



PIENILÄPIMITTAISEN PUUN MAHDOLLISUUDET HIILENSIDONNASSA

Selvitys soveltuvuudesta biohiilen raaka-aineeksi

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Metsätalousinsinööri (AMK), Evo

kevät 2024

Suvi Koskinen

Metsätalousinsinööri (AMK)

Tekijä Suvi Koskinen

Työn nimi Pieniläpimittaisen puun mahdollisuudet hiilensidonnassa: selvitys soveltuvuudesta biohiilen raaka-aineeksi

Ohjaaja Maija Leppälä

Tiivistelmä

Vuosi 2024

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää pieniläpimittaisen puun mahdollisuuksia hiilensidonnassa. Työssä tutkittiin pienpuun potentiaalia toimia luonnollisena hiilinieluna fotosynteesin myötä ja teknologisena hiilinieluna biohiilimuodossa. Keskeisenä tavoitteena oli selvittää pieniläpimittaisen puun soveltuvuutta työn tilaajatahon PUHI Oy:n biohiilituotannon raaka-aineeksi Hämeenlinnassa sijaitsevalla biohiililaitoksella. Opinnäytetyön yhteydessä tehtiin laboratoriomittakaavan koepyrolyysi. Biohiilestä teetettiin raskasmetallianalyysit ulkopuolisella akkreditoidulla laboratoriolta ja saatujen tulosten perusteella arvioitiin pieniläpimittaisesta puusta valmistetun biohiilen soveltuvuutta eri käyttökohteisiin.

Opinnäytetyössä käytiin läpi asioita pääasiassa pieniläpimittaisen energiapuun markkinatilanteen osalta, mikä kuvaa tässä hetkessä parhaiten myös biohiilen raaka-aineena toimivan pieniläpimittaisen puun markkinaa. Tarkastelualue rajattiin Kanta-Hämeen alueelle. Kyseessä ei ollut taloudellisen kannattavuuden selvitys, vaan metsien kasvun ja hoidon, niihin sidoksissa olevan hiilenkierron, sekä energiapuun markkinatilanteen osalta koottu tietopaketti pienpuun raaka-ainekäyttöön biohiilituotannossa vaikuttavista positiivisista ja negatiivisista tekijöistä. Tekijöiden tunnistamiseen käytettiin nelikenttä- eli SWOT-analyysiä.

Analyysin perusteella on löydettävissä useita vahvuuksia ja mahdollisuuksia, mikä tarkoittaa, että pieniläpimittaisella puulla on potentiaalia toimia raaka-aineena PUHI Oy:n biohiilituotannossa. Vahvuudet liittyvät pitkälti hyviin raaka-aineominaisuuksiin, suureen hiilensidontapotentiaaliin ja metsätalouden sivuvirtojen jalostusasteen nostamiseen. Mahdollisuuksina nähdään erityisesti metsäalan toimijoiden yhteistyö metsänomistajien tietoisuuden lisäämisessä pieniläpimittaisen puun saannon ja biohiilen osalta sekä biohiilituotannon linkittämisessä metsätalouteen. Pieniläpimittaisesta puusta valmistettu biohiili soveltuu laadullisesti monentyyppisiin käyttökohteisiin. Koepyrolyysireaktorissa valmistetun biohiilen raskasmetallitulokset alittivat maanparannuskäyttöä ohjaavat kansalliset lannoitelainsäädännön sekä eurooppalaisen biohiilisertifikaatin (EBC) asettamat haitta-aineiden raja-arvot

Analyysissä tunnistetut heikkoudet ja uhat liittyivät pitkälti markkinavoimiin. Kovan kilpailutilanteen vuoksi pieniläpimittaisen puun kysyntä ja hinnat ovat korkealla, minkä vuoksi materiaalin saatavuuden kanssa voi tulla haasteita. Myös biohiilen toistaiseksi korkea hintataso voi jarruttaa sen käyttöä.

Avainsanat Pieniläpimittainen puu, hiilensidonta, hiilinielu, biohiili, pyrolyysi
Sivut 51 sivua ja liitteitä 3 sivua

The aim of this thesis was to clarify the possibilities of using small-diameter wood in carbon sequestration. This study examines the potential of small-diameter wood to work as a natural carbon sink by the process of photosynthesis and as a technological carbon sink in the form of biochar. The essential goal was to study suitability of small-diameter wood for commercial biochar production at PUHI Oy's the thesis commissioner's factory in Hämeenlinna. A lab-scale experimental pyrolysis was performed as a part of this thesis. A biochar sample was sent to an accredited laboratory for heavy metal analyses. Based on the results, the suitability of biochar made from small-diameter wood for different kind of uses was assessed.

For this thesis, information was collected mainly about the current energy markets of the small- diameter wood, which is the best comparable to the markets of biochar made from small-diameter wood. Geographically this thesis concentrates on the region of Kanta-Häme. This study was not meant to be an economic viability study, but an information package of the forest growth and management linked to the carbon cycle and to the market situation of energy tree in order to find positive and negative factors in the raw material use of small-diameter wood in biochar production. Different factors were identified by using SWOT-analysis.

Based on the analysis, several strengths and opportunities are found. It means that small-diameter wood has potential as raw material in PUHI's biochar production. The strengths are mostly related to excellent raw material quality, high carbon sequestration potential and raising the degree of refinement of forestry side streams. To increase the knowledge of forest owners concerning yield of small-diameter wood, biochar and possibilities to link biochar production to forestry in co-operation between different operators in this sector are seen as possibilities. Biochar made of small-diameter wood is suitable for many kinds of use because of its quality. Heavy metal analysis carried out in lab-scale pyrolysis reactor fall below the limit values in the use of soil amendments set by national fertiliser legislation and the European Biochar Certificate (EBC).

Weaknesses identified in the analysis are related to market forces. Due to hard competition, the demand and prices of small-diameter wood are on a high level which can lead to the yield challenges. Also, the high price of biochar may slow down its use.

Keywords Small-diameter wood, carbon sequestration, carbon sink, biochar, pyrolysis

Pages 51 pages and appendices 3 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Työn tilaaja	3
3	Työn tietoperusta ja tutkimusmenetelmät	5
4	Hiilen kierto metsissä	6
4.1	Kiihtyvä ilmastonmuutos	6
4.2	Hiili metsäekosysteemissä	7
4.3	Metsänhoidon merkitys hiilen kierrossa.....	8
4.3.1	Metsänomistajan hiilikompensaatio	9
5	Metsätalouden sivuvirrat – pieniläpimittainen puu	10
5.1	Markkinat	11
5.2	Saatavuus.....	12
5.2.1	Lyhytkierto- eli vesakasvatusmetsät	15
5.3	Käyttö metsäenergian tuotannossa	16
5.4	Energiapuukauppa ja hinnat	18
5.5	Korjuu, varastointi ja logistiikka	21
6	Biohiilen valmistus, käyttö ja hiilensidonta	22
6.1	Biohiili	23
6.1.1	Biohiilen käyttökohteita	23
6.1.2	Pyrolysointiprosessi.....	25
6.1.3	Biohiili ja hiilensidonta	26
6.1.4	Biohiilimarkkinat.....	28
6.2	Biohiilen käyttökohteita metsätaloudessa.....	28
6.2.1	Biohiilen käyttö biosuodinmateriaalina metsäojitusalueiden valumavesien käsittelyssä	29
6.2.2	Biohiilen hyödyntäminen metsäpuiden taimien kasvatuksessa	30
7	Koepyrolyysitutkimus	31
7.1	Tutkimuksen tausta.....	32
7.2	Tutkimuksen toteutus.....	35
7.3	Tutkimustulokset ja niiden analysointi	37
8	Nelikenttä eli SWOT-analyysi.....	39
9	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	41
9.1	Vahvuudet ja mahdollisuudet	41
9.2	Heikkoudet ja uhat	43
9.3	Pohdinta	44

Lähteet	45
---------------	----

Kuvat

Kuva 1. PUHI Oy:n laitosaluetta Karanojan alueella Hämeenlinnassa	4
Kuva 2. Pieniläpimittaista puuta.	10
Kuva 3. Hoitorästikohde.....	12
Kuva 4. Esiin raivattu kuusen taimikko.....	13
Kuva 5. Karttaote energiapuukohdekeskittymistä Kanta-Hämeessä.	14
Kuva 6. Kuitupuun hinta 13.4.2024	19
Kuva 7. Energiapuukasa.....	22
Kuva 8. Havainnekuva biohiilen rakenteesta.....	23
Kuva 9. Woodgrow Oy:n biohiilituoteseloste	31
Kuva 10. Pieniläpimittaista lehtipuuta kotimetsästä.....	35
Kuva 11. Tuoretta seulottua puusilppua.....	35
Kuva 12. Lehtipuusekoituksesta pyrolysoitua biohiiltä.....	36
Kuva 13. SWOT-analyysi pieniläpimittaisen puun käytöstä biohiilen raaka-aineena. ...	40

Kaaviot

Kaavio 1. PUHI Oy:n prosessi.....	4
Kaavio 2. Metsähakkeen käyttömäärät energiantuotannossa koko maan alueella vuosien 2018–2023 välisenä aikana.	16

Kaavio 3. Metsähakkeen käyttömäärät raaka-aineittain Kanta-Hämeessä vuosina 2018–2023.	17
Kaavio 4. Pienpuun käyttö energiantuotannossa maakunnittain vuonna 2023.	18
Kaavio 5. Energiapuun kanto- ja hankintahintojen kehitys alueittain Q2/22-Q4/23	20
Kaavio 6. Energiapuun hankintaketju	21
Kaavio 7. Pajubiohiilen elinkaaren ilmastovaikutukset.....	27

Taulukot

Taulukko 1. Eri raaka-aineista valmistetun biohiilen kemiallisia ominaisuuksia.	24
Taulukko 2. Maanparannusaineiden suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet	33
Taulukko 3. Ainesosaluokka 9, pyrolyysihiili.....	33
Taulukko 4. EBC-agro raja-arvot haitta-aineille	34
Taulukko 5. Valmiin biohiilen raskasmetallipitoisuuksia (mg/kg).....	37
Taulukko 6. Havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa	38

Liitteet

Liite 1.	Vapaaehtoisen eurooppalaisen biohiilisertifikaatin (EBC) biohiilen sisältämille haitta-aineille asettamat raja-arvot
Liite 2.	Tutkimustodistus raskasmetallianalyseistä 09042024
Liite 3.	Opinnäytetyön aineistonhallintasuunnitelma

Käsiteluettelo

Biohiili

Orgaanisesta biomassasta korkeassa lämpötilassa ja lähes hapettomissa olosuhteissa keinoitekoisesti valmistettu hiili.

EBC

Vapaaehtoinen eurooppalainen biohiilisertifikaatti.

Energiapuu

Energiatuotannossa käytettävä, yleensä pieniläpimittainen lehti- ja havupuu.

Fotosynteesi

Yhteyttämisprosessi, jossa kasvit, levät ja bakteerit sitovat itseensä hiilidioksidia (CO₂) ja vettä (H₂O) ja auringon säteilyenergian avulla muuttavat niitä sokereiksi ja hapeksi.

Hiilen kierto

Alkuainehiili (C) kiertää eri muodoissaan maapallolla maaperän, vesistöjen ja ilmakehän välillä.

Hiilensidonta

Fotosynteesiin perustuva prosessi, jossa kasvit sitovat itseensä ilmakehän hiilidioksidia.

Hiilikompensaatio

Omassa toiminnassa syntyvien päästöjen hyvittämistä ostamalla ja rahoittamalla toisaalla tehtäviä hiilensidontaa lisääviä toimenpiteitä.

Hiilikrediitti

Yksikkö, jota käytetään vapaaehtoisilla hiilikompensaatiomarkkinoilla. Vastaa yhden hiilidioksidiekvivalenttitonin suuruista hiilenpoistoa.

Hiilinielu

Hiilivarasto, joka kasvaa ja sitoo aktiivisesti hiilidioksidia ilmakehästä.

Hiilitase

Kuvaa hiilivaraston muutosta tietyssä aikajänteessä. Hiilivarasto on kasvanut, kun tase on positiivinen. Hiilivarasto on vastaavasti pienentynyt taseen ollessa negatiivinen.

Hiilivarasto

Maanpäällinen ja -alainen, elävä ja kuollut biomassassa, johon hiili on sitoutuneena.

Hiilidioksidiekvivalenttitonni (CO₂-ekv)

Verrannaisyksikkö, jossa kaikkien kasvihuonekaasujen vaikutus suhteutuu hiilidioksiidiin. Yksi CO₂-ekv vastaa laskennallisesti yhden hiilidioksiditonin ilmastoa lämmittävää vaikutusta.

Kaskadikäyttö

Materiaalien mahdollisimman tehokas hyödyntäminen ja korkea jalostusaste ennen loppukäyttöä. Energiahyödyntäminen tai kaatopaikalle loppusijoittaminen ovat viimesijaisia vaihtoehtoja.

Luonnollinen hiilinielu

Kaikki organismit, jotka käyttävät fotosynteesiä hiilensidonnassa.

Lyhytkierto- eli vesakasvatusemetsä

Puubiomassa, jota kasvatetaan raaka-aineeksi tai energiaksi metsissä, joiden kiertoaika on keskimäärin 5–8 vuotta.

Pieniläpimittainen puu eli pienpuu

Ainespuun kaupalliset mitta- ja laatuvaatimukset täyttämätön puu, jota käytetään paljon energiapuuna.

Pyrolyysi eli kuivatislaus

Lämpökemiallinen reaktio, jossa orgaanisia kiinteitä aineita hajotetaan kuumentamalla lähes hapettomissa olosuhteissa.

Teknologinen hiilinielu

Hiilidioksidin poisto ilmakehästä teknologian keinoin ja varastointi esimerkiksi pysyviin geologisiin hiilivarastoihin tai biohiileen.

1 Johdanto

Suomi on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, jolloin hiilinielujen tulisi sitoa vähintään yhtä paljon hiilidioksidia kuin ilmapäästöjä syntyy. Tavoitteeseen pääseminen vaikuttaa epävarmalta, sillä tällä hetkellä päästöjä on vielä 2–3 kertaa enemmän nykyisten hiilinielujen kapasiteettiin nähden. Käytännön keinoja tavoitteeseen pääsemiseksi ovat päästöjen vähentäminen nykyisestä sekä hiilinielujen turvaaminen ja vahvistaminen, mikä vastaa hyvin myös Euroopan unionin ilmastopolitiikan tavoitteita. (Suomen ympäristökeskus, 2023)

Hiilikeskustelu on tullut jäädäkseen suomalaiseen metsätalouteen. Sanotaan, että hiilestä on tullut uusi päätösmuuttuja metsätalouden päätöksentekoon. (Vanhatalo, 2024) Suomessa metsät ovat nykyhetken merkittävimpiä hiilinieluja, koska ne sitovat yli 40 % kansallisista kasvihuonekaasupäästöistä. (Lehtonen ym., 2020) Ilmakehän hiilidioksidia sitoutuu tehokkaasti puustoon ja muuhun metsäkasvillisuuteen luonnon omissa kasvuprosesseissa. Ihminen voi toiminnallaan edistää puuston hyvää kasvukuntoa ja samalla tehokasta hiilen sidontaa. Oikein ajoitetut ja tarkoituksenmukaiset metsänhoitotoimenpiteet lisäävät puiden kasvua sekä luovat perustaa puuston terveydelle ja puolustuskyvyille metsätuhoja vastaan. Eri toimenpidevalinnoilla vaikutetaan myös monimuotoisuuteen ja hiilen varastoitumiseen. Mitä pidempi kiertoaika metsällä on, sitä vanhemmiksi puut kasvavat ja sitä suurempi hiilivarasto ehtii muodostua.

Hiilensidonnin keinovalikoimasta löytyy tänä päivänä luontaisiin kasvuprosesseihin perustuvien hiilinielujen lisäksi myös teknologisia hiilinieluja, jollaiseksi esimerkiksi biohiili luokitellaan. Biohiilen avulla ilmakehästä poistetaan hiilidioksidia hyvin pitkäkestoisesti, vähintään satojen vuosien ajaksi, ja jopa pysyvästi. Puhutaan niin sanotuista negatiivisten päästöjen teknologioista (NET), joilla ei korvata, vaan täydennetään kansallisia päästövähennystoimenpiteitä (VTT, 2023). Teknologisten hiilinielujen yhteiskunnallista vaikuttavuutta lisää myös se, että nykyinen hallitus on sitoutunut hallitusohjelmassaan edistämään teknologisten nielujen käyttöönottoa (Valtioneuvosto, 2023). Myös YK:n alaisuudessa toimiva hallitusten välinen ilmastomuutospaneeli IPCC on nostanut esiin biohiilen mahdollisuuksia hiilensidonnassa jo vuonna 2020 (Frilander, 2021).

Syvennyin metsätalouden sivuvirtoihin ja niiden hyödyntämismahdollisuuksiin biohiilen raaka-aineena suorittaessani metsätalousinsinöörin (amk) tutkintoon kuuluvaa asiantuntijaharjoittelua PUHI Oy:n biohiililaitoksella Hämeenlinnassa. Mutta miten PUHI:n toiminta liittyy metsätalouteen? Vastaus löytyy yrityksen ympäristöluvasta, jonka Hämeenlinnan kaupunki myönsi PUHI:lle kesällä 2023. PUHI alkaa valmistaa biohiiltä puu- ja

maatalousperäisistä sivuvirroista vuoden 2024 aikana. PUHI Oy käyttää tuotannon alkuvaiheessa biohiilen raaka-aineena kierrätyspuuta, joka voi olla peräisin muun muassa rakentamisesta, purkukohteista tai puunjalostusteollisuudesta. PUHI:n ympäristöluvan mukaisiin raaka-aineisiin kuuluvat myös metsätalouden sivuvirrat, kuten muun muassa hakkuutähteet, kannot sekä pieniläpimittainen puu, joiden vuotuinen vastaanottolupa on yhteensä 7 000 t/a. Materiaali vastaanotetaan pääasiassa hakkeena tai murskeena. (Hämeenlinnan kaupunki, 2023, s. 7)

Harjoittelun aikana mielenkiintoni alkoi kohdistua erityisesti pieniläpimittaiseen puuhun, eli pienpuuhun, jolla tarkoitetaan ainespuun mitat täyttämätöntä puuta. Pienpuu liikkuu markkinoilla tällä hetkellä pääasiassa energiapuuna, josta valmistetulla hakkeella on nykyisin merkittävä rooli Suomen energiasektorilla. Pienpuu on puhdas kotimainen raaka-aine, jonka uusiutuvuus on nopeaa ja saatavuus ympärivuotista. Pienpuuta on mahdollista korjata nuoren metsän kunnostusten ja ensiharvennusten yhteydessä, mutta myös muun muassa pellonreunojen, voimalinjojen alusten, ojien- ja tienvarsien raivauksista.

Pienpuun arvo ja arvostus ovat nousseet lyhyen ajan sisällä mainittavan nopeasti. Taustalla vaikuttavat erityisen paljon energian hinnannousu ja metsähakkeiden kysynnän kasvu, jotka ovat lähes suoraa seurausta vuonna 2022 Venäjän aloittamasta hyökkäyssodasta Ukrainaan. Sodasta seuranneet Venäjään kohdistetut pakotteet tyrehtyttivät nopeasti myös venäläisen puun tuonnin Suomeen. Vaikutus oli huomattava, sillä Venäjältä tuotiin puuta esimerkiksi vuonna 2021 yhdeksän miljoonaa kuutiometriä, joka vastaa noin 10 % metsäteollisuuden puun kokonaiskulutuksesta. Venäläisestä tuontipuusta energiahaketta oli noin kaksi miljoonaa kuutiota. (YLE, 2022a)

Pieniläpimittaisen puun kysyntä kasvaa tulevaisuudessa entisestään ja kilpailu markkinoilla kovenee, kun uusia puupohjaisia tuotteita ja markkinoita kehitetään perinteisen energiantuotannon rinnalle. Ilmastonmuutoksen hillintään liittyvät käytännön toimet kiristyvät jatkuvasti ja monet niistä nivoutuvat metsätaloudellisiin toimenpiteisiin. Samaan aikaan biohiilen kotimainen tuotanto laajenee. Biohiilen raaka-aineena puupohjaiset raaka-ainemateriaalit ovat keskeisiä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää pieniläpimittaisen puun mahdollisuuksia hiilensidonnassa. Vastauksia lähdettiin hakemaan selvittämällä pienpuun potentiaalia toimia luonnollisena hiilinieluna fotosynteesin myötä ja teknologisenä hiilinieluna biohiilimuodossa. Asiaa puntaroidaan lisää niin metsätaloudellisten tekijöiden kuin biohiilen valmistuksen ja käytönkin näkökulmasta. Opinnäytetyössä käydään läpi asioita pääasiassa pieniläpimittaisen energiapuun markkinatilanteen osalta, mikä kuvaa tässä hetkessä parhaiten myös biohiilen

raaka-aineena toimivan pieniläpimittaisen puun markkinaa. Tarkastelualue rajattiin Kanta-Hämeen alueelle. Lisäksi työssä etsitään perusteita, joiden pohjalta pieniläpimittaisesta puusta voisi muodostua varteenotettava raaka-ainevaihtoehto jatkuvaan tuotantoon PUHI Oy:n biohiililaitokselle. Tämä tarkoittaisi käytännössä sitä, että pieniläpimittaisen puun raaka-ainekäyttömäärä olisi perusteltua nostaa nykyisen ympäristöluvan sallimaan maksimimäärään, joka vastaa noin kolmannesta laitoksen koko tämänhetkisestä ympäristöluvanmukaisesta raaka-ainevirrasta.

Tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyössä haetaan vastauksia:

- Mitkä raaka-aineominaisuudet ja markkinoilla vaikuttavat tekijät tuovat lisäarvoa pieniläpimittaiselle puulle biohiilen raaka-aineena?
- Mitkä raaka-aineominaisuudet ja markkinoilla vaikuttavat tekijät puolestaan asettavat haasteita pieniläpimittaisen puun raaka-ainekäytölle?
- Kuinka paljon raskasmetalleja pieniläpimittaisesta lehtipuusta valmistettu biohiili sisältää ja onko pitoisuuksilla vaikutuksia biohiilen käyttökohteisiin?

On hyvä huomioida, että kyseessä ei ole ensimmäinen kerta, kun pieniläpimittaisen puun laatua tutkitaan tai sitä käytetään biohiilen raaka-aineena Suomessa. Tässä opinnäytetyössä lähdettiin hakemaan vastauksia tutkimuskysymyksiin PUHI Oy:n lähtökohdista ja tarpeista. Valmiin opinnäytetyön tarkoituksena on toimia työn tilaajalle ajankohtaisena ja metsätalospainotteisena tietopakettina sekä päätöksenteon tukena biohiilen raaka-ainehankintoja vertailtaessa ja päätettäessä.

2 Työn tilaaja

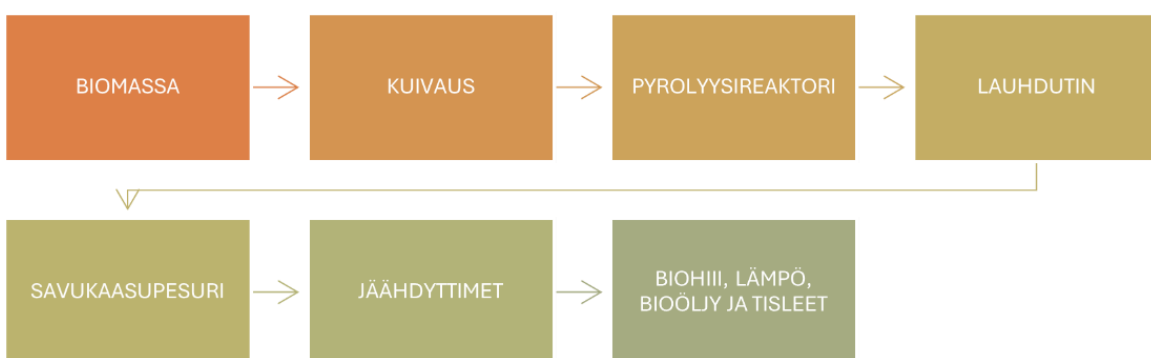
PUHI Oy on perustettu vuonna 2021. Yrityksen kotipaikka on Liperi Pohjois-Karjalassa (Suomen Asiakastieto Oy, n.d.). PUHI:n tavoitteena on lähes 20 000 tonnin vuotuisella raaka-ainekapasiteetilla toimivan biohiililaitoksen kaupallisen tuotannon käynnistäminen Hämeenlinnassa sijaitsevalla laitoksella vuoden 2024 aikana. (PUHI Oy, 2023) PUHI kehittää innovatiivisesti biohiilen valmistukseen liittyvää pyrolyysitekniikkaa. Tavoitteena on rakentaa eri kokoluokkiin skaalautuvaa liiketoimintaa. Hämeenlinnan laitos ei ole jäämässä ainoaksi laitokseksi, sillä PUHI etsii aktiivisesti yhteistyökumppaneita ja laajenemismahdollisuuksia niin Suomesta kuin ulkomailtakin. Biohiililaitos sijaitsee Karanojan jätteenkäsittelyalueella entisen St1 Renewable Energy Oy:n bioetanolilaitoksen tiloissa. PUHI modifioi puitteet biohiilituotannolle soveltuviksi (kuva 1).

Kuva 1. PUHI Oy:n laitosaluetta Karanojan alueella Hämeenlinnassa (PUHI Oy, 2023).



Vuositasolla biohiilen tuotantomäärä on noin 7 500 t. Biohiiltä myydään markkinoille ensisijaisesti maanparannukseen sekä hulevesien käsittelyyn. Muita prosessissa syntyviä tuotteita ovat pyrolyysikaasu, jolla voidaan lämmittää reaktoria, sekä bioöljy ja tisleet, jotka toimitetaan jatkojalostukseen. Prosessissa syntyy myös lämpöä, jonka ylijäämä myydään kaukolämpöverkkoon. (Hämeenlinnan kaupunki, 2023, s.6) Kaaviossa 1 on kuvattu yksinkertaistetusti PUHI:n biohiilen tuotantoprosessi.

Kaavio 1. PUHI Oy:n prosessi (mukaillen Hämeenlinnan kaupunki, 2023, s. 6)



PUHI:n biohiilen valmistusprosessi on hiilinegatiivinen, eli se poistaa ilmakehästä enemmän hiilidioksidia, kuin mitä se prosessissaan vapauttaa. PUHI:n prosessissa yksi tonni biohiiltä sitoo 3,6 tonnia CO₂-ekv. päästöjä, kun taas sen valmistus tuottaa noin 0,4–0,8 tonnia CO₂-ekv. päästöjä. Näiden lukujen välinen erotus lasketaan hiilikrediiteiksi, joita PUHI:n on tarkoitus myydä vapaaehtoisilla päästökompensaatiomarkkinoilla. (Hämeenlinnan kaupunki, 2023, s. 10) Yksi hiilikrediitti vastaa yhtä hiilidioksidiekvivalenttonnia (CO₂-ekv.).

Hiilidioksidiekvivalentilla tarkoitetaan hiilidioksidiin suhteutettua kasvihuonekaasujen yhteismittaa, jolla kuvataan kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua vaikutusta ilmaston lämpenemiseen (Tilastokeskus, n.d.). Puhilaisten tavoitteena on saavuttaa 300 000 hiilidioksiditonin vuotuinen hiilidioksidin poisto vuoteen 2035 mennessä (PUHI Oy, 2023).

3 Työn tietoperusta ja tutkimusmenetelmät

Kyseessä on tutkimuspainotteinen opinnäytetyö. Tietoperusta rakentuu aiheen ja tavoitteen kannalta keskeisestä kirjallisesta aineistosta, kuten tutkimus- ja ajankohtaistiedosta, sekä työn osana tehtävän soveltavan tutkimuksen tulosaineistosta. Tärkeänä tietolähteenä toimii mahdollisuuksien mukaan myös PUHI:n henkilökunnan asiantuntijatieto.

Aihetta lähestytään teoreettisesti sekä metsätalouden että työn tilaajan näkökulmista. Yleisemmällä teoriatasolla perehdytään metsissä tapahtuvaan hiilen kiertoon ja kuinka metsänhoitotoimenpiteillä voidaan vaikuttaa siihen etenkin muuttuvassa ilmastossa. Biohiilestä, sen valmistuksesta, käytöstä ja markkinatilanteesta tehdään yleiskatsaus. Työssä nostetaan esiin muutama ajankohtainen esimerkki biohiilen käytännön sovelluksista metsätaloudessa. Työn keskeisenä sisältönä syvennytään varsinaisen tutkimuksen kohteena olevaan pieniläpimittaiseen puuhun ja siihen, millä tavalla pieniläpimittainen puu on mukana hiilen kierrossa. Raaka-ainehankinnan näkökulmasta poimitaan aiheen kannalta oleellisia tietoja pienpuun alueellisesta saatavuudesta, markkinatilanteesta, hankintaketjusta sekä laadullisista ja teknisistä ominaisuuksista. Näiden tietojen avulla työn tilaaja pystyy arvioimaan monipuolisesti metsätalouden näkökulmat huomioiden pieniläpimittaisen puun soveltuvuutta biohiilen raaka-aineeksi.

Opinnäytetyön osana tehtävän laboratoriomittakaavan koepyrolyysin tarkoituksena on selvittää pieniläpimittaisen puun laadullisia ja teknisiä edellytyksiä toimia biohiilen raaka-aineena. Koepyrolyysissä käytetyt lämpötilat, viipymäajat ja koneistot ovat osa työn tilaajan tuotekehitystä, eikä niihin liittyviä tietoja näin ollen julkaista opinnäytetyössä. Työssä käsitellään kuitenkin yleisellä tasolla biohiilen laatuun vaikuttavia pyrolysoinnin prosessitekniisiä tekijöitä.

Valmiista biohiilestä teetetään laatuanalyysit tilaajan kannalta merkityksellisten ominaisuuksien osalta. Saatuja tuloksia verrataan pienpuusta ja siitä valmistetusta biohiilestä tehtyihin laatututkimuksiin sekä lakien ja asetusten raja-arvoihin. Tuloksia hyödynnetään soveltuvin osin johtopäätösten teossa. Lopuksi työssä kootaan yhteen sekä kirjallisuuskatsauksesta että käytännön tutkimuksesta saatuja tietoja pieniläpimittaisen puun

raaka-ainekäyttöön liittyvistä vahvuuksista, heikkouksista, sekä tulevaisuuden mahdollisuuksista ja uhkista nelikenttä- eli SWOT-analyysin avulla.

4 Hiilen kierto metsissä

Suomessa on metsää yli 75 % maapinta-alasta, minkä ansiosta Suomi sijoittuu kärkisijalle Euroopan metsäisimpien maiden joukossa. (Lehtonen ym., 2020) Metsien tulevaisuuden osalta keskeisessä roolissa ovat yksityiset metsänomistajat, jotka omistavat yli 60 % suomalaisesta metsätalousmaasta. Yksityiset metsät vaihtavat omistajaa usein perintönä tai sukupolvenvaihdosten yhteydessä ylisukupolvisissa ketjuissa. Uuden sukupolven metsänomistajat asuvat yhä harvemmin enää tilalla ja omistajakunta muuttuu entistä kaupunkilaisemmaksi. Valtio-omisteista metsää on noin neljäsosa pinta-alasta ja loppuosa omistuksista jakautuu yhtiöiden, kuntien, seurakuntien ja yhteisöjen kesken. (Hänninen, 2020, ss. 12–14)

4.1 Kiihtyvä ilmastonmuutos

Ilmasto muuttuu tällä hetkellä vauhdilla. Erityisenä uhkana pidetään maapallon keskilämpötilan nousua, jota ihmistoiminta kiihdyttää esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käytöllä ja metsien, etenkin sademetsien kestäättömillä hakkuilla. Ilmakehään vapautuu kasvavia määriä kasviuonekaasuja, joista määrältään merkittävin on hiilidioksidi (CO₂). Muita ilmakehän lämpenemiseen vaikuttavia kaasuja ovat esimerkiksi metaani (CH₄), otsoni (O₃) ja dityppioksidi eli typpioksiduuli (N₂O). (Euroopan komissio, n.d.-a)

Ilmaston lämpeneminen heijastelee metsäekosysteemeihin sekä suoria että välillisiä vaikutuksia. Sään ääri-ilmiöt tulevat koettelemaan entistä rajummin puiden kasvua kuumuudella ja kuivuudella, lumikuormilla, metsäpaloilla, myrskytuulilla ja tuholaisilla. Korjuu- ja kuljetusolosuhteet muuttuvat haastavammiksi leudontuvien talvien ja roudan vähenemisen myötä. Samanaikaisesti puuston kasvu ja hiilidioksidin sidonta hyötyvät lämpötilan noususta ja pidentyvistä kasvukaudesta. Yhä useampien puulajien on mahdollista laajentaa kasvualueitaan pohjoisemmaksi, kun taas toisille lajeille, kuten kuuselle, entiset hyvät olosuhteet muuttuvat epäedullisiksi. Vielä ei voida varmuudella tietää mitkä ilmastonmuutostekijät ottavat ylivoimaa tässä tasapainoilussa, mutta on mahdollista ennakoita tulevia mullistuksia. (Euroopan komissio, n.d.-b)

4.2 Hiili metsäekosysteemissä

Hiili kiertää luonnollisten prosessien myötä maapallon suurten hiilivarastojen, kuten ilmakehän, vesistöjen, biomassan sekä maaperän välillä. Hiiltä vapautuu ja sitoutuu jatkuvasti. Metsissä hiili aloittaa kiertonsa, kun kasvit sitovat fotosynteesissä eli yhteyttämisprosessissa ilmakehän hiilidioksidin sisältämää hiiltä itseensä osaksi metsäbiomassaa. Hiilen kiertoa ohjailevat useat eri ympäristötekijät, kuten lämpötila, kosteus ja maaperän mikrobit, sekä biologiset, kemialliset ja fysikaaliset olosuhteet. Metsissä hiili sitoutuu metsäekosysteemin elävään ja kuolleeseen biomassaan, sekä maan päällä että maanpinnan alapuolella. Puut sitovat kasvaessaan hiiltä runkoihin, oksistoihin, neulasiin, lehtiin, juuristoihin ja karikkeeseen. Puihin on sitoutunut noin kolmasosa metsän sisältämästä hiilestä, josta suuri osa maan alle juuristoon. Kaksi kolmasosaa on sitoutuneena kuolleessa orgaanisessa aineessa, eli metsämaassa, jonne on kerääntynyt hiiltä vähitellen vuosituhansien aikana. Suomessa kaikkein eniten hiiltä on varastoituneena suoturpeeseen. (Itä-Suomen yliopisto, n.d.)

Yhden keskimääräisen kasvukauden aikana, eli noin 180 vuorokaudessa, suomalaiset metsät sitovat hiilidioksidia noin 150 000 000 kg päivässä. Yhden puukuution on arvioitu sitovan kasvaessaan itseensä 1 000 kg hiilidioksidia ja hehtaarin suomalaista metsää noin 4 700 kg hiilidioksidia vuodessa. (Karvonen, 2019) Metsien kyky sitoa ja varastoida hiiltä vaihtelee metsän kehitysvaiheen mukaan. Hiilensidonta on voimakkainta hyvin hoidetuissa ja nopeasti kasvavissa nuorissa metsissä. Eteläisessä Suomessa rungon tilavuuskasvu on suurimmillaan noin 30–60-vuotiaana, jolloin myös hiilidioksidia sitoutuu eniten. Tämän jälkeen kasvu hidastuu, mutta ei täysin loppu. Hiiltä on varastoituneena eniten uudistuskypsissä metsissä. Vanha puusto toimii hiilensidontan osalta tasapainossa, kun hiilivarasto vielä hitaasti kasvaa ja samalla pienenee puuston lahotessa. Erityisesti suojelualueilla hiilivarastot ovat suuria ja säilyvät pitkään, koska hakkuita ei tehdä. (MMM, 2024; Karvonen, 2019)

Hiilen poistumista tapahtuu puiden luonnollisessa lahoamisessa, mutta huomattavasti nopeutetummin hakkuiden yhteydessä. Hiiltä kulkeutuu puutavaran mukana pois metsästä. Mikäli puusta valmistetaan puutuotteita, ne sitovat hiiltä itseensä kymmeniksi vuosiksi toimien samalla hiilivarastoina. Jos taas puutavara päättyy metsähakkeeksi energiantuotantoon, vapautuu puuhun sitoutunut hiili välittömästi polton yhteydessä ilmakehään. Mikäli myös hakkuutähteet korjataan, poistuu niiden mukana hiiltä sisältävää ja metsänpohjaa hitaasti lannoittavaa kariketta. Mikäli hakkuutähteet jätetään paikoilleen, alkavat ne hajota ja samalla vapauttaa hitaasti hiiltä takaisin ilmakehään. (Metsänhoidon suositukset, n.d.-a) Edellä kuvattujen toimintojen seurauksena metsän hiilitase on joko

positiivinen, jolloin varastoituvan hiilen määrä on suurempi kuin poistuvan, tai negatiivinen, jolloin poistuma on varastoitunutta hiilimäärää suurempi. (Vanhatalo, 2024)

4.3 Metsänhoidon merkitys hiilen kierrossa

Metsänomistajien metsäsuhde ja sen taustalla vaikuttava arvomaailma ovat monipuolistumassa, kun perinteisen metsien tuoman taloudellisen turvan rinnalle nousee varteenotettaviksi vaihtoehtoisiksi aineettomia arvoja. Valittavana on aiempaa enemmän luonnon monimuotoisuutta, ilmastokestävyyttä ja hiilensidontaa tehostavia tapoja hoitaa metsiä. Jokainen metsänomistaja päättää itsenäisesti mitä tavoitteita haluaa metsäomaisuudellaan saavuttaa. Arvot eivät ole automaattisesti toisiaan poissulkevia, vaan parhaimmassa tapauksessa ne täydentävät toisiaan. Ilmastokestävästi hoidettu metsä voi tuottaa yhtä hyviä puukauppataloja, kuin perinteisesti hoidettu talousmetsäkin.

Ihminen vaikuttaa hakkuilla ja muilla metsänhoidon toimenpiteillä metsäekosysteemin hiilenkiertoon ja hiilivaraston muutoksiin. Oikea-aikaisella ja kohteelle sopivalla metsänhoidolla voidaan turvata puuston kasvumahdollisuuksia myös muuttuvassa ilmastossa. Eri metsänhoidon keinoin on mahdollista pyrkiä sopeutumaan ilmastonmuutokseen ja samalla hillitsemään sitä. Sopeutumisella tarkoitetaan metsänhoidossa tuhoriskien ennakointia ja hallintaa. Tällöin metsänhoidollisia toimenpiteitä voivat olla muun muassa jalostetun viljelymateriaalin käyttö, sekapuustoisuuden ja lehtipuuseoksen suosiminen sekä oikean puulajin valinta oikealle kasvupaikalle. (Metsäkeskus, n.d.-a) Vastaavasti nopea reagointi tuhoihin, seuraustuhojen ehkäiseminen ja nopea tuhokohteen uudistaminen, ovat osa sopeutumista. Ilmastonmuutoksen hillinnällä viitataan hiilinielujen ja -varastojen ylläpitämiseen ja vahvistamiseen. Käytännön hillintäkeinoina voivat toimia esimerkiksi taimikon hoito, pidennetty kiertoaika, metsitys tai suojele. Myös puuntuotannon maksimointiin tähtäävillä hoitotoimenpiteillä lisätään hiilen sitoutumista ja varastointia, samoin kuin hakkuissa saatavan ainespuun hyödyntämisellä pitkäikäisissä puutuotteissa. (Vanhatalo, 2024)

Muun muassa kaikki edellä mainitut metsänhoitotoimenpiteet sisältyvät Tapion koordinoimana laadittuihin Metsänhoidon suosituksiin, joita on varsinkin viime vuoden aikana päivitetty merkittävästi. Suositusten laadinnassa hyödynnetään tuoreinta käytettävissä olevaa tutkimustietoa ja kannustetaan metsänomistajia metsiensä kestävään hoitoon. Päivityneet suositukset huomioivat entistä laajemmin metsänhoidon ilmastokestävyyttä, monimuotoisuutta ja hiilenkiertoa. Metsänhoidon päivityksiin on lisätty tietoa esimerkiksi siitä, kuinka eri metsänhoitotoimenpiteet vaikuttavat hiilen sitoutumiseen ja vapautumiseen. (Vanhatalo, 2024) Metsänhoidon suositukset ovat vapaaehtoisia, mutta ne ovat vuosien

varrella juurruttaneet itsensä tukevasti suomalaisten metsänomistajien ja alan toimijoiden arkeen. Suositukset ovat laajalti käytössä ja näin myös ilmastokestävät metsänhoitotoimenpiteet tulevat metsänomistajille tutummiksi ja jalkautuvat metsäalan toimijoiden ansiosta arjen metsänhoitoon.

4.3.1 Metsänomistajan hiilikompensaatio

Metsänomistajille on tarjolla hiilensidontaa myös kaupallistetussa hiilikompensaation muodossa, jolloin on mahdollista tienata metsäomaisuudella muutenkin kuin päätehakuutuloilla. Kuten metsänhoidon suositukset, myös hiilikompensaatio on täysin vapaaehtoista. Yksityisten metsänomistajien lisäksi hiilikompensaatiopalvelun kohderyhmänä voivat olla myös yritykset ja yhteisöt.

Hiilikompensaatiossa metsänomistaja sitoutuu kasvattamaan hiilivarastoja metsissään esimerkiksi lannoituksen mukanaan tuoman lisäkasvun muodossa. Sovitussa määrääjassa tapahtuneesta ja mittaamalla todennetusta kasvusta maksetaan korvaus. Samalla metsänomistaja sitoutuu esimerkiksi siihen, että sopimuskaudella ei tehdä metsänhoitotoimenpiteitä. Tämän tyyppistä lisäansaintamallia tarjoavat esimerkiksi metsänhoitoyhdistykset ja yksityiset toimijat. Markkinoilla toimii hiilivarastojen kasvattajien, hiilensidontapalveluita tarjoavien ja kompensaatioiden myyjien lisäksi luonnollisesti niitä, jotka ostavat hiilikompensaatiota, eli rahoittavat toisaalla tehtäviä hiilensidontaa lisääviä toimenpiteitä omia päästöjään hyvittääkseen. Kauppaa käydään päästöhyvityksiköillä, jotka hiilikompensaatiossa ovat hiilikredittijä. Hiilikompensaation hinta määräytyy kansainvälisen päästökaupan ohjaamana. (Itä-Suomen yliopisto, n.d.)

