



Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-Hämeessä

Elo, Nummela & Kymäläinen

HAMK
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-Hämeessä

Annakaisa Elo, Jarkko Nummela
& Maritta Kymäläinen

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Biohiili kiertotalousratkaisuna Kanta-Hämeessä

Annakaisa Elo, Jarkko Nummela & Maritta Kymäläinen

E-JULKAISU

ISBN 978-951-784-835-0

ISSN 1795-424X

HAMKin e-julkaisuja 5/2021

JULKAISIJA

Hämeen ammattikorkeakoulu

Häme University of Applied Sciences

PL 230

13101 HÄMEENLINNA

puh. (03) 6461

julkaisut@hamk.fi

www.hamk.fi/julkaisut

CC- BY-SA 4.0



Ulkoasu ja taitto: Mainostoimisto KMG Turku

Hämeenlinna, lokakuu 2021

Kannen kuva: Annakaisa Elo

Sisällys

Lukijalle.....	5
Biohiilestä ratkaisu kiertotalouden haasteisiin.....	6
Johdanto.....	6
Biohiilen tuotantoon soveltuvat jäte- ja sivuvirrat Kanta-Hämeessä.....	8
Purku/jätepuu.....	9
Mädätetty puhdistamoliete.....	13
Puutarhajäte.....	16
Hiilensidontapotentiaali.....	18
Biohiilen valmistus – tutkimustuloksia.....	19
Johdanto.....	19
Pyrolyysilaitteistot.....	20
Pyrolyysi pyrolyysikoelaitteella ja pyrolyysituotteiden analysointi.....	21
Tulokset – pyrolyysikoelaitte.....	23
Mädätetty puhdistamoliete.....	23
Puutarha/risujäte.....	24
Purku/jätepuu.....	24
Tulokset – pilottimittakaavan panosretortti.....	29
Biohiilen käyttösovellukset – tutkimustuloksia.....	31
Biohiili viherrakentamisessa.....	31
Kasvatuskokeet.....	1
Biohiilen käyttö golfviheriöllä.....	8
Jätteidenkäsittelyalueen suotoveden käsittely.....	43
Laboratoriotason suodatuskokeet.....	43
Kenttäsuodatuskokeet Karanojan alueella.....	47
Yhteen hiileen – biohiilen ympärille sijoittuva osaamis- ja yritysekosysteemi Kanta-Hämeeseen.....	50
Biohiili tutuksi.....	50
Biohiilitoimintaympäristö Kanta-Hämeessä.....	51
Alueellisia biohiilihankkeita muualla.....	54
Lähteet.....	55

Lukijalle

Kiinnostus biohiiltä kohtaan on viime vuosina kasvanut merkittävästi. Jatkossa kiinnostuksen uskotaan entisestään lisääntyvän. Tämä johtuu biohiilen potentiaalista toimia hiilinieluna ja siten keinona hillitä ilmastomuutosta sekä sen roolista monien kiertotalousratkaisujen mahdollistajana. Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hanke lähti edistämään biohiileen pohjautuvien kestävien kiertotalousratkaisujen liiketoimintamahdollisuuksia Kanta-Hämeessä. Hanke toteutettiin Hämeen ammattikorkeakoulun biotalouden tutkimusyksikössä (HAMK Bio), ajalla 1.9.2018–31.12.2020.

Hankkeen päärahoittaja oli Uudenmaan liiton kautta EU:n aluekehitysrahasto (EAKR), osarahoittajia olivat Kiertokapula Oy ja HS-Vesi. Hankkeen ohjausryhmässä toimivat Marleena Hagner (Luke), Mikko Koivulehto (Kiertokapula Oy), Jukka Meriluoto (HS-Vesi), Timo Sollo (Sollo-yhtiöt), Priit Tammeorg (Helsingin yliopisto), Anu Riikonen (Sitowise Oy), Ari Räsänen (Linnan kehitys) ja Annukka Pakarinen (HAMK). Rahoittajan edustajana toimi Arto Saarinen (Hämeen liitto).

Tässä julkaisussa esitellään Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeen keskeisimmät toimenpiteet ja tulokset. Kirjoittajien lisäksi työtä ovat olleet toteuttamassa HAMK Bion projektityöntekijät Ilona Lahti, Laura Kanisto, Satu Tiainen ja Timi Niekka, opinnäytetyöntekijät Iina Lahti, Satu Åhlström, Silja Lassilantuomi ja Mervi Rosti sekä iso joukko HAMK:n opiskelijoita erilaisten opiskelijaprojektitöiden yhteydessä. Suuri kiitos kaikille merkittävästä panoksestanne tässä hanketoteutuksessa.

Kiitos rahoittajille työn mahdollistamisesta. Kiitos niin ohjausryhmälle kuin myös kaikille hankkeen tapahtumiin osallistuneille mielenkiinnosta ja aktiivisesta osallistumisesta.

Annakaisa Elo, Jarkko Nummela ja Maritta Kymäläinen

Hämeenlinnassa, 29.4.2021

Biohiilestä ratkaisu kiertotalouden haasteisiin

Johdanto

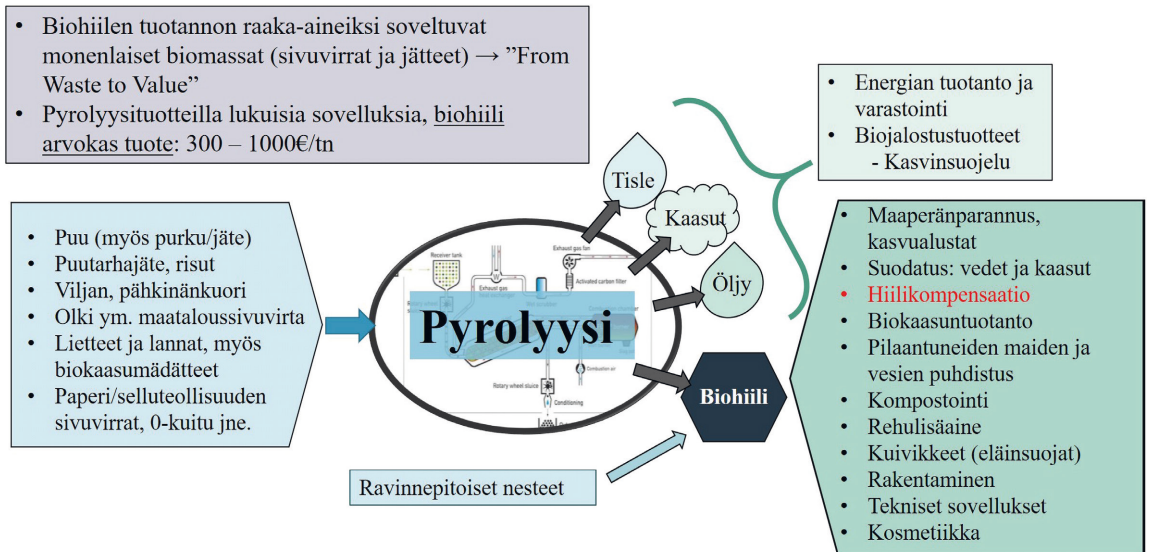
Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeen taustalla ovat aiemmat Kanta-Hämeeseen kohdistuneet kiertotalousaiheiset selvitykset ja hankkeet. Aiempien selvitysten sekä sidosryhmien kautta oli tiedostettu etenkin ympäristöhuollon (vesi- ja jätehuolto), maataloustoimintojen ja rakentamisen tuottavan toistaiseksi huonosti hyödynnettyjä biopohjaisia jätte- ja sivuvirtoja. Näiden jäte- ja sivuvirtojen käsittely on nykyisellään taloudellisesti kannattamatonta, ne aiheuttavat lisäkustannuksia toimijoille (varastointi, kuljetus, porttimaksut) tai niiden nykyinen käsittely on ympäristön kannalta kestävämpää (ravinteiden ja hiilen päästöt). Joidenkin sivu- ja jätevirtojen, kuten jätevesilietteiden, hyödyntämiseen tai kierrätykseen suhtaudutaan jopa negatiivisesti. Jätevesipohjaisten lietteiden, myös mädätettyjen, jatkokäyttö etenkin peltolannoitteena on herättänyt huolta ja epäluuloa niiden mahdollisesti sisältämien lääkeainejäämien, haitta-aineiden ja mikromuovien vuoksi.

Nykyisen kiertotalousajattelun mukaan sivu- ja jätevirrat olisi käsiteltävä ennemminkin mahdollisuuksiksi ja arvokkaiksi resursseiksi kuin kulu-eräksi. Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hanke selvitti, voisiko alueellinen biohiilen tuotanto tarjota vaikeasti hyödynnettäville jäte- ja sivuvirroille kestävä hyödyntämiskäytön ja samalla luoda luontevan alustan alueelliselle osaamis- ja yritys yhteistyölle biohiilen valmistukseen ja käyttöön pohjautuvan kiertotalouden ympärillä.

