

**MAATILAMITTAKAAVAN BIOHIILITUOTANNON MAHDOLLISUUDET  
JA KANNATTAVUUS**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö  
Tieto- ja viestintätekniikka, biotalouden koulutus

Kevät 2023

Katri Juva

Tämän toiminnallisen opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää maatilayrittäjille uusia ansaintamahdollisuuksia biohiilituotannon kautta. Tuotoksia hyödynnettiin työn toimeksiantajan, HAMK Bio -tutkimusyksikön, osatoteuttamissa KieMaRa- ja Lyckan-hankkeissa. Työssä tehtiin teknis-taloudellista tarkastelua maatalan biohiilituotannolle. Tarkasteluun sisältyi maatalan biohiilituotannon konseptointia ja kannattavuuden laskentaa. Lisäksi opinnäytetyön tietoperustaosion pohjalta tuotettiin KieMaRa-hankkeelle materiaalia.

Biohiilen valmistukseen soveltuvia pienemmän mittakaavan pyrolyysilaitteistoja on viime vuosina tullut markkinoille. Kannattavuuslaskentaan valittiin maatilojen käyttöön kehitetty jatkuvatoiminen pyrolyysilaitteisto. Laitteisto on suunniteltu yhdistettyyn biohiilen ja lämpöenergian tuotantoon.

Työssä tarkasteltiin maatiloilla muodostuvien sivuvirtojen soveltuvuutta biohiilen raaka-aineeksi. Metsänhoidon sivuvirroista tuotettu hake oli sopivin raaka-aine maatalan jatkuvaan biohiilituotantoon. Hakkeeseen voidaan sekoittaa muita maatilalla muodostuvia sivuvirtoja, kuten olkea, viljan esipuhdistusjätettä tai pilaantunutta rehua. Sivuvirroille hahmoteltiin pyrolyysiin perustuva, lisäarvoa tuottava arvoketju. Maatila voi käyttää biohiiltä omassa toiminnassaan tai myydä biohiiltä eteenpäin. Biohiilen maatalasovelluksia ovat esimerkiksi maanparannus ja biohiilen lisääminen lantaan tai kuivikkeeseen. Biohiili on pysyvä hiilivarasto, joten biohiilen ja lämmön lisäksi biohiiltä tuottava maatila voi saada tuloa hiilikrediittien myynnistä vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla.

Kannattavuuslaskentaa tehtiin kahdelle maatilalle takaisinmaksuajan menetelmällä. Laskelmat osoittivat, että maatila voi tuottaa biohiiltä kannattavasti, mikäli biohiilituotanto yhdistetään lämmöntuotantoon, ja maatalan lämmöntarve on lähellä pyrolyysilaitteiston maksimikäyttökapasiteettia. Hiilikrediittien myynti ei nykyisillä hinnoilla yksistään tehnyt biohiilituotannosta kannattavaa. Työn tuotoksia hyödynnettiin KieMaRa- ja Lyckan-hankkeissa tehtävissä biohiilituotannon teknis-taloudellisissa tarkasteluissa. Ideoitua maatalan biohiilituotannon konseptia tullaan jatkokehittämään hankkeissa. Myös biohiilen tuotantoa harkitseva maatilayrittäjä hyötyy sekä työn tietoperustaosioon kootusta tiedosta että käytännönläheisistä esimerkkilaskelmista.

The purpose of this functional thesis was to develop new earning opportunities for farmers through biochar production. The commissioner of the thesis was HAMK Bio Research Unit. The outputs of the thesis were utilized in the KieMaRa and Lyckan projects partially carried out by the commissioner. A techno-economic analysis was carried out for the farm-scale biochar production. The review included conceptualizing a farm-scale biochar production and calculating its profitability. In addition, based on the theory section of the thesis, biochar-related material was produced for the KieMaRa project.

In recent years, smaller-scale pyrolysis plants suitable for farms have entered the market. For the profitability calculation, continuous pyrolysis system developed for farm use was chosen. The equipment is designed for the combined production of biochar and thermal energy.

The suitability of farm side streams as pyrolysis feedstock were examined. Wood chips produced from forestry side streams were the most suitable feedstock for the continuous farm-scale biochar production. Other side streams generated on the farm, such as straw, grain pre-cleaning waste or spoiled feed, can be mixed with wood chips. A value chain for these feedstocks was sketched. The farm can use biochar in its own operations or sell the biochar onwards. Biochar farm applications include soil improvement and adding biochar to manure or bedding. Biochar is a permanent carbon storage, so in addition to biochar and heat, a farm can generate income by selling carbon credits on the voluntary emission compensation market.

In the thesis, profitability calculations were carried out for two farms using the payback method. The calculations showed that the farm can produce biochar profitably, if the production is combined with heat production, and the farm's heat demand is close to the maximum operating capacity of the pyrolysis equipment. Selling carbon credits did not alone make biochar production profitable at current prices. The results of the thesis were utilized in the techno-economic analysis of the biochar production in the KieMaRa and Lyckan projects. In conclusion, the concept of farm-scale biochar production will be further developed in these projects. A farm entrepreneur considering the biochar production could also benefit from the information gathered in the theoretical part of the thesis and the practical example calculations.

Keywords Biochar, carbon sequestration, side stream, farms, profitability

Pages 75 pages and appendices 16 pages

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Biohiilen valmistaminen ja liiketoimintamahdollisuudet.....	3
2.1	Biohiili osana biokiertoalouden arvoketjuja.....	4
2.2	Biohiilen markkinapotentiaali Suomessa.....	7
2.3	Päästökompensaatio ja biohiili .....	9
2.4	Pyrolyysin sivutuotteiden markkinapotentiaali .....	12
2.5	Pyrolyysiteknologia .....	14
2.5.1	Hidaspyrolyysi .....	16
2.5.2	Panostoimiset laitteistot eli retortit.....	16
2.5.3	Jatkuvatoimiset ruuvipohjaiset pyrolyysilaitteistot .....	18
2.6	Biohiilen koostumus ja ominaisuudet.....	22
2.7	Biohiilen käyttökohteet.....	24
2.8	Ajankohtaisia hankkeita ja yritystoimintaa biohiilen ympärillä.....	26
2.8.1	Carbofex Oy .....	27
2.8.2	Hjelmsäterin kartanotila, Ruotsi .....	28
2.8.3	Tukholman kaupungin biohiiliprojekti .....	28
2.8.4	HSY:n lietehiilihanke.....	29
2.9	Biohiilen tuotteistamiseen liittyvää ohjausta .....	30
2.9.1	EBC-sertifikaatti.....	30
2.9.2	Biohiilituotannon lainsäädäntöä .....	31
3	Kehittämistyön tarkoitus ja tavoite .....	32
4	Biohiilikonseptin suunnittelu ja kannattavuuslaskenta .....	33
4.1	Biohiilituotannon suunnittelu .....	33
4.1.1	Pyrolyysilaitteiston valinta .....	34
4.1.2	Pyrolyysisyötteiden valinta .....	35
4.2	Maatila-ympäristön biohiilikonsepti .....	37
4.3	Kannattavuustarkastelut.....	39
4.3.1	Takaisinmaksuajan menetelmä ja kannattavuuslaskentatyökalu .....	39
4.3.2	Investointikustannukset.....	41
4.3.3	Muuttuvat kustannukset.....	42

4.3.4	Tuotot.....	44
4.4	Case-esimerkki biohiiltä käyttävä lihakarjatila .....	45
4.4.1	Takaisinmaksuaika ja investoinnin kannattavuus .....	46
4.4.2	Herkkyysanalyysi .....	47
4.5	Case-esimerkki energiayrittäjyyttä harjoittava kasvinviljelytila .....	50
4.5.1	Takaisinmaksuaika ja investoinnin kannattavuus .....	51
4.5.2	Herkkyysanalyysi .....	52
5	Johtopäätökset ja pohdinta.....	54
	Lähteet.....	60

## **Liitteet**

Liite 1	KieMaRa-hankkeelle laaditun biohiilitietoiskun esitysdia
Liite 2	KieMaRa-hankkeen yhteistoiminnallisen työpajan tiivistelmä biohiilir ryhmän työpajatyöskentelystä
Liite 3	Esimerkkituloille tehtyjen kannattavuuslaskentojen tulokset
Liite 4	Aineistonhallintasuunnitelma

## 1 Johdanto

Tämä toiminnallinen opinnäytetyö laadittiin Hämeen ammattikorkeakoulun HAMK Bio - tutkimusyksikön toimeksiannosta. Työn tavoitteena oli kehittää maatilayrittäjille uusia ansaintamahdollisuuksia biohiilituotannon kautta. Opinnäytetyön tuotoksia hyödynnettiin HAMK Bion osatoteuttamissa Kiemara- ja Lyckan-hankkeissa biohiilituotannon ympärille rakentuvien kiertotalouskonseptien kehittämisessä ja näiden konseptien kannattavuuden arvioinnissa. Tuotoksia olivat kannattavuuslaskelmat maatilalla tapahtuvasta biohiilen tuotannosta, sekä KieMaRa-hankkeelle tuotettu biohiiliaiheinen materiaali.

KieMaRa-hanke on Hämeen ammattikorkeakoulun ja ProAgria Keskusten liiton yhteishanke (KieMaRa – Kokonaisvaltaisesta kiertotaloudesta maaseudun elinvoiman rakennuspalikoita). Hanke on rahoitettu Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta. Kanta- ja Päijät-Hämeen alueella toteutettavan hankkeen tavoitteina on välittää tietoa kiertotalouden tarjoamista mahdollisuuksista maaseudun toimijoille ja kiertotalousjakeiden hyödyntäjille, sekä rakentaa uusia kiertotalouskonsepteja alueen maatilayrityksissä muodostuvien sivu- ja jätevirtojen ympärille. Hanke pyrkii jalkauttamaan tutkimus- ja kehitystoimintaa käytännön tasolle, ja saamaan aikaan uudenlaisia kiertotalouden toimintamalleja maaseudulle. (ProAgria, 2023; ks. myös Hämeen ammattikorkeakoulu, n.d.-a)

Lapinjärven kunnan Lyckan-hankkeessa kehitetään kestäväää maaseutuyrittäjyyttä. Myös tämä hanke on rahoitettu Euroopan aluekehitysrahastosta. Hankkeessa maaseutuyrittäjyyttä kehitetään usealla osa-alueella, joista vastaavat Lyckanin eri hanketoimijat. Hankkeen osa-alueita ovat biokiertotalous, matkailu, luovat alat sekä tulevaisuus. Hanketoimijoita ovat Lapinjärven kunta, Laurea-ammattikorkeakoulu, Hämeen ammattikorkeakoulu, LAB-ammattikorkeakoulu sekä Haaga-Helia ammattikorkeakoulu. (Lyckanhub, 2022a) Hämeen ammattikorkeakoulun Bio-tutkimusyksikkö vastaa hankkeessa biokiertotalouden osa-alueen toteutuksesta. Tähän kuuluu mm. alueella muodostuvien biopohjaisten sivuvirtojen uusien hyödyntämiskäytäntöjen kartoitus, sekä näille ratkaisuille tehtävät teknis-taloudelliset tarkastelut. Tavoitteena on kehittää uutta liiketoimintaa alueelle biopohjaisista sivuvirroista. (Lyckanhub, 2022b)

Suomessa biohiiltä tuotetaan teollisessa mittakaavassa Carbofex Oy:n laitoksella Nokialla. Vuonna 2022 sekä Vantaan Energia että GRK Suomi Oy ilmoittivat suunnittelevansa uusia pyrolyysilaitoksia Suomeen. GRK Suomi Oy:n ensimmäinen biohiilen tuotantolaitos on valmistunut Utajärvelle Pohjois-Pohjanmaalle, ja laitoksen tuotanto on käynnistynyt vuonna 2022 (Riina Rantsi, GRK Suomi Oy, henkilökohtainen tiedonanto 24.1.2023). Aihe on siis hyvin ajankohtainen, ja liiketoimintaa biohiilen ympärille on kehittymässä Suomessakin. Biohiilen valmistukseen soveltuvia, pienemmän mittakaavan laitteistoja on viime vuosina tullut markkinoille, ja ne tarjoavat mahdollisuuden biohiilen valmistamiseen esimerkiksi maatilalla. Tässä opinnäytetyössä tehdään kannattavuuslaskelmia biohiilen tuotannosta maatilalla edellä mainituilla pienemmän mittakaavan laitteistoilla.

Biohiiltä voidaan valmistaa monenlaisista biomassoista pyrolyysimenetelmällä, jossa biomassaa kuumennetaan hapettomassa tilassa 300–700 °C lämpötilaan. Biohiiltä myydään kuluttajapakkauksissa erilaisten istutusten kasvualustoihin ja kompostoinnin tehostajaksi. Sitä voidaan käyttää myös esimerkiksi maanparannuksessa, hulevesien suodatuksessa, vanhojen kaivosalueiden maisemoinnissa ja pelkistimenä teräksen tuotannossa. Biohiili on siis monikäyttöinen materiaali ja biohiilen tuotanto tarjoaa mahdollisuuksia luoda uusia kiertotalouden mukaisia arvoketjuja biopohjaisille sivu- ja jätevirroille (Elo, 2020; Thomsen, 2022 ss. 46–47).

Kiinnostus biohiilen tuotantoon ja käyttöön on kasvanut voimakkaasti 2010- ja 2020-luvuilla ilmastokriisin torjunnan noustua globaaliksi megatrendiksi. Pyrolyysiprosessissa biomassan sisältämää hiiltä varastoituu erittäin pysyvässä muodossa biohiileen. Biohiileen voidaan varastoida pitkäaikaisesti sellaista hiiltä, joka muutoin vapautuisi hiilidioksidina ilmakehään. (Thomsen 2022, ss. 6–7) Biohiilituotannon hiilen sidontaa myydään vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla. Turtiaisen (2023, s. 51) mukaan maataloustuottajat ovat ilmastotavoitteiden saavuttamista koskeissa keskusteluissa toivoneet mahdollisuutta kaupallistaa alkutuotannon hiilensidontaa. Biohiili tarjoaa tähän mahdollisuuden, ja se huomioidaan tämän opinnäytetyön kannattavuuslaskelmissa. Kasvanut kiinnostus biohiileen on johtanut biohiilian teknologiseen, tieteelliseen, poliittiseen ja taloudelliseen kehitykseen, joka jatkuu edelleen (Thomsen 2022, ss. 6–7). Näitä biohiilian kehityksen osa-alueita tarkastellaan tietoperustaosiossa.

Opinnäytetyössä tarkasteltavia tutkimuskysymyksiä ovat:

- Millaisia maatilamittakaavan pyrolyysilaitteistoja on tarjolla, ja millaisia investointeja laitteistot ovat?
- Miten maatilalan sivuvirrat soveltuvat näiden pyrolyysilaitteistojen syötteiksi?
- Millainen on biohiilen markkinatilanne ja yleinen hintataso?
- Voiko biohiilen tuotanto maatilamittakaavassa olla kannattavaa?

## 2 Biohiilen valmistaminen ja liiketoimintamahdollisuudet

Biohiiltä valmistetaan orgaanisesta materiaalista muuntamalla sitä hiilipitoiseksi materiaaliksi pyrolyysiksi kutsutulla termokemiallisella menetelmällä. Pyrolyysi perustuu materiaalin kuumentamiseen hapettomissa olosuhteissa, jolloin useimmat orgaanisen aineksen sisältämät alkuaineet (happi, typpi, vety) kaasuuntuvat, ja merkittävä osa hiilestä jää kiinteään olomuotoon. (Basu, 2013, s.147; Wilson, 2014)

Pyrolyysissa kiinteään olomuotoon jäävä hiili voidaan eurooppalaisen biohiilisertifikaatin (EBC, European Biochar Certificate) mukaan määritellä biohiileksi, mikäli hiili varastoidaan pitkäaikaisesti, tai mikäli hiilellä on tarkoitus korvata fossiilista hiiltä teollisessa valmistuksessa (EBC, 2022, s. 10). Biohiili varastoi hiiltä pidemmäksi aikaa kuin luonnollisessa kierrossa oleva biomassa. Biohiilituotannolla saadaan vähennettyä ilmakehään päätyvän hiilidioksidin määrää, mikäli biohiilen raaka-aineena käytetään sellaista biomassaa, joka muutoin hajoaisi nopeasti vapauttaen hiilidioksidia ilmakehään. Biohiili poistaa hiiltä nopeasta kierrosta sitomalla sitä pitkäaikaisesti itseensä. (Wilson, 2014; Cowie ym., 2015, s. 763)

Biohiili on terminä ja määritelmänä melko uusi, mutta käytännössä biohiiltä on osattu valmistaa ja käyttää jo tuhansia vuosia (EBC n.d.-a). Luonnon olosuhteissa syntyy biohiiltä, kun metsäpalojen yhteydessä osa orgaanisesta aineksesta hiiltyy. Biohiiltä valmistetaan samalla menetelmällä kuin puuhiiltä, ja raaka-aineena voidaan käyttää samaa materiaalia. Yleisin puuhiilen käyttötarkoitus on kautta aikain ollut ruoan valmistaminen. Esiteollisella ajalla puuhiiltä on valmistettu mehiläispesän muotoisissa uuneissa. Puuhiiltä käytettiin



ruoanvalmistuksen lisäksi raudan irrottamiseen rautamalmista. (Basu, 2013, s.147; EBC, n.d.-a). Pyrolyysiteknologia on näistä ajoista kehittynyt, ja biohiilen valmistamiseen on nykyisin tarjolla useampaan eri tekniikkaan perustuvia kaupallisia laitteistoja (Elo, 2020; Pöyry Finland Oy, ss. 46–47).

## **2.1 Biohiili osana biokiertoalouden arvoketjuja**

Korkeamman arvonlisän biotalous on nostettu yhdeksi pääpainopisteeksi Suomen biotalousstrategiassa 2022–2035. Korkeamman arvonlisän biotalouteen pyritään kehittämällä uusia biopohjaisia raaka-aineita sekä biopohjaisten tuotteiden valmistusmenetelmiä. Samalla kehitetään uusia tuotteita ja palveluita sekä lisätään raaka-aineiden jalostusarvoa ja resurssitehokkuutta. Sivuvirtojen hyödyntäminen ja kiertoalouden toimintamallien käyttöönotto ovat keskeisiä keinoja tavoitteen saavuttamiseksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022)

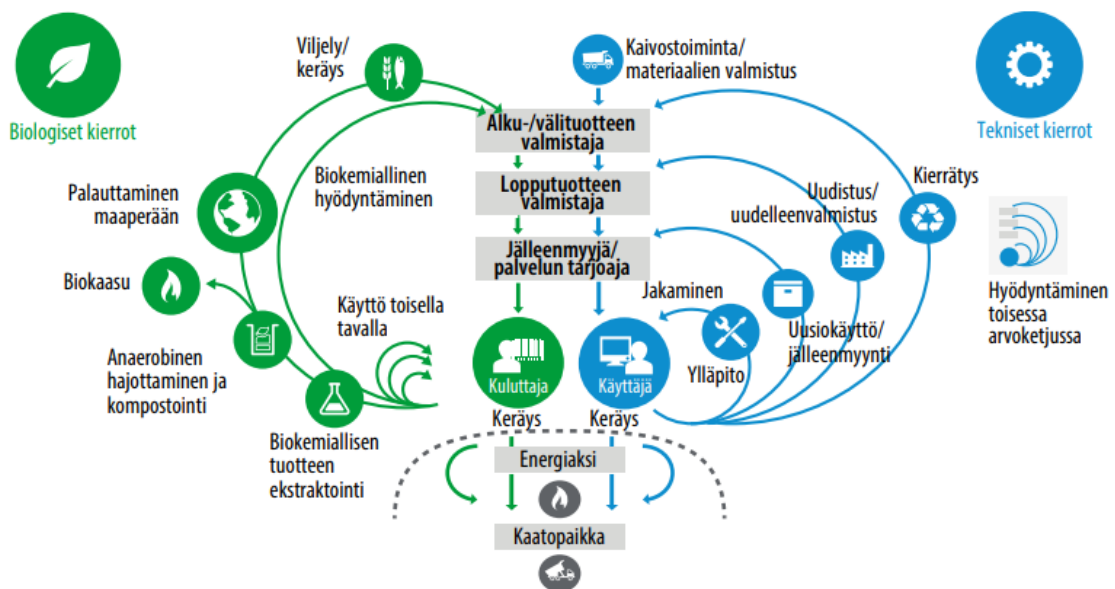
Kiertotalous on talousmalli, jonka toivotaan vähentävän maapallon luonnonvarojen ylikulutusta (Ellen MacArthur Foundation, n.d.-a). Biotalous taas on luonnosta saatavien, uusiutuvien materiaalien käyttöön perustuva talousmalli, joka pyrkii vähentämään uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä (Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra, n.d.).

Kiertotalouden periaatteiden mukainen, resurssiviisas materiaalikierto voidaan jakaa kahteen luokkaan: biologiseen ja tekniseen kiertoon (Ellen MacArthur Foundation, n.d.-a). Nämä materiaalikierrat voidaan esittää perhosdiagrammin avulla (kuva 1).

Perhosdiagrammin sisäkehillä kiertoalouden toteutuminen on ihanteellisinta, sillä sisäkehillä esitetyt hyödyntämiskäytännöt säilyttävät tuotteen arvoa parhaiten (Valtioneuvosto, 2021a, s. 27). Sisäkehän mukainen biomassan arvoa säilyttävä käyttö voi olla esimerkiksi puupohjaisten paneelien valmistamista vähäarvoisesta puusta ja puujätteestä (Euroopan komissio, 2019, s. 14). Biomassan biokemiallisen jalostuksen kautta voidaan tuottaa uutta raaka-ainetta kuten puuteollisuuden sivuvirroista erotettavaa ligniiniä teollisuudelle (Euroopan komissio, 2019, s. 49). Myös ulkokehällä esitetty biopohjaisten materiaalien kierrättäminen on kiertoaloutta, kun biologisissa kierroissa käyttöön otettuja, biohajoavia materiaaleja palautetaan maahan erilaisten prosessien kuten kompostoinnin tai

mädätyksen kautta (Ellen MacArthur Foundation, n.d.-b). Kiertotalouden perhosdiagrammin biologisen kierron kehää voi ajatella pohjana bio- ja kiertotalouden yhdistävälle biokiertotalouden käsitteelle: kestävän biotalouden on toteutettava kiertotalouden periaatteita, ja kiertotalouden on huomioitava biotalous tärkeänä osana materiaalien kiertoa (Hellström, 2018).

Kuva 1. Kiertotalouden mukaiset materiaalikierrot (Valtioneuvosto, 2021b, s. 27; ks. myös Ellen MacArthur Foundation 2019).

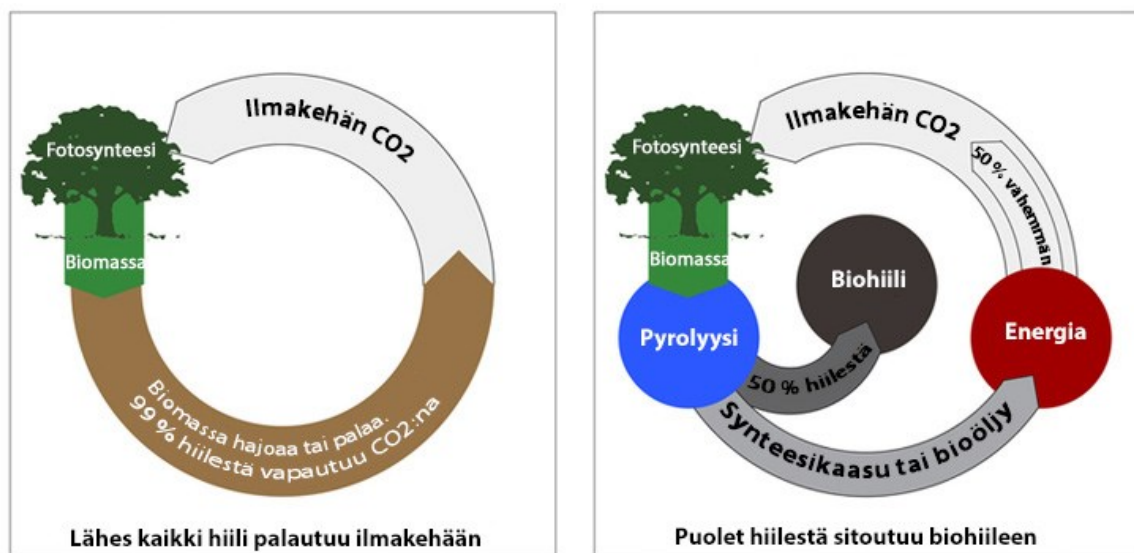


Biohiili on biomassasta valmistettu tuote, jota voidaan hyödyntää monella tavalla osana erilaisia kiertotalousratkaisuja ja lopulta palauttaa hiili maahan (Thomsen, 2022, s. 30 ja ss. 46–47). Biohiilellä on potentiaalia kestävän biotalouden tuotteena, jota voidaan hyödyntää monenlaisissa kiertotalouskonsepteissa (Thomsen, 2022, s. 30 ja s. 46–47). Biohiilen valmistuksen ja käytön on kokonaisuudessaan arvioitu olevan lupaava keino edistää hiilitehokasta (engl. carbon-efficient) resurssien kiertoa, ilmastonmuutoksen hillitsemistä ja taloudellista kestävyttä (Carvalho ym., 2022, s. 14).

Biohiili sitoo hiiltä pitkäaikaisesti ja sen tuotantoprosessi voi tätä kautta olla hiilinegatiivinen (Biochar Solutions Inc., 2011; Cowie ym., 2015, s. 763). Kuvassa 2 vasemmalla esitetään

hiilen kierto biomassan energiakäytössä tai luontaisessa hajoamisessa ja oikealla hiilen kiertoa biomassan pyrolyysin kautta. Biomassan poltossa tai luontaisessa hajoamisessa lähes kaikki biomassan sisältämä hiili palaa ilmakehään hiilidioksidin muodossa. Kun biomassaa muunnetaan pyrolyysiprosessilla biohiileksi, noin puolet biomassan sisältämästä hiilestä varastoituu pitkäaikaisesti biohiileen, eikä kaasuunnu ilmakehään hiilidioksidina (EBC, 2020, s. 1). Loppuosa biomassan sisältämästä hiilestä vapautuu ilmakehään ja hiilen nopeaan kiertoon, kun biohiilen sivutuotteina muodostuvat synteetikaasut ja bioöljy poltetaan energiaksi. Kasvit sitovat hiilidioksidina ilmakehään palaavan hiilen fotosynteesin kautta. (Biochar Solutions, 2011a)

Kuva 2. Biomassan pyrolysointi biohiileksi on hiiltä ilmakehästä poistava prosessi (mukailten Biochar Solutions, 2011b).



Biohiilen tuotanto nähdään biomassan arvoa säilyttävänä, ns. kaskadikäyttönä, jolla tuotetaan biomassalle kertautuvaa arvoa (Euroopan komissio, 2019, s. 15; ks. myös Euroopan komissio, 2019, s. 37). Tuotettua arvonlisää voidaan tarkastella arvoketjujen avulla. Arvoketju mallintaa jonkin hyödykkeen vaiheittaista jalostumista raaka-aineesta tuotteeksi. Ketjun jokainen vaihe lisää tuotteen arvoa. (Tieteen termipankki, 2016)

Biomassan jalostaminen pyrolyysillä voi tuottaa monivaiheisia arvoketjuja biomassalle. Biohiilituotannon hiilensidonnan kaupallistaminen myytäviksi hiilikrediiteiksi tuottaa

lisäarvoa. Biomassalle voidaan tuottaa lisäarvoa jo ennen pyrolyysia käyttämällä sitä esimerkiksi metsäteollisuudessa tai biokaasun tuotannossa. Pyrolyysilla valmistettua biohiiltä voidaan vielä ennen maanparannuskäyttöä hyödyntää jossain muussa tarkoituksessa. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi kompostoinnin tehostajana, tai ravinteiden sitojana biokaasulaitoksen rejektivesissä. (Thomsen, 2022, ss. 38–39). Tällaisten kiertotalousajattelun mukaisten pidempien arvoketjujen syntymiseen tarvitaan usein monen toimijan muodostamia kiertotalousekosysteemejä (Sahimaa, 2021).