Vapaaehtoiset päästökompensaatiojärjestelmät ovat kohdanneet paljon arvostelua sekä epäilyjä esimerkiksi siitä, että yritykset yrittäisivät välttää kalliimpia päästövähennystoimenpiteitä ostamalla halvempaa kompensaatiota muualta. Myös päästöjen kaksoislaskennan riskistä on ollut paljon uutisointia. Vapaaehtoisen päästömarkkinan lisäksi on olemassa valtiollinen päästöraportointi ja vaarana on, että samat hiilinielut lasketaan kahteen eri järjestelmään. Epävarmuuden ymmärtää, sillä vapaaehtoisia päästömarkkinoita ei ohjata vielä tällä hetkellä lainsäädännöllä ja markkinat ovat vielä toistaiseksi melko hajanaiset. Markkinoilla toimii kuitenkin jo useita eri tahoja ja tahtotila on vahva saada aikaan vakiintuneita käytäntöjä sekä luotettavaa tilastointia ja seurantaa. (Osta vastuullisesti, 2022)

5 Metsätalouden sivuvirrat – pieniläpimittainen puu

Metsätalouden, tai tarkemmin ilmaistuna, puunkorjuun sivuvirroilla tarkoitetaan ainespuun hakkuissa syntyviä sivutuotteita, joita syntyy pääasiallisten tuotteiden, eli tukki- ja kuitupuuhakkuiden ohessa. Hakkuista saatavasta puuaineksesta on keskimärin 2/3 runkopuuta, joka ohjautuu pääosin metsäteollisuuden käyttöön. Jäljelle jäävä osa koostuu sivuvirroista, eli hakkuutähteistä, kuten latvus- ja oksamassoista, kannoista, kaupalliset mitta- ja laatuvaatimukset täyttämättömistä rungon osista eli lumpeista sekä nuoren metsän kunnostuksessa ja harvennuksessa korjattavasta pieniläpimittaisesta puusta. Edellä mainituista sivuvirroista tuotetaan metsähakkeita ja -mursketta, kuten kokopuu- ja rankahaketta, metsätähdehaketta ja kantomursketta. (BIOS-tutkimusyksikkö, 2019)

Pieniläpimittaisella puulla eli pienpuulla (kuva 2) tarkoitetaan ainespuun mittoja pienempää puuta, jonka teollinen hyödyntäminen on pienen läpimitan vuoksi haastavaa tai kannattamatonta. Siksi pienpuu ohjautuukin tällä hetkellä pääasiassa energiapuuhakkeena lämpölaitoksille ja polttopuiksi kotitalouksille.

Kuva 2. Pieniläpimittaista puuta.



Pienpuuta kertyy talousmetsissä tehtävien hakkuiden lisäksi myös raivaussahatöiden yhteydessä, kun pensaikkoja, vesakkoja, risukkoja ja pöheikköjä poistetaan ympäristöstään. Nimityksiä villiintyneille tai ainakin siltä näyttävillä pienpuu ja -pensaskasvustoille löytyy monia. Toisissa paikoissa pienpuut toimivat monimuotoisuuden edistäjinä, ja suoja- pesimäpaikkoina linnuille ja eläimille, jolloin raivaukset eivät ole luonnollisestikaan

suositeltavia. Mutta paljon on myös kohteita, joissa puuston poisto on tehtävä käytännön ja velvoittavien syiden vuoksi, kuten esimerkiksi pellonreunojen ja niiden reunaojien raivaukset. Pienpuun poisto ympäröivistä ojista ja pientareilta parantaa peltojen vesitalouden toimivuutta ja peltolohkot pystytään esimerkiksi maataloustukiehtojen valvontaa varten todentamaan satelliittikuvista paremmin. Voimalinjojen alusia ja maanteiden pientareita raivataan säännöllisesti vastuutahojen toimesta. Myös kuntien ja kaupunkien taajamametsien hoitotoissa raivataan pienpuun ja muun kasvillisuuden valtaamia alueita viheralueiden hoidon, alueiden virkistyskäytön, maisemallisten ja turvallisuuteen liittyvien syiden vuoksi. Kohteesta ja toimijasta riippuen raivatut puut jätetään kohteeseen, tai toimitetaan mahdolliseen jatkokäyttöön.

5.1 Markkinat

Puumarkkinat ovat edenneet vauhdilla uudenlaiseen tilanteeseen, jossa aiemmin aliarvostetusta pienpuusta on muodostunut metsä- ja energiateollisuuden kilpailun kohde raaka-ainemarkkinoilla. Viime vuosien aikana Suomessa on suunniteltu ja toteutettu useita isoja metsäteollisuuden laitosinvestointeja, ja lisää on tuloillaan. Investoinnit, venäläisen puuntuonnin päättyminen sekä energiaturpeen ja fossiilisten polttoaineiden asteittainen alasajo ovat lisänneet lyhyessä ajassa merkittävästi puuraaka-aineen kysyntää. Kysyntä kohdistuu metsäteollisuuden puolella erityisesti selluteollisuuden käyttämään kuitupuuhun ja energiateollisuudessa metsätalouden sivuvirroista tuotettuihin metsähakkeisiin.

Kilpailutilanne kiristyy kysynnän kasvaessa, minkä seurauksena hinnat lähtevät nousuun. Aiemmat markkinoilla liikkuneet puumäärät eivät enää riitä vastaamaan tarpeeseen, vaan raaka-ainetta tarvitaan entistä enemmän vajeita paikkaamaan. Hieman kiistanalainen todellisuus on se, että energia-alan toimijat joutuvat ostamaan hakkeen raaka-aineeksi myös ainespuun mitat täyttävää puuta. Energiatuotantoon ohjautuu vuosittain muutamia miljoonia kuutiometrejä kuitupuuta sekä järeää runkopuuta. (Riikilä, 2024) Kiistanalaisuutta asiaan tuo se, että puun käyttöä tulisi ohjata korkean jalostusasteen tuotteisiin niin sanotun EU:n biomateriaalien kaskadiperiaatteen mukaisesti. Puusta olisi pyrittävä saamaan suurin mahdollinen hyöty ennen lopullista käyttöä. Käytännön keinoina ovat muun muassa puutuotteiden käyttöiän pidentäminen, kierrätys ja uudelleen käyttö. Viimesijainen vaihtoehto puulle on energiahyödyntäminen. Kaskadiperiaate ei ole vielä tällä hetkellä toimijoita velvoittava. (Mauno, T. 2021, s. 9)

5.2 Saatavuus

Pieniläpimittainen puu on ehtymätön, nopeasti uusiutuva ja puhdas luonnonvara. Kotimaista pieniläpimittaista puuta olisi saatavilla nykyistä käyttöä enemmänkin, mutta syystä tai toisesta suomalaisia metsiä hoidetaan monin paikoin riittämättömästi tai jätetään kokonaan hoitamatta. Suomessa on arvioitu kasvavan yli miljoona hehtaaria hoitamattomia metsiköitä, niin sanottuja hoitorästikohteita, joissa pieniläpimittainen puu on biomassaltaan valtalaji. (Hujanen, 2020)

Hoitorästikohteet sopivat hyvin energiapuun korjuuseen. Kun taimikonhoitoa ei tehdä ajallaan tai riittävällä voimakkuudella, alkaa puuston runkoluku kasvaa ja puiden kasvutila vähentyä. Metsä kasvaa nopeasti ylitiheäksi, jolloin elävän latvuksen osuus alkaa pienentyä. Puut kilpailevat valosta, minkä seurauksena puusto riukuuntuu, eli rungot kasvattavat pituutta, mutta eivät läpimittaa. (Puukila, 2020) Kuvassa 3 on tyypillinen hoitorästikohde, jossa puusto ei vielä läpimitaltaan täytä kannattavan ensiharvennuksen kriteerejä, mutta josta olisi vielä pikaisesti suoritettavalla energiapuuharvennuksella tehtävissä esimerkiksi kelvollinen sekametsä.

Kuva 3. Hoitorästikohde.



Alan asiantuntijat ovat arvioineet hoitamattomuuden syyksi muun muassa sitä, että metsänomistajuus on alkanut pirstoutua ja omistajat ovat etäännyneet omista metsistään. (YLE, 2022b) Hoitorästit voivat myös johtua metsänomistajien tietämättömydestä metsänhoidon tarpeista, hyödyistä ja kannustimista. Luonnonvarakeskuksen tuoreeseen metsäinventointiin ja Metsäkeskuksen tilastoihin perustuen on arvioitu, että metsien

hoitamattomuuden seurauksena suomalaiset metsänomistajat menettävät metsästä saatavia tuottoja sadan miljoonan euron edestä vuosittain. On myös arvioitu, että hyvin hoidetun metsän tuotto on 30 %:a suurempi, kuin hoitamattoman metsän (LähiTapiola, 2022). Viivästyneiden hoitotoimenpiteiden korjaamiseksi tehtävien toimenpiteiden kustannus nousee nopeasti tuoton laskiessa eikä siltikään kaikkia puuston kasvulle hoitamattomuudesta aiheutuneita vahinkoja tai menetettyä arvokasvua pystytä enää myöhemmin korjaamaan. (YLE, 2022-b)

Hoitamattomuudesta antaa viitteitä myös se, että yksityisille metsänomistajille suunnattuja Kemeran eli kestävän metsätalouden määräaikaisen rahoituslain (34/2015) ja siihen perustuvan metsänhoidollisille toimenpiteille tarkoitetun tukijärjestelmän mukaisia tukia on jäänyt vuosittain miljoonien eurojen edestä maan laajuisesti käyttämättä. Kemeran voimassaolo päättyi 31.12.2023, mutta heti vuoden 2024 alusta astui voimaan uusi metsän- ja luonnonhoidon kannustejärjestelmä Metka. Tuettavia työlajeja ovat Kemeran tavoin taimikon varhaisperkaus, taimikon harvennus ja nuoren metsän harvennus, joiden tukimäärä on 200 euroa hehtaarilta. Hoitotöiden yhteydessä kaadetun pienpuun keräämisestä saa lisätukea. Pienpuulle ei ole määritetty läpimittaa, vaan sillä tarkoitetaan ”pienirunkoista puuta”. Pienpuun kertymän tulee olla kuitenkin esimerkiksi Etelä- ja Keski-Suomessa 35 kiintokuutiometriä hehtaarilla, jolloin tuen määrä nousee 300 euroon hehtaarilta. (Metsäkeskus, n.d.-b) Kuvassa 4 on raivattu nopeakasvuisempien lehtipuiden kätköistä hyvässä kasvussa olevia kuusen taimia.

Kuva 4. Esiin raivattu kuusen taimikko.



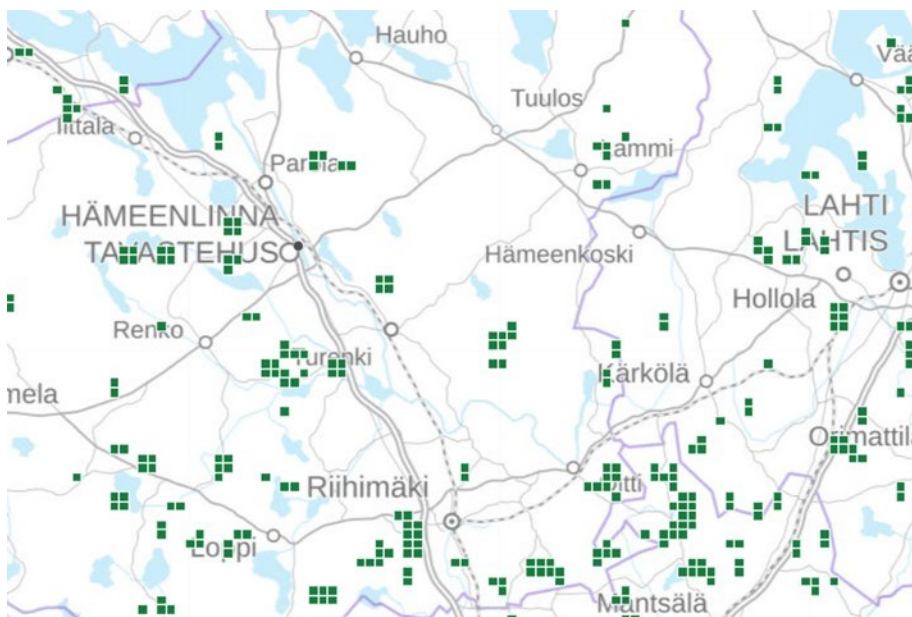
Pieniläpimittaisen puun poistolla annetaan jäljelle jääville taimille kasvutilaa ja vahvistetaan niiden kasvuvoimaa, mikä puolestaan lisää hiilensidontaa. Metsänomistajan päätettävissä

on, kerätäänkö kaadettu pienpuu talteen energiapuuksi vai jätetäänkö se metsänpohjaan lahoamaan.

Myös kantahämäläisittäin tarkasteltuna voidaan todeta, että maakunnan alueelle on kertynyt paljon nuorten metsien hoitorästejä ja käyttämättömiä metsänhoidon toimenpiteille suunnattuja tukia. Metsänhoidollisesti hyvälaatuisten pienten taimikoiden osuus Kanta-Hämeessä on noin 60 prosenttia, mutta hyvälaatuisten varttuneiden taimikoiden osuus on alle 40 prosenttia. Taimikonhoitoja tulisi 1,5-kertaistaa ja ensiharvennuksia 2-kertaistaa nykytasoon verrattuna hoitorästien kuittaamiseksi. Taimikoiden osalta tämä tarkoittaisi noin 12 000 hehtaarin laajuudelta hoitotoimenpiteitä vuodessa. (Metsäkeskus, 2020, ss. 8, 14)

Metsähakkeiden riittävyyden osalta monet alan toimijat ovat ryhtyneet toimenpiteisiin raaka-aineen saatavuuden lisäämiseksi, ja samalla myös metsänomistajien kannustamiseen metsänhoidon rästien purkamiseksi. Yksi toimijoista on Suomen metsäkeskus, joka järjestää metsänomistajille kampanjatilaisuuksia pienpuun myynnin edistämiseksi. Uutena palveluna (kuva 5) on lanseerattu Metsäkeskuksen sähköinen karttapalvelu, johon on merkitty energiapuun potentiaalisia korjuukohteita. Palvelua voivat hyödyntää puunostajat, jotka saavat maksua vastaan niiden metsänomistajien tiedot, jotka siihen ovat antaneet suostumuksensa. ("Energiapuun korjuukohteet näkyvät", 2021)

Kuva 5. Karttaote energiapuukohdekeskittymistä Kanta-Hämeessä (Maanmittauslaitos,2023).



Metsäyhtiöistä Stora Enso ja Metsä Group ovat vastanneet kiihtyvään raaka-ainekilpailuun alentamalla toistaiseksi kuitupuiden minimiläpimittoja. Tuoreeltaan myös UPM ilmoitti

alentavansa kuitupuun minimiläpimittaa kuusikuidulla seitsemästä kuuteen senttimetriin ja männyn sekä koivun mittoja kuudesta viiteen senttimetriin. Käytännössä puiden latvaosat tullaan jatkossa hyödyntämään tehokkaammin korjuiden yhteydessä. Muutoksen myötä tehtaille saadaan enemmän raaka-ainetta ja metsänomistajille puukauppatuloa. Lisäys hakkukertymässä on noin yhdestä kolmeen kuutiota hehtaaria kohti, ja kertymä on suhteessa suurin yleensä ensiharvennuskohteissa. ("Myös UPM pudottaa kuitupuun läpimittaa", 2024)

5.2.1 Lyhytkierto- eli vesakasvatusmetsät

Metsiä ei pääsääntöisesti kasvateta varta vasten energiapuumetsiksi, vaan energiapuuta saadaan hakkuiden ja metsäteollisuuden sivuvirroista. Näkemystä haastavat niin sanotut lyhytkiertometsät eli vesakasvatusmetsät, jotka ovat eräs varteenotettava tapa lisätä pieniläpimittaisen puun raaka-ainevarantoa. Vesametsätaloudeksikin kutsutussa metsänkasvatustavassa uusi metsänkasvu alkaa vesasyntyisten lehtipuiden, kuten pajun, haavan, hybridihaavan ja koivun kanto-, runko- ja juurivesoista. Näin syntyvä metsä on tasaikäistä ja -kokoista, ja puubiomassan tuotos on nopeaa ja määrällisesti suurta. Puhutaan lyhytkiertoviljelystä puubiomassasta tai yleisesti energiapuuviljelmistä. (Puttonen, 2020, ss. 73–74) Lyhytkiertometsiä on tähän mennessä kokeiltu Suomessa vielä pienialaisesti lähinnä energiapuun kasvatuksessa. Kiertoaika on keskimäärin noin viidestä kahdeksaan vuotta, minkä jälkeen puubiomassa korjataan. Nopea kasvu edellyttää myös lannoitusta, ja mikäli halutaan päästä hiilineutraaliin lopputulokseen, on käytettävä keinolannoitteiden sijasta esimerkiksi orgaanisia kierrätyslannoitteita. (Hohteri, 2021)

Suomessa vapautunee lähivuosina paljon entisiä turvetuotantoalueita, koska vuonna 2020 asetetun ja hallitusohjelmaan kirjatun tavoitteen mukaan turpeen käyttömääriä puolitetaan seuraavan 10 vuoden aikana. Poikkeuksen tähän tavoitteeseen on tuonut energiaturpeen käytön tilapäinen kasvu, jolla on pyritty paikkaamaan venäläisen energiapuun aiheuttamaa vajetta. Mikäli tavoitteessa kuitenkin pysytään, turvetuotantoa ajetaan alas ja käytöstä poistuneille tuotantoalueille pyritään löytämään uutta käyttöä. Vaihtoehtoina ovat esimerkiksi metsittäminen tai muuttaminen kosteikoksi, jolloin alue myös muuttuu vähitellen hiilipäästölähteestä hiilinieluiksi. (Hohteri, 2021)

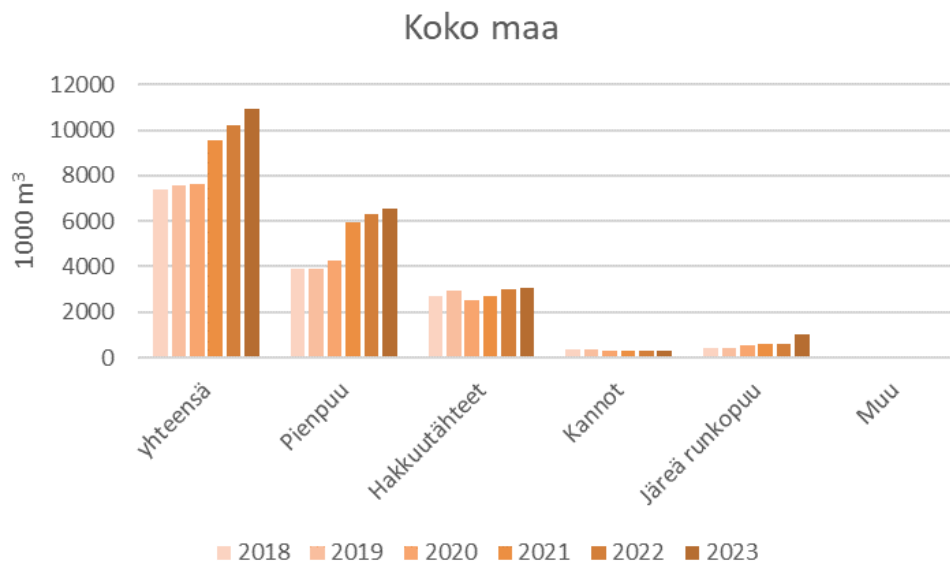
Vuosien 2021–2023 välisenä aikana oli voimassa metsitystukea koskeva laki, jolla tuettiin metsänkasvulle sopivien puuttomien joutomaiden metsittämistä. Entiset turvetuotantoalueet olivat hyviä esimerkkejä tukikohteista. (Metsäkeskus, n.d.-c) Nyt, kun tuen maksaminen on päättynyt, voi lyhytkiertometsien perustaminen kiinnostaa alueiden maanomistajia uudella tavalla. Lyhytkiertoviljely on yksi tapa saattaa alueet takaisin tuottavan toiminnan piiriin ja

vaikuttaa samalla hiilen kiertoon. Suomessa on saatu jo jonkin verran kokemusta entisille turvetuotantoalueille perustetuista pajuviiljelmistä. (forest.fi -verkkolehti, 2017) Paju on yksi Suomen nopeimmin kasvavista puulajeista, joka tuottaa paljon biomassaa. Laajoilla, tasaisilla alueilla on mahdollista tehdä viljelmän perustamis-, hoito- ja korjuutyöt koneellisesti, mikä lisää viljelyn tehokkuutta. Yksittäisen pajuviiljelmän käyttöikä on noin 25 vuotta, ennen kuin viljelmä tulee perustaa uudelleen. Paju soveltuu erityisen hyvin myös biohiilen raaka-aineeksi. (HIME, 2021)

5.3 Käyttö metsäenergian tuotannossa

Puupohjaiset polttoaineet ovat tärkeässä roolissa suomalaisessa energiantuotannossa, sillä niillä tuotetaan yli neljännes energian kokonaiskulutuksesta. (MMM, n.d.) Kiinteitä puupolttoaineita käytettiin lämpö- ja voimalaitoksilla viime vuonna 22,4 miljoonaa kiintokuutiometriä, josta metsähakkeiden osuus oli noin 11 miljoonaa kuutiometriä (Luke, 2024-b). Kaaviossa 2 on esitetty metsähakkeen käyttömäärät energiantuotannossa koko maan osalta vuosien 2018–2023 välisenä aikana.

Kaavio 2. Metsähakkeen käyttömäärät energiantuotannossa koko maan alueella vuosien 2018–2023 välisenä aikana (Luke, 2024-a).