Vaikka biohiilen ominaisuuksia on hyödynnetty jo tuhansia vuosia, on kiinnostus sitä kohtaan kasvanut viime vuosina suorastaan eksponentiaalisesti. Syitä tähän on monia. Biohiili on noussut kasvavan mielenkiinnon kohteeksi sekä tieteessä, käytännön sovelluksissa että kiertotalouden piirissä, koska sille on löydetty lukuisia sovelluskohteita maaperän parantamiseksi teknisiin tuotteisiin (Kuva 1). Biohiilen perinteisin ja tunnetuin käyttötapa peltoviljelyssä perustuu sen hyödyllisiin ominaisuuksiin maaperässä, jossa biohiili voi pidättää ravinteita, sitoa kosteutta ja parantaa maaperämikrobien elinolosuhteita (mm. Lehmann 2007). Suomessakin satoja vuosia harjoitettu kaskikulttuuri perustuu pitkälti (bio)hiilen suotuisiin maanparannusominaisuuksiin. Biohiilen avulla voidaan ratkaista ongelmia, joihin ei ole löydetty ympäristön kannalta kestävä ratkaisua. Biohiilen käyttö onkin noussut esiin yhä enemmän kaupunkiympäristössä muun muassa erilaisten hule-, valuma- ja suotovesien suodatuksessa. Usein näissä kohteissa yhdistetään viherrakentamista erilaisiin hulevesiratkaisuihin, kuten katupuuistutukset, viherkatot ja hulevesipainanteet

(Kuoppamäki ym., 2019; Tammeorg ym., 2021). Tulevaisuudessa uusia biohiilen käyttösovelluksia löytyy yhä enemmän erilaisista teknisistä ratkaisuista, kuten teollisuudesta ja rakentamisesta. Tällä hetkellä biohiilen huomionarvoisin ominaisuus on kuitenkin sen merkitys konkreettisena, pitkäikäisenä ja kustannustehokkaana hiilen sitojana. Biohiili onkin noussut yhä enemmän esiin ilmastopoliittisissa keskusteluissa, sillä vastaavaa korvaavaa materiaalia ei käytännössä ole. Siksi kiinnostus biohiileen hiilikompensaatiovälineenä on parin viime vuoden aikana noussut vahvasti esiin maailmanlaajuisesti.

Biohiilen ainutlaatuisuutta hiilivarastona korostaa se, että sitä voidaan valmistaa lähes kaikesta orgaanisesta materiaalista (Kuva 1), jolloin siihen sitoutunutta hiiltä saadaan varastoitua pysyvään muotoon. Biohiilen tuotanto ei myöskään välttämättä vaadi ulkopuolista energiaa, vaan päinvastoin biohiilen tuotannolla, pyrolyysillä, voidaan tuottaa hiilinegatiivista (lämpö)energiaa (esimerkiksi Lehmann, 2007). Biohiilen kaupallinen tuotanto on toistaiseksi vielä rajoittunutta, ja sen hinta on pysynyt korkeana. Tämä on rajoittanut biohiilen laajamittaista käyttöä etenkin suuren mitatakaan sovelluksissa. Toisaalta voi olettaa, että biohiilen parempi saataavuus ja kilpailukykyisempi hankintahinta lisääisi sen käyttöä, kysyntää ja siten myös markkinoita.



Kuva 1. Miksi biohiili kiinnostaa? Biohiilen tuotannon monipuoliset raaka-aineet ja pyrolyysituotteiden käyttökohteita.

Biohiilen tuotantoon soveltuvat jäte- ja sivuvirrat Kanta-Hämeessä

Biohiilituotannon yleisin raaka-aine Suomessa on havu- tai lehtipuupohjainen hake eli niin kutsuttu energiapuu. Hallituksen tavoite bioenergian osuuden kasvattamisesta yhtä aikaa energiaturpeen alasajon kanssa lisää energiapuun tarvetta ja kysyntää lähitulevaisuudessa. Vaikka biohiilen valmistus pyrolyysillä on sinänsä energiapositiivista (Lehmann, 2007, Boateng ym., 2015), niin tuottamalla biohiiltä metsäpuuhakkeesta voidaan päätyä raaka-ainevajeeseen. Biohiilen tuotannossa (lämpö)energia on sivutuote, ja osa raaka-aineen energiasta on sitoutunut biohiileen. Paitsi energiapuuna metsähakkeella on kasvava kysyntä nykyisissä, rakenteilla olevissa ja suunnitelluissa mittavissa biojalostamoinvestoinneissa. Kilpailu tästä raaka-aineesta eri käyttäjäryhmien välillä vaikuttaa sekä sen hintaan että saatavuuteen. Toisaalta vaikka biohiili toimii pitkäikäisenä hiilivarastona, ei sen valmistus neitseellisestä materiaalista tue kiertotalous- ja kestävyysajattelua. Biohiilen tuotannossa tulisikin korostaa kestävyttä ja tarkoituksenmukaisuutta: pitäisi tuottaa sovelluskohteeseen sopivan laatuista ja kustannuksiltaan kilpailukykyistä biohiiltä kestäväällä tavalla suosien sivu- ja jätevirtoja. Näin näiden materiaalien arvo potentiaalisesti nousee ja biohiilen valmistuksen hyödyt voidaan maksimoida. Onkin luontevaa tarkastella näitä virtoja myös kaupallisen biohiilituotannon pohjana. Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeen eräs päätavoitteista oli selvittää mahdollisuuksia tuottaa biohiiltä taloudellisesti ja kestävästi paikallisista jäte- ja sivuvirtamateriaaleista ja samalla tarkastella kokonaisvaltaisesti biohiilen ympärille rakentuvaa liiketoimintaekosysteemiä Kanta-Hämeessä.

Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeen ensimmäisenä toimenpiteenä toteutettiin alueellinen kartoitus biohiilituotantoon soveltuvista sivu- ja jätevirroista Kanta-Hämeessä. Raaka-ainetietoja kerättiin muun muassa suorien kontaktien, haastattelujen, kyselyn ja yritysten vuosikertomusraporttien avulla. Kartoitustulosten pohjalta valittiin alueellisesti mielenkiintoisimmat raaka-aineet hankkeen pyrolysointikokeisiin eli biohiilituotantoon sekä biohiilien käyttösovellustestauksiin. Lisäksi saatuja raaka-ainetietoja käytettiin hankkeessa lähtötietoina arvioitaessa alueellisen biohiilituotannon mahdollisuuksia ja biohiilen käyttösovelluksia sekä alueellista hiilensidontapotentiaalia. Materiaalikartoitusten tarkemmat tulokset julkaistiin hankkeen osaraportissa (Elo ym., 2020).

Valmistukseen potentiaalisesti soveltuvien biomassojen määrän ja saatavuuden kartoitus aloitettiin hankkeessa mukana olevista, sivu- tai jättemateriaaleja tuottavista yrityksistä: HS-Vesi Oy (puhdistamolietteet), Kiertokapula Oy (puutarhajäte), Sollon Kodit ja Kiinteistöt Oy (rakennusjäte), Hakeyhtymä Kankaanmäki Oy (huonolaatuinen hake) ja HempRefine Oy (hampun päistäre). Näistä viimeksi mainittu jouduttiin rajaamaan pois

tarkasteluista alueen ainoan tätä sivutuotetta tuottavan yrityksen toiminnan päättymisen myötä.

Kartoituksen perusteella valittiin biohiilen valmistuksen kannalta potentiaalisimmat biomassat: Päävalintaperusteina olivat muun muassa materiaalin määrä ja saatavuus sekä nykykäyttö. Tässä yhteydessä rajattiin tarkastelusta pois maatalousperäiset biomassat (mm. hevosenlanta). Materiaalikartoituksessa huomioitiin myös alueen energiapuuvarannot ja johtopäätöksenä todettiin, että nykytilanteessa Kanta-Hämeen alueella ei ole ”ylimääräistä” energiapuu- tai metsätähdepohjaista sivuvirtaa mahdollisen biohiilen tuotantolaitoksen tarpeisiin vaan biohiilen valmistus joutuisi kilpailemaan raaka-aineen saatavuudesta muiden käyttäjien, kuten lämpövoimalaitosten kanssa. Kyselytutkimuksen perusteella biohiilen valmistus energiapuuhakkeesta kuitenkin kiinnosti alan toimijoita ja tulevaisuudessa kiinnostus biohiilen tuotantoa kohtaan voi kasvaa. Biohiilen valmistukseen potentiaalisesti sopivaa sivutuotetta syntyy myös puunjalostusteollisuudessa. Hämeen alueella sijaitsee myös useampia suurehkoja sahoja ynnä muita puunjalostuslaitoksia, joiden prosessissa syntyy sahanpurua tai kutterinlastua. Sahanpuru on materiaalisivuvirtana käsittelyn kannalta haastavaa muun muassa sen herkän syttyvyyden sekä hienojakoisuuden vuoksi. Hankkeessa tehdyn kartoituksen perusteella nämä sivuvirratt käytetään nykyään pääasiassa niitä tuottavien laitosten omassa energiantuotannossa eikä intressejä biohiilen tuotantoon ole. Kartoituksen pohjalta alueellisesti merkittävimpinä biomassoina käytännön testauksiin valikoituivatkin purku/kierrätyspuu, mädätetty puhdistamoliette sekä puutarhajäte (risu), joita käsitellään tässä raportissa tarkemmin.