Biohiilituotannossa biomassalle saadaan korkeampaa arvonlisää, kun biohiiltä tuotetaan esimerkiksi maa- ja metsätalouden tähteistä, eikä neitseellisistä biomassoista. Kestävässä biohiilituotannossa maankäyttömuotoa ei raaka-aineen hankintaa varten muuteta raivaamalla metsiä, tai siirtämällä ruoan tuotannossa olevia alueita pyrolysoitavan biomassan tuotantoon. Esimerkiksi maa- ja metsätalouden tähteitä voidaan pitää kestäväenä raaka-ainevalintana. Kestävässä biohiilen tuotannossa pyrolysoitavaa biomassaa kerätään sitä mukaa, kun luonto sitä pystyy tuottamaan. (Amonette ym., 2010, s. 3 ja s.7)

## **2.2 Biohiilen markkinapotentiaali Suomessa**

Biohiilellä on monia mahdollisia käyttökohteita (kts. luku 2.7). Tämä yhdistettynä biohiilen mahdollisuuksiin vauhdittaa yritysten hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamista on tehnyt biohiilimarkkinasta kasvavan (STT Viestintäpalvelut Oy, 2022). Salon (2019) mukaan biohiilimarkkinan kehittyminen Suomessa on alkanut vuonna 2017, ja edelläkävijöitä biohiilen käytössä ovat olleet kunnat ja kaupungit. Vuonna 2019 Suomen 10 suurinta kaupunkia olivat kaikki käyttäneet biohiiltä (Salo, 2019). Esimerkiksi Helsingissä ja Mikkelissä biohiiltä on käytetty hulevesien käsittelyssä ja Turussa kaupunkien katualueiden viherrakentamisessa. (Salo, 2019; ks. myös Miksei Oy, n.d; Kaupunkivesistöt kuntoon, 2020, s. 3)

Vuonna 2018 valmistuneessa pro gradu -työssään biohiilisovellusten nykytilanteesta ja tulevaisuuden näkymistä Salo (2018, s. 44) arvioi biohiilen saavuttavan vahvan aseman kompostoinnissa, viherkatoissa, kasvualustoissa sekä hule- ja valumavesien käsittelyssä ja suodatuksessa. Carbons Finland Oy myy biohiiltä näihin Salon (2018, s. 44) potentiaalisina

näkemiin käyttökohteisiin. Carbons Finland Oy on tuotteistanut puupohjaista biohiiltä esimerkiksi kasvualustabiohiileksi, hule- ja valumavesien käsittelyyn sekä kompostin lisäaineeksi. (Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra, 2019)

Biohiilen käyttö peltojen maanparannusaineena on haastavaa, koska biohiilen hinta on melko korkea eikä taloudellisia kannustimia biohiilen peltokäyttöön ole riittävästi. (Rasa, 2021, ss. 6–7; Sohlo, 2022). Muina haasteina biohiilimarkkinoiden kehittämisessä Suomessa on nähty ainakin kaupunkialueilla tapahtuvaan biohiilen käyttöön liittyvän tutkimuksen puute, tuotetun biohiilen ominaisuuksien vaihtelun vaikutus käyttömahdollisuuksiin, ja suomalaisten olosuhteiden vaikutus biohiilen tunnettuihin hyötyihin. Tunnistetuista haasteista huolimatta biohiilen markkinoiden on ennustettu kasvavan sekä Suomessa että Euroopassa. (Salo, 2018, s. 4 ja s. 43; STT Viestintäpalvelut Oy, 2022)

Biohiilimarkkinoiden tilanne Suomessa on kehittyvä ja uusia tuotantolaitoksia on suunnitteilla. GRK Suomi Oy aikoo rakentaa Suomeen useita keskikokoisia biohiilen tuotantolaitoksia. GRK Suomi Oy:n käyttämä teknologia mahdollistaa tulevaisuudessa myös lietteen ja hevosen lannan käyttämisen biohiilen raaka-aineena. Yritys arvioi pystyvänsä käyttämään tuottamaansa biohiiltä omissa hankkeissaan esimerkiksi kasvualustoissa, maanparannuksessa sekä vesien puhdistuksessa. GRK Suomi Oy on myös tutkinut biohiilen käyttömahdollisuuksia bitumin tai betonin raaka-aineena. Yrityksen antamassa mediatiedotteessa biohiilen käytön todetaan edistävän heidän yritysvastuutavoitteenaan olevaa oman toiminnan hiilineutraaliutta vuoteen 2030 mennessä. (STT Viestintäpalvelut Oy, 2022)

Biohiilen tuotantomahdollisuuksien arvioinnin ajankohtaisuus näkyy myös tutkimus- ja kehityshankkeissa. Esimerkiksi vuosille 2021–2023 rahoitusta saaneessa Fiksuhiili-hankkeessa pyritään suunnittelemaan ja muokkaamaan tehdasvalmisteisesta, pienen teholuokan lämmityskattilasta jatkuvatoiminen hybridi-biohiilikattila. Hankkeen verkkosivujen mukaan hankkeessa saavutettavien tulosten pohjalta olisi mahdollista skaalata tekniikka isompaan, esimerkiksi maatalouden toimijoiden käyttöön. (Hämeen ammattikorkeakoulu HAMK, n.d.-b)

Tällä hetkellä Suomessa toimii yksi teollisen mittakaavan biohiililaitos, Nokiolla sijaitseva Carbofex Oy. Carbofex Oy on valmistanut biohiiltä vuodesta 2018 lähtien. Vuonna 2019 yrityksen silloinen toimitusjohtaja ja yrittäjä Sampo Tukiainen on todennut heidän vuosittaisen biohiilituotantonsa (1000 tonnia / vuosi) ylittävän Suomen markkinoiden tarpeet ja suurin osa heidän tuottamastaan biohiilestä on viety Ruotsiin (Business Tampere, 2019). Carbofex Oy:n valmistamaa biohiiltä on käytetty mm. Tukholman kaupungin istutuksissa, Espoon kaupungin valumavesien suodatuksessa sekä Tampereen kaatopaikkavesien suodatuksessa (Puro.earth, 2021a). Carbofex Oy:n valmistama biohiili on sertifioitu maanparannus- ja rehukäyttöön. (Carbofex Oy, n.d.)

Carbofex Oy:n kotisivuilla ilmoitetun mukaan biohiilen myymisestä saatava tuotto olisi 2 000 € biohiilitonnia kohden (Carbofex Oy, n.d.). Salon (2018, s.33) mukaan biohiilen hinta on 2010-luvulla noussut biohiilen kysynnän ylittäessä tarjonnan. Vuonna 2018 biohiilen hinta on ollut välillä 700–800 €/t, kun aikaisemmin hinta liikkui tasolla 300–400 €/t (Salo 2018, s. 33). Esko Salon 6.2.2023 antaman henkilökohtaisen tiedonannon mukaan maanparannusaineena käytettävän biohiilen hinta on noin luokkaa 1 200–1 300 €/t.

Campbellin ym. vuonna 2018 julkaisemassa artikkelissa on tarkasteltu biohiilen markkinoita ja havaittu biohiilen hinnan vaihtelevan globaalisti hyvin paljon. Hinnanvaihtelun on arvioitu johtuvan biohiilen tuotantoprosessin ja raaka-aineen aiheuttamasta hiilen laadun ja ominaisuuksien vaihtelusta sekä biohiilen myynnistä useisiin käyttötarkoituksiin useille eri sektoreille. (Campbell ym., 2018, s. 333) Campbellin ym. (2020, s. 333) tutkimuksessa viitataan IBI:n (International Biochar Initiative) raporttiin, jossa biohiilen hinnan maailmanlaajuisesti oli havaittu vaihtelevan välillä 27–13 480 US\$/t, ja biohiilen keskihinnaksi on saatu 2 650 US\$/t. (Jirka & Tomlinson, 2014, s. 20)

### **2.3 Päästökompensatio ja biohiili**

Päästökauppa on ollut ilmastopolitiikan työkalu vuodesta 1997 lähtien. Tuolloin solmitussa, valtioiden välisessä Kioton ilmastopimuksessa on asetettu valtioille päästöihin liittyviä velvoitteita ja kehitetty päästöjen kompensatiomekanismeja tavoitteiden saavuttamista

varten. Kompensoinnin tavoitteena on hyvittää sellaisia päästöjä, joiden vähentäminen on valtiotasolla vaikeaa. (Finnwatch ry, 2021, ss. 4–7).

Vuonna 2005 käyttöön otettu Euroopan unionin päästökauppajärjestelmä perustuu Kioton ilmastopoliittisten periaatteisiin ja on asetettu koskemaan teollisuus- ja energiantuotantolaitoksia sekä EU:n sisäistä lentoliikennettä (Työ- ja elinkeinoministeriö, n.d.). Käytännössä EU:n päästökaupassa päästökauppasektorin toimijat saavat osittain päästöoikeutensa ilmaiseksi ja osittain ostavat päästöoikeuksia EU-valtioiden yhteiseltä huutokauppapaikalta (Energiavirasto, n.d.-a; Energiavirasto, n.d.-b.). Kompensoinnin perusajatuksena on se, että ilmakehään päätyvät kasvihuonekaasut leviävät tasaisesti ilmakehään, jolloin kasvihuonekaasupäästöjä joko vähentämällä tai ilmakehästä poistamalla voidaan kompensoida toisaalla aiheutettuja päästöjä (Finnwatch ry, 2021, ss. 4–7).

Ilmastopolitiikan työkaluksi kehitetyn valtioiden välisen päästökaupan rinnalle on syntynyt vapaaehtoisen päästökompensaation markkina. Vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla yritykset ja yksityiset henkilöt voivat kompensoida päästöjään ostamalla ilmakehästä sidottuja CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonneja eli päästöyksiköitä tai ns. hiilikrediittejä sellaisilta yrityksiltä ja hankkeilta, joiden toiminta todennetusti vähentää päästöjä tai sitoo hiiltä ilmakehästä. Vapaaehtoinen kompensatio on yrityksille yksi keino saavuttaa ilmastotavoitteet omassa toiminnassaan. Vapaaehtoisilla kompensatiomarkkinoilla kaupattavilla päästöyksiköillä saavutettavat todelliset ilmastohyödyt pyritään takaamaan sertifioimalla päästövähennystä tai hiilensidontaa lupaavat hankkeet. Aito ilmastohyöty tulee osoittaa sertifiointikriteerien täyttämällä. Kompensaationsertifikaatteja on kehitetty useampia. Yleisesti tunnettuja, Suomessa käytössä olevia sertifikaatteja ovat Valonian (2020) ja Finnwatch ry:n (2021, s. 39) mukaan Verified Carbon Standard (VCS) ja Gold Standard (GS). Näillä sertifikaateilla taataan muun muassa, että tarjottava kompensatio on lisäistä, eli päästöjen kompensointia ei tapahtuisi ilman ostettua kompensatiopalvelua. (Finnwatch ry, 2021, s. 8; s. 13; Valonia, 2020)

Päästöjen vapaaehtoisen kompensoinnin yhteydessä puhutaan usein kaksoislaskennan ongelmasta. Ongelma syntyy, mikäli myytävä päästövähennysyksikkö lasketaan useamman toimijan eduksi. Esimerkiksi maankäyttösektorin päästöt ja hiilinielut raportoidaan EU:lle ja

YK:lle osana kansallisia päästöjä ja nieluja. Tällöin metsityksellä aikaansaatavien päästövähennysten myyminen vapaaehtoisilla kompensatiomarkkinoilla johtaisi siihen, että päästöt hyvitetäisiin kahteen kertaan: sekä Suomen valtiolle että vapaaehtoisen päästökompensaation ostajalle. Kaksoislaskennan välttäminen kuuluu Ympäristöministeriön julkaisemiin hyvän päästökompensaation kriteereihin. Biohiilen käyttäminen vapaaehtoisissa kompensatiorankkeissa ei aiheuta kaksoislaskennan riskiä, koska biohiilen käyttö maanparannusaineena ei kuulu Suomea sitovien ilmastotavoitteiden piiriin. (Finnwatch ry, 2021, s. 19; Valtioneuvosto, 2022)

Vapaaehtoisen kompensaaion markkinoilla päästövähennyksiä tai hiilen sidontaa toteuttava yritys ei myy kompensatioyksiköitä suoraan kuluttajille tai yrityksille. Asiakkaan ja kompensatiorankkeen välissä toimii kompensatiopalvelun tarjoaja.

Kompensatiopalveluita tarjoava yritys myy päästöyksiköitä verkossa toimivilla markkinapaikoilla eli alustoilla. Palveluntarjoajia on markkinoilla useita ja ne eroavat toisistaan esimerkiksi tarjoamalla tiettyihin painopisteisiin keskittyviä rankkeita. (Valonia, 2021)

Esimerkkeinä kompensatiopalveluita tarjoavista markkinapaikoista voidaan mainita:

- Puro.earth: markkinapaikka hiilidioksidin teolliselle poistolle ilmacehästä
- Compensate: suomalainen kompensatiopalvelu, joka painottaa rankkeissaan biodiversiteettiä, ihmisoikeuksia sekä paikallisyhteisöjä
- Hiilipörssi: ennallistaa suomalaisia ojitettuja soita, ja painottaa rankkeissaan biodiversiteettiä ja maisemallisia arvoja

Biohiilirankkeiden kautta tapahtuvaa päästökompensatiota myyviä toimijoita ovat esimerkiksi Puro.earth-markkinapaikka sekä Compensate-palvelu. Markkinapaikoilta löytyvissä biohiilirankkeissa joko tuotetaan biohiiltä tai käytetään EBC-sertifioitua biohiiltä maanparannukseen. (Compensate Operations Oy, 2021a; Compensate Operations Oy, 2021b; Puro.earth, 2021a; Puro.earth, 2021b)



Puro.earth-palvelun hankkeet täyttävät hiilidioksidin teollisen poiston hankkeille kehitetyn Puro Standard -sertifikaatin kriteerit. Compensate palvelusta löytyvät hankkeet täyttävät joko Verified Carbon Standard (VCS) tai Gold Standard (GS) -sertifikaatin kriteerit. (Valonia, 2020) Puro.earth -palvelussa yhden CORC:in, eli sidotun CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonnin hinta on kompensatiohankekohtainen. CORC-yksikön hinnat vaihtelevat välillä 20–535 €. (Puro.earth, 2021c) Compensate-palvelussa yhden kompensoitavan päästöyksikön (CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonni) hinta on 35 € kaikissa ko. palvelusta löytyvissä hankkeissa (Compensate Operations Oy, 2021c).

Yhden biohiilitonnin tuotannolla on mahdollista tuottaa noin kolme vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla myytävää CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonnia eli hiilikrediittiä. Luku perustuu hiiliatomin ja hiilidioksidimolekyylin massoihin: yksi hiilidioksidimolekyyli (CO<sub>2</sub>) painaa alkuaineiden jaksollisen järjestelmän mukaan noin 3,7 kertaa yhden hiiliatomin (C) verran, jolloin yksi hiiliatomi poistaa 3,7 kertaa oman painonsa verran hiilidioksidia ilmakehästä. Todellisuudessa biohiilessä on hieman muitakin alkuaineita kuin hiiltä ja lisäksi biohiilen valmistamisesta aiheutuu yleensä myös hiilidioksidipäästöjä, joten kompensatiohankkeissa yksi biohiilitonni sitoo em. teoreettista lukua vähemmän hiilidioksidia. Esimerkiksi Carbofex Oy:n valmistaman biohiilikilon ilmoitetaan Puro.earth-palvelussa sitovan 3,43 kg hiilidioksidia ja Hjelmsäterin kartanotilan biohiilikilon 3,26 kg hiilidioksidia (Puro.earth, 2021a; Puro.earth, 2021b).

## **2.4 Pyrolyysin sivutuotteiden markkinapotentiaali**

Osa orgaanisesta aineksesta kaasuuntuu biomassan pyrolyysin aikana kondensoituviksi ja kondensoitumattomiksi kaasuiksi. Nämä kaasut ovat pyrolyysin sivutuotteita. Kondensoituvat kaasut voidaan nesteyttää pyrolyysinesteeksi eli bioöljyksi ja kondensoitumattomat kaasut polttaa lämpöenergiaksi (Basu, 2013, ss.151–153). Myös kondensoituvat pyrolyysikaasut poltetaan usein kokonaisuudessaan energiaksi kondensoitumattomien kaasujen mukana, koska pyrolyysinesteille ei ole riittävästi hyödyntämismahdollisuuksia (Vuori & Kangas, 2017).

Pyrolyysikaasujen sisältämää energiaa hyödynnetään yleensä pyrolyysiprosessin ylläpitämiseen. Kaasujen polton tuottama energiamäärä voi olla suurempi kuin pyrolyysiprosessin kuluttama energiamäärä, jolloin prosessista saadaan ulos lämpöenergiaa. Tuotetun energian määrä riippuu pyrolysoitavasta materiaalista sekä erityisesti materiaalin kosteuspitoisuudesta. Mikäli pyrolyysiprosessi tuottaa enemmän energiaa kuin kuluttaa, voidaan sitä käyttää esimerkiksi pyrolyysisyötteiden kuivaamiseen tai lämmön tuotantoon. (Leppäkoski, 2021; ks. myös Pöyry Finland Oy, 2019, s. 47)

Pyrolyysissa muodostuvien kaasu- ja nestefraktioiden osuudet riippuvat mm. pyrolyysilämpötilasta sekä raaka-aineesta (Boateng ym., 2015, ss. 65–66). Kondensoitumattomat kaasut koostuvat mm. hiilidioksidista, hiilimonoksidista (häkä), metaanista, etaanista ja etyleenistä (Basu, 2013, s. 152). Pyrolyysineste koostuu tervamaisesta, veteen liukenemattomasta osasta sekä vesiliukoisesta osasta. (Peltonen ym., 2020, ss. 51–52; Hagner ym., 2019, s. 7; Basu 2013 ss. 151–153)

Pyrolyysinesteille ei lainsäädännöllisistä syistä johtuen ole toistaiseksi ollut merkittävää kaupallista käyttöä Euroopan unionin sisällä (Rasa, 2021, s. 8). Euroopan unionin kemikaalilainsäädäntöön kuuluva REACH-asetus säätelee mm. kemikaalien rekisteröintiä unionin alueella (REACH – Registration, Evaluation, Authorization and restriction of chemicals). Asetuksen mukaan kaupallisessa käytössä olevat kemikaalit tulee rekisteröidä Euroopan kemikaalivirastossa. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto TUKES, n.d.-a) REACH-asetus koskee myös pyrolyysinesteitä. Etikkapitoiselle osalle REACH-rekisteröinti on vireillä (Hagner ym., 2019; ss. 4–7; Kari Tiilikkala, henkilökohtainen tiedonanto 30.1.2023). REACH-rekisteröintejä on tehty joillekin tervajakeille. Pyrolyysinesteitä ei ole rekisteröity kasvinsuojeluinerekisteriin. Karjatilojen on mahdollista hyödyntää itse valmistamiaan pyrolyysinesteitä lietelannan hapotuksessa omalla tilallaan. Pyrolyysinesteiden laajempi hyödyntäminen edellyttäisi kaupallista toimijaa, joka lähtisi edistämään vaadittavia rekisteröintejä. (Kari Tiilikkala, henkilökohtainen tiedonanto 30.1.2023)

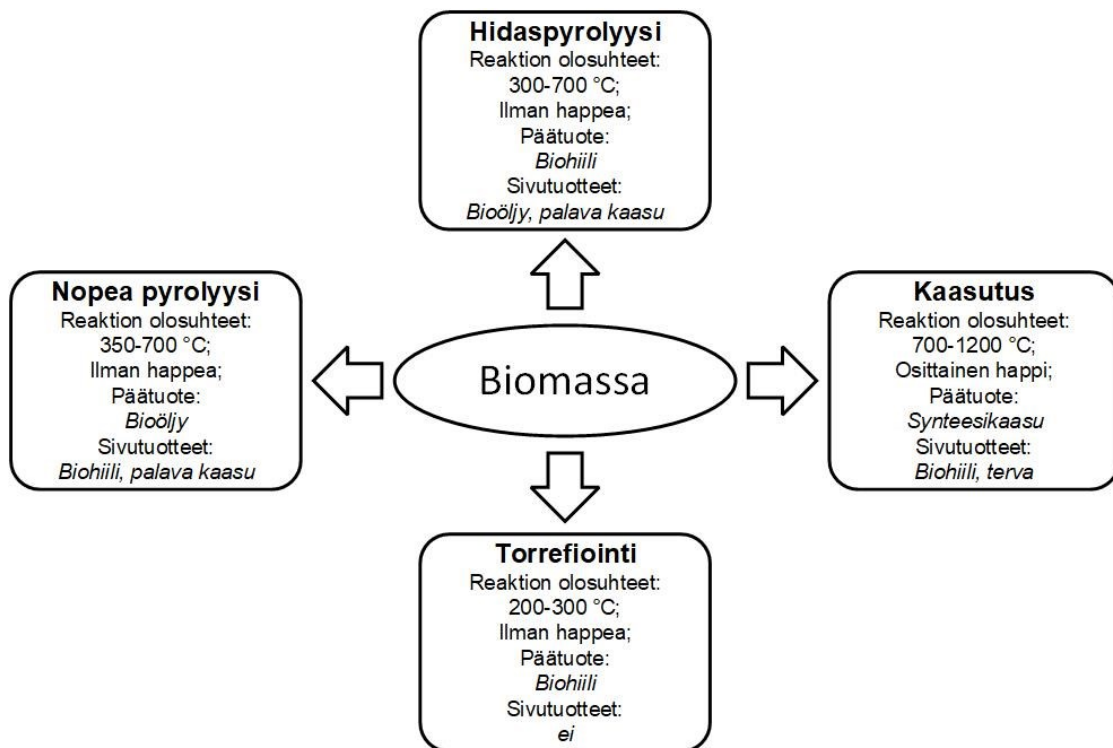
Pyrolyysinesteiden vesiliukoinen, etikkahappopitoinen osa (ns. puuetikka) soveltuisi esimerkiksi kasvinsuojeluaineeksi, lannoitteeksi tai korvaamaan rikkihappoa lietelannan

hapotuksessa (Vuori & Kangas, 2017; Rasa, 2021, ss. 7–8). Pyrolyysinesteiden hyödyntämiselle katemateriaalissa on olemassa patentoitu sovellus (Rasa, 2021, ss. 6–8).

## 2.5 Pyrolyysiteknologia

Kuvassa 3 (muokattu Wang ym. 2020, s. 2) on esitetty termokemialliset käsittelymenetelmät, joilla biomassaa voidaan muuntaa biohiileksi. Biohiiltä muodostuu, kun biomassaa kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa. Pyrolyysin lisäksi muita biohiiltä tuottavia kuivatusmenetelmiä ovat biomassan torrefiointi ja kaasuttaminen. Keskeisimpiä menetelmien välisiä eroavaisuuksia ovat prosessilämpötila, kuumennusnopeus sekä prosessiin syötettävän hapen määrä. Nämä parametrit säätelevät muodostuvien reaktiotuotteiden määräsuhteita. (Wang ym., 2020a ss. 2–6)

Kuva 3. Termokemialliset biohiilen valmistusmenetelmät (mukaillen Wang ym. 2020b, s. 2).



Pyrolyysissa biomassaa kuumennetaan noin 300–700 °C lämpötilaan. Pyrolyysissa pääasiallinen reaktiotuote on kuumennusnopeudesta riippuen joko kiinteä biohiili tai bioöljy. Torrefioinnissa lämpötila on noin 200–300 °C ja kaasutuksessa 700–1200 °C. Torrefioinnissa

reaktiotuote on energiakäyttöön tarkoitettua kiinteää hiiltä. Kaasutuksessa muodostuu pääasiassa synteetikaasua. (Wang ym. 2020a, ss. 2–6)

Pyrolyysissa biomassaa voidaan kuumentaa joko nopeasti tai hitaasti ja vaikuttaa näin saatavien reaktiotuotteiden määräsuhteisiin. Nopeasti kuumentamalla pääasiallinen reaktiotuote on nestemäinen bioöljy. Sivutuotteina saadaan synteetikaasua ja biohiiltä. Biohiilen tuotantoon tähtäävässä pyrolyysissa biomassaa kuumennetaan hitaasti, jolloin reaktiotuotteesta noin kolmannes on biohiiltä, kolmannes bioöljyä ja kolmannes kaasua. (Wang ym. 2020a, ss. 2–6; Kan ym. 2016 s. 1128; Basu, 2013 s. 147 ja s. 151–153)

Pyrolyysiprosessissa muodostuvassa kiinteässä biohiilessä hiiliatomit ovat järjestäytyneet rengasmaisiksi eli aromaattisiksi molekyyleiksi, jotka ovat kemiallisesti erittäin pysyviä rakenteita verrattuna alkuperäisen orgaanisen aineksen ketjumaisiin hiilivetymolekyyleihin (Wilson, 2014). Biohiileen varastoituu noin puolet alkuperäisen biomassan sisältämästä hiilestä. Mikäli biohiili käytetään maanparannukseen, noin 74 % tästä hiilestä pysyy biohiileen sitoutuneena ainakin 100 vuotta. (EBC, 2020, s. 1) Noin puolet biomassan sisältämästä hiilestä kaasuuntuu pyrolyysin aikana, vapautuu ilmakehään ja säilyy hiilen ns. nopeassa kierrossa (Biochar Solutions, 2011).

Yhden biohiilikilon tuottamiseen tarvitaan biomassaa useampia kiloja. Esimerkiksi Nokialla toimiva Carbofex Oy esittää verkkosivuillaan biohiilen talouslukuja, joiden mukaan heidän prosessissaan tuhannen kuusihaketonnin pyrolyysi sitoo 920 tonnia hiilidioksidia, ja tuottaa 286 tonnia biohiiltä. Carbofex Oy:n prosessissa käytettävän syötemateriaalin kosteus on maksimissaan 40 %. (Carbofex Oy, n.d.)

Lähes kaikkea biomassaa voidaan pyrolysoida. Pyrolysoitavan biomassan ei tulisi olla kovin vesipitoista, jotta energiaa ei tarvitse käyttää veden haihduttamiseen, ja pyrolyysin tuottama lämpö riittää materiaalin hiilettämiseen (Tiilikkala ym., 2013). Pyrolyysisyötteen kuiva-ainepitoisuuden tulisi yleensä olla vähintään 70 %. Vesipitoisia syötteitä on kuivattava ennen pyrolysointia. (Marttinen ym., 2017, s. 36) Kuivaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pyrolyysilämpöä (Pöyry Finland Oy, 2019, s. 47).

### 2.5.1 Hidaspyrolyysi

Pienen mittakaavan biohiilen valmistuksessa, kuten maatilamittakaavassa, hidaspyrolyysi on laajasti käytetty menetelmä (Tan ym., 2021, s. 3). Yksinkertaisimpia hidaspyrolyysiin perustuvia laitteistoja ovat ns. panostoimiset laitteistot eli retortit, joihin pyrolysoitava biomassapanos ladataan kerralla, ja odotetaan, kunnes ladattu panos on pyrolysoitunut. (Maaseudun sivistysliitto, 2021; Red Gardens, 2019)

Hidaspyrolyysiin voidaan käyttää myös automaattisempia jatkuvatoimisia laitteistoja. Jatkuvatoimisuus tarkoittaa sitä, että biomassa kulkee pyrolyysilaitteiston läpi jatkuvana virtana. Syöte siirretään pyrolyysilaitteistoon esimerkiksi ruuvikuljettimilla. Reaktorissa panos siirtyy eteenpäin esimerkiksi siirtoruovin tai erilaisten melojen avulla tai painovoimaisesti. Yleisimmin pienemmän mittakaavan jatkuvatoimiset hidaspyrolyysilaitteistot ovat tyypiltään ruuvipohjaisia. Suuremman mittakaavan biohiilituotannossa voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia rumpu- ja monikerrosuuneja. Rumpu-uuneissa pyrolyysi tapahtuu pyörivässä putkessa, ja monikerrosuuneissa biomassa kulkee hiljalleen alaspäin pyörivien levyjen säädellässä biomassan etenemistä. (Pöyry Finland Oy, 2019, s. 47; Suopajärvi, 2013, ss. 28–35)

Tässä työssä tarkastellaan tarkemmin kaupallisesti saatavilla olevia laitteistoja, joiden tuottamia pyrolyysikaasuja pystytään hyödyntämään lämmöntuotantoon, ja jotka ovat kokoluokaltaan maatilamittakaavaan soveltuvia. Näillä reunaehdoilla saatavilla olevat laitteistot ovat toimintaperiaatteiltaan joko panos- tai ruuvitoimisia, joten näihin teknologioihin perustuvia laitteistoja esitellään seuraavissa luvuissa tarkemmin.

### 2.5.2 Panostoimiset laitteistot eli retortit

Biohiilen valmistaminen panostoimisesti pienessä mittakaavassa voidaan yksinkertaisimmillaan toteuttaa polttamalla biomassaa maakuopassa, jolloin palaminen tapahtuu enimmäkseen hapettomassa tilassa (Red Gardens, 2019). Kotikäyttöön, esimerkiksi omaan puutarhaan, on saatavilla yksinkertaisia toimintaperiaatteiltaan maakuoppaa vastaavia hiilettimiä eli astioita. Yksi esimerkki tällaisesta hiilettimestä on kartionmuotoinen

Kon-Tiki-kartiohiiletin (Elo, 2020; Maaseudun sivistysliitto, 2021). Tällaisista avoastiatyyppisistä ratkaisuista lämpöenergiaa ei saada talteen, ja pinnalla oleva, pyrolyysia ylläpitävä palava materiaali palaa tuhkaksi saakka. Biohiiltä muodostuu alemmissa osissa astiaa. (Maaseudun sivistysliitto, 2021)

Suljetuissa panostoimisissa ratkaisuissa pyrolyysilämpö saadaan hyödynnettyä. Esimerkiksi suomalaisvalmisteisessa, siirrettävässä Amacee 800 -retortissa pyrolyysin tuottamalla lämpöenergialla saadaan ylläpidettyä pyrolyysireaktiota johtamalla kuumat synteetikaasut ylläpitämään pyrolyysireaktiota. Amacee 800 -pyrolyysilaitteisto on esitetty kuvassa 4. (SoilCare Oy, n.d.-a).

Kuva 4. Panostoiminen Amacee 800 -pyrolyysuuni (SoilCare Oy, n.d.-b).