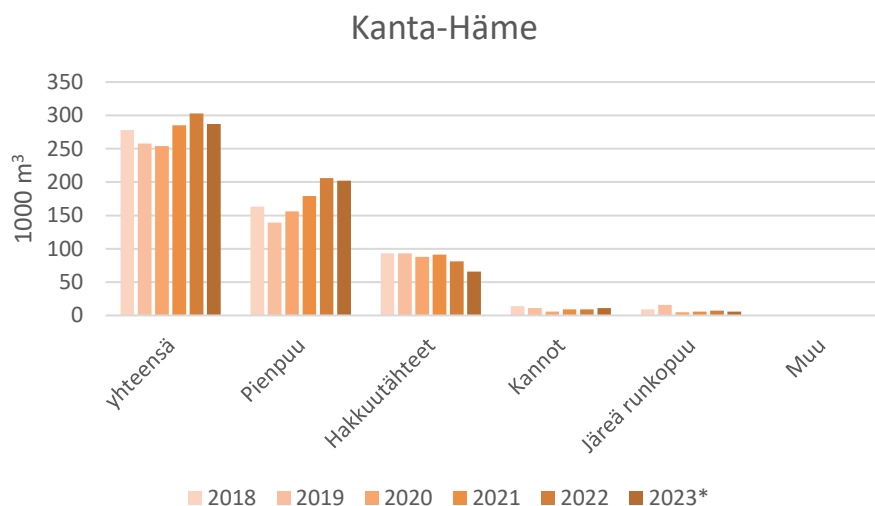


Viime vuonna lämpö- ja voimalaitoksilla käytettiin eri raaka-aineista valmistettua metsähaketta noin 11 miljoonaa kuutiometriä, joka oli kahdeksan prosenttia enemmän kuin edellisenä vuonna. Metsähakkeen raaka-aineina käytettiin pieniläpimittaista puuta, hakkuutähteitä, kantoja ja järeää runkopuuta. Yli puolet kokonaismäärästä, noin 6,6 miljoonaa kuutiometriä, valmistettiin sekä karsitusta että karsimattomasta pienpuusta.

Luvussa on mukana jonkin verran myös kuitupuuta. Pieni osuus polttoon ohjatusta kiinteästä puupolttoaineesta oli kierrätyspuuta, puupellettejä ja -brikettejä. Pieniläpimittainen puu on ollut metsähakkeen raaka-aineista käytetyin useamman vuoden aikajaksolla tarkasteltuna. Selvä nousu pienpuun käyttömäärissä tapahtui jo vuodesta 2021 alkaen. Kantojen käytössä on puolestaan havaittavissa lievää laskua.

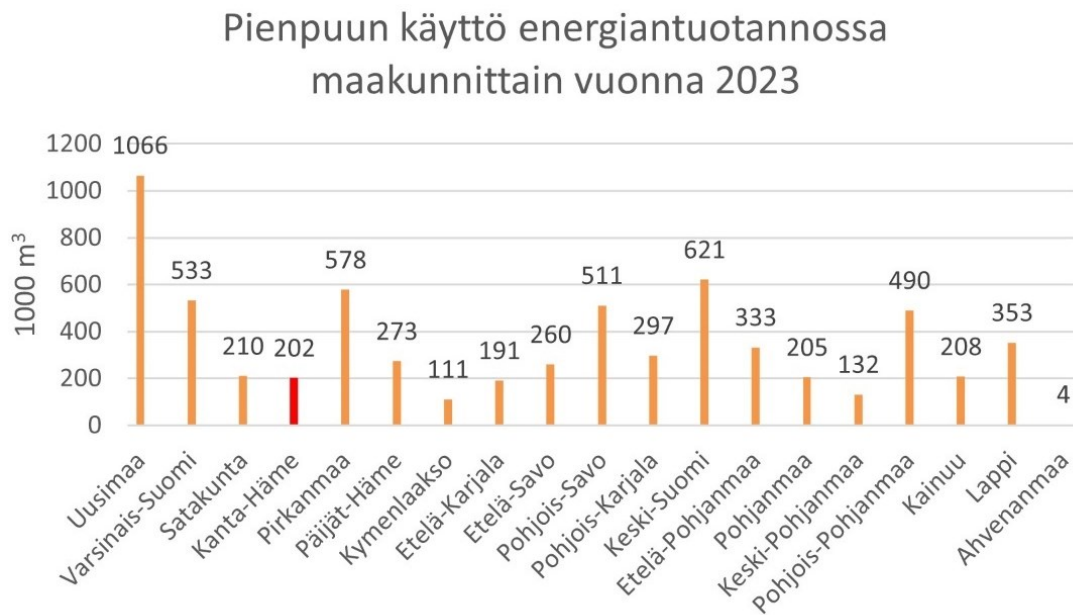
Kaaviosta 3 nähdään metsähakkeen käyttömäärät ja raaka-ainejakaumat Kanta-Hämeessä. Pienpuun käytön osalta on nähtävissä koko maan kehitystä vastaava nouseva trendi vuosien 2018–2023 välisenä aikana. Pienpuu on ollut selvästi käytetyin metsähakkeen raaka-aine Kanta-Hämeen alueella.

Kaavio 3. Metsähakkeen käyttömäärät raaka-aineittain Kanta-Hämeessä vuosina 2018–2023, (Luke, 2024-a).



Vertailun vuoksi tarkastellaan vielä kaaviota 4, jossa on esitetty pieniläpimittaisen puun käyttöä energiantuotannossa maakunnittain viime vuonna. Voidaan havaita, että Kanta-Häme sijoittuu käyttömäärien perusteella 15. sijalle 19 maakunnan joukossa. Kanta-Hämeessä pienpuuta käytetään energiantuotannossa vain vajaa viidesosa tilaston kärkisijaa pitävään Uuteenmaahan verrattuna. Päijät-Hämeen puolellakin käyttömäärä on noin 70 000 m³ enemmän kuin Kanta-Hämeessä.

Kaavio 4. Pienpuun käyttö energiantuotannossa maakunnittain vuonna 2023 (Luke, 2024-a).



5.4 Energiapuukauppa ja hinnat

Metsänomistajat voivat vapaasti valita energiapuunsa ostajan. Eri toimijoiden kilpailuttaminen on jopa suositeltavaa, sillä energiapuuhakkeeksi päätyvästä materiaalista suoraan tai välillisesti kiinnostuneita tahoja toimii puumarkkinoilla nykyisin useita ja hinnat voivat vaihdella paljonkin alueellisesti. Suomen markkinoilla toimii kolme isoa metsäteollisuuskonsernia: UPM Metsä, Stora Enso ja Metsä Group. Näiden lisäksi pienemmät yksityiset yritykset ja alueelliset metsänhoitoyhdistykset ostavat ja välittävät energiapuuta markkinoille koko maan kattavasti. Muita ostajia ovat haketus- ja murskausalalan toimijat, lämpölaitokset sekä lukuisat muut metsäpalveluyritykset.

Energiapuukauppaa tehdään joko itsenäisenä kauppana tai osana ainespuukauppaa kohteesta riippuen. Energiapuun mittaukseen sovelletaan pääosin lakia puutavaran mittauksesta 414/2013, joka pitää sisällään mm. painoon ja tilavuuteen perustuvat mittaustavat, mutta ei lämpöarvoon tai energiasisältöön. (Luke, 2015) Energiapuukaupassa maksettaviin hintoihin vaikuttaa markkinoiden kysynnän ja tarjonnan lisäksi muitakin tekijöitä, kuten leimikon, eli tulevan hakkuualueen puutavaran kertymä sekä korjuu- ja kuljetuskelpoisuus kustannuksineen. Energiapuun hinta voi olla sidottuna myös samalta kohteelta saatavaan ainespuukertymään. Hintaan vaikuttaa pitkälti kauppatapa, eli tehdäänkö kaupat pysty-, hankinta- vai käteiskauppana. Mikäli markkinoilla on tarjolla

vaihtoehtoisia energiamuotoja, aiheuttavat ne kilpailua energiapuun hintojen kanssa. (Horne, 2020, s. 338)

Samalla kun metsäteollisuus ja energia-ala sopeutuvat venäläisen tuontipuun jättämän tyhjiön paikkaamiseen, on yksityiselle metsänomistajalle avautunut mahdollisuus aiempaa kannattavampaan metsänhoitoon erityisesti nuoren metsän hoidon, ensiharvennusten ja pienpuun raivausten osalta. Edellä mainitut työlajit eivät lähtökohtaisesti tuota suuria hakkuutuloja eikä ainespuukertymiä. Poikkeuksen edellä mainittuun tekevät ensiharvennukset, joissa jonkinasteinen kuitupuukertymä on yleensä odotettavissa. Erityisesti hankintahakkuut ovat olleet metsänomistajien suosiossa energiapuun hintanousun vauhdittamina. Hankintahakkuussa metsänomistaja ja puunostaja sopivat kaupan tietystä puuerästä, jonka metsänomistaja omalla kustannuksellaan joko itse tai ulkopuolisen tekijän toimesta hakkaa ja kuljettaa sovittuun paikkaan. Energiapuun hinta on noussut paikoitellen samaan tasoon kuitupuun kanssa, ja jopa ylikin. Kuvassa 6 on esitetty kuitupuun hinta puulajeittain eri hakkuutavoilla. Parhaimman hinnan sai kyseisenä ajankohtana kuusikuidusta hankintakaupassa, jolloin hinta nousi lähelle 50 euroa kuutiolta.

Kuva 6. Kuitupuun hinta 13.4.2024 (Metsälehti, 2024).

Kuitupuu €/m³

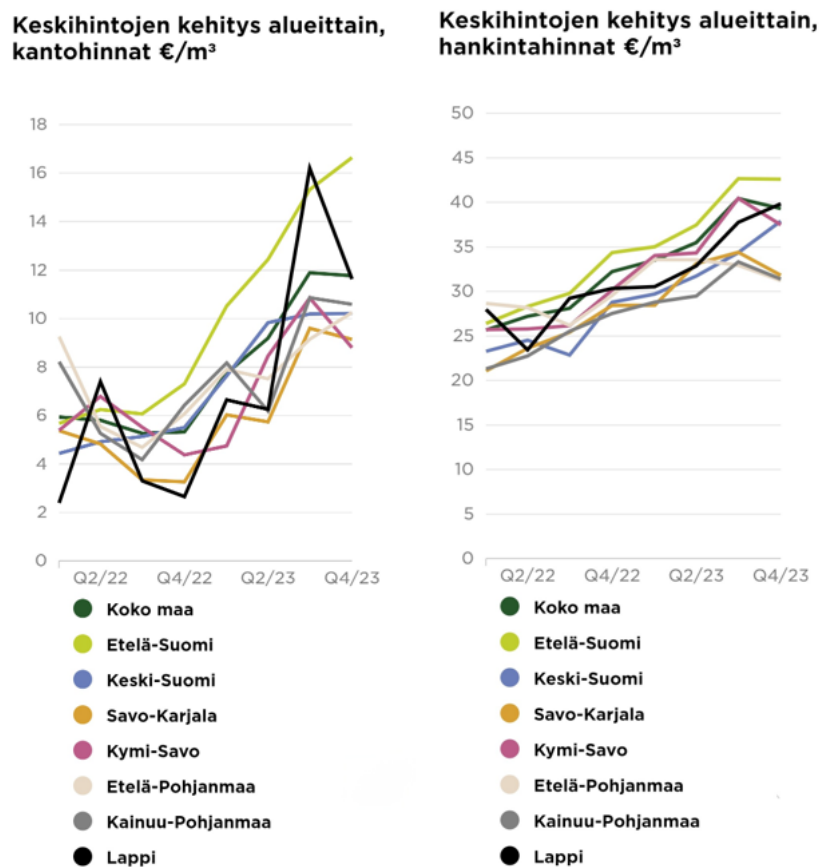
Mänty			
Päätehakkuu		Kasvatushakkuu	
30,34	↑	27,94	↑
Ensiharvennus		Hankintakauppa	
22,72	↑	47,81	↑
Kuusi			
Päätehakkuu		Kasvatushakkuu	
31,32	↑	29,38	↑
Ensiharvennus		Hankintakauppa	
24,44	↑	48,80	↑
Koivu			
Päätehakkuu		Kasvatushakkuu	
31,02	↑	28,31	↑
Ensiharvennus		Hankintakauppa	
22,72	↑	48,06	↑

Hintakehityksen innoittamana moni hankintahakkuuta tekevä metsänomistaja on alkanut korjaamaan kaikki harvennuksista ja raivauksista saadut puut, kuitupuut mukaan lukien,

energiapuukasoihin. Tällöin kertymä on suurempi, koska kaikki puulajit voi koota samaan kasaan ja myös heikkolaatuiset puut kelpaavat mukaan. (Karppinen, 2023)

Kantohinnat ovat hankintahintoja alhaisemmat, mutta niissä puun korjuu tapahtuu ostajan vastuulla ja kustannuksella. Kaaviossa 5 on esitetty energiapuun kanto- ja hankintahintojen kehitys vuosien 2022 ja 2023 aikana ja suunta on ollut molemmissa nousujohteinen. Paikka paikoin tienvarsihintaa on voinut kohoa jopa 50 euroon kuutiolta. Etelä-Suomessa on maksettu muuta maata kovempia hintoja, mutta alueellinen hintavaihtelu on suuri.

Kaavio 5. Energiapuun kanto- ja hankintahintojen kehitys alueittain Q2/22-Q4/23 (Metsälehti, 2024).



Hintojen kehitystä ja muita metsäalan kehitysennusteita voi seurata esimerkiksi Pellervon taloustutkimus PTT:n laatimista koosteista, joita julkaistaan kahdesti vuodessa.

Luonnonvarakeskus julkaisee omat ennusteensa vuosittain ja ylläpitää lisäksi tilastotietoa puukaupoista ja hinnoista. (Horne, 2020) Konsulttiyhtiö Afry:n laatimien ennusteiden mukaan energiantuotantoon ohjautuvan puun hinta pysyttelee korkealla aina 2030-luvulle saakka, joskin hienoista laskua on odotettavissa nyt käynnissä oleviin hintojen huippuvuosiin verrattuna. Nykyisen korkean energiapuun markkinahinnan lisäksi, hintoihin vaikuttavana säätelijänä toimivat uusien energiantuotannon teknologioiden kehittyminen ja jalkautuminen

arkeen, jolloin raaka-aineriippuvuus metsähakkeiden osalta alkaa vähitellen taantua. Aurinko- ja tuulivoimaloilla sekä esimerkiksi pienoisydinvoimaloilla tai vetyteknologialla tuotettu energia tuovat vaihtoehtoja ja varmuutta energiemarkkinoille. (Riikilä, 2024)

5.5 Korjuu, varastointi ja logistiikka

Koneellisissa hakkuissa pieniläpimittaista puuta korjataan joko rankana eli karsittuna ilman oksia, tai kokopuuna oksien kanssa. Karsitulla rangalla eli energiarangalla minimiläpimitta on keskimäärin 4 cm, kun taas kokopuulle ei ole määritetty minimiläpimittoja. Molemmissa tapauksissa kaikki puulajit voi laadusta riippumatta korjata samaan kasaan. (Karppinen, 2023) Vielä muutama vuosikymmen taaksepäin energiapuuta korjattiin pääsääntöisesti kokopuuna, mikä on edelleen perusteltua varsinkin hoitamattomissa metsissä. Nykyisin pienpuuta korjataan kuitenkin enemmän karsittuna rankana. Perusteena on kannattavampi korjuu ja kuljetus, parempi varastoitavuus sekä hyvä ja tasalaatuinen hakkeen laatu. (Karppinen, 2022)

Kaaviossa 6 on kuvattu tyypillinen energiapuun hankintaketju, joka koostuu korjuusta, varastoinnista, haketuksista ja murskauksista, vastaanotosta ja käytöstä laitoksella sekä logistiikasta näiden vaiheiden välillä.

Kaavio 6. Energiapuun hankintaketju (Metsänhoidon suositukset, n.d.-b)



Aiemmin kysynnän ollessa vähäistä, olivat myös korjuukustannukset korkeita, mikä söi kannattavuuden ja yrittäjien mielenkiinnon pieniläpimittaisen puun korjuusta. Nyt kuumentuneet metsähakemarkkinat ovat kuitenkin houkutelleet yhä useampia korjuualan yrittäjiä erikoistumaan energiapuualalle ja investoimaan uusiin laitteisiin sekä kustannustehokkaisiin tekniikoihin pienpuun koneellisessa korjuussa. Esimerkkinä nykypäivän tarpeisiin kehitetyistä korjuutekniikoista on integroitu eli yhdistetty korjuu, jossa kohteelta voidaan samalla kerralla korjata rankapuuna sekä aines- että energiapuuta. Myös niin sanotut energiapuun joukkokäsittelyt ja niihin sopiva kalusto yleistyvät. Joukkokäsittelyssä hakkuulaitteeseen voidaan koota, karsia, katkoa ja kasata useita runkoja

nippuna samanaikaisesti. Pellonreunojen ja vastaavien energiapuun erilliskeräyskohteiden siistimiseen soveltuvat hyvin erilaiset energiapuukourat, kuten giljotiinikoura.

Korjuutekniikoiden kehityksellä pyritään ennen kaikkea kustannustehokkuuden lisäämiseen pieniläpimittaisten puiden korjuissa. (Metsänhoidonsuositukset, n.d.-b) Korjuun jälkeen puut kuljetetaan varastoitavaksi tienvarsivarastoihin (kuva 7).

Kuva 7. Energiapuukasa.



Tienvarsivarastoiden yhteydessä on mahdollista suorittaa haketukset ja murskaukset suoraan kuorma-auton konttiin ja toimittaa edelleen käyttökohteeseen. Tuoretta haketta ei kannata varastoida pitkiä aikoja, sillä kosteus heikentää hakkeen laatua sekä nostaa kuormapainoja ja samalla kuljetuskustannuksia. Puut voidaan kuljettaa varastoon myös terminaaleihin, jossa tehdään tarvittavat jatkokäsittelyt tai vaihtoehtoisesti kuljetetaan terminaalista vastaanottajalle käsiteltäviksi. Terminaalit mahdollistavat tasaisen raaka-ainevirran ympäri vuoden ja paremman hakkeen laadunhallinnan. (Metsänhoidon suositukset, n.d.-b)

6 Biohiilen valmistus, käyttö ja hiilensidonta

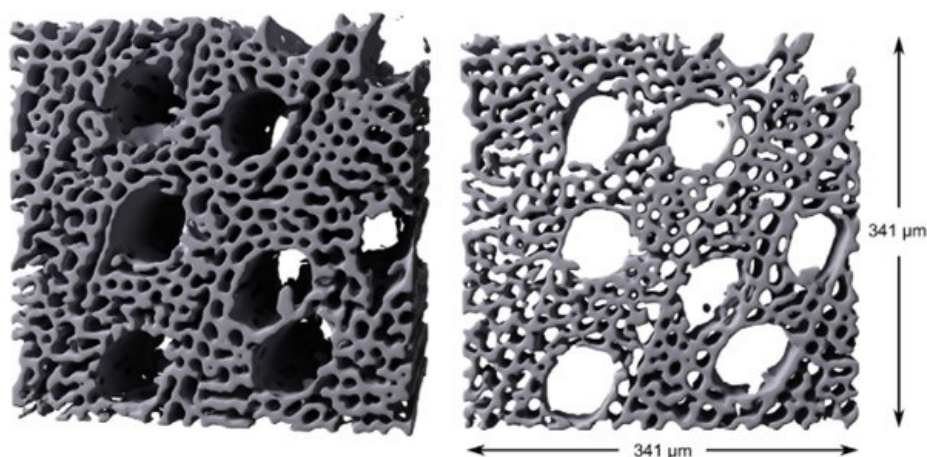
Kestävän kehityksen kannalta olisi ihanteellista, mikäli biohiilen tuotannossa pystyttäisiin hyödyntämään lähtökohtaisesti olemassa olevia, mutta alempi arvoisia raaka-aineiden sivuvirtoja, joista pyrolysoinnilla tuotettaisiin korkeamman jalostusasteen ja

hiilensidontapotentiaalin tuotteita. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi metsätalouden sivuvirtana syntyvän pieniläpimittaisen puun jalostamista biohiileksi tällä hetkellä vallalla olevan energiahyödyntämisen sijaan.

6.1 Biohiili

Biohiiltä valmistetaan kuumentamalla biomassaa korkeassa lämpötilassa tyypillisesti noin 450–800 °C:ssa ja lähes hapettomissa olosuhteissa. Biohiiltä voidaan valmistaa lähes kaikesta eloperäisestä aineksesta. Valmistusprosessia kutsutaan pyrolyysiksi eli kuivatuslaukseksi. Tyypillisesti biohiilen hiilipitoisuus on korkea, noin 60–98 %. Lisäksi huokospinta-ala on suuri, n. 500–1000 m²/g ja rakenne kennomainen, minkä ansiosta biohiili adsorboi, eli sitoo itseensä tehokkaasti muun muassa vettä ja ravinteita. (Elo & Nummela, 2021) Kuvassa 8 on pajubiohiilestä otettu mikrometrin tarkkuudella otettu 3D-kuva, jossa biohiilen erityisrakenne näkyy selvästi.

Kuva 8. Havainnekuva biohiilen rakenteesta, (Rasa ym., 2018, s. 348).