Purku/jätepuu

Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeessa purku/jätepuu nousi selkeästi esiin potentiaalisimpana materiaalina biohiilen tuotantoon muun muassa sen huomattavan suuren määrän ja nykyisen huonon hyödyntämistason vuoksi. Valtakunnallisesti puun osuus kaikesta rakennus- ja purkujätteestä on heti betonijätteen jälkeen toiseksi suurin. Suomessa syntyy rakennus- ja purkutyömailla puujätettä noin 250 000 tonnia, vaikka Suomen virallisen jätetilaston mukaan vuosittainen määrä on noin 190 000 tonnia (Häkämies ym., 2019). Jätepuun todellisesta määrästä on vaikea esittää tarkkaa arviota, sillä syntyvän rakennusjäte/purkupuun omistaa rakennuttaja, rakennuskohteen purkaja tai kuljetusyritys eikä näillä toimijoilla ole virallista ilmoitusvelvollisuutta syntyvistä määristä. Tällä hetkellä käytännössä lähes kaikki puujäte ohjautuu energiahyödyntämiseen, tilastokeskuksen mukaan vuonna 2018 vain noin neljä prosenttia puujätteestä hyödynnettiin. Suomi on sitoutunut EU:n yhteisiin tavoitteisiin jätteiden hyödyntämisestä, ja niiden mukaan materiaalihyödyntämistä tulee lisätä ja jätteiden kaatopaikkasijoitusta ja polttoa vähentää. EU:n jätedirektiivin 2008/98/EY tavoitteiden mukaan jäsenvaltioiden

tulisi nostaa rakennus- ja purkujätteen kierrätysaste 70 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä, mutta tähän ei ole päästy (Seppälä, 2020). Kierrätys/jätepuun haasteena on sen heterogeenisuus sekä syntypaikan että koostumuksen mukaan. Energian hyödyntämisen näkökulmasta kierrätyspuulle on kehitetty omat laatuohjeet, jotka kohdentuvat kemiallisesti käsiteltyyn teollisuuden puutähteeseen, rakennustoiminnan ja jätteenkäsittelyn puutähteeseen sekä tienvarsipuustoon (Alakangas, 2016).

Tässä hankkeessa tarkasteltiin purku/jätepuun määriä sitä vastaanottavien alueellisten toimijoiden tilastojen pohjalta (Elo ym., 2020). Kanta-Hämeen suurimmat kierrätys- ja purkupuun vastaanottajat keskittyvät Hämeenlinnaan Karanojan alueelle, jossa toimii kunnallinen jätehuolto-yhtiö Kiertokapula Oy sekä yksityinen toimija Lassila & Tikanoja Oy. Kiertokapula ottaa vastaan sekä yksityisiltä ihmisiltä että yrityksiltä tulevaa puujätettä, jonka jätteen tuojat itse lajittelevat purkupuuksi tai puhtaaksi puuksi (A ja B luokan kierrätyspuu). Kiertokapula otti vuoden 2018 tietojen mukaan vastaan Karanojan alueella Hämeenlinnassa yhteensä noin 800 tonnia puhdasta puuta sekä 2 900 tonnia purkupuuta (Taulukko 1). Lassila & Tikanoja puolestaan ottaa vuosittain vastaan Karanojan alueella noin 1 800 tonnia kierrätyspuuta, tämän lisäksi sen omasta lajittelusta syntyy puujaetta 2 000 tonnia vuodessa. Sekä Kiertokapula että Lassila & Tikanoja hakettavat ja seulovat puun, joko itse tai ulkopuolisen toimijan avulla, ja hake päättyy pääasiassa lämpölaitoksille. Loimi-Hämeen Jätehuolto Oy:n Forssan jätekeskukseen puujätettä vastaanotetaan vuodessa noin 1 000 tonnia (vuonna 2018, Taulukko 1). Riihimäen alueella ei puolestaan ole vastaanottopaikkaa puujätteelle. Riihimäen alueen puujätteet kulkeutuvat todennäköisesti Kiertokapulan Hyvinkään asemalle tai muiden toimijoiden kautta muualle. Koko Kiertokapulan toimialueen (Järvenpää, Hyvinkää, Hämeenlinna ja Valkeakoski) vastaanottama puumäärä on noin 11 000 tonnia (2018).

Kuten edellä todettiin, tilastoihin perustuva lähtötieto puujätteen määrästä ei ole kattava. Tämän vuoksi Kanta-Hämeen kierrätys/purkupuumääriä selvitettiin vastaanottotilastojen lisäksi myös asiantuntijahaastatteluin, joiden arvioiden mukaan alueella syntyy puujätettä huomattavasti jätteenvastaanottokeskusten tilastoimia määriä enemmän. Yhtenä syynä on se, että alueen jätteenkäsittely-yritysten ympäristöluvut rajoittavat puun vastaanottomääriä. Lisäksi porttimaksut ohjaavat purkupuun kuljetuksia, jolloin erityisesti isoimmat toimijat, kuten Delete Oy ja Remeo Oy, kuljettavat purkupuun omiin käsittelylaitoksiinsa pois alueelta tai puu kuljetetaan sellaiselle jätteenkäsittelytoimijalle, joka tarjoaa edullisemmän tai kokonaan ilmaisen vastaanoton puujätteille. Näin ollen kierrätys- ja purkupuujätettä kulkeutuu mitä ilmeisimmin huomattavia määriä Kanta-Hämeen alueen ulkopuolelle.

Taulukko 1. Kierrätyspuun vastaanottomäärät Kanta-Hämeen jätteenkäsittelylaitoksilla vuonna 2018 sekä kierrätyspuun biohiilen tuotanto ja hiilensidontapotentiaali laskettuna materiaalin kuiva-ainepitoisuuden mukaan (Elo ym., 2020).

Alue	Määrä t/v	Biohiilipotentiali* t/v (80% ka)	CO ₂ sidontapotentiaali** t/v
L&T Karanoja	3 800	912	3 192
Kiertokapula Karanoja	3 700	888	3 108
Yhteensä Karanoja:	7 500	1 800	6 300
Loimi-Häme Forssa	1 065	256	896

*) Kierrätyspuun koostumus ja kosteusprosentti vaihtelee, tässä käytetty energiapuulaskelmissa yleisesti käytettyä pitoisuutta (esim. Alakangas 2016), biohiiltä on laskettu syntyvän 30 % ka:sta.

**) CO₂ -sidontapotentiaali on laskettu kertoimella, 1 kg biohiiltä sitoo 3,5 kg CO₂.

Eräs rakennuspuujätteen tai purkupuun keskeisistä haasteista on materiaalin heterogeenisuus. Tavallisesti purku- tai rakennustyömaan puujäte koostuu käsittelemättömän puhtaan puun lisäksi eri tavoin pintakäsittelystä puusta sekä puujalosteista, kuten liimapuulevystä. Kierrätyspuun laatu vaihtelee: puhtaimmat jakeet (A ja B luokat) vastaavat ominaisuuksiltaan ja käyttökohteiltaan normaalia energiapuuta, joten ne luetaan niin kutsutuksi ”puhtaaksi puuksi”. Energiakäytössä purkupuun fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien analysointi ei ole tarpeen, mikäli sen ominaisuudet tunnetaan riittävän hyvin ja sen alkuperä ja käsittely on hyvin dokumentoitu (Alakangas, 2016). Teollisuudesta tulevat jakeet sekä hyvin lajiteltu kemiallisesti käsittelemätön hirs- tai muu vastaava purkumateriaali voivat välttää jäteluokituksen (C), johon purkupuun jätteen mukana pääsääntöisesti luetaan (Alakangas, 2016). Toisaalta on mahdollista, että pyrolyysi voidaan hyväksyä ”end of waste” -käsittelyksi myös purkupuun tapauksessa (Åhrström, 2020). Hyvälaatuisen biohiilen tuotannon kannalta on yleensä varmistettava kunkin syöte-erän homogeenisuus. Valmistettaessa biohiiltä kierrätys- ja purkupuumateriaalista eräs pääedellytyksistä onkin lähtömateriaalin luotettava lajittelu ja dokumentointi. Biohiilen tuotannon kannalta on oleellista selvittää mahdollisuudet ja tarve lajitella purkupuujätettä tarkemmin jo syntypaikalla eli purkutyömaalla. Nykyisessä toimintamallissa purkupuujätteen lajittelua ei työmaalla juuri tehdä, koska käytännössä kaikki purkupuujäte päätyy sen vastaanottajan kautta hakkeeksi, joka toimitetaan voimalaitoksille energiahyödyntämiseen, eikä lajitteluun ole lainsäädännöllistä tai viranomaisvelvoitetta tai taloudellista kannustinta.

Tässä hankkeessa selvitettiin tarkemmin biohiilen valmistamista jätetuusta etenkin rakennusyritysten näkökulmasta. Hankkeessa valmistui aiheesta kaksi AMK-opinnäytetyötä. Åhlströmin (2020) AMK opinnäytetyön ”Biohiilen valmistaminen rakennusjätepuun käsittelyratkaisuna” tilaajina toimivat Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hanke sekä Remeo Oy. Opinnäytetyössä selvitettiin, millaisia mahdollisuuksia Suomessa olisi biohiilen valmistamiseen rakennusjätepuun käsittelytapana sekä millainen vaikutus tällä olisi elinkaariarvioinnin näkökulmasta verrattuna muihin käsittelytapoihin. Lisäksi opinnäytetyössä tarkasteltiin biohiilen tarjoamia mahdollisuuksia vähähiilisessä rakentamisessa. Työn tulosten perusteella suurinta osaa rakennusjätetuusta voitaisiin käyttää biohiilen raaka-aineena. Rakennusjätepuun pyrolysointi vaikuttaa myös elinkaareltaan varteenotettavalta käsittelymenetelmältä, jonka lisäksi biohiiliratkaisuilla todettiin olevan potentiaalia vähähiilisessä rakentamisessa. Lisäksi rakennusliikkeet olisivat kiinnostuneita toimittamaan rakennusjätetuuta biohiilen raaka-aineeksi ja näkevät biohiilipohjaiset ratkaisut mahdollisuutena myös omassa liiketoiminnassaan. Lassilantuomen (2020) opinnäytetyössä selvitettiin rakennusjätepuun käyttömahdollisuuksia biohiilen raaka-aineena, perehdyttiin kirjallisuustarkastelupohjalta puupohjaisen biohiilen teknisiin sovelluksiin rakennusteollisuudessa ja tienrakennustekniikassa sekä tarkasteltiin rakennusjätetuupohjaisen biohiilen yritystoimintaa ja käyttöä Kanta-Hämeessä. Opinnäytetyössä tehdyn kyselyn mukaan kantahämäläisistä yrityksistä peräti 87,5 prosenttia oli kiinnostuneita toimittamaan rakennusjätetuuta biohiilen raaka-aineeksi ja 68,7 prosenttia käyttämään biohiilipohjaisia rakennussovelluksia, mikäli näistä ei synny yrityksille merkittäviä lisäkustannuksia. Lisäksi ilmeni, että biohiilipohjaisia rakennusmateriaaleja olisi hyvä markkinoida myös rakentajia laajemmalle kohderyhmälle, esimerkiksi suunnittelutoimistoille. Tulevaisuudessa biohiilipohjaiset rakennusmateriaalit voisivat olla osana rakennusten hiilensidontatavoitteita ja kompensoida syntyneitä hiilidioksidipäästöjä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että purku/kierrätyspuu on erittäin lupaava materiaali biohiilen tuotantoon sen runsaan tarjonnan, EU:n kierrätystavoitevelvoitteiden ja rakennusalan toimijoiden kiinnostuksen vuoksi. Ennen kaikkea biohiilen tuotanto purku- tai kierrätyspuusta on kiertotalouden mukaista ja pidentää huomattavasti puumateriaalin elinkaarta ja parantaa rakennustoiminnan kestävyyttä.