Markkinoilla on myös siirrettäviä pyrolyysiretortteja, joihin on integroitu lämmityskattila. Esimerkki tällaisesta pyrolyysilaitteistosta on kuvan 5 suomalaisvalmisteinen, siirrettävään konttiin sijoitettu Amacee 1700 (SoilCare Oy, n.d.-a). Laitteisto sisältää pyrolyysiretortin sekä lämmityskattilan. Laitteisto hyödyntää kondensoitumattomia pyrolyysikaasuja pyrolyysin ylläpitämiseen. Laitteistoon liitetyn lämmityskattilan kautta ylimääräistä pyrolyysilämpöä voidaan tarvittaessa siirtää olemassa olevaan vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään ja tuottaa näin lämmitysenergiaa lämpöverkkoon. Amacee 1700 -

pyrolyysiretortti nesteyttää kondensoituvat pyrolyysikaasut ja ottaa bioöljyn talteen. (Tuomo Leppänen, Mayt Oy, henkilökohtainen kohtainen tiedonanto 15.11.2022; SoilCare Oy n.d.-a)

Kuva 5. Panostoiminen, siirrettävä Amacee 1700 -pyrolyysilaitteisto. Pyrolyysiyksiköllä tuotetaan biohiilen lisäksi lämpöenergiaksi poltettavaa synteetikaasuja sekä bioöljyä (SoilCare Oy, n.d.-b).



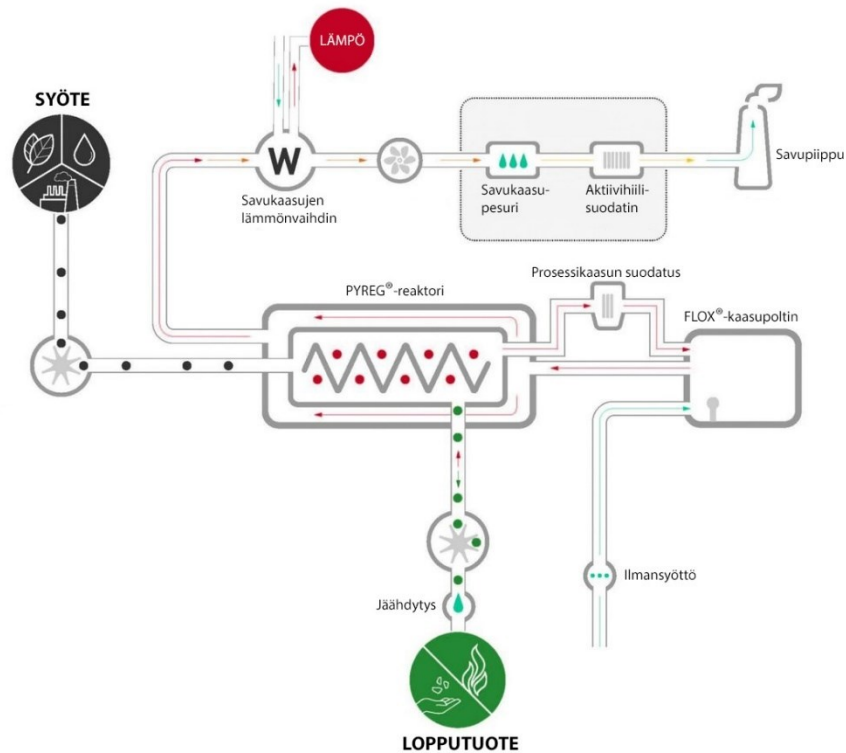
### 2.5.3 Jatkuvatoimiset ruuvipohjaiset pyrolyysilaitteistot

Ruuvipohjaiset pyrolyysilaitteistot ovat rakenteeltaan suhteellisen yksinkertaisia. Niiden toiminta perustuu pyrolyysireaktorin sisällä olevaan kuljetinruuviin, joka pyöriessään liikuttaa pyrolysoituvaa biomassaa eteenpäin reaktorissa. Kuljetinruuvia ympäröi erillinen säiliö, jossa pyrolyysikaasusta tuotetulla lämmöllä lämmitetään pyrolyysitilaa. Tällaisten ruuvipohjaisten laitteistojen etuja ovat syötteen tehokas sekoittuminen ja lämmönsiirto pyrolyysitilassa, jotka ovat edellytyksiä onnistuneelle pyrolyysille. (Campunanzo ym., 2019, s. 372; Campunanzo ym., 2019, ss. 375–376).

Ruuvipohjaisia kaupallisia pyrolyysilaitteistoja valmistavat Euroopassa esimerkiksi saksalaiset Pyreg GmbH ja BioMacon GmbH (jatkossa Pyreg ja BioMacon). Pyregin valmistamien laitteistojen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6. Nämä kaupalliset laitteistot polttavat

pyrolyysikaasut lämpöenergiaksi. Lämpö, joka ei kulu pyrolyysiprosessin ylläpitämiseen voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusten lämmittämiseen tai kaukolämmön tuotantoon. Pyregin pienin laitteisto Pyreg PX500 on lämpöteholtaan 200 kW. (Pyreg GmbH, n.d.-a)

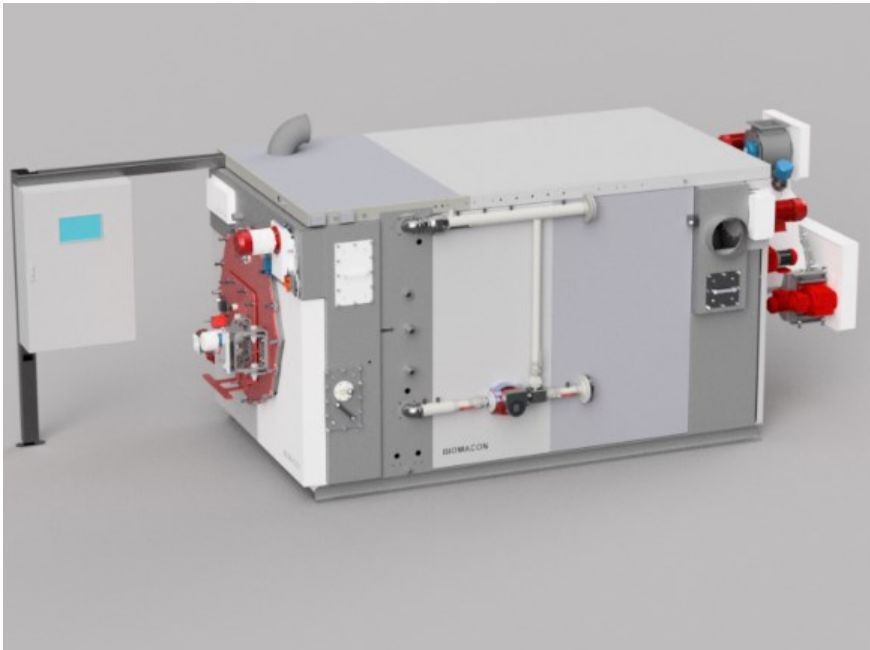
Kuva 6. Pyregin jatkuvatoimisen pyrolyysilaitteiston toimintaperiaate (muokattu Standard Biocarbon Corporation, n.d.).



BioMacon tarjoaa pyrolyysilaitteistoja maatilamittakaavan kokoluokassa. Maatilakäyttöön suunniteltuun Farm Edition -mallistoon kuuluvat pyrolyysilaitteistot ovat nimelliseltä lämpöteholtaan 40–160 kW. Mallikuva BioMacon Farm Edition -pyrolyysilaitteistosta on esitetty kuvassa 7. (BioMacon GmbH, 2020a).



Kuva 7. Havainnekuva BioMaconin Farm Edition -malliston pyrolyysilaitteistosta (BioMacon GmbH 2020b).



BioMaconin laite-esitteen mukaan suurimmalla Farm Edition -malliston pyrolyysilaitteistolla (160 kW) voidaan tuottaa vuodessa 146 t biohiiltä (BioMacon GmbH, n.d.-a). Pyreg PX500 -pyrolyysiyksiköllä biohiiltä voidaan tuottaa jopa 300 t (Pyreg GmbH n.d.-a). Edellä mainittujen esitteiden mukaan BioMaconin laitteisto käsittelee maksimissaan 760 t biomassaa vuodessa ja Pyregin 1100 t. Molemmat valmistajat ilmoittavat laite-esitteissä maksimikäyttötunneiksi 8000 h vuodessa. BioMaconin 160 kW laitteisto tuottaa yhdestä biomassakilosta lämpöenergiaa lähes 1,7 kWh. Pyregin PX500 laitteistolla vastaava luku on lähes 1,5 kWh. Edellä kuvattu Pyregin ja BioMaconin laitteistojen vertailu on esitetty taulukossa 1. Taulukossa 1 esitettyjen lukujen perusteella voidaan laskea, että sama hakemäärä tuottaa pyrolyysilla noin 60 % hakkeen puhtaalla energiapoltoilla tuotetusta energiamäärästä. Lukuun on päädytty käyttäen Alakankaan (2000, s. 152) taulukoimista hakkeen tilavuuspainosta  $0,3 \text{ t} / \text{i-m}^3$  ja energiasisällöstä  $0,8 \text{ MWh} / \text{i-m}^3$  laskettua hakkeen energiasisältöä  $2,7 \text{ kWh} / \text{kg}$ . Hakekattilassa tapahtuvaa lämpöhäviötä ei ole huomioitu, joten luku on melko likimääräinen.

Taulukko 1. Pyregin ja BioMaconin ruuvipohjaisten pyrolyysilaitteistojen vertailua. Esitetyt luvut ovat laite-esitteistä (BioMacon n.d-a; Pyreg GmbH n.d-a).

<b>Laite</b>	<b>Tehollinen lämmön-tuotto</b>	<b>Käyttötunnit vuodessa</b>	<b>Syötteen kuiva-ainepitoisuus</b>	<b>Syötteen määrä</b>	<b>Tuotetun biohiilen määrä</b>	<b>Energian-tuotto biomassakiloa kohden</b>
<b>Pyreg PX500</b>	200 kW	8 000 h	vähintään 65 %	1 100 t	300 t	1,5 kWh/kg
<b>BioMacon 160 kW</b>	160 kW	8 000 h	vähintään 70 %	760 t	160 t	1,7 kWh/kg

BioMaconin maatilamittakaavan laitteistot edellyttävät syötteen kuiva-ainepitoisuudeksi yli 70 % (BioMacon GmbH, n.d.-b). Pyregillä vastaava luku on yli 65 % (Pyreg GmbH n.d.-b). Pyregin laitteistoon soveltuvat partikkelikooltaan alle 30 mm syötteen, ja BioMaconiin hieman suuremmat, palakooltaan alle 70 mm syötteen. Sekä Pyregin että BioMaconin laitteistoilla voidaan valmistaa EBC-sertifikaatin vaatimukset täyttävää, kaupalliseen käyttöön tarkoitettua biohiiltä. (BioMacon GmbH, n.d.-b; Pyreg GmbH n.d.-b)

Pyreg luettelee omiin pyrolyysilaitteistoihinsa soveltuviksi syötteiksi mm. mädätysjäännöksen, lannan, viljajätteet, säilörehujätteen, teurastamojätteen, heinän, oljen, puuhakkeen ja puutarhajätteen (Pyreg GmbH n.d.-b.). BioMaconin vastaava luettelo on hieman suppeampi. Luettelosta löytyy monia erilaisia puumateriaaleja sekä olki ja olkea vastaavat orgaaniset syötteen. Mädätysjäännöksen ja jätevesilietteen käyttäminen BioMaconin pyrolyysilaitteiston syötteenä edellyttää BioMaconin verkkosivuilta löytyvän syötemateriaaliohjeistuksen mukaan lisätoimenpiteitä. (BioMacon GmbH, n.d.-b)

## 2.6 Biohiilen koostumus ja ominaisuudet

Biohiilen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet tekevät siitä monikäyttöisen materiaalin. Biohiili on huokoista ja biohiilen huokokset pidättävät itseensä vettä sekä samalla veteen liuenneita ravinteita. Biohiilen huokoinen rakenne korreloi biohiilen suuren huokospinta-alan kanssa. (Tan ym., 2015, s. 71; Wilson 2014) Biohiilen ominaispinta-ala on tyypillisesti 10–100 m<sup>2</sup>/g (Siipola ym. 2019, s. 9). Siipola ym. (2019, s. 11) toteavat biohiilen ominaispinta-alan harvoin ylittävän 350 m<sup>2</sup>/g.

Biohiili on kemialliselta koostumukseltaan suureksi osaksi hiiltä. Biohiili sisältää jonkin verran myös happea ja vetyä, vaikkakin pääosa näistä alkuaineista kaasuuntuu pyrolyysissa. Lisäksi biohiileen jää tuhkana raaka-aineesta peräisin olevia muita alkuaineita, kuten ravinteita ja raskasmetalleja, jotka eivät kaasuunnu pyrolyysissa. (Wilson, 2014) Puupohjaisen biohiilen hiilipitoisuus on tyypillisesti jopa 70-90 % ja olkipohjaisen vastaavasti noin 40-50 %. (EBC, 2022, s. 21). Olkipohjainen biohiili sisältää puupohjaista biohiiltä enemmän tuhkaa, jolloin sen hiilipitoisuus jää alhaisemmaksi (Ippolito ym., 2020, s. 424). Pyrolyysissa orgaanisesta aineksesta voi muodostua myös haitallisia polyaromaattisia hiilivety-yhdisteitä eli PAH-yhdisteitä (Riikonen, 2019, s. 13–14).

Eurooppalainen biohiilisertifikaatti EBC asettaa enimmäisrajat biohiilen sisältämien haitallisten PAH-yhdisteiden ja raskasmetallien (lyijy, kadmium, kupari, nikkeli, elohopea, sinkki, kromi ja arseeni) pitoisuuksille (EBC, 2022, s. 6). Pienempinä pitoisuuksina monet edellä mainituista raskasmetalleista, kuten kupari ja sinkki, ovat kasveille välttämättömiä hivenravinteita (Yara Suomi, n.d.).

Pyrolyysissa biomassan orgaaniset hiilivetyketjut hajoavat, ja kiinteään olomuotoon jäävät hiiliatomit järjestäytyvät rengasmaisiksi eli aromaattisiksi hiilimolekyyleiksi, jotka ovat erittäin pysyviä. Näiden aromaattisten molekyylien välisten konjugaatiosidosten takia biohiilen huokospinnoilla on elektronivarauksia, jotka sitovat hiilen pintaosiin erilaisia funktionaalisia ryhmiä kuten esimerkiksi veteen liuenneita ravinteita. (Wilson 2014; ks. myös Tan ym., 2015, s. 71)

Edellä kuvailut biohiilen fysikaaliskemialliset ominaisuudet sekä kemiallinen koostumus vaihtelevat syötteen laadusta, pyrolyysilämpötilasta ja pyrolyysin nopeudestakin riippuen. Noin 5400 vertaisarvioitua tutkimusartikkelia koostavassa katsauksessaan Ippolito ym. (2020, s. 421) toteavat, että näiden tekijöiden vaikutuksia biohiilen laatuun ei vielä tunneta riittävän hyvin. Vaikutusten parempi tunteminen hyödyttäisi biohiiltä valmistavia tahoja optimoimaan tiettyyn tarkoitukseen käytettävän biohiilen valmistusprosessia ja syötemateriaaleja. (Ippolito ym., 2020, s. 421)

Ippolito ym. (2020, ss. 424–425) toteavat koosteessaan esimerkiksi, että suuren ominaispinta-alan omaavalla biohiilellä on paremmat edellytykset parantaa maaperän ilmavuutta, läpäisevyyttä ja kokonaisrakennetta. Biohiilen fysikaalis-kemiallisista ominaisuuksista ominaispinta-alan havaittiin kasvavan pyrolyysilämpötilan kasvaessa. Myös syötemateriaali vaikuttaa biohiilen ominaispinta-alaan. Ippolito ym. jakoi koosteessaan pyrolyysisyötteitä puupohjaisiin, kasvipohjaisiin, ruohopohjaisiin sekä lanta- ja lietepohjaisiin syötteisiin. Puupohjaisista syötteistä valmistetulla biohiilellä havaittiin olevan suurin ominaispinta-ala eli korkein huokoisuus. (Ippolito ym. 2020, ss. 421–423)

Biohiilen kemialliseen koostumukseen vaikuttaa enimmäkseen pyrolyysisyötteen kemiallinen koostumus. Syötteiden ravinnepitoisuudet korreloivat biohiilen ravinnepitoisuuksien kanssa. Esimerkiksi lanta- ja lietepohjaisissa biohiilissä typpi-, rikki-, fosfori-, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet ovat korkeita muista syötemateriaaleista valmistettuun biohiileen verrattuna (Ippolito, 2020, s. 425).

Rasa (2021, s. 6) toteaa, että lantaa ja jätevesilietettä pyrolysoimalla voidaan tuottaa lannoitevalmisteeiksi soveltuvaa biohiiltä. Eläinten lantojen osalta pyrolysointia on toistaiseksi tehty lähinnä laboratoriomittakaavassa, mutta jätevesilietteiden osalta esimerkiksi Helsingin seudun ympäristöpalveluilla (HSY) on käytössään teollisen mittakaavan pilot-laitteisto osana jätevesilietteiden käsittelyä (2021, s. 6). Jätevesilietteen käsittelytekniikoista pyrolyysilla voidaan päästä mm. orgaanisten haitta-aineiden, lääkeaineiden ja mikromuovien suhteen parhaaseen tulokseen (Pöyry Finland Oy, 2019, s. 46).

## 2.7 Biohiilen käyttökohteet

Biomassasta pyrolysoidulle biohiillelle on innovoitu kymmeniä käyttökohteita (Schmidt & Wilson, 2014). Biohiiltä voidaan käyttää niin maataloudessa, ympäristönsuojelussa, rakentamisessa kuin metallurgiassakin. Mahdollisia käyttökohteita maataloudessa ovat maanparannus, lannan ravinneominaisuuksien parantaminen, kompostoinnin tehostaminen, rehukäyttö ja kuivikekäyttö. Ympäristönsuojeluun liittyviä käyttökohteita ovat esimerkiksi ravinteiden huuhtoutumisen vähentäminen tai käyttö hulevesien hallinnassa ja suodatinmateriaalina. Biohiilen on todettu toimivan myös eristemateriaalina rakentamisessa, ja metalliteollisuudessa sillä voidaan korvata metallien pelkistämiseen käytettävää kivihiiltä. (Schmidt & Wilson, 2014)

Maanparannuskäytössä biohiilen avulla voidaan vaikuttaa maaperän vedenpidätyskykyyn ja maaperän rakenteeseen. Biohiilen huokoisen rakenteen ja hyvän kationinvaihtokapasiteetin johdosta biohiili sitoo huokosiinsa vettä ja veteen liuenneita ravinteita, sekä absorboi huokospinnoilleen ravinteita. Alkalinen biohiili nostaa maaperän pH-arvoa, jolloin monien ravinteiden liukoisuus kasvaa (Fidel ym., 2017, ss. 367–368; Schmidt & Wilson, 2014). Nämä ominaisuudet tekevät siitä hyvän maanparannusaineen. Karkearakeisessa maaperässä biohiili pidättää vettä paremmin kuin ympäröivä maalaji, ja kuivina kausina kasvit hyötyvät tästä maaperään pidemmäksi aikaa jäävästä kosteudesta. Oleellista on, että biohiilen tiedetään erityisesti karkearakeisessa maaperässä lisäävän huokoskokoa, josta kasvien juuret pystyvät ottamaan vettä (Riikonen, 2019, s. 26; Kammann & Graber, 2015 ss. 396–397). Hienojakoisilla savimailla biohiililisäyksellä voidaan pyrkiä lisäämään maaperään sellaista huokoskokoa, josta kasvien juuret pystyvät ottamaan vettä, ja parantaa kuivuuden kestoa tätä kautta. (Schmidt & Wilson, 2014; Rasa ym., 2018, s. 351–352)

Korkean huokoisuuden, ominaispinta-alan sekä huokospintojen funktionaalisten ryhmien avulla biohiili sitoo huokosiinsa ja huokospinnoilleen maaperästä veteen liukenevia ravinteita ja toisaalta myös saattaa lisätä joidenkin ravinteiden liukoisuutta (Laird & Rogovska, 2015; ss. 535–536). Biohiilellä on useissa tutkimuksissa todettu olevan ravinnevalumia vähentävä vaikutus (Elo ym., 2021, s. 31; Rubin ym., 2020, s. 1981; Borchard ym., 2019, s. 2354). Koska biohiili sitoo ravinteita, saattaa maaperään lisätty biohiili lyhyellä

aikavälillä vaikuttaa negatiivisesti kasvien ravinteiden saantiin ja heikentää kasvua (Schmidt & Wilson, 2014).

Kompostiin sekoitettaessa biohiili sekä tehostaa kompostoitumista, että absorboi ravinteita kompostista. Biohiilessä itsessään ei yleensä ole riittävästi ravinteita lannoitekäyttöön, joten biohiilen lataaminen kompostissa tai muussa ravinnerikkaassa materiaalissa mahdollistaisi biohiilen käytön lannoitevalmisteena. (Schmidt & Wilson, 2014)

Schmidt ym. (2019) on koostanut tutkimuksia biohiilen mahdollisista hyödyistä kotieläintiloilla. Tutkimustiedon valossa näyttää siltä, että biohiilen käyttö rehun lisäaineena voi parantaa kotieläinterveyttä ja tehostaa eläinten rehun käyttöä. Biohiilen sekoittaminen kuivikkeeseen voi parantaa eläinsuojan ilmanlaatua. (Schmidt, 2019). Biohiiltä voidaan myös sekoittaa lietelantaan vähentämään hajuhaittoja, tai käyttää lietelannan katteena.

Lietelantaan sekoitettuna biohiili sitoo itseensä lannasta helposti haihtuvia typpiyhdisteitä. Biohiili parantaa lietelannan ravinnearvoa, ja päätyy lopulta lannoite- ja maanparannuskäyttöön (Schmidt ym., 2019; Elo, 2020). Edellä kuvatun kaltaisella biohiilen käytöllä on potentiaalia vähentää ravinnehävikkiä ja kasvihuonekaasupäästöjä sekä parantaa lannan ominaisuuksia ja tätäkin kautta maan viljavuutta. Aihepiiriin liittyvät tutkimustulokset eivät kuitenkaan kiistatta osoita näitä hyötyjä. Schmidt esittääkin, että tulevaisuudessa näitä vaikutuksia koskevissa tutkimuksissa tulisi kiinnittää huomiota käytettävän biohiilen laatuun, joka on aiemmissa tutkimuksissa jätetty vähälle huomiolle. (Schmidt ym., 2019)

Maatilasovelluksena voidaan vielä mainita, että biohiiltä on tutkittu myös anaerobisen mädätyksen lisäaineena biokaasutuotannossa. Tutkimusnäyttöä on saatu siitä, että biohiilillä tehostaisi mädätysprosessia, lisäisi metaanintuottoa ja mahdollistaisi myös vaikeampien syötteiden käytön biokaasutuksessa. Tutkimustulokset ovat kuitenkin ristiriitaisia, ja tähän tarkoitukseen soveltuvan biohiililaadun löytäminen vaatii lisää testausta. (Elo, 2017)

Biohiilen korkea ominaispinta-ala ja kyky absorboida erilaisia yhdisteitä tekevät siitä toimivan suodatinmateriaalin. Biohiiltä voidaan käyttää esimerkiksi hulevesien suodatuksessa yhtenä biosuodattimen materiaalina. Se sitoo ravinteita ja erilaisia haitta-

aineita itseensä. Biohiilen toimivuuteen suodatinmateriaalina vaikuttavat biohiilen ominaisuudet, kuten biohiilen raaka-aine, pyrolyysilämpötila, pyrolyysinopeus ja biohiilen aktivointi valmistuksen jälkeen. (Kirjokivi, 2018, s. 57)

Biohiilellä on todettu positiivisia vaikutuksia kaivannaisjätteiden peittomateriaaleissa käytettynä. Geologian tutkimuskeskuksen Biopeitto-projektissa kaivosalueen vanhan rikastushiekka-altaan alueella testattiin biohiiltä osana rikastushiekan päälle levitettävää moreenipeittoa. Kenttäkokeissa peittokerros, johon oli sekoitettu sekä puupohjaista biohiiltä että kompostoitua jätevesilietettä, pidatti eniten vettä sekä pienensi useiden metallien liukoisia pitoisuuksia peittokerroksessa. Biohiilen havaittiin myös pidättäneen kompostista liuenneita ravinteita. Kolmevuotisessa kenttäkokeessa todettiin, että kyseisessä biohiili-komposti seosta sisältäneessä peittokerroksessa ruohovartiset kasvit kasvoivat parhaiten. (Pietilä ym., 2020, s. 2; Pietilä ym., 2020, ss. 49–54)

Aktiivihiihi on erittäin tehokas vesiä ja ilmaa puhdistava suodatinmateriaali. Biohiilen suuri ominaispinta-ala sekä huokospintojen funktionaaliset ryhmät tekevät biohiilestä hieman aktiivihiihiin kaltaisen tuotteen. Aktiivihiihiin valmistamisessa keskeistä on pyrolysoimalla tuotetun hiilen fysikaalinen tai kemiallinen aktivointi, jolla pyritään kasvattamaan huokosten kokoa poistamalla hiilestä tiettyjä yhdisteitä (Hannola, 2007, s. 20). Aktiivihiihiin ominaispinta-ala on siten biohiiltä suurempi. Niemen (2018, s.5) mukaan Tan ym. (2015) esittävät, että biohiilen soveltaminen vastaavan kaltaisena suodattimena tietyissä kohteissa onkin aktiivihiihiä edullisempi vaihtoehto, sillä sen valmistaminen ei vaadi niin korkeaa lämpötilaa eikä erillistä aktivointiprosessia. Rasa (2021, s. 7) näkee biotaloustrategian mukaisena korkean lisäarvon mahdollisena tuoteinnovaationa biohiilen muokkaamisen aktiivihiiheksi.

## **2.8 Ajankohtaisia hankkeita ja yritystoimintaa biohiilen ympärillä**

Suomen biotalousstrategiassa vuosille 2022–2035 on korkeamman arvonlisän biotalous nostettu yhdeksi strategian neljästä otsikosta. Luonnonvarakeskus (Brännström ym., 2021, s. 3) on edellä mainittua biotaloustrategian päivitystyötä silmällä pitäen laatinut koosteen maa- ja metsätaloudessa sekä metsäteollisuudessa syntyvien sivuvirtojen potentiaalista

korkeamman lisäarvon tuotteiden tuottamiseen. Koosteessa yhdeksi potentiaalisiksi menetelmäksi korkeamman lisäarvon tuotteiden tuottamisessa on valittu biopohjaisten sivuvirtojen hidaspYROLYYSI. (Brännström ym. 2021 s. 2–3)

Liiketoimintaa ja projekteja biohiilen ympärille kehitellään jatkuvasti. Tässä luvussa esitellään valittuja ajankohtaisia, korkeamman arvonlisän biotaloutta tavoittelevia yrityksiä ja hankkeita, jotka tuottavat biohiiltä sivuvirroista hidaspYROLYYSIN avulla joko pilot- tai teollisessa mittakaavassa.

### **2.8.1 Carbofex Oy**

Suomalainen Carbofex Oy valmistaa EBC-sertifioitua biohiiltä Nokialla teollisessa mittakaavassa. Biohiilen raaka-aineena käytetään PEFC-sertifioitua kuusimetsän harvennuspuuta (Puro.earth, 2021a). Valmistettava biohiili on sertifioitu sekä Premium, että Feed -sertifikaateilla, jotka osoittavat sen soveltuvuuden maanparannuskäyttöön, suodatinmateriaaliksi, kompostin lisäaineeksi sekä rehun lisäaineeksi. Carbofex Oy on aloittanut biohiilen valmistuksen vuonna 2017, ja käytössä oleva laitteisto on yrityksen itse kehittämä. Carbofexin laitteistossa pyrolyysilämpötila on jopa 1000 °C. Biohiilen lisäksi yritys valmistaa ja myy biohiiliteknologiaa. (Carbofex Oy, n.d.; Palomaa, 2019)

Tampereen Hiedanrannasta Nokialle vuonna 2022 siirtynyt Carbofex Oy myi Hiedanrannan koelaitoksella tuotettua pyrolyysilämpöä Tampereen kaupungin kaukolämpöverkkoon. Hiedanrannan pyrolyysilaitoksen hukkalämmöllä pyöritettiin 1 MW lämpölaitosta. Pyrolyysiprosessin sivutuotteena muodostuva pyrolyysiöljy otettiin talteen, ja Tampereen kaupungin sähkölaitos hyödynsi myös pyrolyysiöljyn lämmöntuotannossa. (Business Tampere, 2019) Nykyisin Carbofex Oy:n Nokian laitoksella muodostuvaa pyrolyysilämpöä toimitetaan kaukolämpöverkkoon Leppäkosken Energialle (Junkala, 2023).

Carbofex Oy:n biohiilituotanto on sertifioitu hiiltä ilmakehästä sitovaksi hankkeeksi hiilikompensaatiopalveluita välittävässä Puro.earth-markkinapaikassa. Carbofex Oy:n verkkosivuilla esitettyjen lukujen mukaan biohiilituotannon hiilikompensaation tuotto heille olisi hieman alle 62 € sidottua hiilidioksiditonnia kohden. Biohiilestä saatavaksi



myyntituotoksi saadaan em. verkkosivuilla ilmoitetuista luvuista noin 2000 €/t, ja lämpöenergian arvoksi noin 0,12 €/kWh. (Carbofex Oy, n.d.)

