhkalan-
noitus_tapio_2008_pakattu.pdf](https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhkalan-
noitus_tapio_2008_pakattu.pdf) 14.11.2017
- Maljanen, M., Jokinen, H., Saari, A., Strömmer, R. ja Martikainen, P. J. 2006. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. Soil Use and Management 22 (2), 151–157. [http://onlineli-
brary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2006.00029.x/abstract](http://onlineli-
brary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2006.00029.x/abstract) 14.11.2017
- Maljanen, M., Nykänen, H., Moilanen, M. ja Martikainen, P. 1999. Tuhkalannoit-
uksen vaikutus metsämaan kasvihuonekaasuvirtoihin. Metsätehon
raportti 83. [http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/met-
satehon_raportti_083.pdf](http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/met-
satehon_raportti_083.pdf) 14.11.2017
- Martikainen, P. J., Nykänen, H., Maljanen, M. 1998. Metsämaan kaasuaineen-
vaihto. Teoksessa Anttila, P. ja Korpilahti, A. (toim.) Tuhkahankkeen
väliseminaari 1998, Esitelmien tiivistelmät, Metsätehon raportti 52.
39–42. [http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/met-
satehon_raportti_052.pdf](http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/met-
satehon_raportti_052.pdf) 14.11.2017
- Merisaari, H. 1981. Tuhkalannoituksen vaikutuksen kesto erällä vanhoilla ko-
keilla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 13. ISSN 0358-4283.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207201903> 14.11.2017
- Moilanen, M. 1996. Kannattaako suometsien ravinnetaloutta hoitaa? Teoksessa
Moilanen, M., Pietiläinen, P. ja Väärä, T. (toim.) Metsäntutkimuspäivät
Pyhäsalmeella 1996, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 674. 27-37.
ISBN 951-40-1611-4, ISSN 0358-4283. [http://urn.fi/URN:ISBN:951-
40-1611-4](http://urn.fi/URN:ISBN:951-
40-1611-4) 14.11.2017
- Moilanen, M. 2009. Puutuhkan ja kivennäismaan vaikutukset männyn ravinneti-
laan ja kasvuun Pohjois-Pohjanmaan metsäojitetuilla soilla. Teok-
sessa Piironen, M.-L., Murtovaara, I. ja Wallin, E. (toim.) Muhoksen
toimintayksikkö. Vuosikertomus 2008. 6-7. [http://jukuri.luke.fi/han-
dle/10024/515485](http://jukuri.luke.fi/han-
dle/10024/515485) 14.11.2017
- Moilanen M., Hytönen J., Hökkä H. ja Ahtikoski A. 2015. Fertilization increased
growth of Scots pine and financial performance of forest management
in a drained peatland in Finland. Silva Fennica 49 (3), 1-18. [https://sil-
vafennica.fi/pdf/article1301.pdf](https://sil-
vafennica.fi/pdf/article1301.pdf) 14.11.2017
- Moilanen M., Hytönen J., Leppälä M. 2013a. Puutuhkan vaikutus turpeen hiilidi-
oksidipäästöihin ja puuston hiilensidontaan ojitetulla rämeellä. Teok-
sessa Leppälämmi-Kujansuu, J., Soinne, H., Merilä, P., Rankinen, K.,
Salo, T. ja Hänninen, P. (toim.) Maankäytön kestävyys. VII Maaperä-
tieteiden päivien abstraktit. 59-60. [http://docplayer.fi/8128549-Pro-
terra-no-61-2013-vii-maaperatieteiden-paivien-abstraktit.html](http://docplayer.fi/8128549-Pro-
terra-no-61-2013-vii-maaperatieteiden-paivien-abstraktit.html)
14.11.2017