Kuva 2. Purkupuuta/puujätettä Karanojan jätteenkäsittelyalueella.
(Kuva: Jarkko Nummela, HAMK)

Mädätetty puhdistamoliete

Biokaasulaitoksilla ja jätevedenpuhdistamojen yhteydessä toimivilla lietemädättämöillä syntyy biokaasun ohella kiinteää mädätysjäännöstä eli mädätettä. Tämä on merkittävä tuote, joka mahdollistaa muun muassa ravinteiden kierrätyksen. Mädätettä käytetäänkin yleisesti peltoviljelyssä. Viime vuosina on huolestuttu puhdistamolietepohjaisten mädätteiden sisältämien orgaanisten haitta-aineiden, kuten lääkejäämien ja mikro muovien, määristä ja vaikutuksista peltokäytössä. Asiasta ei kuitenkaan ole vielä riittävästi tutkittua tietoa, etenkin pitkäaikaisessa käytössä. Muutamit viljaa käyttävät teollisuusyritykset Suomessa ovatkin kieltäneet sopimusviljelijöitään käyttämästä puhdistamolietepohjaisia mädätteitä. Tästä on aiheutumassa iso ongelma useiden biokaasulaitosten ja lietemädättämöjen toiminnalle. Mädätteiden terminen prosessointi pyrolysoimalla voisi olla yksi tapa poistaa edellä mainitut haitta-aineet, mikä on herättänyt merkittävää kiinnostusta lietehiilen tuotantoa kohtaan. Pyrolysointi nähdään yhtenä mahdollisena ratkaisuna poistaa mikro muovit ja orgaaniset haitta-aineet puhdistamolietepohjaisista mädätteistä, ja täten parantaa niiden käyttömahdollisuuksia etenkin peltoviljelyssä. Puhdistamolietepohjaisen lietehiilen hyväksyntä EU-tasolla on nostettu esiin Strubias-lannoitelainsäädännön valmistelun myötä. Lietteen pyrolyysiin on panostanut etenkin Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY). Sen Lietehiili-hankkeen yhteydessä on Ämmäsuolle pystytetty puhdistamolietemädätettä pyrolysoiva laitos (HSY, 2021). Myös Biohiilestä bisnestä

Hämeeseen -hankkeessa mädätteet valikoituivat kiinnostavaksi syötteenksi jo hankevalmisteluvaiheessa. Hankkeessa on laadittu infograafi, joka esittelee tiivistetysti puhdistamolietettä lietehiilen tuotannon näkökulmasta (Tiainen, 2020). Lisäksi biokaasun ja biohiilen tuotannon synergioita tarkasteltiin artikkelissa ”Biohiilellä on monia kytkentöjä biokaasutuotantoon” (Kymäläinen ym., 2020).

Kanta-Hämeen alueella mädätteitä syntyy jätevedenpuhdistamoilla (HS-Vesi, Riihimäen Vesi ja Forssan Vesilaitos), isoilla biokaasulaitoksilla (Envor-Forssa, Gasum-Riihimäki) ja St1:n bioetanoli-biokaasulaitoksella Hämeenlinnassa. Jätevedenpuhdistamoilla mädäte on sataprosenttisesti puhdistamolietepohjaista, kun taas isoilla biokaasulaitoksilla syötepohja on vaihteleva. St1:n laitoksen tuottama mädäte on biojätepohjaista ja sillä on luomustatus.

Alueella syntyy puhdistamolietepohjaisia mädätteitä keskimäärin seuraavasti: HS-Veden Paroisten laitoksella mädätettyä, lingottua lietettä syntyy noin 5 000 tonnia/vuosi. Riihimäen Veden lietteenkäsittelystä syntyy mädätettä noin 3 740 t/v ja Forssan vesilaitoksen lietemädättämöstä noin 4 300 tonnia/v. Lisäksi alueen puhdistamolietettä päätyy todennäköisesti Gasumille ja Envorille, ja näin ollen sitä sisältyy näiden biokaasulaitosten mädätämääriin. Envorin Forssan ja Gasumin Riihimäen biokaasulaitosten käsittelykapasiteetit ovat 84 000 ja 75 000 tonnia/v. Tässä tarkastelussa oletettiin, että biokaasulaitoksen kokonaiskapasiteetista kolmannes tuottaa puhdistamolietepohjaista mädätettä. Muu reaktorikapasiteetti on biojätteitä ja muita peltokäyttöön hyväksyttävämpiä syötettä varten. Näiden tietojen pohjalta arvioitujen mädätettyjen puhdistamolietteidien määrät (v. 2018) Kanta-Hämeen alueen lietemädättämissä ja isoilla biokaasulaitoksilla sekä niiden lietehiilen tuotantopotentiaali on esitetty taulukossa 2. Kanta-Hämeen alueen mädätteitä on kuvattu tarkemmin hankkeen osaraportissa (Elo ym., 2020)

Taulukko 2. Mädätettyjen puhdistamolietteiden määrät (v. 2018) Kanta-Hämeen alueen lietemädättämöillä ja isoilla biokaasulaitoksilla sekä niiden lietehiilen tuotanto ja hiilensidontapotentiaali laskettuna materiaalin kuiva-ainemäärän mukaan (Elo ym., 2020).

Laitos	Määrä t/v	Määrä t ka/v	Lietehiili-potentiaali *) t/v	CO ₂ sidonta-potentiaali **) t/v
HS-Vesi, Parainen H:linna	5 000	1 125	610	640
Forssan vesihuoltoliikelaitos	4 300	1 000	540	570
Riihimäen Vesi	3 740	970	520	540
Envor, Forssa ***)	5 600	1 400	750	790
Gasum, Riihimäki ***)	5 000	1 250	670	700
Yhteensä:	23 640	5 745	3 090	3240

*) Lietehiiltä on laskettu syntyvän 54 % kuiva-aineesta (vastaa tässä hankkeessa saatua koetulosta)

**) CO₂ -sidontapotentiaali on laskettu lietehiilen hiilipitoisuudesta kertoimella, 1 kg hiiltä sitoo 3,5 kg CO₂. Lietehiilen hiilipitoisuudeksi on arvioitu 30 % kuiva-aineesta.

***) Määrät perustuvat oletukseen, että biokaasulaitoksen kokonaiskapasiteetista 1/3 tuottaa puhdistamolietepohjaista mädätettä. Muu reaktorikapasiteetti on biojätteitä ym. peltokäyttöön hyväksyttävämpiä syötteitä varten.

Lietteiden ja erityisesti mädätteiden pyrolyysissä kysymykseksi nousee materiaalin alhainen energiasisältö. Lietemateriaalien hiilipitoisuus on puumateriaalia alhaisempi (noin 25 % vs 50 %), jolloin myös potentiaalisesti lämpöä tuottavien kaasujen osuus on alhaisempi. Lisäksi lietteen kuiva-ainepitoisuus on puupohjaisia materiaaleja alhaisempi, jolloin kuivaukseen tarvitaan lisäenergiaa. Muun muassa HSY:n Lietehiili -tutkimushankkeen pyrolyysikoelaitoksessa syötteen hiili- ja energiapitoisuutta on nostettu sekoittamalla mädätysjäännöksen sekaan puuhaketta ennen pyrolyysiä (HSY, 2021). Myös Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeessa on tarkasteltu lietteen ja purkupuun yhteiskäsittelyn energiamääriä (Tiainen, 2020).

Tässä hankkeessa tuotettiin lietehiiltä HS-Veden mädätteestä ja testattiin sen käyttöä kasvualustoissa ja vesiensuodatuksessa. Tuloksia on esitetty raportin seuraavassa pääluvussa. Hankkeessa tutkittiin myös pelletöinnin vaikutusta pyrolysoitumiseen. Tulosten perusteella pelletöinti ei tuonut tässä toteutettuihin pyrolysointeihin tai hiilituotteeseen lisäarvoa, varsinkin jos otetaan huomioon pelletöinnin vaatima ylimääräinen työ ja energiantarve.