### **2.8.2 Hjelmsäterin kartanotila, Ruotsi**

Vänern-järven etelärannalla Ruotsin Länsi-Götanmaalla sijaitseva Hjelmsäterin kartanotila on valmistanut jatkuvatoimisella pyrolyysilaitteistolla biohiiltä vuodesta 2018 lähtien (Nordic Biochar, 2018). Hjelmsäterin tilalla itse tuotettua biohiiltä on käytetty tilan omilla pelloilla maanparannusaineena. Maaliskuussa 2021 julkaistussa artikkelissa Hjelmsäterin kartanotilan maatilayrittäjä Edvard Hamilton kertoo, että biohiilellä käsitellyt pellot tuottivat äärimmäisen kuivana vuonna 2018 normaalin sadon, kun taas ilman biohiililisäystä jääneillä pelloilla satotaso oli hyvin vaatimaton. (Jonsson, 2021)

Tilalla on käytössä BioMaconin valmistama pyrolyysikattila, joka tuottaa biohiilen lisäksi lämpöä. Pyrolyysikattila on lämmitysteholtaan 160 kW. Laitteisto käyttää raaka-aineenaan kuusihaketta 6 m<sup>3</sup> päivässä. Biohiiltä tällä raaka-ainemäärällä saadaan yksi suursäkillinen (1,5 m<sup>3</sup>) päivässä. Ylimääräisellä pyrolyysilämmöllä lämmitetään tilan rakennuksia, sekä uima-allasta. (Jonsson, 2021)

Hjelmsäterin tilan biohiilituotanto on hyväksytty Puro.earth-markkinapaikalle hiilinegatiiviseksi päästökompensaatiohankkeeksi. Hjelmsäterin tila myy kyseisen palvelun kautta hiilidioksidipäästöjä kompensoivia hiilikrediittejä. (Hjelmsätters Egendom, 2022; Puro.earth, 2021b)

### **2.8.3 Tukholman kaupungin biohiiliprojekti**

Tukholman kaupunki voitti vuonna 2014 ideakilpailun idealla puutarhajätettä käyttävästä biohiililaitoksesta. Vuonna 2017 Tukholmaan rakennettiin pyrolyysilaitos tätä tarkoitusta varten. Kaupungin asukkaiden ja työntekijöiden avulla puutarhajätettä kerätään puutarhoista sekä puistoista. Kerätty jäte pyrolysoidaan biohiileksi, ja sivutuotteena muodostuvat pyrolyysikaasut hyödynnetään lämpöenergiana kaupungin kaukolämpöverkossa. Tukholman kaupunki käyttää tuotettua biohiiltä kaupungin puistojen

ja muiden julkisten tilojen istutuksissa. Biohiilen käyttäminen viheralueiden rakentamisessa sitoo hiiltä ilmakehästä pitkäaikaisesti. Biohiilipohjaisten kasvualustojen katsotaan myös helpottavan kasvien juurten kasvua ja veden saantia, ja hyödyttävän näin istutuksia. Katualueille istutettavien puiden ympäristössä biohiilipohjaiset kasvualustat suodattavat katualueille kertyvää sadevettä, ja auttavat hulevesien hallinnassa. Kaupungin biohiiliprojekti on merkittävässä roolissa Tukholman tavoitellessa hiilinegatiivisen kaupungin statusta vuoteen 2030 mennessä. (Nordregio, 2018)

Käytössä oleva pyrolyysiyksikkö on Pyreg GmbH:n valmistama Pyreg 500. Yksikkö tuottaa 300 tonnia biohiiltä vuodessa. Pyrolyysilämpöä riittää 80 asunnon lämmittämiseen (Nordic Biochar 2018; Bloomberg Cities Network 2021).

#### **2.8.4 HSY:n lietehiilihanke**

Pääkaupunkiseudulla kunnallisia vesi- ja jätehuollon palveluita tuottava HSY (Helsingin seudun ympäristöpalvelut) on lietehiilihankeessaan testannut mädätetyn jätevesilietteen uutena käsittelymenetelmänä lietteen pyrolyysia. Mädätetyn jätevesilietteen pyrolyysia on testattu Ämmäsuon ekoteollisuuskeskukseen rakennetussa koetoimintalaitoksessa. Pyrolyysi on osa HSY:n kehittämää konseptia, jossa jätevesilietteen ravinteita ja hiiltä halutaan saada tehokkaammin kiertoon. Konseptiin kuuluu myös HSY:n kehittämällä RAVITA-tekniikalla tapahtuva ravinteiden talteenotto suoraan jätevedestä. Ravinteiden talteenoton jälkeen jäljelle jäävä liete pyrolysoidaan. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, 2021; Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, n.d.-a)

Ämmäsuon koetoimintalaitoksessa jätevesiliete kuivataan hihnakuivaimella ennen pyrolyysia. Tämän jälkeen kuivattuun lietteeseen sekoitetaan haketta, jotta pyrolyysiprosessi saadaan energiaomavaraiseksi. Seos pyrolysoidaan, ja muodostuvalla pyrolyysilämmöllä ylläpidetään pyrolyysiprosessia sekä kuivataan lietettä. Lietteen kuivauksessa haihtuu ammoniakkaa ja se otetaan talteen happopesurilla. Happopesurilla ammoniakasta tuotetaan rikkihapon avulla ammoniumsulfaattia, jota on mahdollista käyttää valmiin hiilituotteen sammutukseen, jolloin siihen saadaan palautettua kuivauksessa haihtunut typpi. Valmis

lietehiili voidaan sammuttaa myös vedellä. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut, 2021; Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, n.d.-b)

## **2.9 Biohiilen tuotteistamiseen liittyvää ohjausta**

Biohiilen tuotteistamiseen liittyy monenlaista ohjausta, johon biohiilen myyntiä suunnittelevan toimijan tulee perehtyä. Biohiilen laatu voidaan osoittaa erilaisilla sertifikaateilla. Biohiilen tuotteistamiseen liittyy keskeisesti esimerkiksi lannoite- ja rehualan lainsäädäntö.

Tässä luvussa esitellään biohiilen laatua varmistavan EBC-sertifikaatin taustaa ja tarkoitusta (EBC, European Biochar Certificate). Lisäksi tuodaan esille biohiilen tuotteistamisen ja myynnin kannalta keskeistä lainsäädäntöä.

### **2.9.1 EBC-sertifikaatti**

Biohiilen valmistusprosessien ja raaka-aineiden vaihdellessa pyrolyysilla voidaan valmistaa ominaisuuksiltaan monenlaista biohiiltä. Eurooppalaiset biohiilen valmistajat ovat kehittäneet biohiilelle EBC-sertifiointijärjestelmän, jonka avulla pyritään vähentämään biohiilen käytöstä ympäristölle ja terveydelle aiheutuvia riskejä sekä takaamaan biohiilen tuotannon kestävyys. Sertifikaatissa asetetaan laatuvaatimuksia biohiilelle sekä tuotantoprosessin ja jälleenmyynnin kestävyydelle. (EBC, 2022, s. 8; EBC, n.d.)

EBC-sertifikaatissa biohiili on määritelty huokoiseksi, hiilipitoiseksi materiaaliksi, joka on tuotettu biomassasta pyrolysoimalla, ja käytetään tavalla, joka varastoi biohiilen sisältämän hiilen pitkäaikaisesti tai korvaa fossiilista hiiltä teollisessa valmistuksessa. Biohiiltä ei valmisteta energiantuotantoa varten. (EBC, 2022, s. 10) EBC-sertifioidulla biohiilellä voidaan katsoa olevan paremmat edellytykset markkinoilla menestymiseen. Sertifikaatissa edellytetään mm. säännöllistä näytteenottoa biohiilestä, tiettyjä raaka-aineita, pyrolyysin sivutuotteiden hyödyntämistä sekä haitta-ainepitoisuuksille asetettujen raja-arvojen alittumista. EBC-sertifikaatissa on luokkia eri tarkoituksiin valmistetulle biohiilelle. Tällä

hetkellä tarjolla on sertifikaatit kuudelle biohiilen käyttötarkoitukseksi: Feed, AgroOrganic, Agro, Urban, ConsumerMaterial ja BasicMaterial. (EBC, n.d.-b)

### **2.9.2 Biohiilituotannon lainsäädäntöä**

Euroopan unionin alueella kaupallisten aineiden ja kemikaalien turvallisuutta säädelään REACH-asetuksella. Kemikaalien turvallisuus varmistetaan rekisteröimällä aine REACH-tietojärjestelmään. TUKESin verkkosivujen mukaan biohiili on rekisteröitävä REACH-asetuksen mukaisesti. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto TUKES n.d.-a; Turvallisuus- ja kemikaalivirasto TUKES n.d.-b)

TUKESin verkkosivujen mukaan biohiiltä koskevat myös CLP-asetuksen velvoitteet. CLP-asetuksella säädetään EU:n sisällä kemikaalien luokituksista, merkinnöistä ja pakkaamisesta. CLP-asetuksen mukaan aineen valmistajan on mm. luokiteltava aine vaaraominaisuuksiensa mukaan, ja varmistettava, että aine on pakattu ja merkitty säännösten mukaisesti ennen sen markkinoille saattamista. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto TUKES n.d.-c)

Mikäli biohiiltä myydään maanparannusaineeksi, on huomioitava lannoitelainsäädännön vaatimukset. Maanparannusaineet kuuluvat lannoitelainsäädännön piiriin.

Lannoitevalmisteista säädetään sekä kansallisella lainsäädännöllä (lannoitelaki 711/2022 ja MMMA 24/11), että EU:n lannoitelainsäädännöllä (EU 2019/1009). Markkinoille saatettavan lannoitevalmisteen on oltava kansallisen lainsäädännön tai EU-lainsäädännön vaatimusten mukainen (Ruokavirasto n.d.-a). Sekä kansallisessa lannoitelainsäädännössä että EU:n lainsäädännössä annetaan lannoitevalmisteiden sisältämille haitallisille aineille (raskasmetallit) suurimmat sallitut enimmäispitoisuudet (Ruokavirasto; n.d.-c).

Kotimaiseen myyntiin tarkoitettuja lannoitevalmisteita voidaan saattaa myyntiin kansallisen lainsäädännön mukaisesti. CE-merkittyjä lannoitteita valmistettaessa on noudatettava EU:n lannoitevalmisteasetusta. (Ruokavirasto n.d.-b; Maa- ja metsätalousministeriö; n.d.)

Lannoitelainsäädäntö asettaa rajoituksia maanparannuskäyttöön valmistettavan biohiilen raaka-aineelle. Kansallisen lannoitelainsäädännön mukaan lannoitevalmisteen raaka-aineena

voidaan käyttää sekä kasviperäisiä raaka-aineita että hyväksytyllä tavalla prosessoitua lantaa (Elintarviketurvallisuusvirasto EVIRA, 2019; Ruokavirasto, n.d.-d). EU:n uudessa lannoitevalmisteasetuksessa (2019/1009) on hyväksytty kasviperäisen biohiilen käyttö lannoitevalmisteena. Komission arvio lannoitevalmisteissa käytettävien eläinperäisten sivutuotteiden (esim. lanta) käsittelyvaatimuksista ei ole valmistunut, joten eläinperäisistä biomassoista valmistetun biohiilen käyttömahdollisuuksista CE-merkityissä lannoitevalmisteissa ei ole varmuutta. (Ruokavirasto n.d.-e) Lannasta valmistettuja tuotteita koskee joka tapauksessa EU:n sivutuotelainsäädäntö. Euroopan unionin sivutuoteasetuksen (EY) N:o 1069/2009 ja tätä asetusta koskevan täytäntöönpanoasetuksen EU N:o 142/2011 mukaan tuotteistettavaa lantaa on lämpökäsiteltävä vähintään 70 °C:ssa vähintään 60 minuutin ajan (Euroopan komission asetus (EU) N:o 142/2011, Liite XI, 2. jakso). Asetuksen EU N:o 142/2011 mukaan toimivaltainen viranomais voi sallia lannalle myös muiden käsittelyparametrien käyttämisen, jos biologisten riskien minimointi pystytään takaamaan.

EU:n rehulainsäädännössä biohiili on hyväksytty rehun lisäaineeksi. Rehukäyttöön tarkoitetulle biohiilelle on asetettu maanparannuskäyttöön tarkoitetusta biohiilestä poikkeavia laatuvaatimuksia haitta-aineiden, kuten esimerkiksi PAH-yhdisteiden suhteen. Nämä vaatimukset on huomioitu biohiilen rehukäyttöön tarkoitetussa EBC Feed -sertifikaatissa (EBC, 2022, s. 35).

### **3 Kehittämistyön tarkoitus ja tavoite**

Tämän työn tavoitteena oli kehittää tiloille uusia ansaintamahdollisuuksia biohiilituotannon kautta. Opinnäytetyön tietoperustaan koottiin perustietoa biohiilestä biohiilituotantoa suunnittelevalle maatilayrittäjälle, jolla ei välttämättä ole aiempaa tietämystä biohiilestä.

Maatilakäyttöön soveltuvia pyrolyysilaitteistoja on viime vuosina tullut markkinoille. Biohiilen raaka-aineena voidaan käyttää biopohjaisia sivuvirtoja. Sekä valmistettavan biohiilen että sivutuotteena muodostuvan synteetikaasun energiakäyttö tai myynti voivat olla uusi tapa lisätä maatalan kannattavuutta. Biohiilituotanto mahdollistaa maatilalle ansainnan myös vapaaehtoisen hiilikompensaation markkinoilla. Maatilamittakaavan biohiilituotannon kannattavuuden tarkastelu olikin yksi kehittämistyön päätavoitteista.

Opinnäytetyöhön koottua tietoa biohiilen mahdollisuuksista on välitetty tietoa Kanta- ja Päijät-Hämeessä sijaitseville maataloille ja muille KieMaRa-hankkeen sidosryhmille sekä Lapinjärven kunnan alueella toimivalle Lyckan-hankkeelle. Maatilamittakaavan biohiilituotannon ympärille rakennettiin yhteistyössä esimerkkitulojen kanssa tilakohtaisia kiertotalouskonsepteja. Näille konsepteille laadittiin alustavat teknis-taloudelliset tarkastelut, joiden avulla biohiilituotannon ansaintamahdollisuuksia ja biohiilen arvoketjua maataloilla saatiin havainnollistettua.

Biohiilituotannosta maatilamittakaavassa ei ole aiemmin tehty vastaavaa kannattavuusselvitystä. Kehittämistyön konkreettisia tuotoksia, eli kannattavuuslaskentaa sekä koulutusmateriaalia voivat hyödyntää viljelijät, neuvontaorganisaatiot sekä koulutusorganisaatiot. Kehittämistyötä on tehty yhteistyössä hankkeissa mukana olevien viljelijöiden sekä muiden sidosryhmien kanssa.

## **4 Biohiilikonseptin suunnittelu ja kannattavuuslaskenta**

Maatilan biohiilituotannon ympärille rakentuvien kiertotalouskonseptien suunnittelussa lähtökohdaksi tunnistettiin lisäarvon tuottaminen maatalojen biopohjaisille sivuvirroille hidaspölylyysin avulla. Tavoitteena oli valita maatalojen käyttöön soveltuva pyrolyysilaitteisto sekä laitteistoon soveltuvat, maataloilla muodostuvat biopohjaiset sivuvirrat pyrolyysisyötteenä.

Suunnitteluvaiheessa KieMaRa-hanke järjesti maataloille suunnatun yhteiskehittämisen työpajan, jossa esiteltiin biohiilen valmistus- ja käyttömahdollisuuksia maataloilla. Työpajan jälkeen kiinnostuneille maataloille suunniteltiin tilakohtaiset maatilan biohiilituotannon konseptit, ja laadittiin näille alustavat tilakohtaiset kannattavuuslaskelmat.

### **4.1 Biohiilituotannon suunnittelu**

Kehittämistyön suunnitteluvaiheessa tarkasteltiin maataloilla muodostuvien sivuvirtojen soveltuvuutta pyrolyysisyötteenä. Lisäksi vertailtiin pienen mittakaavan biohiilituotantoon

soveltuvia pyrolyysilaitteistoja. Tarkastelussa hyödynnettiin KieMaRa-hankkeen haastattelutuloksia.

Sopivan laitteen ja syötteiden valinnan jälkeen hahmoteltiin maatilalla tapahtuvan biohiilituotannon ympärille biomassan arvoketjuja sekä näihin perustuvia biohiilen tuotantokonsepteja. Kannattavuuslaskentaa varten laadittiin Excel-pohjainen laskuri.

#### **4.1.1 Pyrolyysilaitteiston valinta**

Maatilamittakaavan biohiilituotannon teknis-taloudellista tarkastelua varten valittiin maatilojen käyttöön soveltuva pyrolyysilaitteisto. Vertailua tehtiin tietoperustaosion luvuissa 2.5.2 ja 2.5.3 esiteltujen, pienemmän mittakaavan pyrolyysilaitteistojen välillä.

Pyrolyysilaitteistolta toivottiin seuraavia ominaisuuksia:

- Pyrolyysilaitteiston ei tulisi lisätä päivittäistä työmäärää kohtuuttomasti
- Mahdollisuus pyrolyysilämmön hyödyntämiseen ja maatiloille sopiva lämpöteho
- Mahdollisuus tuottaa EBC-sertifikaatin vaatimukset täyttävää biohiiltä

Lämpöenergian hyödyntämismahdollisuudet panostoimisilla laitteistoilla ovat jatkuvatoimisia laitteistoja rajallisempia. Jokaisella panostuksella koko ladattu biomassa pyrolysoituu, ja kaikki pyrolyysissa muodostuva lämpö tulee hyödyntää tai varastoida. Panostoimiset Amaceen laitteistot pystyvät kondensoimaan pyrolyysinesteet synteesikaasusta. Pyrolyysinesteen erottaminen kaasusta pienentää energiaksi poltettavan kaasun määrää. Bioöljyn ja tisleiden talteenotto pienentää tätä kautta panostoimisen pyrolyysiyksikön hiilipäästöjä. Tiselleille ei lainsäädännöllisistä syistä johtuen ole toistaiseksi kuitenkaan markkinoita, joten niiden talteenotolle ei ole taloudellisia perusteita. Panostoimisten laitteistojen kohdalla biomassapanoksen lataus ja valmiin biohiilen purku vievät aikaa verrattuna kaupallisten jatkuvatoimisten laitteistojen automaattisiin syöttö- ja purkuruuveihin sekä säkitykseen. Näistä syistä laitteistovalinta tehtiin jatkuvatoimisten BioMaconin sekä Pyregin laitteiden välillä.

Molempien valmistajien laitteilla on mahdollista tuottaa EBC-sertifikaatin vaatimukset täyttävää biohiiltä. BioMaconin Farm Edition -malliston pyrolyysilaitteistoista löytyy teholliselta lämmöntuotannoltaan maatilan lämmöntarvetta vastaavia laitteita (40 kW, 63 kW, 100 kW ja 160 kW). Esimerkiksi Msika (2020, s. 10) on todennut, että BioMaconin pyrolyysiyksiköt ovat maatilamittakaavan sovellusten kannalta markkinoilla olevista laitteista tarkoituksenmukaisimpia. Pyregin pienimmän mallin tehollinen lämmöntuotanto on 200 kW, joten lämmöntuotantokapasiteetti on maatilakokoluokkaa ajateltuna melko suuri. EBC-sertifikaatti edellyttää, että suuri osa biohiilen tuotannossa muodostuvasta pyrolyysilämmöstä hyödynnetään (EBC, 2022, s. 32). Tuotettua lämpöenergiaa kannattaa taloudellisista ja ympäristöllisistä syistäkin hyödyntää, joten tarkasteluun valittiin maatilan lämmöntarpeita vastaavat laitteistot. Näillä perusteilla tässä työssä tehtyihin teknis-taloudellisiin tarkasteluihin valittiin BioMaconin Farm Edition -mallisto, josta löytyi esimerkkitulojen lämmöntarpeita vastaavat laitteistot.

#### **4.1.2 Pyrolyysisyötteiden valinta**

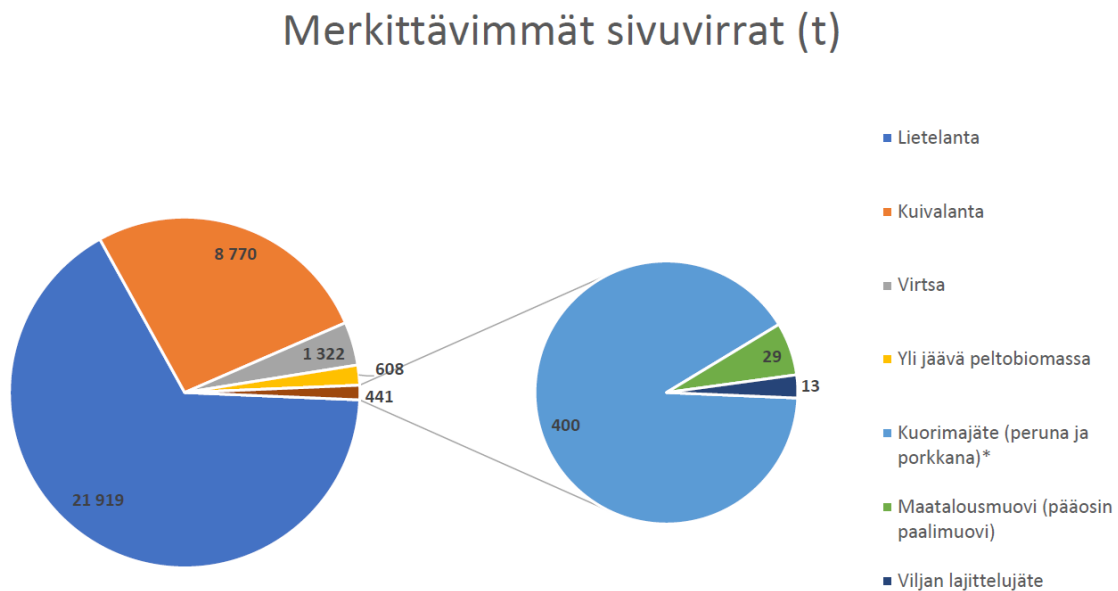
KieMaRa-hankkeessa oli mukana 13 kanta- ja pääjähämäläistä maatilaa. Tiloilla muodostuvia sivu- ja jätevirtoja kartoitettiin tilahaastatteluiden avulla. Haastattelut toteutettiin mautiloilla ja tarvittaessa haastattelua jatkettiin etähaastatteluna Teams-sovelluksen kautta. Haastatteluiden suunnittelu tai toteutus eivät kuuluneet opinnäytetyöhön, mutta haastattelutuloksia hyödynnettiin biohiilikonseptin kehittämisessä. Haastattelut toteutettiin kesällä ja syksyllä 2022. Muodostuvien sivu- ja jätevirtatietojen lisäksi haastatteluilla kartoitettiin mm. tilojen tuotantosuuntaa, tilakokoa, energiankulutusta, energianlähteitä sekä tilojen näkemyksiä kiertotalousliiketoiminnan mahdollisuuksista tilalla.

Tiloilla muodostuvat suurimmat sivuvirrat sekä niiden yhteenlasketut määrät on esitetty kuvassa 8. Kokonaisuudessaan merkittävin sivuvirta oli lanta. Lietelantaa muodostuu enemmän kuin kuivalantaa. Pyrolyysisyötteenä käytettävä lanta vaatii kuivauksen ennen pyrolyysia. Lannan kuivauksessa ja pyrolyysissa lannasta vapautuu ravinteita, ja ravinteiden talteenotto vaatii lisäkäsittelyä. BioMaconilta saatujen tietojen mukaan heidän laitteistonsa edellyttää lannan pelletöintiä ennen pyrolyysia, koska lannassa tuhkaa muodostavien



epäorgaanisten aineiden pitoisuus on korkea (Thomas Hoffmann, BioMacon GmbH, henkilökohtainen tiedonanto 10.1.2023).

Kuva 8. KieMaRa-hankkeessa mukana olevilla maatiloilla muodostuvat määrällisesti merkittävimmät sivu- ja jätevirrat.



HSY:n lietehiiliprojektissa mädätettyä lietettä on kuivattu nauhakuivaimella ennen pyrolyysia (Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, 2021). Myös GRK Suomi Oy on suunnittelemassa suuremman mittakaavan pyrolyysilaitoksia, joissa on erillinen syötteen esikuivausprosessi (henkilökohtainen tiedonanto, Riina Rantsi GRK Suomi Oy 26.1.2023). Tilatasolla syötteen kuivaus vaatisi investointia erilliseen kuivauslaitteistoon, eikä sitä lähdetty KieMaRa-hankkeen tai tämän opinnäytetyön puitteissa tarkastelemaan.

Muita määrällisesti merkittäviä sivuvirtoja olivat virtsa, ylimääräinen peltobiomassa (ylijäämänurmi, suojavyöhykkeiden ja luonnonhoitopeltojen korsintunut biomassa), viljan lajittelujäte sekä vihannestiloilla kuorimajäte ja ei-elintarvikelaatuinen vihannes. Pelloilta kerättävästä oljesta ja muusta ylijäävästä peltobiomassasta olisi mahdollista valmistaa biohiiltä. Kotieläintiloilla olki kerättiin ja käytettiin kuivikkeena. BioMaconilta saatujen

tietojen mukaan heidän laitteistonsa edellyttää oljen pelletöintiä korkeiden hiukkaspäästöjen välttämiseksi. Laittevalmistajalta saadun tiedon mukaan olkea on kuitenkin mahdollista sekoittaa esimerkiksi puupohjaisiin syötteisiin. Lisäksi tilahaastatteluissa mainittiin muutamia pyrolyysisyötteenä soveltuvia sivuvirtoja, joita muodostui tiloilla epäsäännöllisesti, eikä niiden määrästä osattu antaa arvioita. Näitä olivat jätepuu sekä kotieläintilojen pilaantunut rehu.

Kahdeksalla haastatellulla tilalla tuotettiin tilan tarvitsema lämpöenergia polttohakkeella omassa biopolttolaitteistossa. Tässä havaittiin yhtymäkohta tiedonkeruuvaiheessa benchmarkattuihin Carbofex Oy:n pyrolyysilaitokseen sekä Hjelmsäterin tilaan, jotka ovat yhdistäneet biohiilen, lämmön sekä myytävien hiilikrediittien tuotannon omassa toiminnassaan. Nämä toimijat käyttävät pyrolyysisyötteenä puunjalostukseen kelpaamattomista metsäperäisistä sivuvirroista valmistettua haketta.

Edellä esitetyn perusteella kannattavuustarkastelussa tarkasteltavaksi pyrolyysisyötteenä valittiin maatiloilla energiantuotantoon käytettävä, energiapuusta valmistettu polttohake. Valittuun pyrolyysisyötteenä voidaan sekoittaa muuta maatilalla muodostuvaa sivuvirtaa. Puupohjaiseen syötteenä sekoitettavia syötteitä voisivat olla esimerkiksi olki, viljan esipuhdistusjäte tai pilaantunut rehu. EBC-sertifikaatin mukaan EBC-sertifioitun biohiilen raaka-aineen koostumus voi vaihdella 20 % (EBC, 2022, s.4).

## **4.2 Maatilaympäristön biohiilikonsepti**

KieMaRa-hankkeen yhteiskehittämisen työpajassa 24.1.2023 pidin hankkeen kohderyhmille suunnatun tietoisuuden maatilamittakaavan biohiilituotannon mahdollisuuksista. Tietoisuuden tiivistettiin opinnäytetyön tietoperustaosiin kerätty tieto biohiilen käyttömahdollisuuksista, markkinoista, päästökaupasta, ajankohtaista tietoa markkinoilla olevista pienemmän mittakaavan pyrolyysilaitteistoista sekä näihin soveltuvista pyrolyysisyötteenä. Esitys tallennettiin, ja tallenne on katsottavissa Kultura-palvelussa 31.12.2023 saakka ([Linkki tallenteeseen](#)). Esitysdiaat ovat opinnäytetyön liitteenä 1.

Työpajassa työstettiin maatalojen sivuvirtojen mahdollisia uusia, kiertotalouden mukaisia hyödyntämiskäytöksiä sekä näiden pohjalta rakentuvia mahdollisia konsepteja.

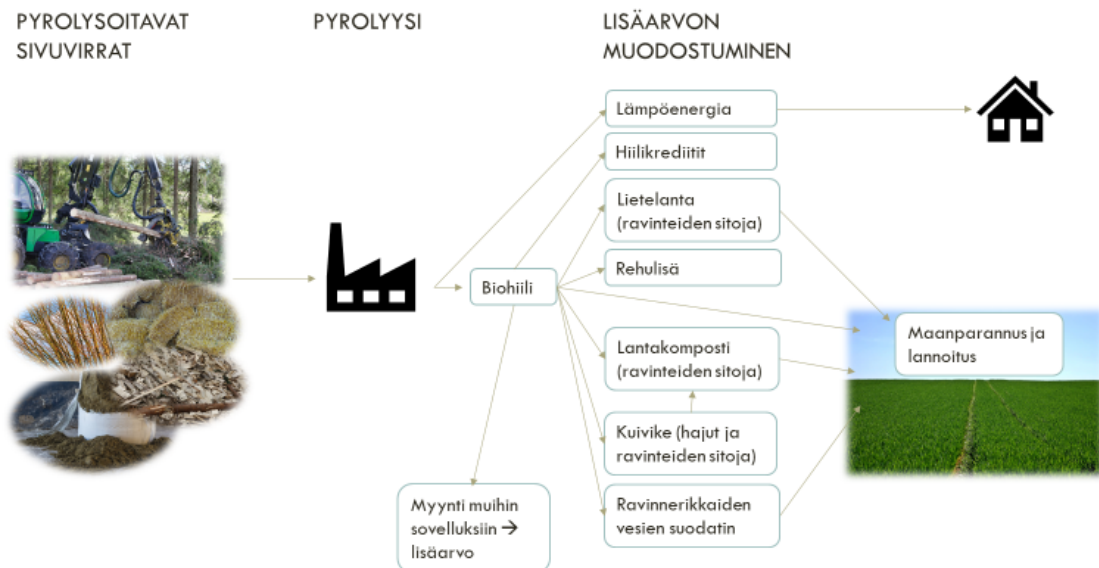
Maatilamittakaavan biohiilituotannon konseptia työstettiin yhdessä työpajan pienryhmistä.