- Moilanen, M. ja Issakainen, J. 2000. Tuhkalannoituksen metsävaikutukset. Metsätehon raportti 93. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_093.pdf 14.11.2017
- Moilanen, M. ja Issakainen, J. 2004a. Puu- ja turvetuhkien vaikutus maaperään, metsäkasvillisuuden alkuainepitoisuuksiin ja puuston kasvuun. Metsätehon raportti 162. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_162.pdf 14.11.2017
- Moilanen, M., Saarsalmi, A., Kukkola, M. ja Issakainen, J. 2013b. Effects of stabilized wood ash on nutrient status and growth of Scots pine – Comparison between uplands and peatlands. *Forest Ecology and Management* 295 (1), 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.021> 14.11.2017
- Moilanen, M., Silfverberg, K. ja Hokkanen, T. J. 2002. Effects of wood-ash on the tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest Ecology and Management* 171 (3), 321-338. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00789-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00789-7) 14.11.2017
- Moilanen, M., Silfverberg, K., Hökkä, H. ja Issakainen, J. 2004b. Comparing Effects of Wood Ash and Commercial PK Fertiliser on the Nutrient Status and Stand Growth of Scots Pine on Drained Mires. *Baltic Forestry* 10 (2), 2-10. https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2004-10%5b2%5d/2_10%20Moilanen%20et%20al.pdf 14.11.2017
- Moilanen, M., Silfverberg K., Hökkä, H. ja Issakainen, J. 2005. Wood ash as a fertilizer on drained mires -growth and foliar nutrients of Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* 35 (11), 2734-2742. <https://doi.org/10.1139/x05-179> 14.11.2017
- Nousiainen, M. 2017. Suometsien ja metsäteiden johtava asiantuntija. Suomen metsäkeskus. Henkilökohtainen tiedonanto puhelinhaastattelussa 28.9.2017.
- Perkiömäki, J., Fritze, H. 2002. Short and long-term effects of wood ash on the boreal forest microbial community. *Soil Biology & Biochemistry* 34, 1343-1353. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00079-2) 14.11.2017
- Peura, P., Hiltunen, E., Haapanen, A., Auvinen, K., Soukka, R., Törmä, H., Kujala, S., Pohjola, J., Mäkiranta, A., Välisuo, P., Grönman, K., Kumar, R., Rasi, S., Lehtonen, E., Anttila, P., Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 35/2017, Valtioneuvoston kanslia, 1.3.2017. <http://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=18206> 14.11.2017
- Pihlström, M., Rummukainen, P. ja Mäkinen, A. 2000. Tuhkalannoitusprojektin kasvillisuus- ja maaperä-tutkimukset Evolla 1997–1999. Loppuraportti. Metsätehon raportti 89, 2000. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_089.pdf 14.11.2017
- Puhas Oy. 2017. Jätekeskuksen vastaanottohinnat 2017 yrityksille. Raskas liikenne ja pakettiautot. <http://www.puhas.fi/hinnat/kontiosuon-jatekeskus/raskas-liikenne/yritykset.html> 17.10.2017
- Pöyry Management Consulting Oy 2017. Hajautetun uusiutuvan energiantuotannon potentiaali, kannattavuus ja tulevaisuuden näkymät Suomessa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 5/2017, Valtioneuvoston kanslia 27.1.2017. <http://vnk.fi/julkaisu?pubid=16603> 14.11.2017