6.1.1 Biohiilen käyttökohteita

Biohiilen raaka-aineeksi soveltuvat monenlaiset orgaaniset materiaalit. Suomessa käytetyin biohiilen raaka-aine on havu- ja lehtipuista valmistettu hake (Elo ym., 2021, s. 8). Muita käytettyjä materiaaleja ovat muun muassa kierrätyspuu, sahojen ja selluteollisuuden sivuvirrat sekä maataloudesta peräisin olevat lannat, lietteet, viljajätteet ja oljet, sekä biohajoavien jätteiden mädätejäännökset (Riikonen, 2019, s.8). Edellä mainittujen jakeiden lisäksi biohiilen raaka-aineena on testattu lukuisia muitakin jakeita aina luonnontuotteista jätteisiin asti. Taulukkoon 1 on koottu eri raaka-aineista valmistetun biohiilen kemiallisia ominaisuuksia ja kuten voidaan huomata, laatu vaihtelee paljon.

Taulukko 1. Eri raaka-aineista valmistetun biohiilen kemiallisia ominaisuuksia (Saario & Laurila, 2019, s. 18).

	pH	Pinta-ala, m ² /g	CEC, mmolc/kg
Maissi	9,27	107,2	607
Vehnä / ohra	8,80	26,7	103
Riisin olki / akana	9,17	42,2	212
Soijapapurehu	9,30	4,4	
Maapähkinän kuori	8,52	115,1	
Pekaanipähkinän kuori	6,97	111,5	
Hasselpähkinän kuori	7,86	467,5	84
Lännenhirssi	9,28	53,0	
Sokeriruokojäte	7,59	113,6	115
Kookospähkinäkuitu		114,8	
Elintarvikejäte	9,09	0,8	81
Viherjäte	8,72	119,8	290
Lehtipuuaines	7,94	171,3	138
Havupuuuaines	7,48	194,2	145
Paperitehdasjäte	9,13	10,1	52
Siipikarjanlanta / kuivike	9,80	50,4	538
Kalkkunanlanta / kuivike	8,95	24,7	
Sianlanta	9,37	26,9	
Maitotilalanta	9,45	33,4	342
Karjanlanta	8,99	73,3	
Viemärijäte/liete	6,90	102,1	24

Lähtökohtaisesti biohiili on raaka-aineesta riippumatta emäksistä. Huokospinta-alan osalta vaihtelu on suurta, mutta puupohjaiset raaka-aineet sijoittuvat vertailussa kärjen tuntumaan pinta-alan vaihdella 171,3–194,2 m²/g välillä. CEC:llä eli kationinvaihtokapasiteetilla tarkoitetaan kykyä pidättää ravinteita maaperässä, ja biohiilellä se on alhaisimmillaankin esimerkiksi maa-aineksiin verrattuna melko korkea (Riikonen, 2019, s. 20). Biohiilet pystyvät sitomaan ravinteita eriasteisesti käytetystä raaka-aineesta riippuen.

Erilaisista biohiilen valmistukseen soveltuvista seosraaka-aineista tehdään tutkimusta, kuten esimerkkinä VTT:n selvitys metsäteollisuuden jätelietteen ja puunkuoren yhdistelmästä. Lopputulemana haastavaksi koettu lietteen käsittely sekä kuorien erillinen polttoprosessi saatiin yhdistettyä pyrolyysireaktorissa. Lopputuotteena syntynyt biohiili soveltuu hyvin esimerkiksi maanparannukseen tai edelleen jatkokäsittelyyn, jossa biohiilestä prosessoidaan aktiivihiihtä tehtaallaan poistokaasujen tai jätevesien käsittelyyn. (Siipola ym., 2021, s. 49)

Lopputuotteena biohiilet voivat olla hyvin erilaisilla ominaisuuksilla varustettuja, minkä vuoksi ne eivät automaattisesti sovellu yhteen ja samaan käyttötarkoitukseen. Yksi perinteisimpiä

käyttökohteita on maanparannus, jossa biohiillisyksellä saavutettavat edut riippuvat paljolti biohiilen laadusta sekä vastaanottavan maaperän olosuhteista (Frilander, 2021).

Puupohjaisista raaka-aineista valmistetut biohiilet ovat yleensä käytetyimpiä maanparannuksessa, sillä ne ovat kestävän kemiallisen luonteensa puolesta erityisen pitkäikäisiä maaperään sijoitettuna. (Riikonen, 2019, s. 3)

Tyypillisesti biohiilen veden- ja ravinteidenpidätyskyky sekä maaperää kuohkeuttava vaikutus edesauttavat kasvien kasvua. Biohiilen huokoinen ja laaja-alainen rakenne tarjoilee hyvän kasvualustan maaperämikrobeille, mikä voi yhdessä edellä mainittujen ominaisuuksien kanssa parantaa maaperän kasvuolosuhteita ja sitä kautta tehostaa kasvien hiilensidontaa. (Bioenergia ry, n.d.) Biohiilen raaka-aineena käytetyn materiaalin pala- tai raekoko sekä muoto vaikuttavat paljon biohiilen käytettävyyteen. Isompi palakoko ilmastaa maaperää paremmin, kun taas hienojakoisempi biohiili tarjoaa enemmän kasvupintaa mikrobeille. (Carbons Finland Oy, n.d.) Biohiilen ravinnesisältö riippuu hyvin paljon raaka-aineesta. Pääravinteista typen, fosforin ja kalilumin osalta pitoisuudet ovat hyvin alhaisia puupohjaisista raaka-aineista valmistetuilla biohiillillä, kun taas lanta- ja lietepohjaiset hiilet sisältävät jonkin verran enemmän ravinteita. (Riikonen, 2019, s. 13)

Viherrakentamisessa biohiiltä lisätään kasvualustoihin etenkin kaupungeissa osana hulevesien hallintaa. Koska biohiili pystyy sitomaan itseensä myös haitta-aineita, sitä hyödynnetään erityyppisinä suodatinmateriaaleina esimerkiksi jäteveden ja hulevesien puhdistuksessa sekä haitta-aineilla pilaantuneiden maa-ainesten puhdistuksessa. (Riikonen, 2019, s. 4) Maatalouden puolella biohiilellä voidaan hallita peltojen ravinnepitoisia valumavesiä ja lisätä peltojen kasvukuntoa. Kotieläintiloilla biohiilen lisäys rehuun lisää karjan hyvinvointia ja lannan mukana biohiili hillitsee hajuja ja metaanipäästöjä. Muita käyttökohteita biohiilelle on muun muassa kosmetiikassa, tekstiileissä ja rakennusteollisuuden puolella muun muassa betonin valmistuksessa. Tiedossa olevien käyttökohteiden lista on tällä hetkellä jo pitkä ja uusia biohiilisovelluksia etsitään, kehitetään ja testataan aktiivisesti (Bioenergia ry, n.d.).

6.1.2 Pyrolysointiprosessi

Biohiilen valmistuksessa käytettävien materiaalien ja prosessitekniisten säätöjen valinta riippuu usein biohiilen tuotantoprosessin tavoitteesta ja käytettävissä olevista resursseista. Pyrolyysiprosessia voidaan räätälöidä halutun kaltaiseksi riippuen siitä, mihin käyttötarkoitukseen biohiiltä tuotetaan ja onko tuotannon painopisteenä biohiili, pyrolyysikaasut vai bioöljy. Pyrolyysissä syntyvän biohiilen fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin sekä saantoon voidaan vaikuttaa raaka-aineen valinnalla ja esikäsittelyllä,

prosessiteknisillä säädöillä sekä tuoreen biohiilen jälkikäsittelyllä. (Riikonen, 2019, s. 7.) Esimerkiksi jos halutaan lisätä biohiilen rakenteeseen pysyvyyttä hajoamista vastaan, suositaan korkeampia pyrolysointilämpötiloja. Jos halutaan säilyttää ravinteita valmiissa tuotteessa, käytetään matalampia lämpötiloja. (Bioenergia ry, n.d.) Prosessisäädöillä vaikutetaan samassa prosessissa muodostuvien bioöljyn ja pyrolyysikaasujen määrään ja laatuun.

Pyrolyysiprosessi voidaan luokitella **hitaaksi**, kun lämmitysnopeus on alhainen eli pyrolysointi tapahtuu noin 300–500 °C:ssa, ja kestää useamman vuorokauden yhtäjaksoisesti. Hiilen saanto on suuri suhteessa muodostuvien kaasujen ja tisleiden määrään. (Riikonen, 2019, s. 7)

Keskinopeassa pyrolyysissä lämpötila nousee hieman hidasta pyrolyysiä korkeammalle vaihdellen välillä 300–700°C, lämmitysnopeus on suurempi ja käsittelyaika on enää vain 10–30 sekuntia. Lopputuotteena saadaan melko tasaväkisesti kaikkia pyrolyysituotteita. (Soikkonen, 2022, s. 12)

Nopeassa pyrolysoinnissa lopputuotteina saadaan puolestaan hiileen verrattuna enemmän kaasuja ja öljyjä prosessin kestäessä vain joitakin sekunteja. Lämpötila nostetaan hyvin nopeasti tavoitteeseen ollen korkeimmillaan noin 750 °C:tta (Riikonen, 2019, s. 7) Pyrolyysiprosessin eri sovelluksia on olemassa useita edellä kuvattujen lisäksi.

6.1.3 Biohiili ja hiilensidonta

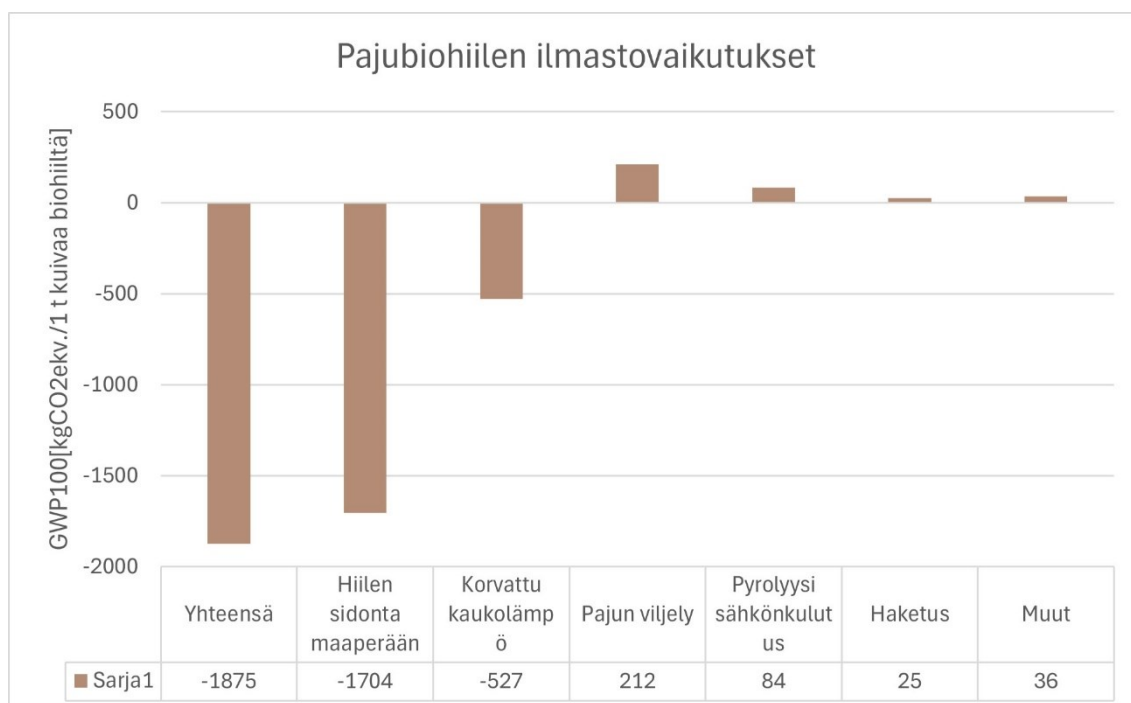
Biohiilen yksi merkittävimpiä ominaisuuksia on sen korkea hiilensidontapotentiaali. Pyrolysoinnin seurauksena biomassaan kasvun aikana sitoutunut hiili ei vapaudu luonnollisesti hajoamisen myötä, vaan se varastoituu biohiileen. Keskimäärin noin 56–74 % biohiilen raaka-aineena käytetyn biomassan sisältämästä hiilestä sitoutuu biohiileen. IPCC käyttää hiilensidontan osalta lukua 56 % ja vastaavasti Euroopan Biohiilisertifikaatin EBC lukuna käytetään 74 %. Käyttökohteesta riippuen biohiili säilyy hiilinieluna parhaimmillaan jopa tuhansia vuosia. Kaikkein pitkäikäisin hiilinielu biohiilestä muodostuu maaperään sijoitettuna. Biohiili on rakenteeltaan stabiili ja siksi hajoaminen maaperässä on hyvin hidasta, hajoamisnopeuden ollessa vuositasolla noin 0,3 %. (Bioenergia ry, n.d.)

Biohiilen elinkaaren aikaisiin negatiivisiin hiilidioksidipäästöihin vaikuttaa biohiilen hiilensidontapotentiaalın lisäksi hiilineutraalin tuotannon ansiosta vältetyt päästöt. (Varpula, 2020, s. 20) Pyrolyysi on reaktiona eksotermisen, eli lämpöä vapauttava, jolloin se tuottaa itsenäisesti energiaa. Näin ollen ulkopuolista energiaa ei vaadita kuin prosessin

käynnistämiseen. Osa energiasta voidaan hyödyntää pyrolyysissä ja ylijäämäenergia ohjata mahdollisuuksien mukaan valtakunnanverkkoon. Tällä energialla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita samoin kuin prosessissa muodostuvilla pyrolyysikaasuilla ja bioöljyllä. Vapaaehtoinen eurooppalainen biohiilsertifikaatti (EBC) edellyttää biohiilituotannon kokonaiskestävyyttä. Standardin mukaan biohiilituotannossa on talteen otettava vähintään puolet bioöljyistä ja -kaasuista. Laitoksen energiatehokkuusvaade on 50 %. (Bioenergia ry, n.d.)

Biohiilen elinkaaren aikaisten ilmastovaikutusten tarkastelussa tunnistetaan ja lasketaan tuotteen aiheuttamia ympäristövaikutuksia aina raaka-ainehankinnasta tuotteen loppukäyttöön asti. Mukaan lasketaan myös kaikki suorat ja välilliset vaikutukset, jotka aiheutuvat esimerkiksi raaka-ainehankinnan konetöistä, logistiikasta ja materiaalin esikäsitteystä, kuten haketuksesta. Esimerkkinä biohiilen elinkaaren aikaisista ilmastovaikutuksista toimii kappaleessa 5.2.1 esitelty lyhytkiertometsissä kasvatettava pieniläpimittainen paju ja siitä valmistettu biohiili. Yksinkertaistetusta kaaviosta (kaavio 7) nähdään kuinka biohiili maaperään sijoitettuna tuottaa suurimmat negatiiviset päästöt, eli se sitoo ilmakehästä hiilidioksidia tehokkaasti.

Kaavio 7. Pajubiohiilen elinkaaren ilmastovaikutukset (mukaillen HIME, n.d.).



On laskettu, että yksi tonni pajubiohiiltä sitoo hiiltä 1875 kg CO₂ -ekvivalenttia (HIME, 2021). Pajun viljelyn osalta positiiviset, eli hiilidioksidia tuottavat päästöt muodostuvat koneiden käyttämisestä polttoaineista sekä lannoitteiden käytöstä. Muita vastaavia päästöjä ovat

pyrolyysin yhteydessä tapahtuva sähkönkulutus sekä pajujen haketus. Lisäksi on oma kohtansa ”muut”, joka sisältää muut erikseen määrittelemättömät päästöt. Edellä kuvatut tekijät yhteenlaskettuna, pajubiohiilen elinkaaren aikana hiilidioksidia sitoutuu selvästi enemmän, kuin sitä vapautuu. Kaavion aikajänne on sata vuotta.

6.1.4 Biohiilimarkkinat

Ensimmäinen biohiilen pilottilaitos rakennettiin Suomessa vuonna 2014 ja on sittemmin jo purettu. (Niemi, 2022) Tämän jälkeen on ehtinyt tapahtua paljon suomalaisilla biohiilimarkkinoilla. Biohiilitutkimusta tehdään kiihtyvällä vauhdilla, uusia biohiilen raaka-aineita ja käyttökohteita etsitään ja testataan. Myös aiemmin markkinoita vaivannut haaste kysynnän ja tarjonnan kohtaamattomuudesta alkaa näyttää muutoksen merkkejä parempaan suuntaan. Markkinoille on tullut uusia toimijoita ja pienen sekä keskisuuren mittakaavan pilottilaitoksia rakennetaan vauhdikkaasti. Kotimainen biohiilen tuotantomäärä kasvaa nopeassa tahdissa. Biohiili on tällä hetkellä kallis tuote sellaisenaan, mikäli sillä ei olisi muita lisähyötyjä, kuten hiilensidontapotentiaalia. Biohiilen markkinahinta on noin 225–300 €/m³ (Elo & Nummela, 2020). Tuotantomäärien kasvaessa hinnan odotetaan kuitenkin laskevan tulevaisuudessa. Biohiilitutkimusta ja pitkäaikaisseurantaa eri raaka-aineiden ja käyttökohteiden osalta tarvitaan kuitenkin vielä paljon.

Uusien tuotteiden markkinoille saattamisen yhteydessä törmätään usein myös markkinahuumaan, jolloin tuotteesta voi olla saatavilla myös ”piraattiversioita”. Markkinoilla saattaa olla mukana toimijoita, joiden markkinoiman biohiilen alkuperää ei tunneta, jolloin myös soveltuvuus käyttökohteeseen on epävarmaa (Elo & Nummela, 2021).

Hämeen ammattikorkeakoulun biotalouden tutkimusyksikössä vuosina 2018–2020 toteutettu Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeessa kartoitettiin kantahämäläisiä jäte- ja sivuvirtoja, joissa olisi potentiaalia biohiilituotantoon. Samassa hankkeessa selvitettiin kyselyllä alueellisten energiapuutoimijoiden kiinnostusta biohiilen valmistukseen energiapuuhakkeesta. Kiinnostusta löytyi ja sen arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa, vaikka ylimääräisiä energiapuuvirtoja ei kyselyhetkellä ollutkaan korvamerkitä biohiilituotannon puolelle. (Elo ym., 2020, s. 9)

6.2 Biohiilen käyttökohteita metsätaloudessa

Metsätalouden puolelta löytyy tänä päivänä biohiilelle käyttökohteita, mutta tutkimusta on tehty vielä vähänlaisesti metsissä. Biohiiltä on toistaiseksi pidetty kalliina tuotteena siihen nähden, että ei ole ollut varmuutta sen tuottamista hyödyistä esimerkiksi

metsänkasvatuksessa. Yksi käytännön syy vähäiselle kenttätutkimukselle on ollut se, että metsässä on hankala sijoittaa biohiiltä maaperään ilman juurivaurioriskejä. Metsiin levitetynä biohiililisästä ei toistaiseksi ole havaittu merkittävää hyötyä, jos ei haittaakaan. Toisaalta biohiililisen vaikuttavuus saattaa tapahtua ja olla mitattavissa vasta paljon pidemmällä aikavälillä. Seuraavissa kappaleissa on esitelty kaksi biohiilen sovelluskohdetta metsätalouden puolella, joilla vaikuttaa tähänastisten kokemusten perusteella olevan potentiaalia käyttökohteessaan. (Riikonen, 2019, s. 40)

6.2.1 Biohiilen käyttö biosuodinmateriaalina metsäojitusalueiden valumavesien käsittelyssä

Erityisesti turvamailla tehtävät hakkuut ja ojitukset lisäävät merkittävästi vesistöihin päätyviä ravinne- ja orgaanisen kiintoaineksen valumia. Liukoisessa muodossa olevia kuormitustekijöitä on haastavaa saada kiinni nykyisillä metsätalouden vesiensuojelutoimenpiteillä. Päästöjen vaikutukset voivat olla lisäksi pitkäaikaisia. Metsäojitusten kulta-aikoina 1960- ja 1970-luvuilla soita kuivatettiin puuston paremman kasvun ja puukauppatulojen turvaamiseksi. Suomalaisten järvien vedenlaadussa on edelleen näkyvissä näidenkin ojitusten vesistövaikutukset. Vastaanottavassa vesistössä edellä mainitut kuormitustekijät aiheuttavat rehevöitymistä ja veden tummumista, jotka molemmat aiheuttavat eriasteisia haittoja vesiekosysteemille. Kuormituksen arvioidaan kasvavan entisestään tulevaisuudessa, kun sademäärät ja valunnat lisääntyvät ilmastonmuutoksen myötä. (Sarkkola&Härkönen, 2023)

Tällä hetkellä käytössä olevia metsätalouden vesiensuojelukeinoja ovat esimerkiksi suojavyöhykkeet ja kosteikot, joissa puhdistava vaikutus perustuu ensisijaisesti kasvukaudella tapahtuviin biologisiin reaktioihin. Muuttuvan ilmaston myötä valumavedet tulevat pahimmillaan kuormittamaan vesistöjä ympärivuotisesti kasvukauden ulkopuolellakin, jolloin biologiset menetelmät eivät toimi. Kuormitusta on tällöin haastavaa torjua. (Palviainen ym., 2020 s. 14)

Eräänä esimerkkinä biohiilitutkimuksesta turvemailta peräisin olevien valumavesien puhdistuksessa mainittakoon Marjatta ja Eino Kollin säätiön ja Suomen Akatemian rahoittamat laboratorio- ja kenttäkokeet, jotka toteutettiin vuonna 2019. Tutkimuksissa selvitettiin eri raaka-aineista valmistettujen biohiilien ja myös eri partikkelikoon biohiilien toimivuutta adsorptioprosessissa lähinnä typen sitojana. (Palviainen ym., 2020, s. 15)

Kenttäkokeissa rakennettiin metsäojoaan sijoitettavia biohiilisuotimia, tässä tapauksessa biohiilellä täytettyjä verkkosäkkejä, joiden läpi rehevältä ja avohakatulta korpialueelta peräsin

oleva ojavesi virtasi. Kenttäkokeiden lopputulemana todettiin, että puuhakkeesta valmistettu biohiili soveltui hyvin vesien suodatukseen, koska hakkeen palakoko oli riittävän isoa sujuvan vedenvirtauksen mahdollistamiseksi. Laboratoriotutkimusten perusteella biohiili kykeni sitomaan itseensä sekä orgaanista että epäorgaanista typpeä, koivusta valmistettu biohiili hieman tehokkaammin, kuin kuusesta. Typen sidonta toimi erityisen hyvin korkeissa ravinnepitoisuuksissa ja pienen partikkelikoon biohiilellä. (Palviainen ym., 2020, ss. 15–16)

Biohiilen ravinteita pidättävä ominaisuus perustuu kemialliseen adsorptioreaktioon, minkä vuoksi sen toimivuus ei ole kasvukaudesta riippuvainen. Tämä ominaisuus antaa selvän etulyöntiaseman moneen muuhun biosuodinmateriaaliin verrattuna. Lisäksi biohiilen pintaan muodostuva biofilmi, eräänlainen mikrobiyhteisö, tehostaa biohiilen biologiseen puhdistukseen perustuvaa vaikutusta kasvukauden aikana. Metsäojien ravinnesepparina toiminut biohiili voidaan lähtökohtaisesti kierrättää sellaisenaan esimerkiksi maaparannuskäyttöön. (Palviainen ym., 2020, s. 16)

6.2.2 Biohiilen hyödyntäminen metsäpuiden taimien kasvatuksessa

Taimivaiheen metsissä ja astiataimien kohdalla biohiilikokeiluista on saatu paljon positiivista kokemusta lisääntyneen kasvun muodossa. (Riikonen, 2019, s. 40) Biohiilen hyödyntämisestä metsäpuiden taimien kasvatuksessa löytyy jo esimerkkejä niin taimitarhassa tehtävien kasvatuskokeiden muodossa, kuin ihan kaupallisessakin käytössä.