Puutarhajäte

Puutarhajätettä, risua, syntyy alueella ja päättyy jätteenkäsittelypisteisiin huomattavasti pienempiä määriä kuin esimerkiksi jätepuuta. Kiertokapulana Karanojan alueen toimipisteessä hienojakoisin puutarhajäte, niin sanottu ”haravointijäte” kuten lehdet ja ohuemmat risut, päätyvät kompostiin ja isommat oksat ja rungot haketetaan kierrätys- ja purkupuun ohessa energiantuotantoon ulkopuolisen hakeyrittäjän toimesta (Kuva 3). Puutarhaperäinen puubiomassa voidaan lukea kierrätyspuuksi (luokka A, ”puhdas puu”), ja jätteenkäsittelylaitosten tilastoissa nämä onkin tilastoitettu yhdessä. Hankkeen biohiiliraaka-ainetarkastelussa risujätettä tarkasteltiin omalla materiaalivirtanaan (Elo ym., 2020). Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeen toimintakaudella Kiertokapula Oy keskeytti puutarhajätteen vastaanoton Karanojan alueella väliaikaisesti alueen muutos- ja uudelleenjärjestelytöiden vuoksi. Tällä hetkellä on epäselvää, jatkuuko puutarhajätteen vastaanotto Karanojan alueella tulevaisuudessa.

Puutarhapohjaista materiaalia syntyy alueella vähemmän kuin muita potentiaalisia sivuvirtoja, jolloin biohiilen tuotantopotentiaalikin jää alhaisemmaksi (Taulukko 3), materiaalin saatavuus on myös epätasaista ja kausiluonteista. Risujen keräys alueella on ilmeisen tehotonta, ja todennäköisesti tätäkin materiaalia olisi nykyistä järjestelmällisemmän keräyksen myötä enemmän tarjolla. Toisaalta hankeyrittäjät keräävät ja toimittavat haketettavaksi isommat risuerät, eivätkä ne päädy jätteenkäsittelyalueelle (ja tilastoihin). Biohiilen tuotannon kannalta puutarhajäte ei riittäne sellaisenaan raaka-aineeksi, vaan se todennäköisesti joudutaan sekoittamaan muuhun puupohjaiseen materiaaliin. Tämä on käytäntö tällä hetkellä Karanojan jätteenkäsittelyalueella, jossa karkeampi puutarhajätteen jae haketetaan kierrätyspuun seassa.

Puutarhajäte on koostumukseltaan epätasaista ja sisältää materiaalia lehdistä ja hennoista oksista puunrunkoihin. Joissain biohiilen tuotantolaitoksissa ja -laitteissa tämä raaka-aine onkin aiheuttanut tuotanto-ongelmia ja laitosesokkeja, etenkin materiaalisuorituksen tukkeutumisen vuoksi, muun muassa Tukholman kaupunki on raportoinut tällaisista ongelmista (Mattias Gustafsson, Tukholman pyrolyysilaitoksen operaattori, haastattelu). Risupohjaisen materiaalin etuna on kuitenkin, että se vastaa koostumukseltaan ”puhdasta” puuta eikä siitä valmistetun biohiilen käytössä ole rajoitteita. Ruokaviraston luokittelun mukaan kyseessä on kasvipohjainen kasvualustahiili.

Tukholman kaupunki ottaa vastaan kaupunkilaisten puutarhajätteet, esimerkiksi joulukuuset, ja näistä valmistetaan biohiiltä, jota jaetaan asukkaille (Stockholm Biochar Project, Gustafsson 2019). Tällä pyritään kasvattamaan kaupungin hiilineutraalisuusastetta ja motivoimaan asukkaita käytännön ilmastotoimiin. Vaikka puutarhajäte ei ole kaikkein ihanteellisin raaka-aine biohiilen tuotantoon, voisi sen keräämisellä ja

biohiiletyksellä olla alueen toimijoille PR-arvoa. Lisäksi alueen asukkaita voidaan näin sitouttaa omakohtaiseen ilmastotyöhön. Myös Kiertokapula Oy on osoittanut mielenkiintoa puutarhajätepohjaisen biohiilen tuotantoon sekä tuotetun biohiilen käyttöön esimerkiksi jätteenkäsittelyalueen vesien suodatuksessa tai kompostituotteen parantamisessa.

Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeessa Kiertokapula Oy:n kokoa-maa puutarhajätettä testattiin pyrolyysi- ja kasvualustakokeissa. Materiaalista tuotettua biohiiltä kutsutaan jatkossa nimellä ”risuhiili”.

Taulukko 3. Puutarhajätteen vastaanottomäärät Kanta-Hämeen jätteenkäsittelylaitoksilla vuonna 2018 sekä materiaalin biohiilen tuotanto- ja hiilensidontapotentiaali laskettuna materiaalin kuiva-ainepitoisuuden mukaan.

Alue	Määrä t	Biohiili-potentiaali *) t/v	CO ₂ sidonta-potentiaali **) t/v
Kiertokapula Karanoja	1140	240	840
Loimi-Häme Forssa	1160	243,6	852

*) Kirjallisuuden mukaan risupohjaisen materiaalin koostumus ja kosteusprosentti vaihtelee (30 – 50 %), tässä käytetty 70 %:n ka-pitoisuutta.

**) CO₂ -sidontapotentiaali on laskettu kertoimella, 1 kg biohiiltä sitoo 3,5 kg CO₂.



Kuva 3. Puutarhajätteen ja kierrätyspuun käsittelyä Karanojan alueella. Etualalla puutarhajätettä ja taustalla haketettua kierrätyspuuta. (Kuva: Ilpo Pölönen, HAMK)

Hiilensidontapotentiaali

On huomattava, että ”ei polttoon ohjautuva”, pyrolysoinnin kautta tuotettu hiili toimii hiilinieluna ja potentiaalisena hiilikompensaation välineenä. Edellisissä taulukoissa on esitetty eri raaka-aineista valmistetun biohiilen teoreettinen hiilensidontapotentiaali yksinkertaisesti kemiallisesta kaavasta laskemalla, kertoimella 1 kg biohiiltä on sitoutunut 3,5 kg CO₂. Tässä työssä ei ole tehty eri raaka-aineiden biohiilihyödyntämisen elinkaaritarkastelua (LCA), jossa pitäisi huomioida muun muassa mahdollisen kuljetuksen, käsittelyn ja pyrolysoinnin aiheuttamat CO₂-päästöt. Tämän selvityksen laskelmien mukaan biohiilen tuotannon avulla voitaisiin jo nykyisiä sivu- ja jätevirtoja hyödyntämällä sitoa teoreettisesti noin 14 000 t CO₂ Kanta-Hämeen alueella vuosittain. Etenkin purku/jätepuun todelliset määrät ja sen mukaisesti hiilensidontapotentiaali ovat hyvin todennäköisesti tässä raportissa arvioitua korkeampia. Paikallinen biohiilen valmistus ja käyttö tukee vahvasti osaltaan alueen hiilineutraalius- ja ilmastotavoitteita. Hiilikompensaatio on yhä merkittävämpää liiketoimintaa ja merkittävä alueellinen liiketoimintamahdollisuus.

Biohiilen valmistus – tutkimustuloksia

Johdanto

Biohiiltä tuotetaan niin kutsutulla pyrolyysillä, joka tunnetaan myös nimellä kuivatuslaus. Käytännössä tällä tarkoitetaan biomassan kuumentamista korkeassa lämpötilassa niukkahappisissa olosuhteissa. Biohiilen valmistuksessa käytettävä pyrolyysilämpötila on useimmiten 300–800 °C (mm. Boateng ym., 2015). Tässä lämpötilassa lopputuotteeseen jää muiden aineiden haihtuessa lähtömateriaalista riippuen vaihtelevassa suhteessa alkuainehiiltä sekä tuhkaa. Sivutuotteena syntyy kaasuja, vesipohjaisia tisleitä (pääasiassa etikkahappoa) sekä pyrolyysiöljyä. Syntyvän biohiilen laatuun ja koostumukseen vaikuttaa lähtömateriaalin lisäksi muun muassa pyrolyysilämpötila ja -aika sekä mahdolliset jälkikäsittelyt. (Esim. Mašek ym. 2016.) Tämän vuoksi biohiili on vastaavasti materiaalina varsin heterogeenista. Näin ollen ei voida puhua yksittäisestä ”biohiili”-tuotteesta vaan käsitteen alla on suoranainen tuoteperhe ominaisuuksiltaan ja sen myötä käyttökohteiltaan hyvin erilaisia tuotteita. Käyttösovellusten kannalta tuotteen kemiallisten ominaisuuksien tuntemus on suorastaan välttämätöntä ja myös fysikaalisilla ominaisuuksilla (esim. huokosjakauma) on suuri merkitys.

Tässä hankkeessa suunniteltiin ja rakennettiin laboratoriomittakaavan pyrolyysilaitte, jolla testattiin alueellisesti mielenkiintoisimpien raaka-aineiden pyrolysointia. Biohiilen valmistuksen lähtömateriaalit olivat HS-veden mädätetty puhdistamoliete (HS-Vesi Oy), risupohjainen puutarhajäte (Kiertokapula Oy) sekä eri lähteistä koottu purku/kierrätyspuu (Kiertokapula Oy, Envor Oy, Sollon Kodit ja Kiinteistöt Oy). Pyrolyysikokeiden tavoitteena oli selvittää vakio-olosuhteissa tuotettujen biohiilien laatua ja saantoa sekä tarvittavia esikäsittelyjä. Pää tarkoitus oli tuottaa riittävästi biohiiltä käyttösovelluskokeisiin. Valmiiden biohiilituotteiden kemiallista laatua analysoitiin sekä ulkopuolisessa analyysilaboratoriossa (Eurofins) sekä HAMK Bion laboratorion omalla CHNS/O-analysaattorilla.