Työpajatyöskentelystä laadittu tiivistelmä on esitetty opinnäytetyön liitteenä 2.

Tiivistelmässä esitetään työpajatyöskentelyn keskeiset tulokset, sekä biohiilikonseptin kehitystyön seuraavat toimenpiteet.

Työpajassa eniten mielenkiintoa herätti maatalon mahdollisuus korvata hake- tai klapikattila pienen mittakaavan pyrolyysilaitteistolla, ja tuottaa biohiiltä lämmöntuotannon yhteydessä. Hiilikrediiteistä saatava myyntitulo nähtiin erittäin mielenkiintoisena mahdollisuutena maataloille. Potentiaalisimpina biohiilen käyttökohteina nähtiin sen sekoittaminen liete- tai kuivalantaan, rehukäyttö, maanparannuskäyttö sekä kotieläintilojen piha-alueiden hulevesien suodattaminen. Työpajan keskustelun pohjalta hahmoteltiin maatalon biohiilituotannon mahdollistamaa biomassan arvoketjua (kuva 9).

Kuva 9. Työpajatyöskentelyn pohjalta laadittu arvoketjutarkastelu maatalon biohiilituotannon kautta muodostuvalle biomassalle. Kaavion kuvituskuvat ovat Pixabay-kuvapankista.



### 4.3 Kannattavuustarkastelut

KieMaRa-hankkeen toteuttaman työpajan jälkeen yksi maatalousyrittäjä oli kiinnostunut tarkastelemaan biohiilituotantoinvestoinnin kannattavuutta omalla tilallaan. Toinen kannattavuustarkastelu tehtiin Lyckan-hankkeessa mukana olevalle, pienimuotoista energiayrittäjyyttä harjoittavalle kasvinviljelytilalle.

Investoinnin kannattavuuslaskelmissa osa lähtötiedoista määritettiin esimerkkitulojen kanssa käytyjen keskustelujen perusteella. Kannattavuuden laskennassa käytettiin takaisinmaksuajan menetelmää, joka on yleisimmin käytetty investointilaskentamenetelmä, ja hyvä lähtökohta investoinnin kannattavuuden arvioinnille (Savonia ammattikorkeakoulu, 2021). Takaisinmaksuajan menetelmällä saatuja laskentatuloksia tarkasteltiin tekemällä herkkyyshanalyseja sekä biohiilen että hiilikrediitin hinnalla.

#### 4.3.1 Takaisinmaksuajan menetelmä ja kannattavuuslaskentatyökalu

Takaisinmaksuajan menetelmä selvittää, miten nopeasti investoinnin yhteenlasketut nettotuotot kattavat investoinnista aiheutuneet kulut. Matemaattisesti ilmaistuna menetelmässä lasketaan, montako vuotta kestää, että kumulatiivisen nettotuoton ja investointikustannuksen erotus on nolla. Mikäli tähän kuluu vähemmän aikaa kuin investoinnin pitoaikaan, investointi on kannattava. (Tevä-Helminen, 2013, s. 20).

BioMaconin Farm Edition -malliston pyrolyysilaitteistojen arvioitu käyttöikä on vähintään 15 vuotta (Thomas Hoffman, BioMacon GmbH, henkilökohtainen tiedonanto, 6.1.2023)

Takaisinmaksuaika johdetaan kaavan 1 mukaisesta lausekkeesta, ja se lasketaan laskentakoron huomioivalla kaavalla 2. Laskentakorolla investoinnista aiheutuvat tulevat tuotot muutetaan niiden nettonykyarvoon. (Tevä-Helminen, 2013, s. 20)

Kaava 1

$$\sum_{t=1}^{n^*} \frac{S_t}{(1+i)^t} - H = 0$$

$n^*$  = takaisinmaksuaika (vuotta)

$t$  = vuosia investoinnista

$S_t$  = investoinnin tuottamat nettotuotot vuonna  $t$

$i$  = laskentakorko

$H$  = perusinvestointi

Kaava 2

$$n^* = \frac{-\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{H}{S}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)}$$

$n^*$  = takaisinmaksuaika (vuotta)

$S$  = investoinnin nettotuotto (vakio)

$i$  = laskentakorko

$H$  = perusinvestointi

Takaisinmaksuajan laskentaa varten laadittiin kaavoihin 1 ja 2 perustuva laskentapohja MS Excel -ohjelmalla. Laskentakorkona käytettiin 5 %.

Investointikustannusten, muuttuvien kustannusten ja tuottojen lisäksi laskentaa varten arvioitiin realistiset, esimerkkitulojen lämmöntarpeeseen perustuvat pyrolyysilaitteiston käyttötunnit. BioMaconin pyrolyysilaitteiston tuotanto on laitekohtaisissa esitteissä ilmoitettu tuntia kohden tuotettuna biohiilimääränä (kg/h) olettaen, että käytettävän pyrolyysisyötteen kosteus on 20 % (BioMacon GmbH, n.d.-c; BioMacon GmbH, n.d.-d). Realististen käyttötuntien avulla saatiin laskettua vuodessa tuotetun lämpöenergian sekä biohiilen määrä.

#### 4.3.2 Investointikustannukset

BioMacon toimitti pyynnöstä (29.11.2022) Farm Edition -malliston pyrolyysilaitteistojen hinnat. Nämä hinnat on esitetty taulukossa 2 siltä osin, kun niitä on tämän työn kannattavuuslaskelmissa hyödynnetty. Pyrolyysilaitteiston lisäksi BioMaconilta voi ostaa kuljettimen biohiilen purkua varten sekä biohiilen säkityslaitteen, jotka on hinnoiteltu erikseen (taulukko 2).

BioMaconin pyrolyysilaitteisto tulee asentaa sisätiloihin. Mikäli tilalla ei ole valmiina riittävän suurta paloturvallisuusvaatimukset täyttävää tilaa (esim. vanha lämpökeskus) on investoitava uuteen rakennukseen. Käytännössä tarvitaan uusi lämpökeskus syöttölaitteineen ja syötevarastoineen. Rakentamiskustannuksista käytettiin työlukuna 120 000 €, joka todettiin molempien esimerkkitulojen kanssa realistista suuruusluokkaa olevaksi arvioksi.

Taulukko 2. Tarkasteltavien investointien kustannuksia.

Investointikustannukset	€ (veroton)
BioMacon 40 kW	93 500
BioMacon 63 kW	108 900
Biohiilen poistojärjestelmä	15 000
Biohiilen säkitysjärjestelmä	15 000
Muut rakennuskustannukset (arvio)	120 000

Kannattavuuslaskennassa huomioitiin maatilayritysten mahdollisuus saada tukea energiaan liittyviin investointeihin, kuten lämpöenergian tuotantolaitoksiin. Tukikaudella 2014–2022 lämpöenergian tuotantolaitoksiin on ollut mahdollista saada 40 % avustus. (ProAgria Keskusten Liitto, 2016; Ruokavirasto, 2023)

### 4.3.3 Muuttuvat kustannukset

Muuttuvina kustannuksina laskelmassa käytettiin pyrolyysisyötteenä käytettävän hakkeen arvoa, arvioitua työkustannusta sekä pyrolyysiyksikön sähkönkulutusta. Esimerkkituloilla pyrolyysisyötteenä on tarkoitus käyttää pääosin haketettua energiapuuta. Energiapuu on metsänhoidollista sivuvirtaa. Esimerkkitulojen kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella energiapuuta saadaan joko omista metsistä, tai ostettuna tavarana.

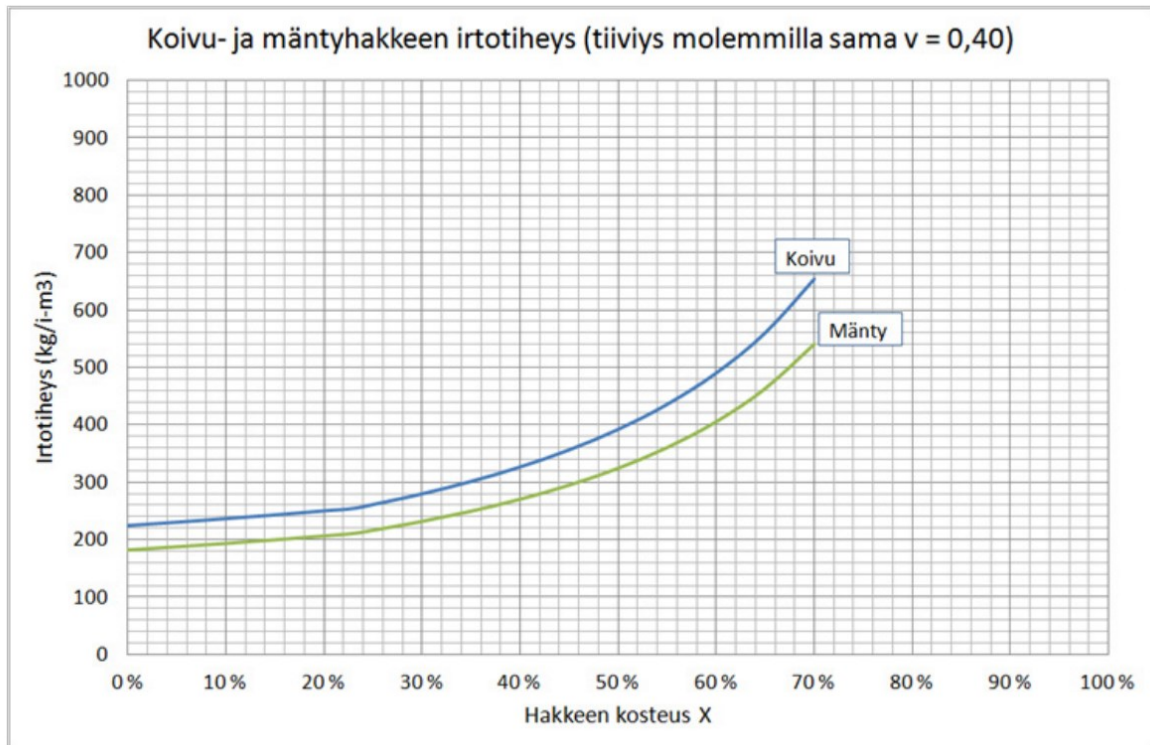
Pyrolyysisyötteenä käytettävän hakkeen arvo laskettiin summaamalla yhteen energiapuun kustannus sekä haketuksen kustannus. Energiapuun kustannukset saatiin esimerkkituloilta. Omista metsistä korjattavan energiapuun arvona käytettiin korjuukustannusta 30 €/kiintokuutio (tilalliselta saatu henkilökohtainen tiedonanto, 8.2.2023), ja ostetun energiapuun hintana 33 €/kiintokuutio (tilalliselta saatu henkilökohtainen tiedonanto, 16.2.2023).

Korjuukosteudessa (45 %) olevan puun paino muunnettiin 20 % kosteuteen kuivuneeseen puun painoon. Laskennassa haluttiin päästä tähän kosteuteen, koska pyrolyysiyksikön tuotanto on BioMaconin manuaaleissa ilmoitettu kosteudeltaan 20 % olevien syötteiden kautta (BioMacon GmbH, n.d.-c; BioMacon GmbH n.d.-d). Korjuukosteudessa (45 %) olevan puun kuutiopaino laskettiin Timberpolis-laskurin ilmoittaman, tuoreena sahatun koivun tilavuuspainon, 768,5 kg/m<sup>3</sup> mukaan (DREVARI.SK s.r.o., n.d.). 20 % kosteuteen kuivuneen koivun kiintokuution painoksi saatiin näin 528 kg, ja korjuukustannukseksi noin 57 €/t.

Haketuksen kustannuksena käytettiin 4,5 €/i-m<sup>3</sup> (tilalliselta saatu henkilökohtainen tiedonanto, 16.2.2023). Hakettonni muunnettiin irtokuutioksi käyttämällä kuvassa 10 esitetyn 20 % kosteudessa olevan koivuhakkeen irtotiheyttä, noin 250 kg/i-m<sup>3</sup>, perusteella (Härkönen, 2012, s. 20). Haketuksen kustannukseksi saatiin näillä luvuilla noin 18 €/t.

Pyrolyysiyötteenä käytettävän hakkeen kustannus on näillä luvuilla laskettuna yhteensä noin 75–81 €/t riippuen siitä, onko polttohakkeen raaka-aineena käytettävä energiapuu peräisin omista metsistä vai ostettu muualta.

Kuva 10. Koivu- ja mäntyhakkeen irtotiheys eri kosteuksissa (Härkönen, 2012, s. 20).



Yrittäjän oman työn arvon määrittämisessä käytettiin apuna Valtioneuvoston asetusta maatalouden rakennetuesta (Valtioneuvoston asetus maatalouden rakennetuesta 240/2015). Kyseisessä asetuksessa säädetään mm. maatalon investointituen myöntämisen ja maksamisen edellytyksistä. Asetuksen kuudennen luvun 20 § arvioitu maatalousyrittäjän oman työn arvoksi 15 €/h, ja koneella tehdyn työn arvoksi 30 €/t. (Valtioneuvoston asetus maatalouden rakennetuesta 240/2015). Osa pyrolyysiyksikön käyttämiseen liittyvästä työstä on koneellista työtä, joten laskennassa käytettiin työn arvona 25 €/h.

Kannattavuuslaskennan kohteena olevien BioMaconin pyrolyysiyksiköiden sähkönkulutus, 3 500 W/h, on ilmoitettu laitekohtaisissa esitteissä. (BioMacon GmbH n.d.-c; BioMacon GmbH n.d.-d). Kannattavuuslaskennassa käytettiin sähkön hintana 0,1 €/kWh.



#### 4.3.4 Tuotot

BioMaconin pyrolyysiyksikkö tuottaa biohiilen lisäksi lämpöä. Tuottoa on mahdollista saada myös hiilikrediittien myynnistä, mikäli biohiilituotanto täyttää jonkin vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla käytettävän standardin vaatimukset (Valonia, 2020). Näin ollen kannattavuuslaskelman tuotoissa arvioitiin biohiilestä, lämmöntuotannosta sekä hiilikrediittien myynnistä saatavaa tuloa.

Maanparannusaineena käytettävän biohiilen nykyhinnat ovat luokkaa 1 200–1 300 €/t (Esko Salo, henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2023). Laskelmissa käytettiin biohiilen myyntihintana 1200 €/t. Biohiilen hinnalla tehtiin herkkyysanalyysia, jotta voitiin arvioida, millaisella biohiilen myyntihinnalla tuotanto olisi kannattavaa.

Puro.earth-markkinapaikan myymille CORC-hiilikrediiteille on luotu Nasdaqin referenssihintaindeksejä. Biohiilellä sidottujen hiilidioksiditonni hintaa kuvaavan CORCCHAR-indeksin mukaan yhden krediitin hinta on vuoden 2022 jälkimmäisellä puoliskolla vaihdellut välillä 100–120 €. (Nasdaq Inc, 2023). Salo arvioi, että tällä hetkellä laskennassa voi käyttää yhden hiilikrediitin arvona 100–150 € (Esko Salo, henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2023). Hiilikrediittien myynnistä saatavaa tuottoa arvioitiin käyttämällä yhden hiilikrediitin arvona 100 €. Yhden biohiilitonni tuotannolla voidaan tuottaa keskimäärin noin kolme hiilikrediittiä. (Esko Salo, henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2023).

Tilastokeskus tilastoi tuotetun lämmitysenergian hintoja. Tilaston mukaan kaukolämmöllä tuotetun lämmitysenergian hinta on aikavälillä 09/2021–10/2022 ollut lähellä 0,09 €/kWh. Sähköllä ja kevyellä polttoöljyllä tuotetun lämmitysenergian hinta on ollut hieman suurempi, 0,10–0,19 €/kWh. (Tilastokeskus, n.d.). Esimerkkitulojen kanssa käydyissä keskusteluissa saatiin tilojen omat arviot tilalla tuotetun energian arvosta. Esimerkkituloilta saadut luvut vastasivat melko hyvin Tilastokeskuksen tilastoimia tuotetun lämmitysenergian hintoja, joten kannattavuuslaskennassa käytettiin tiloilta saatuja arvioita lämpöenergian arvosta.

#### 4.4 Case-esimerkki biohiiltä käyttävä lihakarjatila

Investoinnin kannattavuuslaskelma laadittiin Kanta-Hämeessä sijaitsevalle lihanautatilalle. Tila näkee kiinnostavana tilalla tuotettavan biohiilen hyödyntämisen lietelannassa ja tätä kautta omien peltojen lannoituksessa sekä maanparannuksessa. Ylimääräinen pyrolyysilämpö on mahdollista hyödyntää tilan omassa lämpöenergiantuotannossa. Lisäksi biohiilituotannon sitomasta hiilidioksidista tulisi saada taloudellista hyötyä myymällä hiilikrediittejä vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla. Pyrolyysisyötteenä käytettäisiin tilan omien metsien hoidosta saatavaa polttohaketta. Hakkeeseen on mahdollista sekoittaa esimerkiksi viljan esipuhdistuksesta sivuvirtana muodostuvaa kasvijätettä.

Tilalla kuluu lämpöenergiaa lämmityskaudella noin 340 kWh päivässä eli keskimäärin 14 kWh tunnissa. Biolämpökattiloita valmistavan suomalaisen Ariterm Oy:n puulämmitysoppaan mukaan (Ariterm Oy, 2020, s. 4) mukaan lämmityskauden kesto on keskimäärin 260 päivää vuodessa. Tilalla kuluu tästä laskettuna lämpöenergiaa noin 88 MWh vuodessa.

Tilan käyttövesi lämmitetään kesäaikaan sähköllä, mutta mikäli tila ryhtyisi tuottamaan biohiiltä, myös käyttöveden lämmitykseen olisi järkevää käyttää pyrolyysilaitteistoa. Käyttöveden lämmitykseen arvioidaan kuluvan kesäaikana noin 25 kWh vuorokaudessa perustuen yhden ihmisen keskimääräiseen lämpimään käyttöveden vuorokausikulutukseen 3,6 kWh (”Katso kuinka vedenkäytössä voidaan säästää”, 2020). Tilalla asuu 6–7 henkilöä. Tästä tulisi lämpöenergian lisäkulutusta noin 9 MWh vuodessa, kun lämmityskauden ulkopuolisen ajanjakson pituudeksi oletetaan 100 vuorokautta. Käyttöveden lämmitystarve huomioituna tilan vuotuinen lämpöenergian kulutus olisi luokkaa 97 MWh vuodessa.

Tilan nykyisen klapikattilan teho 40 kW on riittävä tuottamaan tarvittavan lämpöenergian määrän. Tilallisen kanssa päätettiin tarkastella tilannetta, jossa klapikattila korvattaisiin lämpöteholtaan vastaavalla pyrolyysilaitteistolla. Kannattavuustarkasteluun valittiin BioMaconin 40 kW pyrolyysilaitteisto (BioMacon GmbH, n.d.-c).

#### 4.4.1 Takaisinmaksuaika ja investoinnin kannattavuus

Valitulla pyrolyysilaitteistolla tuotettu biohiili menisi tilan omaan käyttöön. Biohiilen sekoittaminen lietelantaan vähentää hajuhaittoja sekä parantaa lannan ravinnearvoa lannoitekäytössä. Biohiilellä käsitelty lietelanta voidaan hyödyntää tilan omilla pelloilla. Biohiilen tuomaa taloudellista lisäarvoa omalla tilalla tapahtuvalle käytölle on vaikea arvioida, joten takaisinmaksuajan laskennassa biohiilestä saatavaksi tuotoksi asetettiin 0 €/t.

Biohiilen sekä hiilikrediittien todellisen tuotantomäärän laskemiseksi pyrolyysiyksikön käyntitunteja arvioitiin tilan lämmönkulutuksen perusteella. Lämmitysteholtaan 40 kW kattila tuottaa tilalla kuluvan energiamäärän, 340 kWh vuorokaudessa noin 8,5 tunnissa. Kesäaikana yksikkö kävisi vuorokaudessa noin 40 minuuttia. Näistä luvuista laskettuna pyrolyysiyksikkö tuottaisi lämpöä ja biohiiltä hieman yli 2 000 tuntia vuodessa (taulukko 3).

Taulukko 3. Tilan nykyiseen lämpöenergiatarpeeseen perustuvat pyrolyysiyksikön käyntitunnit.

Käyntitunnit lämmityskaudella	Käyntitunnit kesällä (käyttövesi)	Käyntitunnit vuodessa (h)
$(340 \text{ kWh} / 40 \text{ kW}) \times 260 = 2\,210 \text{ h}$	$(25 \text{ kWh} / 40 \text{ kW}) * 100 = 62,5 \text{ h}$	<b>2 272,5 h</b>

Maatilarittäjän arvion mukaan pyrolyysiyksikön käyntiaikaa olisi mahdollisuus kasvattaa, mikäli ylimääräistä pyrolyysilämpöä hyödynnettäisiin lisäksi kosteiden pyrolyysisyötteiden kuivaukseen. Tässä vaiheessa sovittiin, että alustava kannattavuuslaskelma tehdään olettaen, että pyrolyysiyksikön käyntitunnit olisivat noin puolet laitteen manuaalissa ilmoitetuista vuotuisista käyntitunneista, eli 4 000 tuntia vuodessa. Tällöin tuotettavan biohiilen määrä olisi 20 tonnia vuodessa, ja hiilikrediittejä olisi mahdollista myydä 60 kpl.

Takaisinmaksuajan laskuriin syötettiin arvioitu investointikustannus, arvioidut tuotot sekä muuttuvat kustannukset. Nämä muuttujat sekä kannattavuuslaskennan tulos on esitetty taulukossa 4. Kuten taulukon 4 viimeisestä sarakkeesta nähdään, näillä parametreillä

laskettuna laitteiston takaisinmaksuaika on ääretön. Vuotuinen nettotuotto ei riitä investoinnin takaisin maksamiseen, mikäli biohiilelle ei lasketa tuottoa.

Taulukossa 5 on esitetty laskennan tulokset huomioiden mahdollinen 40 % suora investointituki. Edes 40 % suora investointituki ei tee investoinnista kannattavaa.

Laskentataulukot ovat kokonaisuudessaan liitteenä 3. Liitteen 3 taulukoissa kustannusten ja tuottojen erittelyt ovat nähtävissä.

Taulukko 4. Kannattavuuslaskennan tulokset biohiilen tuottamiselle lihanautatilan omaan käyttöön (ilman investointitukea).

Investoinnin kohde	Investointikustannus (€)	Muuttuvat kustannukset (€/vuosi)	Tuotto (€/vuosi)	Nettotuotto (€/vuosi)	Takaisinmaksuaika 5 % laskentakorolla (vuotta)
<b>BioMacon 40 kW</b>	243 500	15 100	22 000	6 900	ei laskettavissa (ääretön)

Taulukko 5. Kannattavuuslaskennan tulokset biohiilen tuottamiselle lihanautatilan omaan käyttöön. Investointikustannuksessa huomioitu mahdollinen 40 % suora investointituki.

Investoinnin kohde	Investointikustannus (€)	Muuttuvat kustannukset (€/vuosi)	Tuotto (€/vuosi)	Nettotuotto (€/vuosi)	Takaisinmaksuaika 5 % laskentakorolla (vuotta)
<b>BioMacon 40 kW</b>	146 100	15 100	22 000	6 900	ei laskettavissa (ääretön)

#### 4.4.2 Herkkyysanalyysi

Hiilikrediitin hinnalla tehdyn herkkyysanalyysin avulla selvitettiin, millaisella hiilikrediitin hinnalla biohiilen tuotanto tilan omaan käyttöön olisi kannattavaa. Herkkyystarkastelun tulokset on esitetty kuvassa 11. Vaaka-akselilla esitetään hiilikrediitin hinta ja pystyakselilla hiilikrediitin hinnan perusteella laskettu takaisinmaksuaika. Tuloksesta nähdään, että ilman

investointitukea hiilikrediitin hinnan tulisi olla lähes 400 €, jotta investointi olisi kannattava. Mikäli investointiin saataisiin tukea, joka kattaisi 40 % kokonaiskustannuksista, investointi olisi kannattava, jos hiilikrediitin hinta ylittäisi 200 € (kuva 12).

Kuva 11. Hiilikrediitin myyntihinnan vaikutus biohiilituotantoinvestoinnin takaisinmaksuaikaan ilman investointitukea.



Kuva 12. Hiilikrediitin myyntihinnan vaikutus tuetun (40 %) biohiilituotantoinvestoinnin takaisinmaksuaikaan.

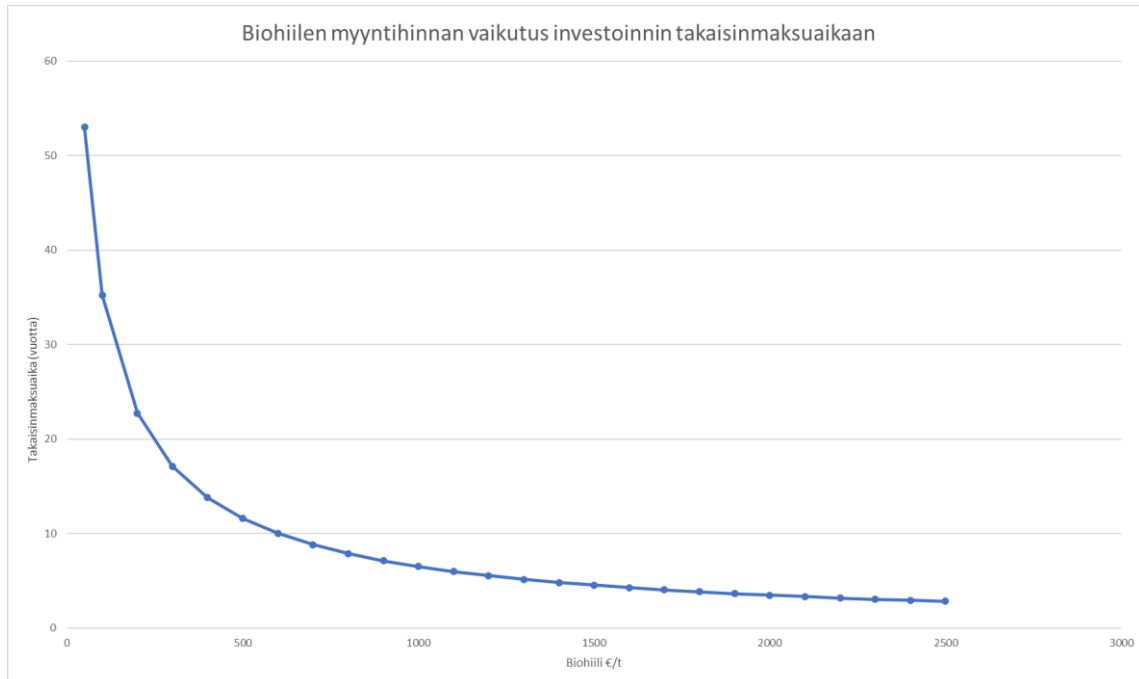


Myös biohiilen hinnalla tehtiin vastaavaa herkkyyssanalyysia. Tässä tarkastelussa hiilikrediitin hintana pidettiin 100 € / kpl. Kuvassa 13 esitetyistä tuloksista nähdään, että ilman investointitukea investointi olisi kannattava, mikäli biohiilestä saadaan myyntituottoa noin 800 €/t. Mikäli suoraa investointitukea saataisiin 40 %, biohiilen myyntituoton tulisi olla noin 350 €/t (kuva 14).

Kuva 13. Biohiilestä saatavan tuoton vaikutus biohiilen tuotantoinvestoinnin takaisinmaksu-aikaan (ei investointitukea).



Kuva 14. Biohiilestä saatavan tuoton vaikutus tuetun (40 %) biohiilen tuotantoinvestoinnin takaisinmaksuaikaan.



#### 4.5 Case-esimerkki energiayrittäjyyttä harjoittava kasvinviljelytila

Toinen kannattavuuslaskelma laadittiin Lapinjärvellä sijaitsevalle energiayrittäjyyttä harjoittavalle kasvinviljelytilalle. Kyseisellä kasvinviljelytilalla tuotetaan tällä hetkellä lämpöenergiaa 200 kW hakekattilalla. Tila myy lämpöenergiaa Lapinjärven kunnan omistaman läheisen koulurakennuksen käyttöön. Lisäksi hakkeella tuotettua lämpöenergiaa käytetään maatilan päärakennuksen ja varistorakennuksen lämmitykseen sekä viljan kuivaamiseen. Viljan kuivauksessa apuna on erillinen öljykattila.