- Pöyry Management Consulting Oy 2017b. Metsäbiomassan kustannustehokas käyttö. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 23/2017. Valtioneuvoston kanslia 2.2.2017. <http://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=16903> 14.11.2017
- Repo, A. 2015. Climate impacts of bioenergy from forest harvest residues (Hakkuutähteiden energiakäytön ilmastovaikutukset). Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu, matematiikan ja systeemianalyysin laitos. <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/15923> 6.1.2017
- Rosenberg, O., Persson, T., Högbom, L., Jacobson, S. 2010. Effects of wood-ash application on potential carbon and nitrogen mineralization at two forest sites with different tree species, climate and N status. *Forest Ecology and Management* 260, 511-518. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.05.006> 14.11.2017
- Rummukainen, P., Pihlström, M. ja Mäkinen, A. 2004. Puutuhkalannoituksen lyhytaikaiset vaikutukset kasvilajistoon. *Metsätehon raportti* 171. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_171.pdf 14.11.2017
- Rütting, T., Björk, R.G., Meyer, A., Klemmedtsson, L., Sikström, U. 2014. Reduced global warming potential after wood ash application in drained Northern peatland forests. *Forest Ecology and Management* 328, 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.033> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Derome, J. ja Levula, T. 2005. Effect of wood ash fertilization on stand growth, soil, water and needle chemistry, and berry yields of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in a Scots pine stand in Finland. Teoksessa Mandre, M. (toim.) *Utilisation of industrial wastes in forestry. Forestry Studies (Metsanduslikud Uurimused)* 42. 13-33. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201703072003> 14.11.2017
- Saarsalmi, A. ja Kukkola, M. 2009. Tuhkalannoituksen vaikutus maaperään ja puuston kasvuun. *Metsätieteen aikakauskirja* 1, 2009. <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff091063.pdf> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Kukkola, M., Moilanen, M. ja Arola, M. 2006. Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management* 235 (1-3), 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.004> 14.11.2017
- Saarsalmi, A. ja Levula, T. 2007. Wood Ash Application and Liming: Effects on Soil Chemical Properties and Growth of Scots Pine Transplants. *Baltic Forestry* 13 (2), 149-157. [https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2007-13\[2\]/149_157%20Saarsalmi%20&%20Levula.pdf](https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2007-13[2]/149_157%20Saarsalmi%20&%20Levula.pdf) 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Mälkönen, E. ja Piirainen, S. 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica* 35, 355-368. <https://silvafennica.fi/pdf/article590.pdf> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Mälkönen, E. ja Kukkola, M. 2004. Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (3), 217-233. <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02827580410024124> 14.11.2017

- Saarsalmi, A., Palmgren, K. ja Levula, T. 1985. Leppäviljelmän biomassan tuotos sekä ravinteiden ja veden käyttö. *Folia Forestalia* 628. ISBN 951-40-0710-7. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0710-7> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Palmgren, K. ja Levula, T. 1991. Harmaalepän vesojen biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö. *Folia Forestalia* 768. ISBN 951-40-1143-0. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1143-0> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M. ja Arola, M. 2010. Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland. *Plant and Soil* 331 (1-2), 329–340. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0256-y> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., Moilanen, M. ja Saramäki, J. 2012. 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management* 278, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.006> 14.11.2017
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M. ja Kukkola, M. 2014. Wood ash in boreal, low-productive pine stands on upland and peatland sites: Long-term effects on stand growth and soil properties. *Forest Ecology and Management* 327, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.031> 14.11.2017
- Salokoski, P. 2017. Tulevaisuuden energia 2030...2050. Taustaraportti. Tekesin katsaus 332/2017, Helsinki 2017. http://tem.fi/documents/1410877/2772829/332_2017_Tulevaisuuden+energia_2030_2050.pdf/4f1c0ec0-58fc-4c1c-9297-7f90ac01615b 14.11.2017
- Sandholm, T. 2017. Myyntipäällikkö. Kaukokiito, Joensuu. Henkilökohtainen tiedonanto sähköpostilla 9.10.2017.
- Saramäki, J. ja Susila, P. 1991. Tuhkalannoitus kivennäismailla. Teoksessa Mäkelä, P. ja Hotanen, J.-P. (toim.) *Metsänkasvatuksen perusteet turve- ja kivennäismailla*. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1991. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 383. 82-83. ISBN 951-40-1159-7. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1159-7> 14.11.2017
- Sikström, U., Almqvist, C. ja Jansson, G. 2010. Growth of *Pinus sylvestris* after the application of wood ash or P and K fertilizer to a peatland in southern Sweden. *Silva Fennica* 44 (3), 411–425. <https://silvafennica.fi/pdf/article139.pdf> 14.11.2017
- Silfverberg, K. 1995. Forest regeneration on nutrient-poor peatlands: Effects of fertilization, mounding and sowing. *Silva Fennica* 29 (3), 205-215. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/1975/9208/029-3_Silfverberg.pdf?sequence=3 14.11.2017
- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 588. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1496-0> 14.11.2017
- Silfverberg, K. ja Hotanen, J.-P. 1989. Puuntuhkan pitkäaikaisvaikutukset ojitetulla mesotrofisella kalvakkanevalla Pohjois-Pohjanmaalla. *Folia Forestalia* 742. ISBN 951-40-1082-5. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1082-5> 14.11.2017