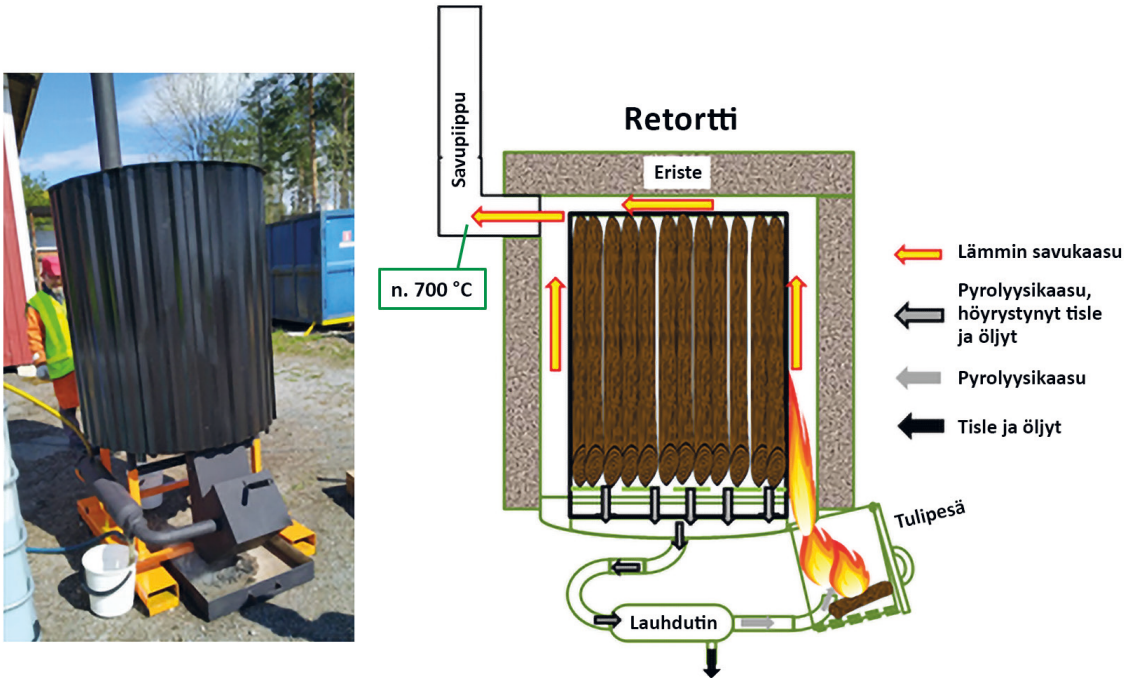
Pyrolyysilaitteistot

Hankkeen aikana HAMK:ssa itse suunniteltu ja kehitetty pyrolyysikoe-laitteisto on panostyyppinen retortti, joka perustuu sähkölämmitteiseen keramiikkauuniin (Kuva 4). Keramiikkauunin etuna on muun muassa portaaton lämpötilansäätö. Uunin mekaanista rakennetta muokattiin siten, että siihen voidaan tuoda uunin kannen läpi panosastiat, jotka tässä ovat rakenteeltaan putkimaiset, niin kutsutut pyrolyysikoeputket, kukin tilavuudeltaan noin 1,8 litraa. Koeputket ovat varustettu kannella, lämpötilan mittauksella ja pyrolyysikaasujen poistokanavalla. Uunissa on paikka neljälle koeputkelle, ja jokaisen putken kaasun purkautumista voidaan seurata erikseen.



Kuva 4. HAMK:n pyrolyysikoe-laite. (Kuva: Annakaisa Elo, HAMK)

Suuremmat biohiilierät (purkupuu) valmistettiin Mayt Oy:n pilot-kokoluokan retortilla (panostyyppinen pyrolyysireaktori) (Kuva 5). Tässä retortissa pyrolyysiin tarvittava lämpöenergia tuotetaan polttamalla pyrolyysissä vapautuvia kaasuja. Pyrolyysi käynnistetään polttamalla retortin tulipesässä puuta tai vastaavaa polttoainetta, kunnes panos alkaa pyrolysoitua itsekseen ja vapauttaa kaasuja. Lisäksi retortti sisältää lauhduttimen tisleiden erottamiseksi pyrolyysikaasusta. Retortin tilavuus on noin 0,8 m³ ja raaka-aineesta riippuen valmista biohiiltä syntyy yhdellä panoksella noin 0,2–0,4 m³. Koska retortissa ei ole valmiin tuotteen jäähdystystä, sillä pystytään käytännössä ajamaan yksi panos vuorokaudessa. Pyrolyysilämpötila on maksimissaan noin 700 °C.

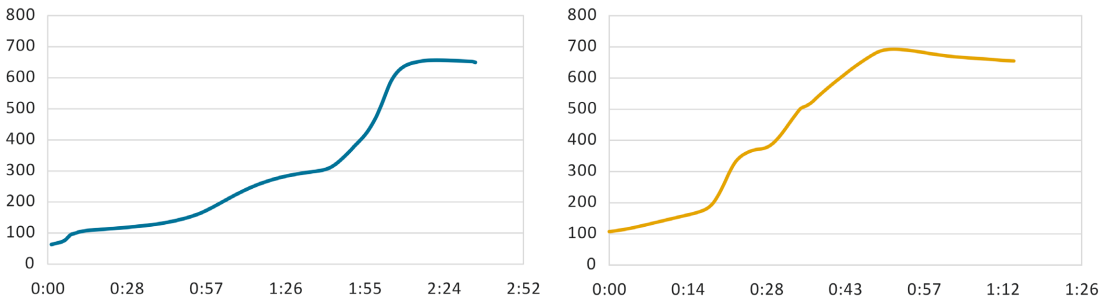


Kuva 5. Mayt Oy:n pyrolyysiretortti. (Kuva: Jarkko Nummela, HAMK)

Pyrolyysi pyrolyysikoelaitteella ja pyrolyysituotteiden analysointi

Pyrolysoinnit pyrolyysikoelaitteella suoritettiin vakio-olosuhteissa, uunin maksimilämpötilan ollessa 600 °C, jolloin lämpötilaseurannan mukaan biomassan loppulämpötila oli noin 600–700 °C. Lämpötilaero johtuu uunin säätimen tarkkuudesta ja pyrolysoitavan materiaalin eksotermisestä reaktiosta, jonka voimakkuus vaihtelee syötteen mukaan. Jotta voitiin varmistua, että kaikki materiaali oli pyrolysoitunut, uunia pidettiin 600 °C:ssa 20 minuutin ajan (= retentioaika). Tehtyjen pyrolysointien päätarkoitus oli tuottaa riittävästi biohiiltä hankkeen kasvatus- ja suodatuskokeisiin. Varsinaista pyrolyysin optimointia tai eri lämpötilojen testausta erilaisten tuoteominaisuuksien saamiseksi ja vertailemiseksi ei hankkeen aikarajoissa ehditty tehdä.

Pyrolysoinnin aikana kerättiin lämpötiladataa jatkuvalla seurannalla (lämpenemiskäyrä) sekä uunista että käsiteltävästä materiaalista. Biohiilen valmistuksessa keskeisin tuotantoprosessiin ja biohiilen ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä on korkein pyrolyysiprosessin aikana saavutettu lämpötila (kirjallisuudessa HTT, highest treatment temperature). Lämpötilakäyrän avulla pystyttiin jälkikäteen toteamaan kunkin biohiilikoe-erän lämpötila ja pyrolyysin kokonaiskesto-aika. Lämpötilakäyrän muoto on riippuvainen uunin manuaalisesta ohjauksesta ja kuvaa siten lähinnä pyrolyysiuunin lämpötilan säätöä eikä suoraan materiaalin ominaisuuksia. Eri syötämateriaalit reagoivat kuitenkin havaittavasti eri tavoin uunin lämpötilan muutoksiin (Kuva 6). Jokainen raaka-aine ja biohiilierä punnittiin, minkä perusteella määritettiin massaosaannot. Lisäksi tuotteen kemiallinen koostumus analysoitiin kaupallisessa laboratoriossa (Eurofins) sekä syksystä 2020 eteenpäin HAMK:n laboratorion ”Flash” CNHS/O -analysaattorilla. Mittausten ja analyysitulosten perusteella tarkasteltiin alustavasti eri alkuaineiden (ml. ravinteiden, raskasmetallien) määrää biohiilessä verrattuna alkuperäiseen lähtöaineeseen. Käsittelemättömän biohiilen sisältämät mineraalit (ravinteet ja raskasmetallit) ovat lähtöisin sen valmistusraaka-aineesta, ellei niitä ole keinotekoisesti lisätty, joten raaka-aine määrittää biohiilen mineraalisisällön. Myös biohiilen laatua heikentävien PAH-yhdisteiden (polysykliset aromaattiset hiilivedyt) määrät analysoitiin (PAH16, Eurofins).



Kuva 6. Esimerkki pyrolyysikoelaitteen lämpötiläkäyrästä pyrolyysin aikana, vasemmalla puhdistamolietemädäte, oikealla haketettu purkupuu. Lämpötila on mitattu pyrolysoitavasta biomassasta.