Vuosina 2017–2019 toteutettiin Biohiilellä puhtaampi ympäristö ja uutta liiketoimintaa Etelä-Savoon-hanke, joka on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -vahuusalan ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n koordinoima kokonaisuus. Hankkeen yhteydessä tutkittiin laboratoriomittakaavassa biohiilen lannoitevaikutusta metsäkuusentaimien kasvatuksessa. (Laurila & Venäläinen, 2019, s. 40)

Laboratoriomittakaavan lannoitekokeet toteutettiin Mikkelpuiston Kaski-mallipuutarhassa Mikkeliissä. Kuusentaimet olivat 1,5 vuoden ikäisiä paakkutaimia. Kokeessa käytetty biohiili oli valmistettu kuusesta 430 °C pyrolyysilämpötilassa 30 minuutin viipymällä. Kokeessa oli käytössä useampia taimikasvatuslaatikoita. Biohiililisykset tehtiin harvennettuihin laatikoihin ja verrokkina toimivat harventamattomat laatikot. Vertailua tehtiin myös kahdella eri biohiilimäärällä sekä samassa laatikossa lannoittamattomalla vyöhykkeellä. Kasvumuutosten seurantavaihe kesti vuoden. (Laurila & Venäläinen, 2019, ss. 40, 42–43)

Kokeista saadut tulokset olivat lupaavia biohiilen lannoitevaikutuksen osalta. Taimien paras kasvu saavutettiin biohiililisän ollessa 0,69 kg/m², jolloin taimet kasvoivat jopa 300–380 %

enemmän kuin lannoittamattomana. Suuremmalla biohiilen annostelumäärällä (1,47 kg/m²) saavutettiin vähemmän kasvua, mutta kuitenkin yli 100 % lannoittamattomiin taimiin verrattuna. (Laurila & Venäläinen, 2019, s. 46)

Kaupallisella puolella esimerkkinä toimii vuonna 2022 perustettu Woodgrow Oy, joka myy sekä ravinteilla että luomuravinteilla ladattua kuusibiohiiltä. Lataus on suoritettu veteen liuotetuilla ravinteilla, jotka imeytetään biohiileen. Ravinteiden kerrotaan vapautuvan hitaasti kasvualustaan. Tuotetta markkinoidaan erityisesti puuntaimien istutuksiin erityisesti kuivilla mailla. Kuvassa 9 on yrityksen valmistamien biohiilten tuoteselosteet. Ohjeen mukaisesti biohiiltä lisätään pottiputkeen noin 2 dl ja sitten taimi perään. Ravinnelisen tehon on kerrottu kestävän 4–8 vuotta ja muiden biohiilen maanparannusominaisuuksien 100–1 000 vuotta. Tuotetta testataan taimikasvatuksessa Savonia-ammattikorkeakoulussa, minkä lisäksi koulutuskeskus Jedussa Haapajärvellä tutkitaan tuotteen käyttöä taimikasvatuksessa, jossa on käynnistymässä kenttäkokeet kolmen hehtaarin laajuusella metsäalueella. (Perkkiö, 2023)

Kuva 9. Woodgrow Oy:n biohiilituoteseloste (Woodgrow, n.d.).



7 Koepyrolyysitutkimus

Opinnäytetyön yhteydessä tehdyllä koepyrolyysillä haluttiin tuottaa käytännönläheistä lisätietoa pieniläpimittaisen puun teknisestä ja laadullisesta soveltuvuudesta biohiilituotannon raaka-aineeksi. Koepyrolyysi toteutettiin maaliskuussa 2024 PUHI Oy:n Karanojan laitoksella sijaitsevalla laboratoriomittakaavan panospyrolyysireaktorilla.

7.1 Tutkimuksen tausta

Biohiilen tulee olla käyttökohteeseen fysikaalisilta ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan soveltuva, eikä se saa aiheuttaa käyttökohteissaan esimerkiksi ympäristön pilaantumisen vaaraa. PUHI:n tavoitteena on valmistaa muun muassa maanparannukseen soveltuvaa biohiiltä, jolle on lainsäädännössä asetettu tiukat laatuksiteerit ja raja-arvot haitta-aineille.

Tutkimukselle asetettavia reunaehtoja, kuten minkäläistä pieniläpimittaista puuta käytetään koepyrolyysissä ja mitä analyysejä valmiista biohiilestä teetetään, lähdettiin pohtimaan biohiiltä koskevan lainsäädännön kautta. Suomessa biohiiltä koskee lannoitevalmisteiden käyttöön, valmistukseen, markkinoille saattamiseen, tuontiin ja vientiin liittyvää lainsäädäntöä, kuten muun muassa lannoitelaki 711/2022 ja maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023. Lannoitevalmisteisiin liittyvän lainsäädännön noudattamista valvoo Suomessa Ruokavirasto. (Ruokavirasto, 2024)

Lannoitevalmisteet luokitellaan lannoitevalmisteasetuksessa seuraaviin kansallisiin tuoteluokkiin:

1. Lannoite

1A. Orgaaninen lannoite

1B. Orgaaninen kivennäislannoite

1C. Epäorgaaninen lannoite

1C1. Epäorgaaninen pääravinnelannoite

1C1.1. Yksiravinteinen epäorgaaninen pääravinnelannoite

1C1.2. Moniravinteinen epäorgaaninen pääravinnelannoite

1C2. Epäorgaaninen hivenravinnelannoite

1C3. Metsätuhkalannoite

2. Kalkitusaine

3. Maanparannusaine

3A. Orgaaninen maanparannusaine

3B. Epäorgaaninen maanparannusaine

4. Kasvualusta

5. Biostimulantti

6. Lannoitevalmisteiden seos

Mikäli biohiiltä on tarkoitus saattaa markkinoille lannoitevalmisteena, on sen täytettävä jonkun edellä mainitun tuoteluokan vaatimukset. Biohiili voi toimia sellaisenaan esimerkiksi maanparannusaineena, mikäli se täyttää kyseisen tuoteluokan vaatimukset. Kuiva-ainetta tulee olla vähintään 15 % ja mikäli orgaanisen hiilen pitoisuus on vähintään yli 7,5 massaprosenttia, biohiili luokitellaan orgaaniseksi maanparannusaineeksi. Alle 7,5 massaprosentin jäävä biohiili luokitellaan epäorgaaniseksi maanparannusaineeksi. (Torniainen, 2024) Maanparannusaineille on säädetty lannoitevalmisteasetuksessa alla olevassa taulukossa 2 esitetyt raja-arvot haitallisten alkuaineiden osalta:

Taulukko 2. Maanparannusaineiden suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet (maa- ja metsätalousministeriö, 2023).

Alkuaine	Enimmäispitoisuus mg/kg ka.
Arseeni	40
Elohopea	1
Kadmium	1,5
Kromi	300
Kupari	600
Lyijy	100
Nikkeli	70
Sinkki	1 500

Tuoteluokakohtaisista pakkausmerkintävaatimuksista säädetään lannoitevalmisteasetuksen liitteessä 3. Kaikki asetuksessa edellytetyt haitta-aineet tulee tutkia ja varmistaa tuoteluokakohtaisten vaatimusten täyttyminen, vaikka niistä ainoastaan kadmiumin (Cd) pitoisuus tulee ilmoittaa tuoteselosteessa. Liitteen 3 lisäksi pakkausmerkinnöissä on huomioitava lannoitelain 711/2022 9 §:ssä ilmoitettavaksi vaadittavat tiedot. (Torniainen, 2024)

Lisäksi asetukseen on koottu eri tuoteluokkien mukaisten lannoitevalmisteiden valmistuksessa sallitut ainesosaluokat. Biohiili kuuluu ainesosaluokkaan 9 eli pyrolyysihiili (taulukko 3). Ainesosaluettelossa on mainittu mistä raaka-aineista biohiiltä saa valmistaa. Esimerkiksi puhdas puu, jota pieniläpimittainen puu edustaa, kuuluu standardin SFS-EN ISO 17225-1:2021 mukaiseen polttoaineluokkaan A. Ainesosaluokalle 9 on vaatimukset lannoitevalmisteasetuksen liitteessä 2. Haitta-aineista PAH16-yhdisteitä saa olla enintään 6 mg/kg kuiva-ainetta.

Taulukko 3. Ainesosaluokka 9, pyrolyysihiili (Ruokavirasto, 2024).

AINESOSALUOKKA 9. PYROLYYSIHIILI		
AINESOSA	ALKUPERÄ	AINESOSAN TIEDOT
Kiinteät biopolttoaineet	Standardin SFS-EN ISO 17225-1:2021 mukaiseen A ja B polttoaineluokkaan kuuluva puu-, kasvi-, hedelmä- ja vesibiomassa sekä näiden seokset	Lämpötila reaktorissa nostettava vähintään 180 celsiusasteeseen vähintään kahdeksi sekunniksi.
Jätevesiliete	Yhdyskuntajätevedenpuhdistamoliete, saostus- ja umpisäiliöliete, muu kiinteistökohtainen tai maatilojen yhteisen jätevedenkäsittelyjärjestelmän liete ja kuivakäymäläjäte sekä muu jätevedenpuhdistamoliete	Lämpötila reaktorissa nostettava vähintään 500 celsiusasteeseen vähintään viideksi minuutiksi.

Polysyklisen aromaattisten hiilivety-yhdisteiden, eli PAH-yhdisteiden pitoisuudet olisi ollut perusteltua selvittää opinnäytetyön yhteydessä, koska niitä muodostuu helposti biomassan pyrolyysiprosessissa ja niille on asetettu ylin sallittu raja-arvo. Käytännössä valmiin biohiilen

sisältämät PAH-yhdisteet ovat kuitenkin usein peräisin itse pyrolyysiprosessista, eivätkä niinkään raaka-aineesta. (Elo ym., 2021, s. 27) PUHI Oy:n pyrolyysiprosessissa PAH-yhdisteet eliminoidaan teknisillä säädöillä lopputuotteesta (Juutilainen, 2023, s. 4).

Toinen mielenkiintoinen ja vaihtoehtoinen kokonaisuus laboratoriomäärityksille olivat raskasmetallit. Kysymyksenä nousi esiin, voiko luonnonpuun käyttö biohiilen raaka-aineena mahdollistaa biohiilen käytön myös sellaisissa käyttökohteissa, joita säätelevät kaikkien tiukimmat haitta-aineiden raja-arvot. Myös mahdollinen biohiilen sertifiointi tulevaisuudessa toimi raskasmetallien selvittämisen kimmokkeena. Esimerkiksi eurooppalaisella biohiilisertifikaatilla osoitetaan, että biohiilen tuotanto on kestäväällä pohjalla ja ympäristöystävällinen, ja että biohiili on pitkäikäinen, eikä sisällä ympäristölle haitallisia aineita. EBC sertifikaatti tarjoaa mahdollisuuden sertifioida biohiiltä kuuteen eri käyttötarkoitukseen (EBC, 2023). Taulukkoon 4 on vertailun vuoksi koottu EBC-agro-luokitukselle asetetut raja-arvot raskasmetalleille, kun biohiilen käyttökohteena on esimerkiksi maanparannus. Raja-arvot ovat kuparin, nikkelin, sinkin, kromin ja arseenin osalta osin huomattavastikin alhaisemmat. Kokonaisuudessaan EBC-sertifiointiin asettamat raskasmetallien raja-arvot eri luokitusten mukaiselle biohiilelle löytyvät opinnäytetyön liitteestä 1.

Taulukko 4. EBC-agro raja-arvot haitta-aineille (mukaillen EBC, 2023).

EBC-agro		
käyttökohde: maanparannus		
Lyijy (Pb)	120	mg/kg
Kadmium (Cd)	1,5	mg/kg
Kupari (Cu)	100	mg/kg
Nikkeli (Ni)	50	mg/kg
Elohopea (Hg)	1	mg/kg
Sinkki (Zn)	400	mg/kg
Kromi (Cr)	90	mg/kg
Arseeni (As)	13	mg/kg

Edellä kuvattujen pohdintojen pohjalta päädyttiin teettämään valmiista biohiilestä raskasmetallipitoisuudet, joiden suuruusluokan selvittäminen palveli työn tilaajan tarpeita tässä hetkessä parhaiten. Koepyrolyysissä käytettäväksi raaka-aineeksi valittiin pieniläpimittainen lehtipuuseos. Lehtipuut ovat nopeasti kasvavia ja uusiutuvia sekä tuottoisia, minkä vuoksi niillä on potentiaalia biohiilen raaka-aineena. Lehtipuuseosta käyttämällä haluttiin saada esiin juuri lehtipuulle ominaisia laadullisia ja teknisiä ominaisuuksia biohiilenä ja sen raaka-aineena sekä jatkossa mahdollisesti huomioitavia prosessisäätöihin liittyviä asioita.

7.2 Tutkimuksen toteutus

Koe-erä valmistettiin 16.3.2024 raivaamalla kotimetsästä pieniläpimittaista puuta, joka oli läpimitaltaan maksimissaan n. 4 cm oksasilppurin läpäisyrajojen puitteissa (kuva 10).

Materiaali koostui neljästä eri lehtipuulajista: paju 45 til.-%, koivu 25 til.-%, haapa 15 til.-% ja pihlaja 15 til.-%.

Kuva 10. Pieniläpimittaista lehtipuuta kotimetsästä.



Puut ajettiin murskaavan oksasilppurin (AL-KO Easy Crush LH2810) läpi karsimattomana kokopuuna eli oksineen. Murskauksen jälkeen puusilppu seulottiin silmäkooltaan 1,8 cm seulaverkon läpi kahdeksi näyte-eräksi (kuva 11). Tämän jälkeen koe-erät kuivattiin ja yhdistettiin yhdeksi näyte-eräksi.

Kuva 11. Tuoretta seulottua puusilppua.



Puusilppu punnittiin heti tuoreena sekä kuivauksen jälkeen. Puusilpun alkuperäinen kosteus laskettiin kuivauksen aikana tapahtuneesta massanmuutoksesta seuraavalla kaavalla: (puun märkápaino-puun kuivapaino) g / puun märkápaino g x 100 (Bioenergian Pikkujättiläinen, n.d.). Puuerän alkuperäiseksi kosteusprosentiksi saatiin 45 alla olevan laskukaavan perusteella. Luku vastaa hyvin tyypillistä luonnonpuun kosteutta vuodenaika huomioiden.

- tuore puusilppu: 2 137 g
- kuivatettu puusilppu: 1 154 g
- alkuperäinen kosteus-%: $(2\ 137 - 1\ 154) \text{ g} / 2\ 137 \text{ g} * 100 = 45$

Lehtipuusilpusta tehtiin kokoomanäytteet, jotka pyrolysoitiin laboratoriomittakaavan panospyrolyysireaktorilla PUHI Oy:n Hämeenlinnan laitoksella. Kuvassa 12 on koepyrolyysin lopputuotteena saatua biohiiltä.

Kuva 12. Lehtipuusekoituksesta pyrolysoitua biohiiltä.



Puupohjaisilla raaka-aineilla biohiilisaanto on tyypillisesti noin 25–30 % alkuperäisen raaka-aineen määrästä (Elo ym., 2021, s. 24). Saannon selvittämiseksi koe-erä punnittiin sekä ennen pyrolyysiä, että sen jälkeen. Koe-erästä valmistetun biohiilen massasaanto oli kaikkien kolmen kokoomanäytepanoksen osalta 28,2 %, 28,6 % ja 29,6 %, mikä vastasi hyvin ennako-odotuksia.

Työn tilaajan palautteen mukaan puusilppu oli tuoreena hyvin pyrolyysiprosessiin soveltuvassa muodossa palakoon ja melko tasalaatuisen koostumuksensa ansiosta. Samat

ominaisuudet puoltavat valmiin biohiilen käyttöä maanparannuskohteissa.

Oksasilppurikäsitteily jätti materiaaliin jonkin verran tikkumaisuutta, mikä johtui erityisesti tuoreen pajun sitkeydestä silppurin teriä vastaan. Suurina määrinä tikkumaiset kappaleet voivat aiheuttaa syöttölaitteistojen tukkeutumista.

7.3 Tutkimustulokset ja niiden analysointi

Pieniläpimittaisesta lehtipuuseoksesta valmistetusta biohiilestä lähetettiin näytteet Eurofins Environment Testing Finland Oy:n akkreditoituun laboratorioon. Näytteestä analysoitiin arseeni, elohopea, kadmium, kromi, kupari, lyijy, nikkeli ja sinkki. Tutkimustodistus on opinnäytetyön liitteenä 1.

Taulukkoon 5 on koottu eri valmistajien ja markkinoille saattajien tuoteselosteissa ilmoitettuja biohiilen raskasmetallipitoisuuksia. Mukana ovat myös Hämeen ammattikorkeakoulun (HAMK) Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-Hämeessä-projektissa sekä tässä opinnäytetyössä saadut pitoisuudet.

Taulukko 5. Valmiin biohiilen raskasmetallipitoisuuksia (mg/kg).

Valmistaja/ markkinoija	Raaka-aine	Arseeni (As)	Kadmium (Cd)	Kromi (Cr)	Kupari (Cu)	Lyijy (Pb)	Nikkeli (Ni)	Sinkki (Zn)	Elohopea (Hg)
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Carbons	kuusi mänty ja kuusi	<0,5	0,04	13	4,7	4,2	13	56	<0,02
GRK	kuusi	<0,8	<0,2	5	6,0	<2	1,0	68	<0,07
Biohansa	puu	<0,2	<0,17	<1	1,24	<2,3	<1,3	15,3	<0,2
Carbofex Hamk-projekti	kuusi	0,045	0,0032	4	4	<2	<1	13	0,07
*	risu	1,2	<0,2	2,7	20	1,6	7,1	250	<0,1
opinnäytetyö	lehtipuuseos	<0,2	0,36	4,7	22	0,81	5,2	270	<0,1

* Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-Hämeessä

HAMK-projektissa ja opinnäytetyössä pyrolyysi toteutettiin laboratoriomittakaavassa, ja niistä molemmista saadut tulokset ovatkin lähimpänä toisiaan vertailussa. Sinkki- ja kuparipitoisuudet ovat kummassakin selvästi korkeammalla tasolla muiden toimijoiden tuloksiin verrattuna. Erot voivat selittyä myös eri raaka-aineiden käytöllä. Havupuupohjaisilla biohiilillä sinkki- ja kuparipitoisuudet ovat vertailutaulukossa pienempiä kuin lehtipuubiohiilillä. Muilta osin tulokset korreloivat hyvin keskenään. Lähtökohtaisesti luonnonpuu on puhdasta raaka-ainetta. Taulukosta 6 nähdään havu- ja lehtipuiden eri osien luontaisia mineraalipitoisuuksia.