Maatilyrittäjällä oli kiinnostusta tarkastella tilannetta, jossa nykyisen hakekattilan rinnalle hankitaan jatkuvatoiminen pyrolyysilaitteisto. Laitteisto mitoitetaan siten, että se on lämmityskaudella pääasiallinen lämpöenergian lähde. Talven kylmimpinä päivinä sekä viljankuivauskausiin tarvittava lisäenergia tuotetaan olemassa olevalla hakekattilalla. Näin saadaan olemassa olevat lämmitysratkaisutkin hyödynnettyä sekä fossiilisen polttoaineen kulutusta vähennettyä.

Pyrolyysisyötteenä käytettävä polttohake saadaan osittain omista metsistä ja osittain ostettuna. Kannattavuuslaskennassa syötteen arvona käytettiin kokonaisuena ostetun energiapuun hintaa sekä haketus kustannusta. Hakkeen lisänä syötteenä on mahdollista käyttää myös muuta sivuvirtaa, esimerkiksi viljan esipuhdistuksesta sivuvirtana muodostuvaa kasvijätettä.

Tilan lämpöenergiantuotanto on noin 400 MWh vuodessa. Yrittäjältä saadun tiedon mukaan suurin osa energiasta kuluu lämmityskauden aikana (260 vuorokautta). Yhden vuorokauden lämpöenergian kulutus on tällöin keskimäärin 1 540 kWh, ja tehontarve tästä laskettuna noin 64 kW. Tehontarve mahdollistaa BioMaconin 63 kW pyrolyysikattilan tehokkaan käytön lämmityskaudella (BioMacon GmbH, n.d.-d).

#### **4.5.1 Takaisinmaksuaika ja investoinnin kannattavuus**

Tila on kiinnostunut hyödyntämään tuotettavaa biohiiltä omien peltojensa maanparannukseen, sekä tuottamaan biohiiltä myyntiin. Takaisinmaksuajan laskennassa biohiilen tuotoksi asetettiin 1200 €/t ja lämpöenergian tuotoksi 0,09 €/kWh. Biohiilen sekä hiilikrediittien todellisen tuotantomäärän laskemiseksi arvioitiin pyrolyysilaitteiston vuosittaisten käyntituntien määrää. Energiatarve huomioiden arvioitiin, että laitteisto käy jatkuvasti koko lämmityskauden (260 vrk) ajan. Tällöin käyntitunteja kertyisi vuodessa noin 6240 tuntia. Näillä käyttötunneilla laskettuna vuodessa tuotetaan lämpöenergiaa noin 393 MWh, biohiiltä lähes 44 tonnia, ja hiilikrediittejä 131 kpl. Kaikki edellä esitetyt, laskennassa käytetyt lähtötiedot on esitetty liitteen 3 laskentataulukoissa.

Takaisinmaksuajan laskennassa käytetty investointikustannus, arvioidut tuotot, muuttuvat kustannukset sekä näiden perusteella laskettu takaisinmaksuaika on esitetty taulukossa 6. Biohiilituotannon vuotuinen nettotuotto on yli 70 000 €. Tällä nettotuotolla investointi on maksettu takaisin neljässä vuodessa. Investointi näyttää siis kannattavalta. Mikäli investointiin saadaan 40 % suora tuki, takaisinmaksuaika lyhenee 2,3 vuoteen. Tulokset on esitetty taulukossa 7, ja laskennan lähtötiedot kokonaisuudessaan liitteessä 3.



Taulukko 6. Kannattavuuslaskennan tulokset biohiilituotannolle kasvinviljelytilalla, jolla on pienimuotoista energiayrittäjyyttä (ei investointitukea).

Investoinnin kohde	Investointikustannus (€)	Muuttuvat kustannukset (€/vuosi)	Tuotto (€/vuosi)	Nettotuotto (€/vuosi)	Takaisinmaksuaika 5 % laskentakorolla (vuotta)
<b>BioMacon 63 kW</b>	258 900	27 890	100 900	73 010	4,0

Taulukko 7. Kannattavuuslaskennan tulokset biohiilituotannolle kasvinviljelytilalla, jolla on pienimuotoista energiayrittäjyyttä (investointituki 40 %).

Investoinnin kohde	Investointikustannus (€)	Muuttuvat kustannukset (€/vuosi)	Tuotto (€/vuosi)	Nettotuotto (€/vuosi)	Takaisinmaksuaika 5 % laskentakorolla (vuotta)
<b>BioMacon 63 kW</b>	155 340	27 890	100 900	73 010	2,3

#### 4.5.2 Herkkyyksianalyysi

Tila oli kiinnostunut käyttämään biohiiltä omien peltojensa maanparannukseen, sekä tuotteistamaan oman käyttötarpeen jälkeen yli jäävän biohiilen myyntiin. Kaikkea biohiiltä ei ole tarkoitus myydä. Biohiilen hinnalla tehdyn herkkyyksianalyysin avulla nähdään, paljonko biohiilestä tulisi vuosittain saada myyntituottoa, jotta investointi näyttäisi kannattavalta.

Herkkyyksianalyysin tulokset on esitetty kuvaajalla kuvassa 15. Vaaka-akselilla on biohiilen hinta, ja pystyakselilla biohiilen hinnan perusteella laskettu takaisinmaksuaika. Kuvasta 15 nähdään, että biohiilestä tulisi saada tuottoa noin 100 €/t, jotta takaisinmaksuaika pysyisi alle 15 vuodessa, ja investointi olisi kannattava. Biohiilen vuosittainen tuotantomäärä laitteiston arvioiduilla käyttötunneilla on noin 44 tonnia, jolloin 100 euron tonnihinnalla biohiilestä saadaan tuottoa 4 400 € vuodessa. Mikäli biohiilen myyntihintana olisi

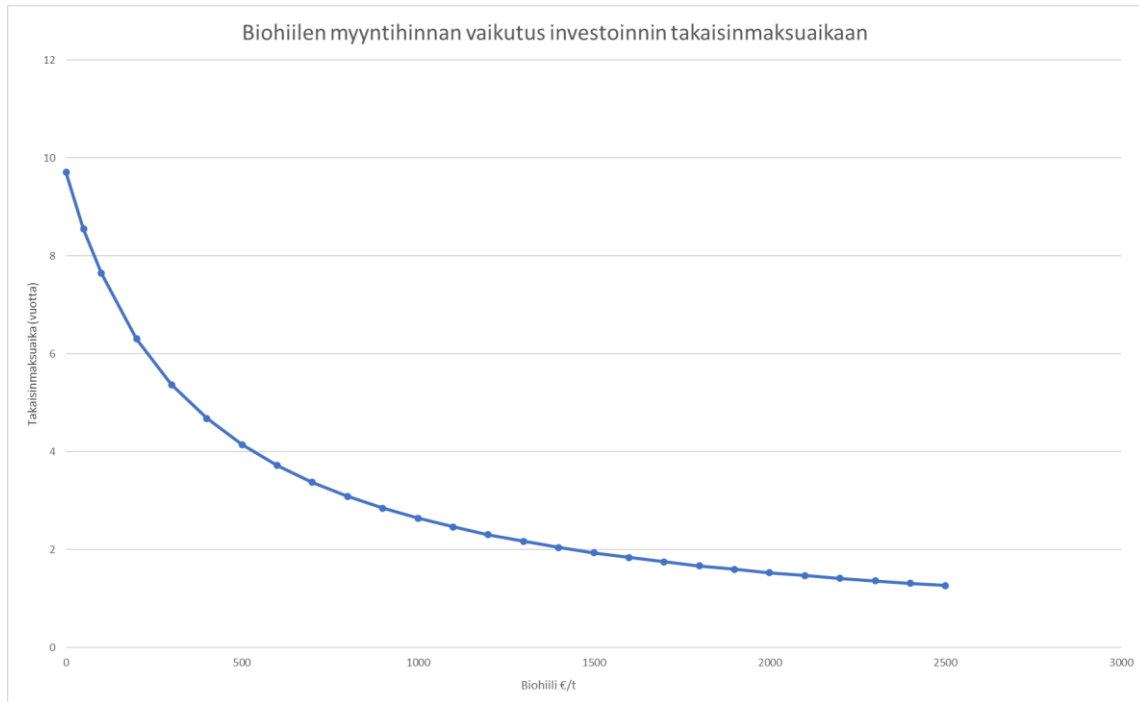
kannattavuuslaskelmassa arvioitu 1200 €/t, biohiiltä pitäisi tämän 4 400 € vuosituoton saavuttamiseksi myydä kaksi tonnia vuodessa.

Kuvassa 16 on esitetty vastaava tarkastelu olettaen, että investointiin saadaan suoraa tukea 40 % kokonaiskustannuksista. Tuloksista nähdään, että takaisinmaksuaika pysyy alle 15 vuodessa, vaikka biohiiltä ei myytäisi ollenkaan (kuva 16).

Kuva 15. Biohiilen myyntihinnan vaikutus biohiilituotantoinvestoinnin takaisinmaksu-aikaan kasvinviljelytilalla, jolla on pienimuotoista energiayrittäjyyttä (ei investointitukea).



Kuva 16. Biohiilen myyntihinnan vaikutus tuetun (40 %) biohiilituotantoinvestoinnin takaisinmaksuaikaan kasvinviljelytilalla, jolla on pienimuotoista energiayrittäjyyttä.



## 5 Johtopäätökset ja pohdinta

Tämän opinnäytetyön aikana tuotettiin biohiilimaiheista materiaalia kahden HAMK Bion tutkimushankkeen tarpeisiin. Varsinaiset tuotokset olivat KieMaRa-hankkeen työpajaan tuotettu materiaali maatilojen biohiilituotannon mahdollisuuksista sekä alustavat maatilamittakaavan biohiilituotannon teknis-taloudelliset tarkastelut. Teknis-taloudellista tarkastelua varten laadittiin Excel-ohjelmaan takaisinmaksuajan laskuri, jota käytettiin kahdelle maatilalle tehdyssä biohiilituotannon kannattavuuslaskelmassa.

Opinnäytetyöprosessin aikana perehdyin hankkeissa mukana olevilla maatioilla muodostuviin sivu- ja jätevirtoihin, ja näiden mahdollisuuksiin pyrolyysisyötteinä. Tehtyjen selvitysten perusteella kannattavuuslaskentaan valittuun pyrolyysiyksikköön soveltuvat parhaiten puupohjaiset syötteen. Moni maatila tuottaa lämpöenergiansa itse energiapuusta valmistetulla polttihakkeella. Metsätaloutta harjoittavilla maatioilla energiapuuta saadaan

metsähoidon sivuvirtana. Pyrolyysisyötteenä käytettävään polttohakkeeseen voidaan sekoittaa muita maatalouden sivuvirtoja. Puupohjaiseen syötteeseen sekoitettavia tuotannon sivuvirtoja voisivat olla esimerkiksi olki, viljan esipuhdistusjäte tai pilaantunut rehu. Sekä KieMaRa-hankkeen sivu- ja jätevirtakartoituksen, että työpajassa esille tuotujen näkemysten perusteella yksittäisellä maatilalla ei maataloustuotannosta muodostu jatkuvasti riittävästi sellaisenaan pyrolyysiprosessin syötteenä soveltuvia jäte- tai sivuvirtoja.

Pienen mittakaavan jatkuvatoimisten pyrolyysilaitteistojen valmistajia löytyy Euroopasta toistaiseksi melko vähän. Opinnäytetyön aikana perehdyttiin tarkemmin kahden eurooppalaisen valmistajan laitteistoihin. Molempien valmistajien laitteistoilla on mahdollista tuottaa laadukasta, eurooppalaisen EBC-sertifikaatin kriteerit täyttävää biohiiltä. Kannattavuustarkasteluun valittiin saksalaisen BioMaconin Farm Edition -malliston laitteistot, koska niiden lämmitysteho vastaa maatalojen tarpeita melko hyvin, ja myös käyttökokemukset useammalla ruotsalaisella maatilalla vaikuttivat valintaan (Wahlberg-Roslund, 2022). BioMacon toimitti Farm Edition -malliston pyrolyysilaitteistojen sekä erillisinä osina myytävien biohiilen purkamiseen ja säilytykseen liittyvien kokonaisuuksien ulosmyyntihinnat pyydettäessä. Saatujen hintojen perusteella saatiin tehtyä alustavat kannattavuuslaskelmat valituille tiloille.

Biohiilen hinta on 2010-luvulta alkaen noussut, ja opinnäytetyössä tehtyjen selvitysten mukaan maanparannuskäyttöön myytävän biohiilen tonnihinta on tällä hetkellä yli 1 000 euroa. Biohiilen markkina Suomessa nähdään kehittyvänä. Biohiilituotannon käynnistämistä suunnittelee useampikin yritys, vaikka esimerkiksi vielä vuonna 2019 Carbofex Oy on Suomen markkinatilanteen takia myynyt tuottamaansa biohiiltä Ruotsiin. Biohiili on biopohjainen materiaali, jonka monipuoliset ominaisuudet mahdollistavat sen käytön useissa sovelluksissa sekä korvaamassa erilaisia materiaaleja. Kysymys lienee usein lähinnä siitä, tuottaako ilmastopositiivinen ja luonnonmukainen materiaalivalinta taloudellista hyötyä. Teknis-taloudelliseen tarkasteluun valitut esimerkkitalat olivat kiinnostuneita biohiilen käyttämisestä lähinnä omassa tuotannossaan. Kasvinviljelytila suunnitteli myös biohiilen myyntiä, mutta myyntikanavia ei tässä vaiheessa ollut tiedossa. Maatilalla valmistetun biohiilen tuotteistaminen ja myyntikanavien löytäminen olisi oma, mielenkiintoinen

prosessinsa, joka mahdollisesti voisi johtaa laajempien kiertotalouskonseptin muodostumiseen.

Opinnäytetyössä tehtyjen kannattavuustarkasteluiden perusteella maatilalla voidaan tuottaa kannattavasti biohiiltä, mikäli biohiilituotanto yhdistetään lämmöntuotantoon, ja maatilalla lämmöntarve on lähellä pyrolyysilaitteiston maksimikäyttökapasiteettia. Laskennassa oletettiin, että biohiilituottaja saa tuloa myymällä hiilikrediittejä hintaan 100 €/kpl.

Toisena laskentaesimerkkinä ollut energiayrittäjyyttä harjoittava kasvinviljelytila mitoitettiin teknis-taloudelliseen tarkasteluun valittavan pyrolyysilaitteiston siten, että vuoden kylmimpinä päivinä tarvittava lisälämpö tuotetaan olemassa olevalla hakelämpökattilalla. Näin mitoitettulla pyrolyysilaitteiston korkealla käyttöasteella investointi saatiin kannattavaksi olettamalla, että tila myy tuotetun biohiilen maanparannuskäyttöön. Herkkyystarkastelua tekemällä selvisi, että mikäli investointiin saadaan 40 % suora tuki, investointi on kannattava, vaikka biohiiltä ei myytäisi ollenkaan. Ilman investointitukea biohiilestä tulisi saada tuottoa noin 100 €/t.

Opinnäytetyössä tarkastellulla lihanautatilalla biohiilen tuotanto omaan käyttöön ei ole kannattavaa arvioiduilla pyrolyysilaitteiston käyttötunneilla, vaikka investointiin tulisi 40 % suora tuki. Tuettuna investointi olisi kannattava, mikäli biohiilestä saataisiin tuottoa noin 350 €/t. Ilman investointitukea biohiilestä tulisi saada tuottoa noin 800 €/t. Lihanautatilalle tehtiin herkkyystarkastelua myös hiilikrediitin hinnan suhteen. Herkkyystarkastelussa oletettiin edelleen, että biohiili tuotetaan tilan omaan käyttöön. Tuettuna energiainvestointina biohiilen ja lämmön tuotanto omaan käyttöön olisi herkkyystarkastelun mukaan kannattavaa, mikäli hiilikrediitin hinta olisi yli 200 €. Ilman investointitukea hiilikrediitistä pitäisi saada lähes 400 €.

Kannattavuuslaskennassa olisi mielestäni pitänyt antaa taloudellinen arvo myös omaan käyttöön tuotetulle biohiilelle. Tämän arvon pitäisi vastata biohiilen käytön taloudellisia hyötyjä, kuten esimerkiksi lannan lannoitearvon lisääntymistä ja biohiilen peltokäytöllä aikaansaataavaa satovaikutusta. Tällainen arviointi vaatisi lisää käyttökokemuksia biohiilestä sekä lisää tutkimusta, eikä arvion tekeminen ollut tämän työn puitteissa mahdollista.

Tehtyjen laskelmien perusteella vaikuttaa siltä, että pyrolyysiyksikön käyttötunneilla on merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksuaikaan ja sitä kautta kannattavuuteen. Käyttötunnit luonnollisesti vaikuttavat tuotetun biohiilen, energian ja hiilikrediittien määrään ja sitä kautta investoinnin tuottoihin. Investointia suunniteltaessa lieneekin perusteltua tehdä herkkyystarkastelua pyrolyysiyksikön käyttötunneilla, kun realistiset energian, biohiilen ja hiilikrediitin hinnat on määritelty. Käyttötunneilla tehtävällä herkkyystarkastelulla voidaan määrittää pyrolyysiyksikön kannattava minimikäyttöaste.

Tuotetun lämmön hukkaaminen ei ole kestävä. Hidaspyrolyysi edellyttää syötteiltä korkeaa kuiva-ainepitoisuutta, joten yksi mahdollisuus lisätä pyrolyysiyksikön käyttötunteja olisi käyttää ylimääräistä pyrolyysilämpöä märkien syötteiden kuivaamiseen esimerkiksi kesäaikana. Tämä edellyttäisi investointia kuivausteknologiaan, eikä tätä konseptia tämän työn yhteydessä tarkasteltu tarkemmin.

Tulosten perusteella biohiilituotanto olisi tässä työssä tarkastelluilla laitteistoilla kannattavaa myös lämpöä myyville energiayrittäjille, joiden lämmöntuotannon tarve takaa pyrolyysilaitteiston korkean käyttöasteen. Investoinnin kannattavuuden arvioinnin kannalta olisi mielenkiintoista verrata pyrolyysilaitteiston takaisinmaksuaikaa teholtaan vastaavan, mutta investointikustannuksiltaan pienemmän hakelämpökattilan takaisinmaksuaikaan. Minkälaista lisäarvoa biohiilituotanto tuo lämmöntuotannolle?

Biohiilituotannon sitomien CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonnien myynti vapaaehtoisilla päästökompensaatiomarkkinoilla on maatalolle uusi, ja odotettukin ansaintamahdollisuus (Turtiainen, 2023, s. 51). Kompensaatiomarkkinoilla mukana olevien hankkeiden hiilensidonta on kuitenkin sertifioitava ennen hankkeiden markkinoille pääsyä. Biohiilituotannon sertifiointi edellyttää tutustumista vapaaehtoisilla kompensaatiomarkkinoilla käytettävien sertifikaattien kriteereihin. Opinnäytetyössä tehdyn selvityksen perusteella biohiilituotannolla ilmakehästä poistettuja CO<sub>2</sub>-ekvivalenttonneja myydään mm. puro.earth-markkinapaikalla. Kyseisellä markkinapaikalla kompensaatiota myyvät hankkeet on sertifioitu CORC-sertifikaatilla. Tämän opinnäytetyön tavoitteena ei ollut vapaaehtoisiin päästökompensaatiohankkeisiin syventyminen, mutta asia herätti hankkeiden kohderyhmässä mielenkiintoa. Jatkoselvitettäväksi jäi, voisiko maatala

esimerkiksi saada biohiilituotannolla ja kasvihuonekaasuja sitovalla biohiilen maatalouskäytöllä korkeampaa hintaa myytävistä hiilikrediiteistä. Kiinnostava ajatus on myös tuotettujen hiilikrediittien käyttäminen maatilalla, tai maatalouden tuotteista jalostettujen elintarvikkeiden hiilijalanjäljen pienentämiseen. Tuleeko tähän kehittymään jonkinlaisia mekanismeja, ja millaista taloudellista hyötyä ne voivat maatilalle tarjota?

Vaikka biohiiltä on viime vuosina tutkittu paljon ja monelta kannalta, biohiilimarkkina vaikuttaa toistaiseksi kehittyneen lähinnä puupohjaisen biohiilen ympärille. Tutkimustiedon perusteella muista biosivuvirroista valmistettava biohiili eroaa ominaisuuksiltaan ja koostumukseltaan puupohjaisista sivuvirroista valmistetusta biohiilestä. Myös optimaalinen pyrolyysilämpötila saattaa olla jotain muuta kuin puupohjaisten syötteiden kohdalla. Tuotekehitykselle ja edelleen myös tutkimukselle näyttäisi olevan tarvetta, mikäli näitä muita biopohjaisia sivuvirtoja halutaan kaupallisesti hyödyntää pyrolysoimalla niitä biohiileksi. Muista sivuvirroista valmistetun biohiilen pääasialliset käyttösovellukset poikkeavat mahdollisesti puupohjaisen biohiilen käyttösovelluksista.

Tämän opinnäytetyön tuotoksia on hyödynnetty HAMK Bio -tutkimusyksikön kahdessa sivu- ja jätevirtojen hyödyntämistä edistävässä hankkeessa. Tuotoksista ovat hyötäneet hankkeissa mukana olevat maatilat, joille on tuotettu tietoa biohiilituotannosta innovatiivisena maatalojen ansaintamahdollisuutena. Kiinnostuneille tiloille on tehty alustavaa teknis-taloudellista tarkastelua maatilamittakaavan biohiilituotannosta ja biohiilen käyttömahdollisuuksista. Kehittämistyön tietoperustaa sekä kannattavuuslaskuria voidaan hankkeissa edelleen käyttää samaan käyttötarkoitukseen. Tilaajalta saadun palautteen mukaan työn tuotoksille on käyttöä tuleviakin hankkeita silmällä pitäen.

Vaikka opinnäytetyöni aihe tuntui alkuun hyvin rajatulta ja kohdennetulta, biohiilen ajankohtaisuus, monipuoliset käyttömahdollisuudet, sivutuotteet, kehittyvä teknologia sekä ilmasto vaikutukset johdattelivatkin perehtymään hyvin laajaan aihekokonaisuuteen. Mukavinta, kehittävintä ja samalla haastavinta oli laatia keräämäni teoriaan perustuva biohiiliihminen tietoisuus KieMaRa-hankkeen työpajaan. Esityksen valmistelu ja laatiminen kasasivat ajatuksia. Sekä työpajan suunnittelutyö että toteutus auttoivat tunnistamaan mahdollisia tilakohtaisia biohiilikonsepteja. Työpajan kautta pääsin keskustelemaan

biohiilituotannosta kiinnostuneiden maatilayrittäjien kanssa mahdollisista biohiilikonsepteista. Hankkeissa maatilamittakaavan biohiilikonseptien kehittämistyötä jatketaan edelleen tämän opinnäytetyön valmistumisen jälkeen. Koenkin opinnäytetyön aihevalinnan onnistuneena. Työtä tehdessä huomasin, että olen tekemisissä hyvinkin ajankohtaisen ja kiinnostusta herättävän aiheen kanssa. Opinnäytetyöprosessin aikana olen oppinut paljon uutta biohiilestä, pyrolyysista, lämmöntuotannosta ja hiilikrediiteistä, ja uskon, että näistä opeista on hyötyä myös jatkossa. Lopputuotoksiin olen tyytyväinen. Investoinnin kannattavuuden arviointiin ja maatilalla biohiilikonseptin sekä arvoketjun rakentamiseen liittyen jäi toki kehitettävää, mutta tähän loppupohdintaan sain mielestäni hyvin jatkotyöstettäviä asioita kirjattua.



## Lähteet

- Alakangas, E. (2000). *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. VTT Tiedotteita 2045. Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Amonette, J. E., Woolf, D., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1(5), 1-9.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Ariterm Oy. (2020). *Puulämmitys*. Ariterm Oy.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Elsevier Science & Technology.
- Biochar Solutions Inc. (2011a). *Biochar solutions – Overview*.  
<http://www.biocharsolutions.com/overview.html>
- Biochar Solutions Inc. (2011b). *Biochar solutions – Overview* [kuva].  
<http://www.biocharsolutions.com/overview.html>
- Bioenergia ry. (2022a). *Biohiili*. Käyttökohteet.  
<https://www.bioenergia.fi/biohiili/#kayttokohteet>
- BioMacon GmbH. (2020a). *Pyrolysis Boiler – Farm Edition*. Haettu 25.10.2022 osoitteesta  
<https://www.biomacon.com/farm-edition?lang=en>
- BioMacon GmbH. (2020b). *Pyrolysis Boiler – Farm Edition*. [kuva]. Haettu 25.10.2022 osoitteesta <https://www.biomacon.com/farm-edition?lang=en>
- BioMacon GmbH. (n.d.-a). *BioMacon Decarbo energy C160-F*. Haettu 2.1.2023 osoitteesta  
[https://www.biomacon.com/files/ugd/7072b5\\_503e3e15a8304ef5bc730c286b0571ee.pdf](https://www.biomacon.com/files/ugd/7072b5_503e3e15a8304ef5bc730c286b0571ee.pdf)

BioMacon GmbH. (n.d.-b). *BioMacon Decarbo energy – Biogenic solid fuel requirements.*

Haettu 2.1.2023 osoitteesta

[https://www.biomacon.com/files/ugd/7072b5\\_79529119d2264e3d89f114d29e0e13d5.pdf](https://www.biomacon.com/files/ugd/7072b5_79529119d2264e3d89f114d29e0e13d5.pdf)

BioMacon GmbH. (n.d.-c). *BioMacon Decarbo energy C40-F.* Haettu 7.2.2023 osoitteesta

[https://www.biomacon.com/files/ugd/1fc82b\\_3d5f140f74e04bfe91fa52341bacd37f.pdf](https://www.biomacon.com/files/ugd/1fc82b_3d5f140f74e04bfe91fa52341bacd37f.pdf)

BioMacon GmbH. (n.d.-d). *BioMacon Decarbo energy C63-F.* Haettu 7.2.2023 osoitteesta

[https://www.biomacon.com/files/ugd/1fc82b\\_37000804c88d45789ca2b7f9be2224e2.pdf](https://www.biomacon.com/files/ugd/1fc82b_37000804c88d45789ca2b7f9be2224e2.pdf)

Boateng, A. A., Garcia-Perez, M., Masek, O., Brown, R., del Campo, B. (2015). Teoksessa J. Lehmann & S. Joseph (toim.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation.* (763-794). Taylor & Francis Group.

Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M. L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., . . . Novak, J. (2019). Biochar, soil, and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N<sub>2</sub>O emissions: A meta-analysis. *The Science of the total environment*, 651(2), 2354-2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>

Brännström, H., Finni, S., Katajajuuri, J-M., Kilpeläinen, P., Korpinen, R., Kotilainen, T., Luostarinen, S., Rasa, K., Rasi, S., Saastamoinen, M., Saranpää, P. (koonnut). (2021). *Suomen biotalousstrategian päivitykseen liittyvä selvitys metsä- ja agrobiotalouden sivuvirroista ja niiden hyödyntämisestä.* Luonnonvarakeskus.

Bloomberg Cities Network. (19.2.2021). *Solution Spotlight: Turning garden waste into a carbon sink in Stockholm.* John Hopkins University.

<https://bloombergcities.jhu.edu/news/solution-spotlight-turning-garden-waste-carbon-sink-stockholm>

- Business Tampere. (9.8.2019). *Tampereen seudulla rakennetaan cleantechin menestystarinoita*. Tampereen kaupunkiseudun virallinen yrityspalvelusivusto. <https://businesstampere.com/fi/tampereen-seudulla-rakennetaan-cleantechin-menestystarinoita/>
- Campbell, R., Anderson, N., Daugaard, D., Naughton, H. (2018). Financial viability of biofuel and biochar production from forest biomass in the face of market price volatility and uncertainty. *Applied Energy* 230(1). 330-343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.085>
- Campuzano, F., Brown, R. C., & Martínez, J. D. (2019). Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable & sustainable energy reviews*, 102(1), 372-409. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014>
- Carbofex Oy. (n.d.). *World class biochar production facilities made in Finland*. Remove CO<sub>2</sub> by converting waste biomass into energy. <https://carbofex.fi/>
- Carvalho, J., Nascimento, L., Soares, M., Valério, N., Ribeiro, A., Faria, L., Silva, A., Pacheco, N., Araújo, J., & Vilarinho, C. (2022). Life Cycle Assessment (LCA) of Biochar Production from a Circular Economy Perspective. *Processes*, 10(12), 2684. <https://doi.org/10.3390/pr10122684>
- Compensate Operations Oy. (2021a). *Project: Soil carbon with biochar*. <https://www.compensate.com/projects/carbonfuture>
- Compensate Operations Oy. (2021b). *Project: Sonnenerde biochar*. <https://www.compensate.com/projects/sonnenerde-biochar>
- Compensate Operations Oy. (2021c). *Start your journey to carbon negative today*. <https://store.compensate.com/>

Cowie, A., Woolf, D., Gaunt, J., Brandao, M., de la Rosa, R-A. & Cowie, A. (2015). Biochar, carbon accounting and climate change. Teoksessa J. Lehmann & S. Joseph (toim.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. (763-794). Taylor & Francis Group.

DREVARI.SK s.r.o. (n.d.). *Puutavara. Määrä → Paino*. [Timberpolis -laskuri].