Tulokset – pyrolyysikoelaite

Kuten edellä todettu, pyrolyysikokeisiin valittiin kolme raaka-ainetta, joita olivat mädätetty puhdistamoliete (HS-Vesi), puutarhajäte (risu) ja A/B-luokan purku/jätepuu. Pyrolyysillä tuotettiin hiiltä sovelluskokeita varten ja varsinaista materiaalin optimointia ei tehty. Pyrolyysilämpötila (uunin lämpötila) oli kaikilla materiaaleilla 600 °C ja retentioaika 20 minuuttia. Risut ja A/B-luokan puujäte hienonnettiin oksasilppurissa. Kaikki materiaalit kuivattiin uunissa (55 °C) yön yli, millä saavutettiin alle 10 prosentin kosteuspitoisuus. Materiaalit pyrittiin pyrolysoimaan heti kuivauksen jälkeen.

Valmistetut biohiilet punnittiin ja analysoitiin sekä saannon että hiilen laadun selvittämiseksi. Lopputuotteen hiilipitoisuus, ja siitä laskettu hiilisaanto, riippuu muun muassa lähtömateriaalin koostumuksesta, alkupe- räisestä hiilipitoisuudesta, lämpötilasta (HTT) sekä pyrolyysin kestoajasta.

Mädätetty puhdistamoliete

Hankkeessa pyrolysoitiin HS-Veden mädätettyä puhdistamolietettä (Kuva 7). Lietehiilen massasaanto oli noin 53–54 prosenttia ja hiilipitoisuus oli noin 20–22 prosenttia. Muista materiaaleista tuotettuihin biohiiliin verrattuna lietehiilen tuhkan määrä oli huomattavan korkea, noin 82 prosenttia.



Kuva 7. Vasemmalla kuivattu puhdistamolietemädäte, oikealla pyrolysoituna 600 °C:ssa. (Kuva: Annakaisa Elo, HAMK)

Puutarha/risujäte

Kokeissa käytettiin oksasilppurilla hienonnettua ja kuivattua Kiertokapula Oy:n keräämää risujätettä (Kuva 8). Risuhiilen massasaanto oli noin 25–30 prosenttia, lopputuotteen hiilipitoisuus oli noin 83 prosenttia, ja tuhkan osuus noin 11 prosenttia.



Kuva 8. Vasemmalla risuhake ja oikealla pyrolysoituna 600 °C:ssa.
(Kuva: Ilona Lahti, HAMK)

Purku/jätepuu

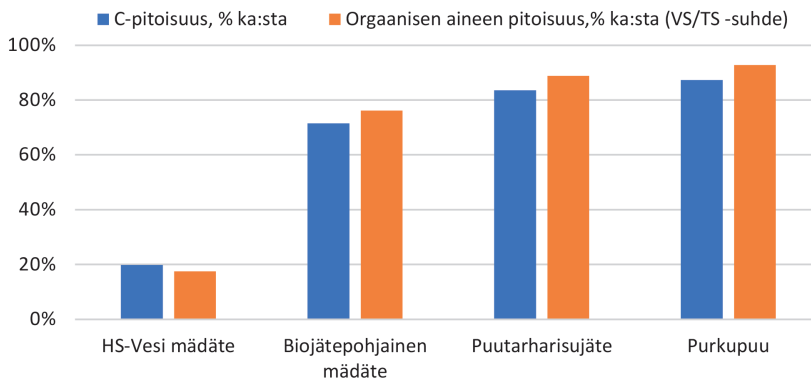
Valmiiksi haketettu purku/jätepuu (A/B-luokka) haettiin Kiertokapula Oy:n vastaanottokentältä, murskattiin ja kuivattiin HAMK-laboratoriossa (Kuva 9). Kierrätyspuubihiilen massasaanto oli noin 25–31 prosenttia, hiilipitoisuus noin 87 prosenttia ja tuhkan osuus noin 7 prosenttia.



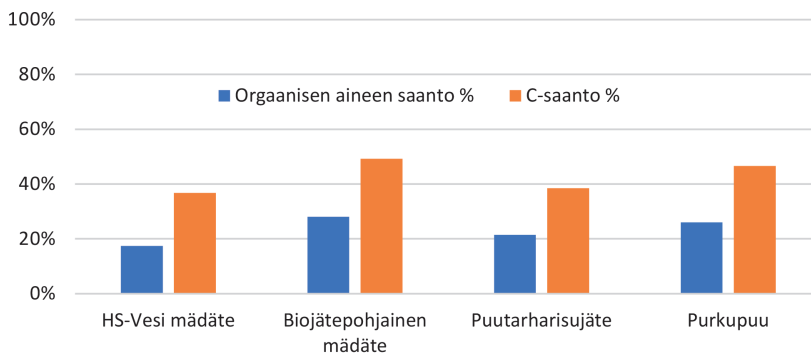
Kuva 9. Vasemmalla kierrätyspuuhaketta ja oikealla pyrolysoituna 600 °C:ssa.
(Kuva: Annakaisa Elo, HAMK)

Eri materiaaleista tehtyjä bio-/lietehiiliä on verrattu kuvissa 10 ja 11 ja Taulukoissa 4 ja 5. Vertailussa on mukana myös samassa yhteydessä analysoitu, samalla pyrolyysikoelaitteella biojättepohjaisesta mädätteestä tehty hiili. Vertailusta nähdään hyvin, että lietteen ja mädätteen sisältämä runsas fosfori säilyi pyrolyysissä ja konsentroitui hiileen. Sen sijaan materiaalin tyypestä menetetään suurin osa. Vaikka raaka-aineen tyyppiä ja fosforia saadaan talteen biohiileen, on niiden käyttökelpoisuus lannoitekäytössä kirjallisuuden mukaan ristiriitaista. Aiemmin julkaistujen tutkimusten perusteella biohiileen jäävät typpi ja rikki voivat olla lähes täysin immobilisoituneita, eivätkä vesiliukoisia ja/tai kasville käyttökelpoisia. Sama koskee usein myös fosforia. (Riikonen, 2019; Sarvi ym. 2021.) Ravinteiden säilymiseen, saantoon, liukoisuuteen ja käyttökelpoisuuteen biohiilituotteessa vaikuttaa todennäköisesti eniten pyrolyysilämpötila. Biohiilillä tehtävät kasvatuskokeet antavat parempaa tietoa näiden ravinteiden käyttökelpoisuudesta.

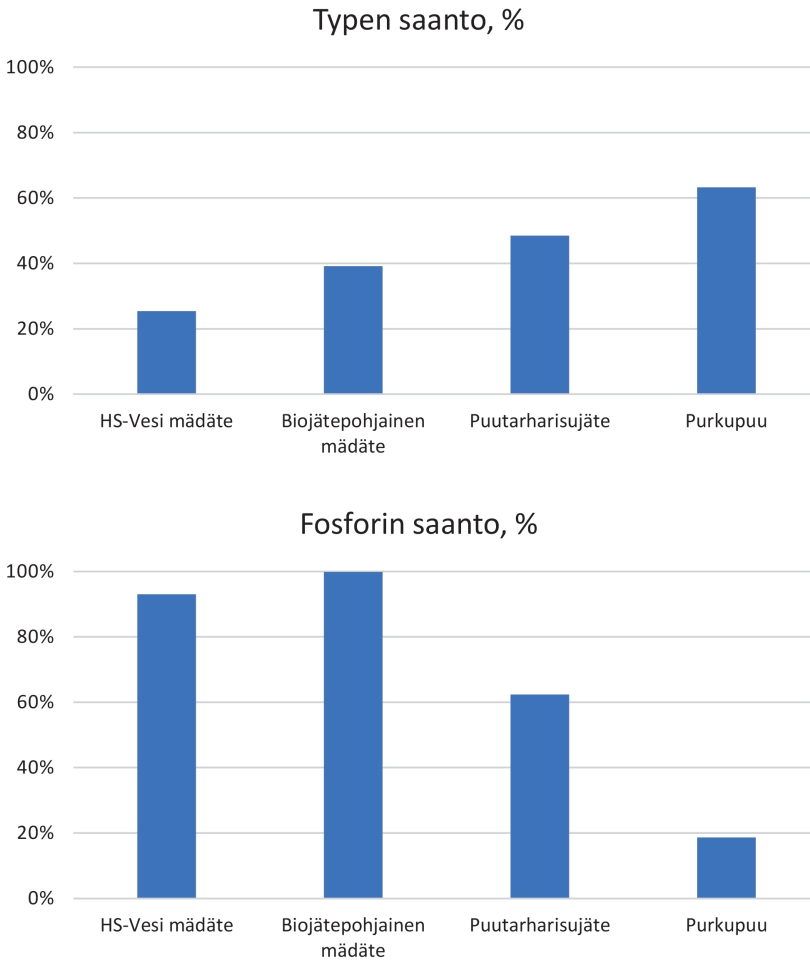
Pitoisuudet bio/lietehiilessä



Orgaanisen aineen ja hiilen saanto



Kuva 10. Eri lähtöaineista tuotettujen biohiilten hiilipitoisuudet ja hiilen saannot pyrolyysikokeissa (600 °C, 20 min).



Kuva 11. Eri lähtöaineista tuotettujen biohiilien typpi- ja fosforisaannot pyrolyysikokeissa (600 °C, 20 min).