Taulukko 6. Havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016, s. 57)

Puulaji/osa	Päämineraali, p-%				Hivenainepitoisuus, ppm (mg/kg)				
	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	B	Cu
HAVUPUU									
Runkopuu	0,01	0,06	0,12	0,02	147	41	13	3	2
Runkopuun kuori	0,08	0,29	0,85	0,08	507	60	75	12	4
Oksat	0,04	0,18	0,34	0,05	251	101	44	7	4
Neulaset	0,16	0,60	0,50	0,09	748	94	75	9	6
KOKO PUU	0,03	0,15	0,28	0,05	296	85	30	6	4
LEHTIPUU									
Runkopuu	0,02	0,08	0,08	0,02	34	20	16	2	2
Runkopuun kuori	0,09	0,37	0,85	0,07	190	191	131	17	13
Oksat	0,06	0,21	0,41	0,05	120	47	52	7	4
Lehdet	0,21	1,17	1,10	0,19	867	135	269	21	10
KOKO PUU	0,05	0,21	0,25	0,04	83	27	39	6	5

Neitseellinen luonnonpuu voi sisältää luontaisesti tai ihmistoiminnasta peräisin olevia raskasmetalleja ja muita haitta-aineita. Sinkki on puiden kasvulle tärkeä hivenaine, mutta samalla myös raskasmetalli. Maaperän sinkkipitoisuus on noin 50 mg/kg, josta kasveille käytettävissä olevan liukoisen sinkin osuus on noin 5 mg/kg. (Pulli, 2017) Lehtipuiden lehdissä ja kuoreissa etenkin sinkkipitoisuus on muiden hivenaineiden tapaan korkeampi kuin muissa osissa ja havupuilla. Oksissa ja nuorissa lehtipuissa kuoren osuus on suhteessa suuri muihin osiin verrattuna. Kaikkia puun osia yhdessä tarkasteltuna sinkkipitoisuus tasaantuu lehtipuillakin alhaiselle tasolle. Kasveihin ja muihin elollisiin eliöihin voi kertyä myös ihmistoiminnasta peräisin olevia haitta-aineita. Bioakkumulaatiolla tarkoitetaan haitallisten aineiden, kuten raskasmetallien, kerääntymistä ympäristöstään veden, ilmakulkeuman ja maaperän välityksellä eri eliöryhmiin. (Tieteen termipankki, n.d.) Puiden osalta kertymistä voi tapahtua esimerkiksi juuriston, lehtien ja neulasten välityksellä. Johtopäätöksiä tehtäessä on myös huomionarvoista, että pyrolyysiprosessi itsessään ja siinä tehtävät säädöt etenkin lämpötilan osalta voivat vaikuttaa biohiilen raskasmetallipitoisuuksiin. Osa raaka-aineesta olevista luontaisista tai ihmistoiminnasta peräisin olevista raskasmetalleista voi rikastua biohiileen pyrolyysiprosessin aikana, kun alkuperäinen raaka-ainemassa pienenee. (Elo ym., 2021, s. 26)

Koepyrolyysissä käytettiin raaka-aineena nuorta lehtipuuta, joka oli käsitelty oksasilppurilla oksineen, minkä vuoksi luontaiset sinkkipitoisuudet ovat voineet olla jo lähtökohtaisesti koholla. Laboratoriomittakaavan koepyrolyysi ei ole suoraan verrattavissa jatkuvan tuotannon isomman mittakaavan laitteistoihin tai pyrolyysin säätö- ja ohjausmahdollisuuksiin ja siksi myös biohiilen laadussa on eroja. Biohiilien raaka-aineet vaihtelevat eri toimijoiden välillä, ja voivat vaikuttaa merkittävästi biohiileen jääviin haitta-ainepitoisuuksiin. Tulokset vertailua ja

suoria johtopäätöksiä ei ole tällöin perusteltua tehdä, mutta suuntaa antavaa pohdintaa sen sijaan kyllä. Yhtä kaikki, opinnäytetyössä valmistetun biohiilen raskasmetallitulokset alittivat maanparannuskäyttöä ohjaavat kansalliset lannoitelainsäädännön sekä eurooppalaisen biohiilisertifikaatin asettamat haitta-aineiden raja-arvot.

Jatkotoimenpiteinä on suositeltavaa valmistaa koe-erä, jossa yhdistetään pieniläpimittaisia lehti- ja havupuulajeja, sillä se vastaa hyvin pienpuun koostumusta vallitsevassa tilanteessa, jossa kaikki puulajit korjataan samaan kasaan. Toinen mielenkiintoinen vaihtoehto on tutkia pelkän havupuun osalta haitta-aineet ja havainnoida samassa yhteydessä teknistä soveltuvuutta pyrolyysiprosessiin.

8 Nelikenttä eli SWOT-analyysi

Nelikenttä- eli SWOT-analyysin avulla kootaan yhteen sekä kirjallisuuskatsauksesta että käytännön tutkimuksesta saadut tiedot pieniläpimittaisen puun raaka-ainekäyttöön liittyvistä positiivisista ja negatiivisista tekijöistä. Menetelmällä on mahdollista muodostaa nopeasti kokonaiskuva analysoitavana olevaan ilmiöön, kuten esimerkiksi palvelun tai tuotteen käyttöön liittyvistä vahvuuksista (Strengths), heikkouksista (Weaknesses), mahdollisuuksista (Opportunities) ja uhista (Threats). Tunnistus on tärkeää, jotta voidaan ylläpitää vahvuuksia, vahvistaa heikkouksia, hyödyntää mahdollisuuksia ja tiedostaa riskit sekä varautua niihin. Opinnäytetyössä tehdyssä SWOT-analyysissä (kuva 13) tunnistettiin tekijöitä, jotka tekevät pieniläpimittaisesta puusta vartenotettavan raaka-ainevaihtoehdon PUHI Oy:n biohiilituotantoon ja vastaavasti niitä tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa haasteita tai riskejä pienpuun raaka-ainekäytölle. Analyysin yhteenveto käsitellään opinnäytetyön loppuosassa kohdassa ”yhteenveto ja johtopäätökset”.

Kuva 13. SWOT-analyysi pieniläpimittaisen puun käytöstä biohiilen raaka-aineena.

<p>S</p> <p>Vahvuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> - puhdas, nopeasti uusiutuva luonnonvara - hyvä paikallinen ja ympärivuotinen saatavuus - puunkorjuun sivuvirran hyödyntäminen <ul style="list-style-type: none"> o jalostusasteen nosto - metsänhoitorästien yhteydessä korjattavissa <ul style="list-style-type: none"> o METKA-tuki kannustimena - hyvä hiilensidontapotentiaali <ul style="list-style-type: none"> o suora ja välillinen - hyvä soveltuvuus maanparannuskäyttöön tarkoitetun biohiilen raaka-aineeksi 	<p>W</p> <p>Heikkoudet</p> <ul style="list-style-type: none"> - kestävyiden ja kiertotalouden periaatteiden toteutumisen ristiriita? - nykyinen markkinahinta korkea - nykyinen kilpailutilanne kuumentunut - tietämättömyys pienpuun ja biohiilen mahdollisuuksista <ul style="list-style-type: none"> o metsien hoitorästien purkaantumattomuus
<p>O</p> <p>Mahdollisuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> - yhteistyö metsäalan toimijoiden kanssa <ul style="list-style-type: none"> o tietoisuuden lisääminen pienpuusta ja biohiilestä o biohiilipalvelut metsänomistajille - yhteistyö energiapuualan toimijoiden kanssa <ul style="list-style-type: none"> o kustannustehokkaat korjuutekniikat ja alalle erikoistuneet toimijat - metsänomistajien arvomaailman monipuolistuminen <ul style="list-style-type: none"> o hiilensidontan merkityksen kasvu metsänhoidon valinnoissa - pienpuun viljely lyhytkiertometsissä <ul style="list-style-type: none"> o joutomaiden käyttöönotto tuottavaan toimintaan ja hiilensidontaan - uusien energiamuotojen käyttöönoton myötä pienpuulle vapautuva markkinatila ja hintojen lasku 	<p>T</p> <p>Uhat</p> <ul style="list-style-type: none"> - nykyisen markkinatilanteen pitkittyessä raaka-aineen saatavuusongelmat - pienpuun hintatason nousu - biohiilen korkea hintataso

9 Yhteenveto ja johtopäätökset

Suomen itselleen asettaman kansallisen hiilineutraaliustavoitteen vuoteen 2035 mennessä saavuttaminen vaikuttaa useiden asiantuntija-arvioiden perusteella jo tässä vaiheessa epätodennäköiseltä. Tehtävää ei tee yhtään helpommaksi ilmastonmuutoksen ääri-ilmiöiden ja aikajänteen arvioinnin arvaamattomuus. Ensisijaisena keinona kohti hiilineutraaliutta on vähentää eri toiminnoissa muodostuvia kasvihuonekaasupäästöjä ja täydentävinä keinoina on käyttää teknologisia hiilinieluja ja päästökompensaatiota. Metsien hiilensidonnan ja varastoinnin lisäämiseksi tarvitaan jo käytössä olevien keinojen tehostamista ja uusien keinojen laajamittaista käyttöönottoa. Metsätalouden sivuvirtojen jalostaminen biohiileksi on osaltaan yksi lupaava, mutta vielä toistaiseksi vähän käytetty keino hiilidioksidin poistamiseksi ilmakehästä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää pieniläpimittaisen puun mahdollisuuksia hiilensidonnassa. Keskeisenä tavoitteena oli selvittää pieniläpimittaisen puun soveltuvuutta työn tilaajatahon PUHI Oy:n biohiilituotannon raaka-aineeksi. Laadullista soveltuvuutta tutkittiin koepyrolyysillä valmistetusta biohiilestä, josta teetettiin raskasmetallianalyysit ulkopuolisella akkreditoidulla laboratoriollla. Saatujen tulosten perusteella arvioitiin biohiilen soveltuvuutta eri käyttökohteisiin. Kyseessä ei ollut taloudellisen kannattavuuden selvitys, vaan metsien kasvun ja hoidon, niihin sidoksissa olevan hiilenkierron, sekä energiapuun markkinatilanteen osalta koottu tietopaketti pienpuun raaka-ainekäyttöön vaikuttavista positiivisista ja negatiivisista tekijöistä. Tekijöiden tunnistamiseen käytettiin nelikenttä- eli SWOT-analyysiä.

9.1 Vahvuudet ja mahdollisuudet

Pieniläpimittaisen puun mahdollisuudet hiilensidonnassa ovat suoria ja välillisiä. Kun kasvuolosuhteet ovat kohdillaan, pieniläpimittainen puu kasvaa nopeasti, tuottaa runsaasti biomassaa ja sitoo hiiltä itseensä. Kun pienpuuta poistetaan metsänhoitotoimenpiteiden yhteydessä, mahdollistetaan jäljellejääville puille paremmat kasvuedellytykset, järeytyminen ja sitä kautta arvokasvun mahdollisuus sekä aiempaa tehokkaampi hiilensidonta. Biohiilen raaka-aineena pienpuun sitoma hiilidioksidi poistuu ilmakehästä lähes pysyvästi. Hiilensidontaa tapahtuu näin ollen suoraan kasvussa, välillisesti taas metsänhoidon toimenpiteiden myötä sekä korkeamman jalostusasteen biohiilituotteena. Pyrolyysiprosessissa biohiilen ohella syntyvillä kaasumaisilla ja nestemäisillä jakeilla sekä ylijäämälämmöllä voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Pieniläpimittainen puu soveltuu tutkituilta osin teknisesti ja laadullisesti PUHI Oy:n biohiilen tuotantoprosessiin. Opinnäytetyössä valmistetun biohiilen raskasmetallitulokset alittivat maanparannuskäyttöä ohjaavat kansalliset lannoitelainsäädännön sekä eurooppalaisen biohiilisertifikaatin asettamat haitta-aineiden raja-arvot. Biohiilituotannossa pieniläpimittaisen puun lisäarvoina voidaan nähdä raaka-aineen puhtaus ja nopea uusiutuvuus, ympärivuotinen saanto ja hyvä hiilensidontapotentiaali. Pieniläpimittaisen puun korjuu- ja logistiikkaketjut ovat kehittyneet aiempaa kustannustehokkaammiksi korjuuseen erikoistuneiden toimijoiden myötä. Paikallisesti saatavilla olevan raaka-aineen myötä hankintaketjun tehokkuus kasvaa. Muita pienpuun hankintaketjun kustannustehokkuutta lisääviä tekijöitä ovat muun muassa kuljetuskaluston suuri kuormatilavuus, kuljetus rankapuuna ja raaka-aineen mahdollisimman alhainen kosteusprosentti, jolloin veden kuljettamisesta ei aiheudu lisäkustannuksia.

Kanta-Hämeen alueella on paljon metsänhoitorästejä, joita purettaessa pieniläpimittaisen puun saanto on kohtuullisen suuri. Haasteen asiaan tuo se, kuinka metsänomistajia saataisiin aktivoitua rästien purkamiseen. Mikäli pieniläpimittaisen puun saantoa halutaan kasvattaa, se edellyttää entistä enemmän metsänomistajille suunnattua tiedottamista. Monet metsäalan toimijatahot rakentavat jo hyvää pohjaa kampanjoimalla hoitorästien purkamisen ja pieniläpimittaisen puun puolesta, tässä vaiheessa ensisijaisesti energiantuotannon näkökulmasta. Tämän lisäksi metsänhoidon suositukset lisäävät riippumatonta tietoa metsänhoidon tärkeydestä ja tarjoaa selkeitä käytännön ohjeita metsänomistajille eri tavoitteisiin pääsemiseksi.

Pieniläpimittaisen puun korjuu ja sen ohjaaminen edelleen raaka-aineeksi biohiilituotantoon tulisi tehdä metsänomistajalle kannattavaksi vaihtoehdoksi esimerkiksi taloudellisen kannustimen muodossa. Pienpuun korjuun osalta yksi käytännön esimerkki on Metka-tuki, jonka avulla metsänomistaja pystyy saamaan lisäansaintaa usein taloudellisesti vielä melko kannattamattomiin metsänhoidon työlajeihin.

Vaikka pieniläpimittaisesta puusta maksetaan tällä hetkellä hyvin, voi metsänomistaja hoitaa metsiänsä muidenkin kuin taloudellisten arvojen ohjaamana. Kannustin voi yhtä hyvin olla myös aineettomiin arvoihin perustuva. Arvomaailman monipuolistumisen myötä yhä useampi metsänomistaja haluaa tietää kuinka oman metsän hoidolla tai hoitamattomuudella voi vaikuttaa esimerkiksi hiilensidontaan ja -varastointiin. Erilaisia metsänomistajille tarjottavia hiilipalveluita löytyy jo palveluvalikoimista. Samoilla periaatteilla voitaisiin yhteistyössä paikallisten metsäalan toimijoiden kanssa jalkauttaa biohiileen sidoksissa oleva palvelumuoto metsänomistajille, jotka haluavat valjastaa metsänsä mukaan ilmastotalkoisiin. Pieniläpimittaisen puun myynti energiantuotannon sijasta biohiilituotantoon, josta seuraa metsänomistajalle aineetonta ja aineellista arvoa, saattaa olla hyvinkin houkutteleva

vaihtoehto nykypäivän metsänomistajalle. Toki omistajien joukosta löytyy aina myös niitä, joille metsäomaisuuden hoito ei ole missään tilanteessa merkityksellistä. Osa metsänomistajista jättää hoitotoita tekemättä myös suojelullisista näkökulmista.

Koska korjuu, haketus ja murskaus sekä logistiikka eivät ole PUHI:n ensisijainen toimiala, on varteenotettava vaihtoehto selvittää yhteistyökuvioiden rakentamista alueellisten metsäalan toimijoiden kanssa, jotka hankkivat tai käsittelevät pienpuuta, ja joilla on omia kone- ja hankintaketjuja sekä asiakasverkot olemassa. Monet energiapuualan yrittäjät alkaneet erikoistua pieniläpimittaisen puun korjuuseen, käsittelyyn ja logistiikkaan, mikä on lisännyt merkittävästi koko hankintaketjun kustannustehokkuutta. Positiivista signaalia pieniläpimittaisen puun raaka-ainekäytölle antaa myös kantahämäläisten energiapuualan toimijoiden kiinnostus biohiiltä kohtaan. Edellä mainittujen toimijoiden lisäksi myös kunnalliset jätehuoltoyritykset, kuten muun muassa Kanta-Hämeen alueella toimiva Kiertokapula Oy, vastaanottavat pieniläpimittaista puuta risujätteenä.

9.2 Heikkoudet ja uhat

Kysynnän ja tarjonnan laki on tyypillinen markkinamekanismi, joka vaikuttaa hintojen kehittymisen suuntaan ja on riippuvainen markkinoilla olevasta kysynnän ja tarjonnan suhteesta. Energiapuumarkkinoilla tämänhetkinen kilpailutilanne on kiristynyt, mikä saattaa nostaa hintoja ja aiheuttaa haasteita pieniläpimittaisen puun saatavuuteen. Ennusteiden mukaan tilanteen odotetaan pysyvän samansuuntaisena vielä useamman vuoden, jopa vuosikymmenen ajan. Toisaalta uusien energiamuotojen käyttöönoton ja energiaomavaraisuuden kasvun myötä pieniläpimittaiselle puulle vapautuu lisää markkinatilaa, minkä seurauksena hinnatkin todennäköisesti alkavat laskea. Myös biohiilen toistaiseksi korkea hintataso voi jarruttaa sen käyttöä. Biohiili on vilkkaasta yhteiskunnallisesta hiilikeskustelusta huolimatta toistaiseksi vielä melko tuntematon tuote.

Kestävyyden ja kiertotalouden periaatteiden toteutumiseen liittyvä ristiriita pohjautuu näkemyksiin, joiden mukaan neitseellisen materiaalin käyttö ei edusta kumpaakaan periaatetta. Asiaa voidaan tarkastella monelta eri kantilta, minkä vuoksi kestävyysnäkökulma voi saada sekä mahdollisuutena että heikkoutena pidettäviä perusteita. Kun huomioidaan pieniläpimittaisen puun rooli puunkorjuun sivuvirtana ja alihyödynnettynä jakeena, nostaa biohiilituotanto pienpuun isolla harppauksella entistä kestävämmälle pohjalle. Kun pieniläpimittaisesta puusta jalostetaan polton sijasta biohiiltä, hiilidioksidin vapautumisen sijaan pienpuu biohiileksi jalostetussa muodossaan sitoo pysyvästi hiilidioksidia ilmakehästä. Lisäksi biohiilenä pienpuu ohjautuu uuteen käyttötarkoitukseen tuotteena, jolla on lisäarvona esimerkiksi maanparannus tai haitta-aineiden poistaminen käyttökohteesta. Parhaassa

tapauksessa käytetty biohiili on kierrätettävissä kestävästi käytön jälkeen.

Lyhytkiertometsissä entisillä turvetuotantoalueilla tai joutomailla kasvatettavan pieniläpimittaisen puun biomassan nopea uusiutuvuus ja hiilensidonta sekä biohiilituotanto tuottavat hiilikompensaatiota negatiivisten päästöjen muodossa.

9.3 Pohdinta

Opinnäytetyön aihe on ollut itselleni hyvin mieluisa. Olen jo aiemmin työelämässä päässyt osallistumaan biohiilitutkimukseen, kuten biohiilen valmistukseen kierrätyspuusta sekä käyttöön kasvualustoissa ja suodatinmateriaalina. Kun nyt metsäalan opintojen yhteydessä tarjoutui mahdollisuus lähteä selvittämään metsätalouden sivuvirtojen potentiaalia hiilensidonnassa ja biohiilen tuotannossa, ei sitä tilaisuutta voinut mitenkään ohittaa. On ollut antoisaa soveltaa metsätalouden oppeja ja näkökulmia eri osaamisalojen toimintaan sekä työharjoittelu- että opinnäytetyöprosessin aikana.

Lähteet

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. (2016). *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. VTT TECHNOLOGY 258. VTT Oy.

<https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Bioenergia ry. (n.d.) *Biohiili*. <https://www.bioenergia.fi/biohiili/>

Bioenergian Pikkujättiläinen. (n.d.) *Puun kosteus*.

<https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/puun-kosteus/>

BIOS-tutkimusyksikkö. (2019). *Metsäteollisuuden sivuvirrat, onko niitä?*

<https://bios.fi/metsateollisuuden-sivuvirrat-onko-niita/>

Carbons Finland Oy. (n.d.). *Biohiili*. <https://carbons.fi/biohiili/>

EBC, European Biochar Certification. (2023). *Guidelines of the European Biochar Certificate – Version 10.3*. https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_3.pdf

Elo A. & Nummela J. (2020). Biohiilen valmistus ja siinä syntyvä energia [webinaari].

Maaseudunhankinnat.fi, MAHVA-hanke.

<https://www.youtube.com/watch?v=HwFcvr3m6Vo&t=1896s>

Elo, A., Nummela J. & Kymäläinen M. (2021). *Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-*

Hämeessä. Hämeen ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-835-0>

Energiapuun korjuukohteet näkyvät uudessa karttapalvelussa. (2021) *Metsälehti*.

<https://www.metsalehti.fi/uutiset/energiapuun-korjuukohteet-nakyvat-uudessa-karttapalvelussa/#32499c25>

Euroopan komissio. (n.d.-a). *Ilmastonmuutoksen syyt*. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fi

Euroopan komissio. (n.d.-b). *Ilmastonmuutoksen seuraukset*.

https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_fi

forest.fi -verkkolehti. (2017). *Pajusta tehdään ilmastopioneeria – biohiiltä maanparannukseen, kompostiin, jopa teolliseen suodatukseen*.

<https://forest.fi/fi/artikkeli/pajusta-tehdään-ilmastopioneeria-biohiilta-maanparannukseen-kompostiin-jopa-teolliseen-suodatukseen/#03331871>

Frilander, J. (2021). (YLE) *Musta kulta sitoo hiilidioksidia ilmakehästä ja saa kasvit kukoistamaan – biohiillelle ladataan jopa myyttisiä odotuksia, mutta monta asiaa on vielä ratkaistavana.* https://yle.fi/a/3-12116000?utm_source=social-media-share&utm_medium=social&utm_campaign=ylediapp

HIME. Hämeen ilmastoviisas maaseutu ja energiayrittäjyys -hanke. (n.d.). *Hämäläinen pajubiohiili. Joutoalueista ilmastoratkaisuja.* LUT University, Pro Agria, Metsäkeskus. <https://hime.fi/wp-content/uploads/2021/02/Hamalainen-pajubiohiili-2.pdf>

Hohteri, H. (2021). Lyökö valtavan kasvuvoimainen paju tällä kertaa läpi? Entinen turvesuo puskee unohdettua puulajia biohiilen raaka-aineeksi. *MT Metsä.* <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/4df27363-8d77-5d27-b404-163678dea738>

Horne, P. (2020). Metsäteollisuuden puuhuolto. Teoksessa J. Ruuska (toim.), *Metsäkoulu* (s. 12). Metsäkustannus.