<https://www.timberpolis.fi/calc-timber-weight.php#goToPage>

EBC. (2020). *Certification of the carbon sink potential of biochar*. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c\\_en\\_sink-value\\_5.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c_en_sink-value_5.pdf)

EBC. (2022). *European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar*. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland.

[https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version\\_en\\_10\\_1.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf)

EBC. (n.d.). *The European biochar certificate*. <https://www.european-biochar.org/en>

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *The butterfly diagram: visualising the circular economy*

[kuva]. <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>

Ellen MacArthur Foundation. (n.d.-a). *Circulate products and materials*.

<https://ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials>

Ellen MacArthur Foundation. (n.d.-b). *The biological cycle of the butterfly diagram*.

<https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-biological-cycle-of-the-butterfly-diagram>

Elo, A. (2017). *Biohiilen monet mahdollisuudet*. [PowerPoint -esitys]. Uusiutuvien

energiamuotojen päivät. [https://lab.fi/sites/default/files/2018-](https://lab.fi/sites/default/files/2018-06/Biohiilen%20monet%20mahdollisuudet.pdf)

[06/Biohiilen%20monet%20mahdollisuudet.pdf](https://lab.fi/sites/default/files/2018-06/Biohiilen%20monet%20mahdollisuudet.pdf)

Elo, A. (2020). *Biohiili*. [PowerPoint -esitys]. Hämeen ammattikorkeakoulu. Haettu 15.11.2022 osoitteesta <https://aoe.fi/api/download/biohiili-1603697789439.pdf>

Elo, A., Nummela, J. & Kymäläinen, M. (2021). *Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-Hämeessä*. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-835-0>

Elintarviketurvallisuusvirasto EVIRA. (n.d.). *Kansallinen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo*. Haettu 5.12.2022 osoitteesta [https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yritykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo\\_konsolidoitu\\_22\\_11\\_2019.pdf](https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yritykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo_konsolidoitu_22_11_2019.pdf)

Energiavirasto. (n.d.-a). *Päästöoikeuksien ilmaisjako*. <https://energiavirasto.fi/paastooikeuksien-ilmaisjako>

Energiavirasto. (n.d.-b). *Päästöoikeuksien huutokauppa*. <https://energiavirasto.fi/huutokauppa>

Euroopan komissio. (2019). *Ohjeita biomassan kaskadikäytöstä ja valikoituja esimerkkejä puumaista biomassaa koskevista parhaista toimintatavoista*. Euroopan unioni. <https://op.europa.eu/s/ybHq>

Euroopan komission asetus (EU) N:o 142/2011 muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveyssäännöistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 1069/2009 täytäntöönpanosta sekä neuvoston direktiivin 97/78/EY täytäntöönpanosta tiettyjen näytteiden ja tuotteiden osalta, jotka vapautetaan kyseisen direktiivin mukaisista eläinlääkärintarkastuksista rajatarkastusasemilla. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=celex%3A32011R0142>

- Fidel, R. B., Laird, D. A., Thompson, M. L., & Lawrinenko, M. (2017). Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere (Oxford)*, 167(1), 367-373.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.151>
- Finnwatch ry. (2021). *Anekauppaa vai ilmastotekoja? Vapaaehtoisen päästökompensaation kysyntä, tarjonta ja laatu Suomessa*. Finnwatch ry.  
[https://finnwatch.org/images/reports\\_pdf/Anekauppaa\\_vai\\_ilmastotekoja\\_small\\_size.pdf](https://finnwatch.org/images/reports_pdf/Anekauppaa_vai_ilmastotekoja_small_size.pdf)
- Fortum Oyj. (1.6.2021). *Fortum myy enemmistöosuuden Puro.earth -startupistaan Yhdysvaltojen Nasdaq-pörssille*. <https://www.fortum.fi/media/2021/06/fortum-myy-enemmistöosuuden-puroearth-startupistaan-yhdysvaltojen-nasdaq-porssille>
- Hagner, M., Sarvi, M., Rasa, K. & Keskinen, R. (2019). *Kasviperäiset pyrolyysituotteet lietelannan ravinnearvon turvaajina (PYSTI) – lainsäädäntöselvitys*. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019081924645>
- Hannola, T. 2007. *Aktiivihielessä etenevän adsorptiorintaman etenemisen mittaaminen puolijohdekaasuanturien avulla*. [Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto].  
<https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20071378>
- Hellström, E. (10.10.2018). *Mitä tulee bio- ja kiertotalouden jälkeen? Kiertotalous*.  
<https://www.sitra.fi/blogit/mita-tulee-bio-ja-kiertotalouden-jalkeen/>
- Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. (8.2.2021). *Jätevesilietteen ravinteet ja hiili turvalliseen kiertoon pyrolyysilaitoksen avulla* [video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=lgP32gP94IA>
- Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. (n.d.-a). *Jäteveden ravinteiden ja hiilen kokonaisvaltainen talteenotto (RAHI 2)*. <https://www.hsy.fi/ymparistotieto/projektit-ja-hankkeet/rahi-hanke/>

- Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. (n.d.-b). *Prosessikuvaus*. Haettu 14.2.2023 osoitteesta <https://www.hsy.fi/lietehiilihanke/prosessi/>
- Hjelmsäters Egendom. (2022). *Klimatkompensera*. Haettu 9.12.2022 osoitteesta <https://www.biokol.se/klimatkompensera-utslappsrafter-kolsanksrafter/>
- Hämeen ammattikorkeakoulu HAMK. (n.d.-a). *KieMaRa*. Kokonaisvaltaisesta kiertotaloudesta maaseudun elinvoiman rakennuspalikoita. Haettu 18.3.2023 osoitteesta <https://www.hamk.fi/projektit/kiemara/>
- Hämeen ammattikorkeakoulu HAMK. (n.d.-b). *FiksuHiili*. Haettu 21.2.2023 osoitteesta <https://www.hamk.fi/projektit/fiksuhiili/>
- Härkönen, M. (2012). *Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpökattiloissa*. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-6602-34-9>
- Ippolito, J.A., Cio, L., Kammann, C., Wrange-Mönnig, N., Estavillo, J.M., Fuertes- Mendizabal, T., Cayuela, M.L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K. & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* 2, 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Jirka, S. & Tomlinson, T. (2014). *2013 State of Biochar Industry*. International Biochar Initiative (IBI).
- Jonsson, P. (22.3.2021). *Pioneers on biochar – visit to a biochar production farm*. Forestry SkogsForum. <https://www.forestry.com/editorial/pioneers-biochar-visit-biochar-production-farm/>
- Junkala, J. (17.2.2023). *Löytyykö maailman merkittävien hiilidioksidin sitoja tulevaisuudessa Nokialta?* Business Nokia. <https://businessnokia.fi/yritystarinoita/carbofex-oy/>

- Kalu, S. (2022). *Long-term effects of biochars as a soil amendment in boreal agricultural soils*. [Väitöskirja, Helsingin yliopisto]. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-8233-3>
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T.J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
- Katso kuinka vedenkäytössä voidaan pitkällä aikavälillä säästää jopa 13 miljardia euroa. (2014). *Suomela.fi*. <https://www.suomela.fi/rakentaminen/Vesi-vesijarjestelmat-1/nain-vedenkaytossa-voidaan-13-miljardia-euroa-73470>
- Kirjokivi, T. (2018). *Biohiilisuodatin hulevesien käsittelyssä*. [Opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805147991>
- Laird, D., Rogovska, N. (2015). *Biochar effects on nutrient leaching*. Teoksessa J. Lehmann & S. Joseph (toim.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. (521-542). Taylor & Francis Group.
- Leppäkoski, L. (18.8.2021). Pyrolyysituotteiden monet käyttökohteet. *LAB Pro*. <https://www.labopen.fi/lab-pro/pyrolyysituotteiden-monet-kayttokohteet/>
- Lyckanhub. (2022a). Maaseudun tulevaisuutta kehittämässä. <https://www.lyckanhub.fi/>
- Lyckanhub. (2022b). *Biokiertoaloudesta ekologista elinvoimaa*. <https://www.lyckanhub.fi/biokiertoalous/>
- Maa- ja metsätalousministeriö. (n.d.). *Lannoitevalmisteet*. <https://mmm.fi/elaimet-kasvit/lannoitevalmisteet>
- Maaseudun sivistysliitto. (2021). *Biohiiletys*. <https://msl.fi/ymparisto/kaytannon-ymparistotekoja/biohiiletys/>



Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiaho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A., zu Castell-Rudenhansen, M. (2017). *Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa: Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-437-3>

Miksei Oy. (n.d.). *Huky- hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö*.

<https://mikseimikkeli.fi/hankkeet/huky-hulevesien-kasittelyn-tk-ymparisto/>

Motiva Oy. (21.7.2020). *Käyttövesi*.

[https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnittelu/kayttovesi](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/kayttovesi)

Msika, J. (2020). *A review of pyrolysis and biochar as climate-positive biomass technologies for the Scottish Uplands*. Climate-positive farming reviews. The James Hutton Institute.

<https://www.hutton.ac.uk/sites/default/files/files/publications/ClimPosReview-Biochar-Msika2020.pdf>

Nasdaq Inc. (2023). *Leading the world in Carbon Removal – Puro.earth: The World’s Leading Carbon Removal Platform*. <https://www.nasdaq.com/solutions/carbon-removal-marketplace>

Niemi, J. (2018). *Biohiilen käyttö suodattimissa*. [kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2018083034332>

Nordic Biochar Network. (2018). *Nordic Biochar Map*. [karttapalvelu]. Haettu 9.12.2022 osoitteesta <https://www.nordicbiochar.org/about-us/map/>

Nordregio. (29.6.2018). *Stockholm Biochar Project*.

[https://nordregio.org/sustainable\\_cities/stockholm-biochar-project/](https://nordregio.org/sustainable_cities/stockholm-biochar-project/)

Palomaa, A. (11.7.2019). Tampereella tehdään biohiiltä ja kaukolämpöä ensimmäisten joukossa maailmassa – uusi laitos kymmenkertaistaisi tuotannon. *YLE Uutiset*.  
<https://yle.fi/a/3-10873372>

Peltonen, S., Hagner, M., Rätty, M. & Keskinen, R. (2020). *Lietteiden happokäsittely vähentää ammoniakkipäästöjä*. Käytännön Maamies KM. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20201211100372>

Pietilä, R. (toim.), Hagner, M., Heiskanen, J., Juutinen, M., Lahtinen, T., Liwata-Kenttälä, P., Mäkitalo, K., Nuottimäki, K., Peltola, R., Ruhanen, H., Sarala, P., Seitsaari, M., Tornivaara, A. & Uusitalo, M. (2020). *Biopeitto-projekti. Biohiilen hyödyntäminen kaivannaisjätteiden peittomateriaaleissa ja viherrakentamisessa*. Tutkimustyöraportti 51/2020. Geologian tutkimuskeskus. [https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/51\\_2020.pdf](https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/51_2020.pdf)

ProAgria. (2023). *KieMaRa - Kokonaisvaltaisesta kiertotaloudesta maaseudun elinvoiman rakennuspalikoita*. Haettu 18.3.2023 osoitteesta  
<https://www.proagria.fi/hankkeet/kiemara-kokonaisvaltaisesta-kiertotaloudesta-maaseudun-elinvoiman-rakennuspalikoita>

ProAgria Keskusten Liitto. (2016). *Ravinteet ja energia käyttöön – Investointituet energiasta maataloille*. Haettu 16.2.2023 osoitteesta  
<https://energiayrittajyys.fi/?q=content/investointituet-energiasta-maataloille>

Puro.earth. (2021a). *Biochar – Finland*. <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/biochar-finland-100008>

Puro.earth. (2021b). *Biochar in Sweden, Hjelmsätters Egendom*. <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/biochar-in-sweden-hjelmsaeters-egendom-100026>

Pyreg GmbH. (n.d.-a) *Premium carbonization technology for a valuable business proposition*.  
<https://pyreg.com/our-technology/>

- Pyreg GmbH. (n.d.-b). *Biomass*. [https://pyreg.com/wp-content/uploads/210423\\_broschuere\\_biomasse\\_EN.pdf](https://pyreg.com/wp-content/uploads/210423_broschuere_biomasse_EN.pdf)
- Pöyry Finland Oy. (2019). *Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen*. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. Suomen Vesilaitosyhdistys ry.
- 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 capacity? *Biomass and Bioenergy*, (119), 346–353. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.004>
- Rasa, K. (2021). Hidas pyrolyysi osana kiertotalouden arvoketjua. Teoksessa P. Saranpää (koonnut), *Suomen biotalousstrategian päivitykseen liittyvä selvitys metsä- ja agrobiotalouden sivuvirroista ja niiden hyödyntämisestä*. Luonnonvarakeskus. (6-8).
- Red Gardens. (2019). *Finally making biochar*. [video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=IZIJSO8RNAY>
- Riikonen, A. (2019). *Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa*. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:19. Helsingin kaupunki.
- Rubin, R.L., Anderson, T.R. & Ballantine, K.A. (2020). Biochar Simultaneously Reduces Nutrient Leaching and Greenhouse Gas Emissions in Restored Wetland Soils. *Wetlands* 40, 1981–1991. <https://doi-org.ezproxy.hamk.fi/10.1007/s13157-020-01380-8>
- Ruokavirasto. (2023). *Maatalouden investointituet*. Haettu 16.2.2023 osoitteesta <https://www.ruokavirasto.fi/tuet/maatalous/investoinnit/maatalouden-investointituet/>

Ruokavirasto. (n.d.-a). *Lannoitteiden ja lannoitevalmisteiden laatuvaatimukset*. Haettu 5.12.2022 osoitteesta

<https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/>

Ruokavirasto. (n.d.-b). *Usein kysytyt kysymykset*. Haettu 5.12.2022 osoitteesta

<https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/usein-kysytyt-kysymykset/>

Ruokavirasto. (n.d.-c). *Haitalliset aineet*. Haettu 5.12.2022 osoitteesta

<https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/>

Ruokavirasto. (n.d.-d). *Lannan käyttö ja käsittely*. Haettu 5.12.2022 osoitteesta

<https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/lannan-kaytto-ja-kasittely/>

Ruokavirasto. (n.d.-e). *CE-merkittyjen lannoitevalmisteiden valmistus*. Haettu 2.1.2023

osoitteesta [https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/Tuoteluokat\\_ja\\_ainesosaluokat/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/Tuoteluokat_ja_ainesosaluokat/)

Sahimaa, O. (23.3.2021). Leena-Aarikka-Stenroos, Tampereen yliopisto: *Eriyiset*

*kiertotalouden ekosysteemit*. [audiopodcast]. Spotify.

<https://open.spotify.com/episode/1zsuSlBr2vQmt9BFp51B41?si=9AR7KGJLRC24TY1SAH8dHw>

Salo, E. (2018). *Current state and future perspectives of biochar applications in Finland*. [Pro

gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201801261337>

Salo, E. (2019). *Biohiili Suomessa*. [PowerPoint -esitys]. Haettu 15.12.2022 osoitteesta

<https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Esko-Salo.pdf>

Savonia ammattikorkeakoulu. (21.12.2021). *Hannu Viitala: 15 Investoinnin*

*kannattavuuslaskentamenetelmät*. [video]. Media Savonia.

<https://media.savonia.fi/View.aspx?id=50863~5j~C4GPS8vCwn&code=T8~jMrDdLe5AUIFUxQoyNjvDbT7OvCqBjvZDC8VwktgHqRxiMjxFO6Y6MnpAzOWV4HFJN15NKrW6yEnkD&ax=7u~axlaQfQbyRJS2>

Schmidt H-P, Hagemann N, Draper K, Kammann C. (2019). The use of biochar in animal feeding. *PeerJ* 7:e7373. <https://doi.org/10.7717/peerj.7373>

Schmidt, H-P., Wilson, K. (2014). *The 55 uses of biochar*. The Biochar Journal. [www.biochar-journal.org/en/ct/2](http://www.biochar-journal.org/en/ct/2)

Siipola, V., Källi, A., Wendling, L., Karlsson, M., Björnström, M. & Koukkari, P. (2019).

*Biohiilen valmistus ja käyttö vedenpuhdistukseen – metsäteollisuuden sivuvirtojen jatkojalostus ja hyödyntäminen ei-energiakäyttöön*. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. (2019). *Biohiili parantaa ravinteiden kiertoa ja hiilensidontaa*. <https://www.sitra.fi/caset/biohiili-parantaa-maaperan-ravinteiden-kiertoa-ja-hiilensidontaa-2/>

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. (n.d.). *Biotalous on kestävä ratkaisu*. <https://www.sitra.fi/aiheet/biotalous/#biotalous-on-kestava-ratkaisu>

Sohlo, M. (25.11.2022). *Biohiili peltojen maanparannuksen ja päästökaupan näkökulmasta*. <https://www.proagriaoulu.fi/fi/biohiili/>

Soilcare Oy. (n.d.-a). *Valmistus ja teknologia*. <https://soilcare.fi/valmistus-ja-teknologia/>

Soilcare Oy. (n.d.-b). *Valmistus ja teknologia*. [kuva]. <https://soilcare.fi/valmistus-ja-teknologia/>

Standard Biochar Corporation. (n.d.). *Our technology*.

<https://www.standardbiocarbon.com/our-tech-partner>

STT Viestintäpalvelut Oy. (10.11.2022). *GRK rakentaa nopeassa tahdissa useita*

*biohiililaitoksia kaikkiin toimintamaihinsa – Suomeen ensimmäiset keskikokoiset laitokset.* <https://www.sttinfo.fi/tiedote/grk-rakentaa-nopeassa-tahdissa-useita-biohiililaitoksia-kaikkiin-toimintamaihinsa-suomeen-ensimmaiset-keskikokoiset-laitokset?publisherId=69819211&releaseId=69956952&lang=fi>

Suopajarvi, H. (2013). *Biomaterian prosessointitavat: esikäsittelyt, termokemiallinen*

*konversio ja käyttö masuunissa. Bioreducer: Biomateriapohjaisen pelkistysaineen mahdollisuudet.* Oulun yliopisto, Prosessimetallurgian laboratorio.

Tan, H., Lee, C T., Ong, P. Y., Wong, K. Y., Bong, C. P. C., Li, C. & Gao, Y. (2021). A Review On

The Comparison Between Slow Pyrolysis And Fast Pyrolysis On The Quality Of Lignocellulosic And Lignin-Based Biochar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1051(1), 012075. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1051/1/012075>

Tevä-Helminen, V. (2013). *Investointilaskenta ja päätöksenteko.* [Opetusmoniste].

Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Thomsen, T. (2022). *Introduction to Production and Use of Biochar 2022: working towards a*

*more circular and bio-based Danish economy.* Roskilde Universitet.

Tieteen termipankki. (2016). Taloustiede: arvoketju. Tieteen termipankki.

<https://tieteentermipankki.fi/wiki/Taloustiede:arvoketju>

Tilastokeskus. (n.d.). Ostetun lämmitysenergian hinta asumisessa. Valitut muuttujat: erillinen

pientalo, kaukolämpö, sähkö, öljy, 2021M01-2022M10. Saatavilla osoitteessa:

[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ehi/statfin\\_ehi\\_pxt\\_13nl.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehi/statfin_ehi_pxt_13nl.px/table/tableViewLayout1/)

Turtiainen, M. (2023). Tuoko hiilikompensaatio uutta tulovirtaa maataloille? *Käytännön maamies KM*, 2023, (1), 50–51.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). (n.d.-a). REACH - Rekisteröinti, luvat ja rajoitukset. <https://tukes.fi/kemikaalit/reach#609e728d>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). (n.d.-b). Usein kysyttyä kemikaaleista. Haettu 5.12.2022 osoitteesta <https://tukes.fi/tietoa-tukesista/usein-kysytyt-kysymykset/kemikaalit>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES). (n.d.-c). Toimijat ja velvoitteet. <https://tukes.fi/kemikaalit/clp-luokitus-merkinnat-ja-pakkaaminen/toimijat>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (1.4.2022). *Biotalousstrategia 2022–2035 – kestävästi kohti korkeampaa arvonlisää*. Biotalous.fi -verkkosivusto. <https://www.biotalous.fi/biotalousstrategia-2022-2035-kestavasti-kohti-korkeampaa-arvonlisaa/>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (n.d.). *Päästökauppa*. <https://tem.fi/paastokauppa>

Valonia. (2020). *Katsaus päästökompensaatiopalveluihin*.

<https://valonia.fi/materiaali/katsaus-paastokompensaatiopalveluihin/>

Valtioneuvosto. (2021a). *Uusi suunta. Ehdotus kiertotalouden strategiseksi ohjelmaksi*.

Valtioneuvoston julkaisuja 2021:1. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-658-7>

Valtioneuvosto. (2021b). *Uusi suunta. Ehdotus kiertotalouden strategiseksi ohjelmaksi*

[kuva]. Valtioneuvoston julkaisuja 2021:1. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-658-7>

Valtioneuvosto. (30.9.2022). *Selvitys: Vapaaehtoisten päästökompensaatioiden kaksoislaskentaa voidaan välttää eri tavoin*. <https://valtioneuvosto.fi/>

[/1410903/selvitys-vapaaehtoisten-paastokompensaatioiden-kaksoislaskentaa-voidaan-valttaa-eri-tavoin-](#)

Valtioneuvoston asetus maatalouden rakennetuesta 240/2015.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150240>

Vantaan Energia. (4.10.2022). *Vantaan Energian suunnittelema aktiivihiililaitos avaisi uuden arvoketjun materiaalikierrätykseen ja tuottaisi hiilineutraalia lämpöä ja aktiivihiiltä.*

<https://www.vantaanenergia.fi/vantaan-energian-suunnittelema-aktiivihiililaitos-avaisi-uuden-arvoketjun-materiaalikierrätykseen-ja-tuottaisi-hiilineutraalia-lampoa-ja-aktiivihiilta/>

Vuori, E. & Kangas, N. (9.3.2017). *Ihmeaine Biohiili.* <https://puutarhakauppa.fi/ihmeaine-biohiili/>

Wahlberg-Roslund, C. (18.1.2022). *Biomassa till energi och biokol – en effektivare råvaruanvändning med multifunktion för ett klimatsmart jordbruk.*

<http://cevaro.se/biomassa-till-energi-och-biokol-en-effektivare-ravaruanvandning-med-multifunktion-for-ett-klimatsmart-jordbruk/>

Wang, D., Jiang, P., Zhang, H., & Yuan, W. (2020a). Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. *The Science of the total environment*, 723(1), 137775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775>

Wang, D., Jiang, P., Zhang, H., & Yuan, W. (2020b). Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. [kuva]. *The Science of the total environment*, 723(1), 137775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775>

Wilson, K. (31.10.2014). *How biochar works in soil.* The Biochar Journal 2014. Arbaz, Switzerland. [www.biochar-journal.org/en/ct/32](http://www.biochar-journal.org/en/ct/32)

Yara Suomi. (n.d.). *Hivenravinteet.* <https://www.yara.fi/lannoitus/hivenravinteet/>



## Liite 1: KieMaRa-hankkeelle laaditun biohiilitietoiskun esitysdiat

# Biohiilituotantoa maatilalla

Katri Juva

HAMK Bio

24.1.2023

**HAMK** HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU  
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



## Monikäyttöinen biohiili

Biomassan hapeton kuumentaminen eli pyrolyysi → Biohiili

Biohiiltä myydään sekä suursäkeissä, että pienissä kuluttajapakkauksissa

Muutamia käyttömahdollisuuksia:

Maanparannus ja  
kasvialustat

Kompostin lisäaine

Rehun lisäaine

Lannan käsittely

Suodatinmateriaali

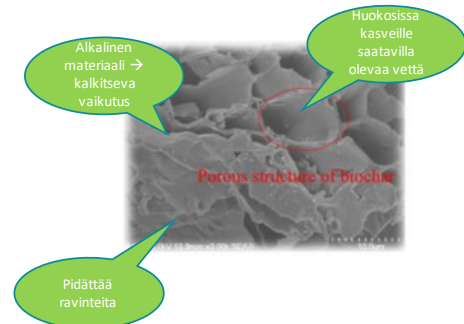
Metalliteollisuuden  
pelkistin



**HAMK** HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU  
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

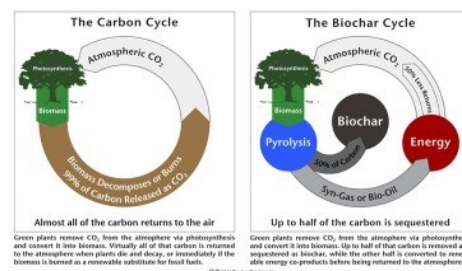
## Biohiili maanparannusaineena

- Biohiilen maaperävaikutuksia
  - Maaperän vedenpidätyskyvyn parantuminen
  - Kasveille käyttökelpoisen maaveden lisääntyminen
  - Tiettyjen ravinteiden pidättyminen ja biosaatavuus, pienempi ravinnehuuhtouma
  - Kalkitseva vaikutus
  - Juurivyöhykkeen ilmavuus, maaperän biologisen aktiivisuuden lisääntyminen
- Suurimmat sadonlisäykset todettu tropiikissa (hapan maaperä, kuivuus ja keinolannoitteiden puute)
- Esimerkiksi Ruotsissa (Hjelsäterin tila) käytännön kokemuksia biohiilellä parannettujen peltomaiden normaaleista satotasoista myös kuivuuden vaivaamina viljelyvuosina



## Biohiili hiilensitojana

- Luonnossa biomassan orgaaninen aines hajoaa hiilidioksidiksi ja vedeksi
- Biomassan pyrolyysissa eli hapettomassa kuumentamisessa, noin puolet hiilestä saadaan sidottua biohiileen
  - Pitkäketjuisista hiilirakenteista rengasmaisiin, pysyvämpiin hiilirakenteisiin
- Lisäämällä biohiiltä maahan voidaan sitoa hiiltä useiksi sadoiksi vuosiksi ja samalla parantaa maaperän kasvukuntoa



## Biohiili päästöjen kompensoinnissa

Euroopan Unionissa päästökauppaa käyvät päästökauppajärjestelmään kuuluvat teollisuus- ja energialaitokset sekä lentoliikenne

- Päästökauppasektorin yritykset ostavat päästöoikeuksia jokaista tuottamaansa hiilidioksiditonnia kohden

Päästökauppajärjestelmän rinnalle syntynyt vapaaehtoisen päästökompensaation markkina

- Yritykset voivat kompensoida oman tuotannon päästöjä ostamalla toisen toimijan sitomia CO<sub>2</sub>-tonneja
- Vapaaehtoisen päästökompensaation markkinapaikat, esimerkiksi:
  - Puro.earth – täällä biohiilen valmistajia (Carbofex, Hjelmsäterin tila)
  - Compensate (täällä myydään maanparannusta biohiilellä, <https://www.compensate.com/projects/carbonfuture> )
- 1 kg biohiiltä (C) sitoo noin 3,5 kg hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>)

## Esimerkkihankkeita Ruotsista

- Ruotsissa biohiilen hinta joulukuussa 2022 välillä 360-600 €/m<sup>3</sup> ([EnvinnBiokol tuotteet](#))
  - Biohiili kevyttä, yleensä 150 -350 kg/m<sup>3</sup> → tonnihinta karkeasti luokkaa 1500 – 2000 €

### Hjelmsäterin biohiili, Ruotsi

- Maatilalla valmistetaan biohiiltä hakkeesta, lisänä kuivurijätettä sekä rehu-/ruokajätettä
- Biohiiltä käytetty tilan peltojen maanparannukseen, ja myyty kunnille (mm. Tukholman kaupunki), yrityksille ja yhdistyksille
- Tila myy vapaaehtoista hiilikompensaatiota Puro.earth-alustalla

### Tukholman kaupunki

- Puutarhajätteestä biohiiltä Tukholman kaupungin pyrolyysiuunilla, ja sivutuotteena lämpöä kaukolämpöverkkoon
- Käyttö kaupungin puistojen ja muiden julkisten tilojen istutuksissa
  - Katualueiden puuistutuksissa biohiili auttaa hulevesien hallinnassa ja helpottaa kasvien juurten kasvua
- Tukee kaupungin tavoitetta olla hiilinegatiivinen vuoteen 2030 mennessä

# Biohiilen valmistaminen maatilamittakaavan pyrolyysiuuneilla

## Panostoimiset eli retortit

- KonTiki –avoastia
- Amacee –laitteistot
  - Pyrolyysilämmönhyödyntäminen, ottavat tisleet ja tervan talteen



## Jatkuvatoimiset pyrolyysiuunit

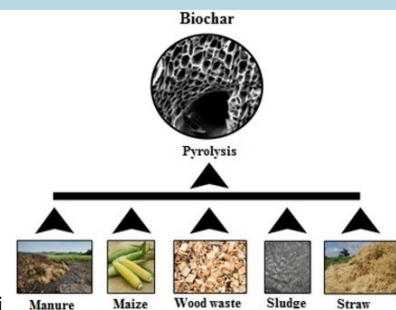
- Ruuvipohjaiset pitkälti automatisoituja, ja toiminnaltaan enemmän hakelämpökusten kaltaisia
- Pyrolyysilämmönhyödyntäminen
  - Lämmöntarpeen huomioiminen laitevalinnassa



**HAMK** HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU  
HAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Pyrolyysisyötteen

- Biohiiltä voidaan valmistaa monenlaisista biomassoista
- Kestävyyden kannalta ensisijaisesti sivuvirtapohjainen materiaali
  - Sivuvirralla korkea arvonnisa kertautuvalla sivuvirran käytöllä
- Teknisiä vaatimuksia
  - Syötteen kuiva-ainepitoisuus vähintään ~6570 %
  - Syötteen palakoolle laitekohtaisia vaatimuksia
- Syötteen koostumus ja ominaisuudet vaikuttavat biohiilen laatuun ja käyttösovelluksiin



**HAMK** HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU  
HAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

# Kiitos!

## Lähteitä

- Lehmann, J. & Joseph, Staim. (2015). Biochar for Environmental Management : Science, Technology and Implementation. Taylor & Francis Group.
- Nordic Biochar Network. (2018). Nordic Biochar Markkintapalvelu <https://www.nordicbiochar.org/abouts/map/>
- Msika, J. 2020. A review of pyrolysis and biochar as climate positive biomass technologies for the Scottish Uplands. <https://www.hutton.ac.uk/sites/default/files/files/publications/ClimPosReviewBiocharMsika2020.pdf>
- Pyreg GmbH. Biomass Esite. [https://pyreg.com/wpcontent/uploads/210423\\_broschuere\\_biomasse\\_EN.pdf](https://pyreg.com/wpcontent/uploads/210423_broschuere_biomasse_EN.pdf)
- BioMacon GmbH. [www.biomacon.com](http://www.biomacon.com) Verkkosivusto.
- SoilCareOy. Valmistus ja teknologia <https://soilcare.fi/valmistus-ja-teknologia/>
- Methator Oy. 2014. Lanta talteen kohti suljettua kiertoa. Loppuraportti
- Ruokavirasto. C-merkittyjen lannoitevalmisteiden valmistus [https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eu-ja-lannoiteasetus/tuoteluokat\\_ja\\_ainosaluokat/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eu-ja-lannoiteasetus/tuoteluokat_ja_ainosaluokat/)
- Thomsen, T. 2022 Introduction to Production and Use of Biochar 2022 working towards a more circular and bio-based Danish economy
- European Biochar Certificate. Summary of the EBC certification <https://www.europabiochar.org/en/ct/25/summary-of-the-EBC-certification>

## Kuvat:

- "Biochar Pill" by USDA.gov is marked with [Public Domain Mark 1.0](#)
- "Chicken feeding on crushed biochar in N" by GAZ Bush Control and Biomulchisation Project is licensed under [CC BY-SA 4.0](#)
- Zhang, Ran, Haoxian Wang, Jie Ji, and Hainia Wang, CC BY 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, via Wikimedia Commons [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEM\\_images\\_of\\_biochar\\_and\\_graphite.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEM_images_of_biochar_and_graphite.png)
- Carbon family nanomaterials: new applications and technologies Scientific Figure on ResearchGate Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Most-common-substrate-for-biochar-production\\_fig1\\_346762317](https://www.researchgate.net/figure/Most-common-substrate-for-biochar-production_fig1_346762317) [accessed 10 Jan, 2023] [Creative Commons Attribution 4.0 International](#)
- Kuva: CCLisenssi, <http://www.biocharsolutions.com/overview.html>
- "Oregon kilns filled with bio" by NRCS Oregon is licensed under [CC BY-ND 2.0](#)
- Sørmo E., Silvani, Thune G., Gerber H., Schmidt H.P., Botnen Smebye A., Cornelisse G. (2020). Waste timber pyrolysis in a medium scale unit: Emission budgets and biochar quality. *Science of the Total Environment*, Volume 718, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137387>. Reference under CC BY 4.0.