- Silfverberg, K. & Huikari, O. 1985. Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemilla. Metsäntutkimuslaitos. Folia Forestalia 633. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 25 s. ISSN 0015-5543; 633. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0716-6> 14.11.2017
- Silfverberg, K., Huotari, N. ja Kokkonen, A.-M. 2010. Puu- ja turvetuhkan vaikutukset kasvillisuuteen ja männyn taimettumiseen päätehakatulla turvekankaalla. Metsätieteen aikakauskirja 4. <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff10/ff104341.pdf> 14.11.2017
- Silfverberg, K. & Issakainen, J. 2001. Puutuhka ja lannoitteet suomänniköiden ravinnetalouden hoidossa. Metsätieteen aikakauskirja 1/2001, 29–44. <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff01/ff011029.pdf> 14.11.2017
- Silvan, N. ja Hytönen, J. 2016. Impact of ash-fertilization and soil preparation on soil respiration and vegetation colonization on cutaway peatlands. American Journal of Climate Change 5, 178-192. http://file.scirp.org/pdf/AJCC_2016060915301780.pdf 14.11.2017
- Suomen ympäristökeskus SYKE. 2015. Jätteiden hyödyntäminen maarakentamisessa. Internetsivusto. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistonsuojelulain_mukaiset_ilmoitukset/Jatteiden_hyodyntaminen_marakentamisessa 6.1.2017
- Tamminen, P. 1998. Typpi- ja tuhkalannoitus punalatikan vaivaamassa männikössä. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 3, 411–420. <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff98/ff983411.pdf> 14.11.2017
- Tapio. 2017. Puutuhkan käyttö kivennäismaiden metsien lannoituksessa. Hanke-sivusto. <http://tapio.fi/konsultointi/kaynnissa-olevat-hankkeet/puutuhkan-kaytto-kivennaismaiden-metsien-lannoituksessa/> 23.10.2017.
- Tilastokeskus. 2017. Polttoaineluokitus 2017. http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html 11.10.2017
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia, Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20. päivänä maaliskuuta 2013 VNS 2/2013 vp, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto 8/2013. http://tem.fi/documents/1410877/2626968/Energia-ja_ilmastostrategia_2013.pdf/ce0e9b73-f907-454b-b52b-87fa9fa481d2 6.1.2017
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2016. 100-prosenttisesti uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiajärjestelmä. Kansalliseen energia- ja ilmastostrategiaan liittyvä tarkastelu, 24.11.2016. <https://tem.fi/documents/1410877/3570111/100+prosenttia+uusiutuvaa+tarkastelu.pdf/8e4ee341-77c5-4447-b6ce-1f2686a3daec> 14.11.2017
- Työ- ja elinkeinoministeriö (toim. Huttunen R.). 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia 4/2017. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkko-julkaisu.pdf?sequence=1 14.11.2017
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2017b. Taustaraportti kansalliselle energia- ja ilmastostrategialle vuoteen 2030. 1.2.2017 (päiv. 2.2.2017) http://tem.fi/documents/1410877/3570111/Energia-+ja+ilmastostrategian+TAUSTA-RAPORTTI_1.2.+2017.pdf/d745fe78-02ad-49ab-8fb7-7251107981f7 14.11.2017