Hujanen, T. (2020). *Pieniläpimittaisen puun hyödyntäminen innovatiivisin käsittelymenetelmin kasvavan ja kestävä biotalouden monivaikutteisissa metsissä.* PIENPUU-hanke. Itä-Suomen yliopisto. https://www.aka.fi/globalassets/1-tutkimusrahoitus/4-ohjelmat-ja-muut-rahoitusmuodot/1-akatemiaohjelmat/biofuture2025/hankekuvaukset_2020_suomi/fv_hujala_fis.pdf

Hämeenlinnan kaupunki, viranomaispalvelut. (2023). PUHI Oy:n ympäristölupa 30.6.2023. HML/534/11.01.00/2023

Hänninen, H. (2020) Metsätalous Suomessa. Teoksessa J. Ruuska (toim.), *Metsäkoulu* (s. 12). Metsäkustannus.

Itä-Suomen yliopisto. (n.d.). *Akateeminen vartti -podcastin tekstivastine: Oma metsä hiilinieluna.* www.uef.fi/fi/akateeminen-vartti-oma-metsa-hiilinieluna

Juutilainen, A. (2023). Puhi-yhtiö aloitti laajamittaisen biohiilen tuotannon Hämeenlinnan Karanojalla – Biohiiltä käytetään näihin asioihin. *Hämeen Sanomat.* Nro 328. s. 4

Karppinen, S. (2022). Karsittu ranka valtaa alaa. *Metsälehti*. (Tiedeliite 2022).

<https://www.metsalehti.fi/artikkelit/karsittu-ranka-valtaa-alaa/#332c2ca5>

Karppinen, S. (2023). Nyt on hinta kohdillaan – energiapuu houkuttaa hankintahakkuulle.

Metsälehti. <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/nyt-on-hinta-kohdillaan-energiapuu-houkuttaa-hankintahakkuulle/#332c2ca5>

Karvonen, R. (2019) Metsä sitoo 38 kesäpäivässä henkilöautojen vuoden päästöt. *MT*

Metsä. <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/4f58eb6a-f6d0-527b-8eb7-6cd1f8c3593c>

Laurila, N. & Venäläinen, T. (2019). Uutta kasvua biohiilestä. *Biohiilellä puhtaampi ympäristö ja liiketoimintaa Etelä-Savoon*. [hankejulkaisu, Kakkois-Suomen ammattikorkeakoulu].

<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-165-1>

Lehtonen, I. Venäläinen, A. & Gregow, H. (2020). *Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomessa metsänhoidon näkökulmasta. Raportteja 2020:5*. Ilmatieteenlaitos.

Luke. (2024-a). *Lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käyttö muuttujina Maakunta, Yksikkö, Puupolttoaine ja Vuosi*. Luonnonvarakeskus.

https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_04%20Metsa_04%20Talous_07%20Puun%20kaytto_10%20Puun%20energiakaytto/01_Laitos_ekaytto.px/table/tableViewLayout2/?loadedQueryId=b9c44f23-1251-4906-9944-d222fdda85fe&timeType=top&timeValue=15

Luke. (2024-b). *Puun energiakäyttö*. Luonnonvarakeskus. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/puun-energiakaytto-2023-ennakko>

Luke. (2015). Tarkennuksia puutavaran mittauslain soveltamisesta energiapuuhun. Infokirje.

Luonnonvarakeskus. https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/wp-content/uploads/sites/9/2018/05/Infokirje_Tarkennuksia_puutavaran_mittauslain_soveltamisesta_energiapuuhun_26102015.pdf

LähiTapiola Loimi-Häme. (2022). *Metsän hoitorästit näkyvät: Kanta-Hämeen metsistä voitaisiin vuosittain saada yli kaksi miljoonaa euroa enemmän tuloja*.

<https://www.lahitapiola.fi/tietoa-lahitapiolasta/uutishuone/tiedotteet/1509576326240/>

MMM. (2024). *Metsien rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä*. Maa- ja metsätalousministeriö.

<https://mmm.fi/documents/1410837/22836561/Metsien+rooli+ilmastonmuutoksen+hillinnassa.pdf/b8b48104-a90c-ed4d-647d-8982f8f507d5/Metsien+rooli+ilmastonmuutoksen+hillinnassa.pdf>

MMM. (n.d.) Puupolttoaineet energiantuotannossa. Maa- ja metsätalousministeriö.

<https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto>

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023. Maa- ja

metsätalousministeriö. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230964>

Maanmittauslaitos. (2023). [Karttaote energiapuukohdekeskittymistä Kanta-Hämeessä]

16.4.2024 osoitteesta

<https://metsakeskus.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=f50de87c8e6f46969bdf90d2514c754>

Mauno, T. (2021). *Pieniläpimittaisen puun tulevaisuudet*. [pro gradu -tutkielma, Itä-Suomen yliopisto]. Metsätieteiden osasto. <http://urn.fi/urn:nbn:fi:uef-20211162>

Metsäkeskus. (2020). *Hämeen metsäohjelma 2021–2025*.

<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/alueellinen-metsaohjelma-hame-2021-2025.pdf>

Metsäkeskus. (n.d.-a). Ilmastokestävä metsänhoito. <https://www.metsakeskus.fi/fi/metsan-kaytto-ja-omistus/metsanhoito-ja-hakkuut/ilmastokestava-metsanhoito>

Metsäkeskus. (n.d.-b). Metkatukien haku alkoi maaliskuun alussa 2024

<https://www.metsakeskus.fi/fi/metsatalouden-tuet/metka-tuet/tietoa-metka-tuista>

Metsäkeskus. (n.d.-c) *Metsitystuki*. <https://www.metsakeskus.fi/fi/metsatalouden-tuet/metsitystuki>

Metsänhoidon suositukset. (n.d.-a). *Metsänhoidon perusteita*.

<https://metsanhoidonsuosituksset.fi/fi/metsatilan-hoito/metsanhoidon-perusteita>

Metsänhoidon suositukset. (n.d.b). *Energiapuun korjuu hoidetuista ja hoitamattomista*

kasvatusemetsistä. <https://metsanhoidonsuosituksset.fi/fi/toimenpiteet/energiapuun-korjuu-hoidetuista-ja-hoitamattomista-kasvatusemetsista/toteutus>

Metsälehti. *Puun hinta*. [kuva 6]. Haettu 13.4.2024 osoitteesta

https://www.metsalehti.fi/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf1Ev1AWU9gdci7TxncHo4bVZUcbj5AOW5tK6iLa0UyCPMIZf_pw3jAaArBEEALw_wcB

Metsälehti. *Energiapuun hinta*. [kuva 7]. Haettu 13.4.2024 osoitteesta https://www.metsalehti.fi/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf1Ev1AWU9gdcI7TxncHo4bVZUcbj5AOW5tK6iLa0UyCPMIZf_pw3jAaArBEEALw_wcB

Myös UPM pudottaa kuitupuun läpimittaa – kilpailu puusta käy kovana. (8.4.2024).

Metsälehti. <https://www.metsalehti.fi/uutiset/myos-upm-pienentaa-kuitupuun-vahimmaislapimittojaan/#32499c25>

Osta vastuullisesti -verkkosivusto. (2022) *Mitä on päästökompensointi?*

<https://www.ostavastuullisesti.fi/mita-on-paastokompensointi/>

Palviainen, M., Laurén, A., Saarela, T., Lafdani, E., Pumpanen, J. (2020). Biohiili valumavesien puhdistajana. *Vesitalous-lehti 2/2020*. https://vesitalous.fi/wp-content/uploads/2020/04/Vesitalous_2002_low.pdf

Perkkiö, H. (2023). *Uusi keksintö antaa buustia kasvuun*. Nivala-Haapajärven seutu NIHAK ry. <https://www.nihak.fi/fi/uusi-keksinto-antaa-buustia-kasvuun/>

Pitkänen, N. (2022). *Biohiilen vaikutus nitraatin pidättymiseen ja pidättymisen vaikutus nitraatin käyttökelpoisuuteen*. [maisterintutkielma, Helsingin yliopisto]. Maataloustieteiden osasto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-202210183624>

PUHI Oy. (2023). *PUHI saa ympäristöluvan biohiilen laajamittaisen tuotannon aloittamiseen*. <https://www.puhi.fi/news/puhi-receives-environmental-permit>

Pulli, L. (2017) *Maahan lisätyn sinkin liukoisuus*. [pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto]. Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201704263968>

Puttonen. (2020) *Metsänhoito*. Teoksessa J. Ruuska (toim.), *Metsäkoulu*. Metsäkustannus.

Puukila, T. (2020). 8 kysymystä energiapuusta. *Metsälehti*.

<https://www.metsalehti.fi/artikkelit/8-kysymysta-energiapuusta/#332c2ca5>

Rasa, K., Heikkinen, J., Hannula, M., Arstila, K., Kulju, S. & Hyväluoma, J. (2018). *How and why does willow biochar increase a clay soil water retention?* Biomass and Bioenergy 119. [kuva 10]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418302708>

Riikilä, M. (2024) *Kuitupuuta energiaksi tiedettyä enemmän – Kaukolämpöä ei risuilla tuoteta*.

Metsälehti. <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/kaukolampoa-ei-risuja-keramalla-tuoteta/>

- Riikonen, A. (2019). Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:19. Helsingin kaupunki. Kaupunkiympäristön toimiala. <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-19-19.pdf>
- Ruohonen, S. (2022). *SWOT-analyysi*. <https://www.muotoilu.info/index.php/tutkiva-muotoilu/menetelmat/swot-analyysi/>
- Ruokavirasto. (20.5.2024). *Lannoitevalmisteiden kansallinen ainesosaluettelo*. <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/kasvit/lannoitevalmisteet/lannoitevalmisteiden-ainesosaluettelo.pdf>
- Ruokavirasto. (8.4.2024). *Lainsäädäntö*. <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/lainsaadanto2/>
- Saario, T. & Laurila, N. (2019). Biohiilen valmistus ja ominaisuudet. *Biohiilellä puhtaampi ympäristö ja liiketoimintaa Etelä-Savoon*. [hankejulkaisu, Kakkois-Suomen ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-165-1>
- Sarkkola, S. & Härkönen, L. (2023). *Nykyinen metsätalouden vesiensuojelu ei vähennä vesistöjen tummumista – systeeminen muutos tarvitaan*. Luonnonvarakeskus. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/nykyinen-metsatalouden-vesiensuojelu-ei-vahenna-vesistojen-tummumista-systeeminen-muutos-tarvitaan>
- Siipola, V., Koukkari, P., Hakala, J., Seppälä, O., Björnström, M & Karlsson, M. (2021). *Metsäteollisuuden sivuvirroista valmistetun biohiilen käyttö jätevesien puhdistukseen-PurCar*. Tutkimusraportti. VTT.
- Suomen Asiakastieto Oy. (n.d.). <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/puhi-oy/31846631/paattajat>
- Suomen ympäristökeskus (Syke). (2023). *Katsaus Suomen ympäristön tilaan*. <https://www.ymparisto.fi/fi/ympariston-tila/ilmastonmuutos/hiilinielut>
- Tapio. (2024). *Uudet suositukset metsien harvennuksiin ja luonnonhoitoon on julkaistu*. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70093696/uudet-suositukset-metsien-harvennuksiin-ja-luonnonhoitoon-on-julkaistu?publisherId=69818553>
- Tieteen termipankki. (n.d.). *Bioakkumulaatio*. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Biologia:bioakkumulaatio>

Tilastokeskus. (n.d.). *Tietoa tilastoista*. <https://www.stat.fi/meta/kas/hiilidioksidiek.html>)

Valtioneuvosto. (2023). *Vahva ja välittävä Suomi: neuvottelutulos hallitusohjelmasta 16.6.2023*.

<https://valtioneuvosto.fi/documents/10184/158702198/Neuvottelutulos+hallitusohjelmasta+16.6.2023.pdf/2febf7a7-d5a1-6f17-df2d-95561de7a6de/Neuvottelutulos+hallitusohjelmasta+16.6.2023.pdf?t=1686924779616>

Vanhatalo, K. (2024) *Hiilinielut ja hiilivarastot osana ilmastokestävää metsätaloutta*. Tapio. [webinaari]. <https://www.youtube.com/watch?v=4Rqplx2F4SA&t=2269s>

Varpula, V. (2020). Biohiilen mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen kompensoinnissa. [kandidaatintyö, Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020101383960>

Woodgrow Oy. (n.d.) [kuva 11]. <https://woodgrow.fi/lisatietoa/>

VTT. (2023). *Teknologiset hiilinielut*. <https://www.vttresearch.com/fi/teknologiset-hiilinielut>.

YLE. (2022a). *Puun tuonti Venäjältä loppui kuin seinään – suomalaisille sahoille ja metsänomistajille luvassa kasvavaa kysyntää ja korkeampia hintoja?* <https://yle.fi/a/3-12352346>

YLE. (2022b). *Yksityiset metsänomistajat menettävät sata miljoonaa euroa vuodessa – tulevaisuuden tuotot hupenevat erityisesti nuoren metsän hoitorästeihin*. https://yle.fi/a/3-12359753?utm_source=social-media-share&utm_medium=social&utm_campaign=ylefiapp

Liite 1. Vapaaehtoisen eurooppalaisen biohiilisertifikaatin (EBC) biohiilen sisältämillä haitta-aineille asettamat raja-arvot

EDC -Certification Class	EDC-FeedPlus	EDC-Feed	EDC-AgroOrganic	EDC-Agro	EDC-Urban	EBC-ConsumerMaterials	EBC-BasicMaterials	
Elemental analysis	Declaration of Ctot, Corg, H, N, O, S, ash							
	H / Corg	< 0.4						< 0.7
Physical parameters	Water content, dry matter (as received and @ < 3mm particle size), bulk density (DM), WHC, pH, salt content, electrical conductivity of the solid biochar							
TGA	Needs to be presented for the first production batch of a pyrolysis unit							
Nutrients	Declaration of N, P, K, Mg, Ca, Fe							
Heavy metals	Pb	10 g t ⁻¹ (88%DM)	10 g t ⁻¹ (88%DM)	45 g t ⁻¹ DM	120 g t ⁻¹ DM	120 g t ⁻¹ DM	120 g t ⁻¹ DM	
	Cd	0.8 g t ⁻¹ (88% DM)	0.8 g t ⁻¹ (88% DM)	0.7 g t ⁻¹ DM	1,5 g t ⁻¹ DM	1,5 g t ⁻¹ DM	1,5 g t ⁻¹ DM	
	Cu	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	100 g t ⁻¹ DM	100 g t ⁻¹ DM	100 g t ⁻¹ DM	
	Ni	25 g t ⁻¹ DM	25 g t ⁻¹ DM	25 g t ⁻¹ DM	50 g t ⁻¹ DM	50 g t ⁻¹ DM	50 g t ⁻¹ DM	
	Hg	0.1 g t ⁻¹ (88% DM)	0.1 g t ⁻¹ (88% DM)	0.4 g t ⁻¹ DM	1 g t ⁻¹ DM	1 g t ⁻¹ DM	1 g t ⁻¹ DM	
	Zn	200 g t ⁻¹ DM	200 g t ⁻¹ DM	200 g t ⁻¹ DM	400 g t ⁻¹ DM	400 g t ⁻¹ DM	400 g t ⁻¹ DM	
	Cr	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	90 g t ⁻¹ DM	90 g t ⁻¹ DM	90 g t ⁻¹ DM	
	As	2 g t ⁻¹ (88% DM)	2 g t ⁻¹ (88% DM)	13 g t ⁻¹ DM	13 g t ⁻¹ DM	13 g t ⁻¹ DM	13 g t ⁻¹ DM	
Organic contaminants	16 EPA PAH	6±2.4 g t ⁻¹ DM	CSi-declaration	6±2.4 g t ⁻¹ DM	6.0-2.4 g t ⁻¹ DM	CSi-declaration	CSi-declaration	
	8 EFSA PAH	1.0 g t ⁻¹ DM					CSi-declaration	4 g t ⁻¹ DM
	benz[e]pyrene benzo[fluoran- thene	< 1.0 g t ⁻¹ DM for each of both substances						
	PCB, PCDD/F	See chapter 10	Once per pyrolysis unit for the first production batch. For PCB: 0.2 mg kg ⁻¹ DM, for PCDD/F: 20 ng kg ⁻¹ (I-TEQ OMS), respectively					

* medical and health care products are not included

declaration, no limit values for certification

Liite 2. Tutkimustodistus raskasmetallianalyyseistä 09042024



Tutkimustodistus	AR-24-GQ-002054-01	Päivämäärä	09/04/2024	Sivu	1/1
------------------	--------------------	------------	------------	------	-----

s-posti suvi.koskinen@student.hamk.fi

Suvi Koskinen
Suvi Koskinen

FINLAND

Näyte-erä

EUAB30-00029928

Asiakkaan tilausnumero

Näyttenumero	748-2024-00003360	Näytteen nimi	Biohiili, pieniläpimittainen lehtipuuseos
Näytteen kuvaus	Biohiili	Asiakkaan näytetunniste	
Näytteenoton aloitus (polttoaine)	22.3.2024	Näytteenottopiste	

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	Tulos	(MU)	Raja-arvo
Alkuaineanalyysit					
Mikroaaltohajotus	YB	SFS-EN 13656:2020		Tehty	
Arseeni (As)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	<0,2	
Elohopea (Hg)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	<0,08	
Kadmium (Cd)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	0,36	0,072
Kromi (Cr)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	4,7	1,1
Kupari (Cu)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	22	5,4
Lyijy (Pb)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	0,81	0,20
Nikkeli (Ni)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	5,2	1,2
Sinkki (Zn)	YB	SFS-EN ISO 17294-2:2016; SFS-EN 13656:2020	mg/kg ka	270	49

Huomautukset

Tutkimustodistuksen osittainen kopioiminen on sallittu vain laboratorion kirjallisella luvalla. Testaustulokset koskevat vain vastaanotettua ja tutkittua näytettä. Näytteet on toimitettu laboratorioon asiakkaan toimesta, ellei tutkimustodistuksella toisin ilmoiteta. (MU) = Laajennettu mittausepävarmuus (k=2)

YB = Analysoiva laboratorio on Eurofins Ahma - Oulu.

YHTEYSHENKILO

Anne-Riikka Rautio Business Development Manager

Anne-Riikka.Rautio@etn.eurofins.com +358 40 7557102

Tutkimustodistus on sähköisesti hyväksytty.

Eurofins Environment Testing Finland Oy
Heinäamentie 2

VAT no: FI27522925

40250 Jyväskylä
FINLAND

www.eurofins.fi

Liite 3. Opinnäytetyön aineistohallintasuunnitelma

1 Tutkimusaineiston tallennus ja säilytys

Opinnäytetyön tutkimuksellisessa osiossa valmistetaan koe-erä biohiiltä, joka toimitetaan laboratorioon analysoitavaksi. Laboratorio vastaa näyte-erän hävittämisestä analyysien suorittamisen jälkeen. Laboratorio toimittaa opiskelijalle analyysitulokset, jotka ovat kirjallista tutkimusaineistoa sekä opinnäytetyössä julkaistavaa tietoa.

Opinnäytetyöprosessin aikana tietoja tallennetaan ja niitä käsitellään HAMKin pilvitallennustilan henkilökohtaisessa kansiossa. Käyttö edellyttää henkilökohtaisen käyttäjätunnuksen ja salasanan. Tietojen tallennus tapahtuu automaattisesti.

Opinnäytetyön tutkimusaineisto sisältää jonkin verran luottamuksellista tietoa liittyen pyrolyysikoeajoissa käytettyihin lämpötiloihin, viipymäaikoihin ja koneistoon. Edellä mainittuja luottamuksellisia tietoja ei julkaista opinnäytetyössä, vaan ne esitetään varsinaisesta työstä kokonaan erillisessä tausta-aineistossa, joka jää tilaajan käyttöön. Tausta-aineiston julkisuudesta rajauksineen on sovittu tilaajan kanssa opinnäytetyösopimuksessa. Luottamuksellisen aineiston osalta opiskelijalla ja työn ohjaajalla on vaitiolovelvollisuus.

Työssä hyödynnetään lisäksi aiheeseen liittyviä aiempia tutkimuksia ja niiden tuloksia, jolloin työssä mainitaan tiedon lähteen alkuperä, tekijät ja lähteet HAMKin lähdeviittausohjeen mukaisesti.

2 Henkilötietojen ja arkaluonteisten tietojen käsittely

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä henkilötietoja tai arkaluonteisia tietoja.

3 Opinnäytetyöaineiston omistajuus

Opiskelijalla on tekijänoikeus omaan työhönsä. Valmis opinnäytetyö luovutetaan työn tilaajalle sähköisessä muodossa. Opinnäytetyön tutkimusaineisto luovutetaan kokonaisuudessaan työn tilaajalle työn valmistuttua.

4 Opinnäytetyöaineiston jatkokäyttö työn valmistumisen jälkeen

Opinnäytetyön tutkimusaineisto luovutetaan kokonaisuudessaan työn tilaajalle työn valmistuttua.