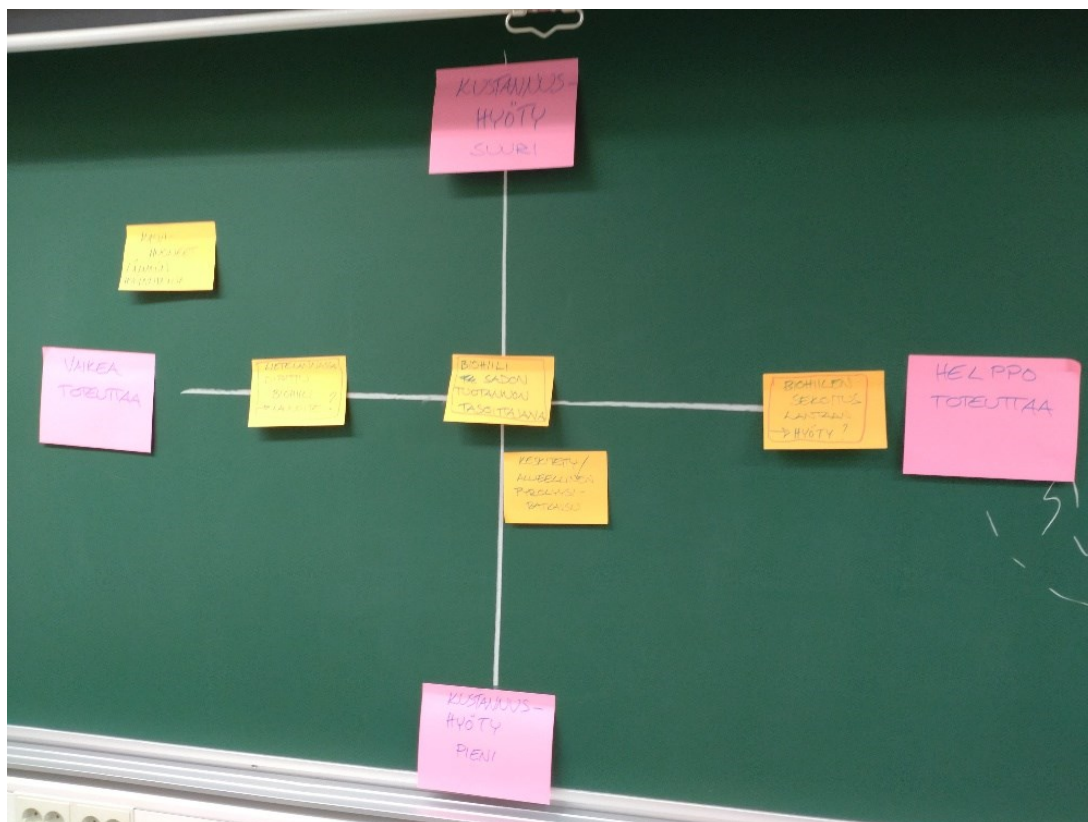
## Liite 2: KieMaRa-hankkeen yhteistoiminnallisen työpajan tiivistelmä biohiiliryhmän työpajatyöskentelystä

### Biohiilen tuotanto maatilamittakaavassa

Millaisia mahdollisuuksia mautiloilla olisi tuottaa biohiiltä? Keskustelussa oli mukana yksi maatila, biohiilituotantoa suunnittelevan GRK Suomi Oy:n edustaja sekä kaksi henkilöä Hämeen ammattikorkeakoulusta. Pienen mittakaavan jatkuvatoimisilla, biohiilen tuotantoon suunnitelluilla pyrolyysiuuneilla voidaan tuottaa lämpöenergiaa tilan omiin tarpeisiin. Tästä syystä tarkastelu keskittyi mautilalla tapahtuvaan biohiilituotantoon. Keskustelua herätti mm. se, että mautiloilla ei välttämättä muodostu riittävästi pyrolyysiyötteeksi soveltuvia biopohjaisia sivuvirtoja. Tämän pohdinnan tuloksena hahmottui kaksi skenaariota:

1. Maatila korvaa oman hake- tai klapi-kattilansa pienen mittakaavan jatkuvatoimisella pyrolyysiuunilla, ja tuottaa metsän harvennusteillä (energiapuu) biohiiltä, lämpöä omaan tarpeeseen sekä vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla myytäviä hiilikredittiejä.
2. Maatila korvaa oman hake- tai klapi-kattilansa pienen mittakaavan jatkuvatoimisella pyrolyysiuunilla, ja vastaanottaa pyrolyysiyötteitä porttimaksulla. Näitä voisivat olla esim. jätepuu tai puutarhajäte. Tila tuottaa biohiiltä, pyrolyysilämpöä omaan tarpeeseen sekä vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla myytäviä hiilikredittiejä.

Molemmissa vaihtoehdoissa nähtiin mahdollisuuksia, mutta myös haasteita. Maatilaympäristössä biohiilen potentiaalisimpina käyttökohteina nähtiin sekoittaminen liete- tai kuivalantaan, rehukäyttö, maanparannuskäyttö sekä kotieläintilojen piha-alueiden hulevesien suodattaminen. Näiden kustannushyötyjä hahmoteltiin nelikenttäanalyysin avulla:



Biohiilen valmistamisesta ja käytöstä nousi esiin seuraavia näkökulmia ja kysymyksiä:

- Olisiko pienehköllä biohiilimäärällä ostajia, vai pitäisikö kannattavuus rakentaa lämmöntuotannon ja hiilikrediittien myynnin varaan, ja käyttää biohiili omalla tilalla?
- Rehukäytön ilmastovaikutuksista liian vähän tieteellistä näyttöä. Jos ilmastohyödyt olisivat riittävän tunnettuja, sopimustuottaja voisi tulevaisuudessa esim. saada tuotteestaan jonkinlaista "ilmastolisää".
- Onko energiapuu liian arvokasta pyrolyysisyötteenä? Energiapuulle löytyy ostajia ja maksajia tällä hetkellä muualtakin.
- Jos otetaan vastaan jätteeksi luokiteltavia pyrolyysisyötettä muualta, olisi laitoksella ympäristöluvan tarve (jätteen vastaanotto, varastointi ja polttaminen).
- Onko pyrolyysiyksiköille mahdollista saada investointitukea?

Hiilikrediittien myynti vapaaehtoisen päästökompensaation markkinoilla, esimerkiksi puro.earth-alustalla, nähtiin mahdollisuutena, sillä päästöyksiköiden hinnan arveltiin lähitulevaisuudessa nousevan edelleen. Myös lisäselvitystarpeita tunnistettiin:

- Biohiili on erittäin pysyvä (> 100 vuotta), joten hiili saadaan sidottua riittävän pitkäaikaisesti myös hiilikredittinä välittävän puro.earthin kriteerien näkökulmasta.
- Hiilikrediittien myyminen olemassa olevan markkinapaikan kautta oli esimerkiksi GRK:n tapauksessa nähty parhaaksi vaihtoehdoksi, koska asiaan liittyvät monimutkaisetkin selvitystarpeet on markkinapaikan toimesta jo ratkaistu ja tehty selkeiksi.
- Biohiilen tuotannolla sidottuja hiilidioksiditonnetta voi myydä kompensatioksi, mutta olisiko jollain tavalla mahdollista, että tämän lisäksi maatila pystyisi hyötymään vielä enemmän, jos käyttäisi biohiilen ensin ympäristöystävällisellä tavalla esim. rehuna, lietelannan lisäaineena tai tilan piha-alueiden hulevesien suodatuksessa, ja hyödyntäisi käytetyn biohiilen lopulta maanparannusaineena / lannoitteena? Kaksoislaskennan ongelma, vai ehkä sittenkin mahdollisuus myydä kalliimpia hiilikredittinä?
- Hiilikrediittien myyminen markkinapaikoilla edellyttää, että hanke ja myytävä krediitti on sertifioitu markkinapaikan käyttämän sertifiointijärjestelmän mukaan. Mitä tämä edellyttää esim. puro.earth-alustalla, ja millaista sitoutumista hiilikrediittien tuottaminen tietyille markkinapaikalle edellyttää?

Maatilanmittakaavan biohiilituotannon kanssa edetään siten, että kiinnostuneille tiloille tehdään alustava kannattavuuslaskelma yhdistetystä lämmön ja biohiilen tuotannosta sekä hiilikrediittien myynnistä. Kannattavuuslaskenta on osa KieMaRa-hankkeessa työskentelevän Katri Juvan opinnäytetyötä. Toimintamallin kehittämistä jatketaan hankkeessa hakemalla vastauksia esiin nousseisiin kysymyksiin.



## Liite 3: Esimerkkituloille tehtyjen kannattavuuslaskentojen tulokset

Kannattavuuslaskentataulukko: Case 1: biohiilen tuottaminen lihanautatilan omaan käyttöön (ilman investointitukea).

Käyttötunnit	4000 h						
							Määrä
							(yks./vuos
Kustannukset ja tuotot	€ /h	€ /kWh	€ /t	€ /kpl	i	€ /vuosi	
<b>Muuttuvat kustannukset</b>							
Sähkö		-0,1			14000	-	1 400,00 €
Raaka-aine (tuotantokustannus)				-75	96	-	7 200,00 €
Henkilötyö	-25				260	-	6 500,00 €
Muuttuvat kustannukset yhteensä						-	15 100,00 €
<b>Tuotto</b>							
Biohiilen myynti			0		20		- €
Lämpöenergian arvo		0,1			160000		16 000,00 €
Hiilikompensaation myynti			100		60		6 000,00 €
Tuotto yhteensä							22 000,00 €
<b>Investointikustannukset</b>							
BioMacon 40 kW					93500		
Biohiilen poistojärjestelmä					15000		
Biohiilen säkitysjärjestelmä					15000		
Muut rakennuskustannukset (arvio)					120000		
Investointi yhteensä					243500		
<b>Vuotuinen nettotuotto</b>							6 900,00 €
Korkokanta	0,05						
Takaisinmaksuaika (vuotta):	#NUM!						
		Vuotuinen	Yhteenlaskettu				
Vuosi		nettotuotto S	nettotuotto				
1		6 900,00 €	-	236 928,57 €			
2		6 900,00 €	-	230 670,07 €			
3		6 900,00 €	-	224 709,59 €			
4		6 900,00 €	-	219 032,94 €			
5		6 900,00 €	-	213 626,61 €			
6		6 900,00 €	-	208 477,72 €			
7		6 900,00 €	-	203 574,02 €			
8		6 900,00 €	-	198 903,83 €			
9		6 900,00 €	-	194 456,03 €			
10		6 900,00 €	-	190 220,03 €			
11		6 900,00 €	-	186 185,74 €			
12		6 900,00 €	-	182 343,56 €			
13		6 900,00 €	-	178 684,35 €			
14		6 900,00 €	-	175 199,38 €			
15		6 900,00 €	-	171 880,36 €			
16		6 900,00 €	-	168 719,39 €			

Kannattavuuslaskentataulukko Case 1: biohiilen tuottaminen lihanautatilan omaan käyttöön  
(40 % suora investointituki)

Käyttötunnit							Määrä (yks./vuosi)	
4000 h								
Kustannukset ja tuotot	€/h	€/kWh	€/t	€/kpl	i)	€/vuosi		
<b>Muuttuvat kustannukset</b>								
Sähkö			-0,1			14000	- 1 400,00 €	
Raaka-aine (tuotantokustannus)				-75		96	- 7 200,00 €	
Henkilötyö	-25					260	- 6 500,00 €	
<b>Muuttuvat kustannukset yhteensä</b>							<b>- 15 100,00 €</b>	
<b>Tuotto</b>								
Biohiilen myynti				0		20	- €	
Lämpöenergian arvo			0,1			160000	16 000,00 €	
Hiilikompensaation myynti				100		60	6 000,00 €	
<b>Tuotto yhteensä</b>							<b>22 000,00 €</b>	
<b>Investointikustannukset</b>								
BioMacon 40 kW					93500			
Biohiilen poistojärjestelmä					15000			
Biohiilen säkitysjärjestelmä					15000			
Muut rakennuskustannukset (arvio)					120000			
<b>Investointi yhteensä 40 % tuella</b>					<b>146100</b>			
<b>Vuotuinen nettotuotto</b>							<b>6 900,00 €</b>	
Korkokanta								
	0,05							
Takaisinmaksuaika (vuotta):								
#NUM!								
<b>Vuotuinen Yhteenlaskettu</b>								
Vuosi	nettotuotto	S	nettotuotto					
1	6 900,00 €	-	139 528,57 €					
2	6 900,00 €	-	133 270,07 €					
3	6 900,00 €	-	127 309,59 €					
4	6 900,00 €	-	121 632,94 €					
5	6 900,00 €	-	116 226,61 €					
6	6 900,00 €	-	111 077,72 €					
7	6 900,00 €	-	106 174,02 €					
8	6 900,00 €	-	101 503,83 €					
9	6 900,00 €	-	97 056,03 €					
10	6 900,00 €	-	92 820,03 €					
11	6 900,00 €	-	88 785,74 €					
12	6 900,00 €	-	84 943,56 €					
13	6 900,00 €	-	81 284,35 €					
14	6 900,00 €	-	77 799,38 €					
15	6 900,00 €	-	74 480,36 €					
16	6 900,00 €	-	71 319,39 €					

Kannattavuuslaskentataulukko Case 2: biohiilituotanto pienimuotoista energiayrittäjyyttä harjoittavalla kasvinviljelytilalla (ei investointitukea).

Käyttötunnit	6240 h						
						<b>Määrä</b> (yks./vuos	
<b>Kustannukset ja tuotot</b>	€ /h	€ /kWh	€ /t	€ /kpl	i)	€ /vuosi	
<b>Muuttuvat kustannukset</b>							
Sähkö			-0,1			21840	- 2 184,00 €
Raaka-aine (tuotantokustannus)				-81		237,12	- 19 206,72 €
Henkilötyö	-25					260	- 6 500,00 €
<b>Muuttuvat kustannukset yhteensä</b>							- 27 890,72 €
<b>Tuotto</b>							
Biohiilen myynti				1200		43,68	52 416,00 €
Lämpöenergian arvo			0,09			393120	35 380,80 €
Hiilikompensaation myynti				100		131,04	13 104,00 €
<b>Tuotto yhteensä</b>							<b>100 900,80 €</b>
<b>Investointikustannukset</b>							
BioMacon 63 kW					108900		
Biohiilen poistojärjestelmä					15000		
Biohiilen säkitysjärjestelmä					15000		
Muut rakennuskustannukset (arvio)					120000		
<b>Investointi yhteensä</b>					<b>258900</b>		
<b>Vuotuinen nettotuotto</b>							<b>73 010,08 €</b>
Korkokanta							
	0,05						
Takaisinmaksuaika (vuotta):							
	<b>4,00</b>						
<b>Vuosi</b>	<b>Vuotuinen nettotuotto S</b>	<b>Yhteenlaskettu nettotuotto</b>					
1	73 010,08 €	- 189 366,59 €					
2	73 010,08 €	- 123 144,30 €					
3	73 010,08 €	- 60 075,44 €					
4	73 010,08 €	- 9,87 €					
5	73 010,08 €	57 195,44 €					
6	73 010,08 €	111 676,68 €					
7	73 010,08 €	163 563,58 €					
8	73 010,08 €	212 979,68 €					
9	73 010,08 €	260 042,63 €					
10	73 010,08 €	304 864,48 €					
11	73 010,08 €	347 551,97 €					
12	73 010,08 €	388 206,71 €					
13	73 010,08 €	426 925,52 €					
14	73 010,08 €	463 800,57 €					
15	73 010,08 €	498 919,66 €					
16	73 010,08 €	532 366,42 €					

Kannattavuuslaskentataulukko Case 2: biohiilituotanto pienimuotoista energiayrittäjyyttä harjoittavalla kasvinviljelytilalla (investointituki 40 %).

Käyttötunnit	6240 h									
							Määrä (yks./vuos)			
Kustannukset ja tuotot	€ /h	€ /kWh	€ /t	€ /kpl	i	€ /vuosi				
Muuttuvat kustannukset										
Sähkö			-0,1			21840	-	2 184,00 €		
Raaka-aine (tuotantokustannus)				-81		237,12	-	19 206,72 €		
Henkilötyö	-25					260	-	6 500,00 €		
Muuttuvat kustannukset yhteensä							-	27 890,72 €		
Tuotto										
Biohiilen myynti				1200		43,68		52 416,00 €		
Lämpöenergian arvo			0,09			393120		35 380,80 €		
Hiilikompensaation myynti				100		131,04		13 104,00 €		
Tuotto yhteensä								100 900,80 €		
Investointikustannukset										
BioMacon 63 kW					108900					
Biohiilen poistojärjestelmä					15000					
Biohiilen säkitysjärjestelmä					15000					
Muut rakennuskustannukset (arvio)					120000					
Investointi yhteensä 40 % tuella					155340					
<b>Vuotuinen nettotuotto</b>								<b>73 010,08 €</b>		
Korkokanta	0,05									
Takaisinmaksuaika (vuotta):	2,31									
		Vuotuinen	Yhteenlaskettu							
Vuosi		nettotuotto S(	nettotuotto							
1		73 010,08 €	-	85 806,59 €						
2		73 010,08 €	-	19 584,30 €						
3		73 010,08 €		43 484,56 €						
4		73 010,08 €		103 550,13 €						
5		73 010,08 €		160 755,44 €						
6		73 010,08 €		215 236,68 €						
7		73 010,08 €		267 123,58 €						
8		73 010,08 €		316 539,68 €						
9		73 010,08 €		363 602,63 €						
10		73 010,08 €		408 424,48 €						
11		73 010,08 €		451 111,97 €						
12		73 010,08 €		491 766,71 €						
13		73 010,08 €		530 485,52 €						
14		73 010,08 €		567 360,57 €						
15		73 010,08 €		602 479,66 €						
16		73 010,08 €		635 926,42 €						

## Liite 4: Aineistonhallintasuunnitelma

### Aineistonhallintasuunnitelma

#### 1.1 Aineistojen yleinen kuvaus

Opinnäytetyössä käytettäviä aineistoja ovat:

- KieMaRa-hankkeessa mukana olevilta maataloilta (13 kpl) haastattelututkimuksin kerättävä data tiloilla syntyvien sivuvirtojen ja jätteiden määrästä ja laadusta
- Kannattavuuslaskennan pohjaksi tiedot valittujen esimerkkitulojen energiantarpeesta, mahdollisista pyrolyysisyötteistä, ja mahdollisista biohiilen käyttökohteista.
- Kannattavuuslaskennan pohjaksi taulukko- tai tekstimuotoista dataa biohiilituotannon kustannuksista.

Pääosa KieMaRa-hankkeen haastatteluista on tehty hankkeen puitteissa kesän ja syksyn 2022 aikana. Kesällä 2022 tehdyt tilahaastattelut ovat toteuttaneet Katja Pouta / HAMK Bio ja Marjo Julin / ProAgria. Syksystä 2022 lähtien haastatteluista ovat tehneet ja tulevat tekemään Jonna Nygård / ProAgria ja opinnäytetyön tekijä Katri Juva / HAMK Bio. Haastattelutallenteet ja muistiinpanot on tallennettu ProAgrian KieMaRa -nimiselle Teams -kanavalle.

Syksyn 2022 aikana tehtävät KieMaRa-hankkeen haastattelut tehdään sekä Teams-etähaastatteluina, että kasvokkain kohdetiloilla. Haastattelut tallennetaan sekä puhelinsovelluksella (Ääninauhuri) että kannettavan tietokoneen Teams-sovelluksen tallenteena. Tallentamiseen pyydetään haastateltavien lupa. Haastatteluiden aikana haastateltavien vastaukset ja kommentit kirjataan ylös keskeisin osin.

Kannattavuuslaskennan pohjaksi pyydetään tarvittavia tietoja biohiililaitteiston valmistajalta BioMacon GmbH:lta (mm. laiteinvestoinnit, työmäärä). Esimerkkituloilta

kannattavuuslaskentaa varten saadut tiedot kysyttiin Teams-palaverissa, ja kirjattiin ylös palaverin aikana.

## **1.2 Hyvä tieteellinen käytäntö**

Opinnäytetyössä noudatetaan lähdeviittausten suhteen hyvää tieteellistä käytäntöä. Lähdeviitauksissa noudatetaan HAMK:in opinnäytetyöohjeistuksen mukaisesti APA-lähdeviitestandardia.

### **1.2.1 KieMaRa-hanke**

KieMaRa-hanke on julkisrahoitteinen ProAgria Keskusten liiton ja Hämeen ammattikorkeakoulun yhteishanke. ProAgria Keskusten liitto on hankkeen omistajana tehnyt hankkeessa haastateltavien tilojen kanssa hankesopimuksen, jonka mukaan haastatteluissa annettavia tietoja voidaan hyödyntää KieMaRa-hankkeessa. ProAgria Keskusten liitto ja Hämeen ammattikorkeakoulu tekevät hankesopimuksen, jossa annetaan tietojen käyttöoikeus myös Hämeen ammattikorkeakoululle.

Haastateltavia tiloja ei opinnäytetyössä yksilöidä, eli tilojen nimiä tai sijainteja ei mainita, koska se ei ole opinnäytetyön kannalta oleellista. Opinnäytetyössä voidaan mainita tilojen tuotantosuunnat. Keskeistä on tiloilla syntyvien sivuvirtojen ja jätteiden määrä ja laatu. KieMaRa-haastatteluissa kerätyt tiedot esitetään siis anonymisoituina. Haastatteluissa annettuja tietoja tarkistetaan haastattelutallenteilta sikäli, kun niitä opinnäytetyössä esitetään.

### **1.2.1 Lyckan-hanke**

Lyckan-hanke on julkisrahoitteinen Lapinjärven kunnan vetämä hanke, jossa muina hanketoimijoina ovat Laurea-ammattikorkeakoulu, Hämeen ammattikorkeakoulu, LAB-ammattikorkeakoulu sekä Haaga-Helia ammattikorkeakoulu. Hämeen ammattikorkeakoululla on käyttöoikeus hankkeessa kerättäviin tietoihin. Lisäksi Lyckan-

hankkeen kautta opinnäytetyön esimerkkitilaksi valikoituneen kasvinviljelytilan yrittäjän kanssa on sovittu kannattavuuslaskennan esittämisestä osana opinnäytetyötä.

### **1.3 Aineistojen säilytys opinnäytetyön aikana**

KieMaRa-hankkeessa kerättävä haastatteluaineisto (tallenteet ja muistiinpanot) käsitellään luottamuksellisena, ja tallennetaan ProAgria Keskusten Liiton omistamalle KieMaRa-hankkeen Teams-kanavalle. Myös haastateltujen tilojen yhteystiedot säilytetään täällä, koska tiedot sisältävät henkilötietoja. Aineistoja pääsevät käsittelemään KieMaRa-hankkeessa mukana olevat henkilöt, jotka on kutsuttu kyseiselle Teams-kanavalle jäseniksi. Haastatteluaineistoja ja tilojen yhteystietoja ei tietosuojasyistä tallenneta muualle. Biohiilituotannon kustannuslaskentaan liittyvät aineistot, opinnäytetyössä käytettävät sähköiset lähdeaineistot (julkisia) sekä opinnäytetyön versiot tallennetaan opinnäytetyön tekijän Hämeen ammattikorkeakoulun OneDriveen (HAMKin henkilökunnan käyttäjätunnuksen pilvipalvelu) pilvipalveluun. Näitä aineistoja pääsee käsittelemään ainoastaan opinnäytetyön tekijä. Opinnäytetyöstä ja biohiilituotannon kustannuslaskentaan liittyvästä aineistosta tallennetaan varmuuskopiot fyysiselle USB-muistitikulle. Biohiilituotannon kustannuslaskentaan liittyvät aineistot tallennetaan myös KieMaRa-hankkeen Teams-kanavalle.

Opinnäytetyötä työstetään HAMKin OneDrivessa. Työstä tallennetaan varmuuskopio aina työpäivän päätteeksi USB-muistitikulle. Varmuuskopion tiedostonimen loppuun lisätään juokseva numero, jotta tarvittaessa on helppo löytää viimeisin versio varmuuskopioidusta opinnäytetyöstä.

Opinnäytetyö laaditaan opiskelijan ollessa työsuhteessa Hämeen ammattikorkeakouluun, ja opinnäytetyötä on laadittu HAMKin osatoteuttamille KieMaRa- ja Lyckan -hankkeille. KieMaRa-hankkeelle tuotettavan aineiston ja tulokset omistaa KieMaRa-hanke. Hankkeen osapuolilla (ProAgria ja HAMK) on yhteistyösopimus, joka sallii aineiston hyödyntämisen

molemmissa organisaatioissa. Lyckan-hankkeelle tuotettavan aineiston omistaa Lyckan-hanke.

Opinnäytetyöhön liitettävien valokuvien osalta varmistetaan, että niiden käyttö opinnäytetyössä on sallittua (kuvien käyttöoikeus varmistetaan).

#### **1.4 Aineistojen käsittely opinnäytetyön valmistuttua**

Opinnäytetyön valmistuttua työn aikana tuotettua aineistoa käsitellään hankkeiden (KieMaRa ja Lyckan) aineistohallintasuunnitelmien mukaisesti.

#### **1.5 Henkilötietojen käsittely opinnäytetyössä**

Opinnäytetyössä ei käsitellä henkilötietoja. Henkilötietojen käsittely tapahtuu KieMaRa-hankkeen puitteissa, eikä niitä ole tarpeen käsitellä opinnäytetyössä.

#### **1.6 Opinnäytetyön saavutettavuus**

Opinnäytetyössä käytetään Hämeen ammattikorkeakoulun opinnäytetyön asiakirjamallia, joka on otettu käyttöön syksyllä 2020. Kyseinen malli täyttää saavutettavuusvaatimukset. Lisäksi opinnäytetyöstä tehdään sisällöllisesti selkeä, ja noudatetaan rakenteellisia saavutettavuusohjeita, jotka löytyvät esimerkiksi Theseus-palvelusta (Opinnäytetyön saavutettavuusohjeet, <https://submissions.theseus.fi/saavutettavuusohjeet.htm>). Valmis opinnäytetyö viedään digitaalisessa muodossa Theseus-tietokantaan.