- Valerie. 2017. Sustainable Forest Biomass: Recycling of Wood Ash. Case study description. <http://www.valerie.eu/index.php/case-studies/sustainable-forest-biomass> 14.11.2017.
- Valtioneuvoston kanslia. 2015. Ratkaisujen Suomi. Pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma 29.5.2015. Hallituksen julkaisusarja 10/2015. Edita Prima, 2015. http://valtioneuvosto.fi/documents/10184/1427398/Ratkaisujen+Suomi_FI_YHDIS-TETTY_netti.pdf/801f523e-5dfb-45a4-8b4b-5b5491d6cc82 6.1.2017
- Vihanninjoki, V. 2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa. Nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. Suomen ympäristökeskus SYKE, Kulutuksen ja tuotannon keskus. <http://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845> 14.11.2017
- Ympäristöministeriö (toim.). 2011. Maarakentamisen uusiomateriaalit. Ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen. Ympäristöministeriön raportteja 11/2011. Helsinki 2011. <http://www.uuma2.fi/sites/default/files/Maarakentamisen%20uusiomateriaalit%20%E2%80%93%20YMa11%20%E2%80%93%202011.pdf> 6.1.2017
- Ympäristöministeriö. 2015. Pariisin sopimus, Suomennosluonnos 11.4.2016. Ympäristöministeriö. <http://www.ym.fi/download/noname/%7B3AF3015B-6900-4059-B58B-65C28DE6F459%7D/118492> 14.11.2017
- Ympäristöministeriö. 2017. Ministeri Tiilikainen: Ympäristöneuvoston LULUCF-päätös Suomelle pettymys. Tiedote 13.10.2017. [http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ministeri_Tiilikainen_Ymparistoneuvoston\(44782\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ministeri_Tiilikainen_Ymparistoneuvoston(44782)) 23.10.2017

PUUTUHKAN KIERRÄTYKSEN EKOSYSTEEMIMALLIN KEHITTÄMINEN

Kyselylomake

Kohde: Puubiomassaa käyttävät hajautetun energiantuotannon toimijat

Toteutus: Kyselytutkimus, puhelinkontaktointi

Saatesanat

Tällä kyselytutkimuksella selvitetään alueellisten puubiomassoja käyttävien lämpölaitosten lähtötietoja. Tietojen pohjalta arvioidaan alueen lämpölaitostoiminnan tilaa ja valmiuksia tuotannossa syntyvät tuhkan kierrätyksen tehostamiseksi. Ratkaisuna voi toimia esimerkiksi yhteistyömallin organisointi, taloudellinen ekosysteemi.

Polttolaitos, polttoaineet ja tuhka

1. Polttoaineet, määrä /v, laatu tiedot, toimittajat				
Polttoaine	Tonnia/v	Kosteus %	Toimittaja	Muuta (mm.epäpuhtaudet)
hake				
pelletti				
kuori				
muu biomassa, mikä				

2. Prosessiolosuhteet	
Kattilatyyppe	
Polttolämpötila	

3. Tuhka	
Määrä tonnia/v	
Analysointi	___ Lannoitevalmiste ___ Maarakentaminen
Tulokset	___ Tiedosto voidaan toimittaa ja tietoja voidaan käyttää

4. Tuhkan nykyinen sijoittelu		
Kohde	Tonnia/v	Vastaanottava taho
Lannoitevalmiste		
Maarakentaminen		
Muu, mikä?		
Jäte		
Mistä hyödyntämisvaihtoehdosta olisitte kiinnostunut?		

Tuhkan käyttö lannoitevalmistena

5. Suurimmat haasteet lannoitevalmistekäytössä omasta näkökulmasta?
6. Onko lähellä toimijoita, joiden kanssa kiinnostusta/mahdollisuus yhteistyöhön?
7. Oletteko kiinnostuneita osallistumaan pilot-kokeeseen?
8. Tiedätkö, onko alueella kiinnostusta tuhkan käytölle?
9. Kuinka suureksi arvioitte vuosittaisen tuhkan käyttömahdollisuuden lähialueilla (tonnia)?
10. Kuinka paljon olisitte valmis Investoimaan esim. käsittelylaitteistoihin ja kaupallistamisen vaatimiin muihin toimenpiteisiin tuhkan kierrätyksen tehostamiseksi? <i>Investointeja mm. laite tuhkan rakeistamiseen tai säkityskone, varastointitilat, CE-merkitsemisen vaatimat analyysit.</i>
11. Muita ajatuksia (esim. oma näkemys lannoitusvaikutuksista omissa metsissä)?