Mikäli alkuperäinen raaka-aine sisältää raskasmetalleja, osa näistä (esim. kadmium, elohopea) höyrystyy pyrolyysilämpötilasta riippuen, osa kuitenkin konsentroituu biohiileen, kun raaka-aineen massa pienenee. Hankkeessa tehtiin raskasmetallianalyysit yhdestä kutakin raaka-ainetta ja biohiiltä edustavasta näytteestä (Taulukko 4). Raskasmetallianalyseissä ainoastaan jätteen arseenipitoisuus ylitti lannoitevalmistelainsäädännön asettaman raja-arvon (Taulukko 4). Hiiletykseen käytetty purku/jätteenpuu oli koostumukseltaan erittäin heterogeenista, joten oli haastavaa saada edustavaa, nimenomaan kyseistä biohiilituotennäytettä vastaavaa raaka-ainenäytettä analysoitavaksi. Myös Sormo ym. (2020) raportoivat

korkeita arseenipitoisuuksia jätepuubiohiilissä. Kyseisessä norjalaisen NGI:n hankkeessa ja tässä julkaisussa on selvitetty laajasti purku/jätepuun epäpuhtauksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

Epätäydellisessä palamisessa, kuten biomassaa pyrolysoitaessa, muodostuu helposti PAH-yhdisteitä, joiden katsotaan olevan terveyden kannalta pääsääntöisesti haitallisia. PAH-yhdisteet muodostuvat vaihtelevasta määrästä bentseenirenkaita. PAH-yhdisteitä syntyy myös luonnonprosesseissa, ja koska ne ovat ympäristössä pitkäikäisiä, niitä on lähes kaikkialla, myös muissa orgaanisissa maanparannusaineissa kuten kompostissa (Riikonen, 2019). Terveydelle haitallisimmiksi katsottujen PAH-yhdisteiden yhteisummalle (PAH16) on asetettu liukoisuus- ja pitoisuusrajoja erilaisia tuotteita koskeissa säädöksissä ja ympäristölainsäädännössä. Biohiilen PAH-pitoisuudelle antaa raja-arvot vapaaehtoinen European Biochar Certificate (EBC 2012). On kuitenkin esitetty, että PAH:ien liukoisuus ja biosaatavuus maaperään sijoitetusta biohiilestä on heikkoa (Hilber ym., 2017).

Hankkeessa testatuista materiaaleista puutarhajäte/risu osoittautui koepyrolyyseissä haastavaksi materiaaliksi. Haitallisimmiksi katsottujen PAH-yhdisteiden yhteisumman (PAH16) arvot ylittävät risubiohiilen kohdalla EBC-biohiilisertifikaatin ohjearvon (12 mg/kg) peruslaatuiselle biohiilelle (Taulukko 5). On kuitenkin huomattava, että PAH-analyysi on tehty vain yksittäisistä biohiilinäytteistä, ylipäätään PAH-pitoisuus ei kuvaa niinkään yleisesti raaka-aineen laatua biohiilen tuotannossa vaan ennemminkin yksittäisen pyrolyysikokeen tai käytetyn pyrolyysilaitteen olosuhteita (Bucheli ym., 2015). Risuhiilen kohdalla kyseessä voi olla todennäköisimmin näytteen kontaminaatio pyrolyysiputken kanteen tiivistyneellä PAH-pitoisella pyrolyysinesteellä (terva). On myös esitetty, että korkeissa lämpötiloissa tuotettuun biohiileen voi muodostua PAH-yhdisteitä kaasujen mineralisaation myötä, mikäli kaasujen virtaus ei ole riittävä (Bucheli ym., 2015). Analyysien perusteella lietehiilen raskasmetallipitoisuudet alittavat MMM:n lannoiteasetusten ylärajat ja PAH-pitoisuus EBC:n raja-arvot, sen sijaan purkupuun PAH-pitoisuus ylitti premium-laatuisen biohiilen arvon (4 mg/kg), mutta alitti EBC:n peruslaatuiselle biohiilelle asetetun raja-arvon (Taulukko 5).

Taulukko 4. Eri raaka-aineiden ja niistä tuotettujen biohiilen (600 °C, 20 min) raskasmetalli- ja PAH-pitoisuudet.

mg/kg ka	Risu	Risuhiili	Jätepuu	Jätepuuhiili	Liete-mädäte	Lietehiili	Raja-arvo*
Arseeni (As)	<1,0	1,2	2,8	95	8,4	17	25
Elohopea (Hg)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,28	<0,10	1
Kadmium (Cd)	0,22	<0,20	0,21	<0,20	0,77	0,46	1,5
Kromi (Cr)	<1,0	2,7	15	89	32	59	300
Kupari (Cu)	6,3	20	13	220	260	410	600
Lyijy (Pb)	<1,0	1,6	8,5	78	26	33	100
Nikkeli (Ni)	<2,0	7,1	6,5	11	29	55	100
Sinkki (Zn)	99	250	330	260	790	1200	1500
PAH16		14		9,9		1,2	

*) Lannoitevalmisteelle asetettu raja-arvo (MMM lannoitevalmisteasetus 12/18).

Taulukko 5. Biohiilen analyysitulokset vs. EBC:n ja MMM:n raja-arvot. Korkeaksi katsotut arvot on merkitty punaisella. Tässä analyysissä jätepuuhiilen arseenipitoisuus ylitti lannoitevalmisteasetuksen asettaman raja-arvon.

Analyysitulokset vs. enimmäisrajat [mg/kg ka]					
	MMM lannoitevalmisteasetus	EBC (premium)	EBC (basic)	Jätepuuhiili	Lietehiili
Arseeni (As)	25	-	-	95	17
Elohopea (Hg)	1	1	1	0,1	0,1
Kadmium (Cd)	1,5	1	1,5	0,2	0,46
Kromi (Cr)	300	80	90	89	59
Kupari (Cu)	600	100	100	220	410
Lyijy (Pb)	100	120	150	78	33
Nikkeli (Ni)	100	30	50	11	55
Sinkki (Zn)	1500	400	400	260	1200
Summa 16 EPA-PAH	-	4	12	9,9	1,2

Tulokset – pilottimittakaavan panosretortti

Laboratoriokokeiden lisäksi biohiiltä tuotettiin Mayt Oy:ltä vuokratulla aiemman kuvauksen mukaisella pilottimittakaavan panosretortilla. Mayt Oy:n retorttiin päädyttiin, koska hankkeen resursseilla ei ollut mahdollista rakentaa omaa pilottimittakaavan laitteistoa eikä laboratoriomittakaavan laitteella voitu tuottaa tarpeeksi materiaalia hankkeessa tehtäviin kenttämittakaavan suodatuskokeisiin. Mayt Oy:n pyrolyysilaitteistolla tuotettiin biohiiltä purkupuumateriaalista kahdessa eri yhteydessä, toukokuussa 2020 Karanojan jätteenkäsittelyalueella Hämeenlinnassa ja marraskuussa 2020 Kiimassuon alueella Forssassa. Karanojalla käytettiin Kiertokapula Oy:n purkupuuta ja Kiimassuolla Envor Group Oy:n purkupuuta. Molemmat koepyrolyysit olivat samalla biohiilen valmistuksen demotilaisuuksia. Materiaalina käytettiin purkupuukasalta kerättyä sekaista puhdasta tai kevyesti pintakäsiteltyä puuta ja levyä. Purkupuubiohiilien CHN-jakauma analysoitiin HAMK:n laboratoriossa (taulukko 6) ja lisäksi Kiimassuolla valmistetusta hiilierästä teetettiin haitta-aineanalyysit Eurofins-laboratoriossa. Tämän hiilen kokonais-PAH (PAH16) pitoisuus oli 6,9 mg/kg, tja se täytti EBC-sertifioinnin perustason hiilen vaatimukset (12 mg/kg). Analyysissä ei havaittu merkittäviä määriä raskasmetalleja ja muun muassa arseenipitoisuus jäi tällä kertaa alle määritysrajan. Vaihtelu raskasmetallipitoisuuksissa eri purku/jätepuuerien välillä kuvastaa tämän raaka-aineen heterogeenisuutta. Karanojan purkupuumateriaaleista valmistettua biohiiltä käytettiin myöhemmin murskattuna ja seulottuna vesiensuodatuskokeissa.



Kuva 12. Purkupuun biohiillettystä Mayt Oy:n pyrolyysiretortilla Kiertokapula Oy:n Karanojan alueella Hämeenlinnassa. (Kuvat: Annakaisa Elo)

Taulukko 6. Mayt Oy:n pyrolyysilaitteella tuotettujen purkupuuhiilien hiili-, vety- ja typpipitoisuudet.

Näyte [% kuiva-aineessa]	C	H	N
Purkupuu Kiertokapula	86,9	1,8	0,12
Purkupuu Envor	92,4	1,3	0,26

Biohiilen käyttösovellukset – tutkimustuloksia

Biohiili viherrakentamisessa

Biohiilen käytöllä viherrakentamisessa, kasvualustoissa ja hulevesiratkaisuissa tavoitellaan usein suurempaa haitta-aineiden, ravinteiden ja veden pidättymistä ja sen myötä parempaa kasvien kasvua (Riikonen, 2019). Biohiilen on havaittu parantavan maaperän ominaisuuksia etenkin haastavissa olosuhteissa, jollaisia ovat etenkin läpäisevät ja ravinneköyhät mineraalimaat sekä happamat maat (Rasa ym., 2018). Biohiilellä on itsessään kalkitusvaikutusta muun muassa sen luontaisesti korkean pH:n vuoksi. Biohiili voi pidättää maaperästä vettä, ravinteita ja mahdollisia haitta-aineita ja voi näin estää esimerkiksi ravinnevalumia. Biohiili ei itsessään ole lannoitevalmiste, ja sen lannoitusvaikutuksen katsotaan olevan pieni. Se voi kuitenkin sisältää valmistuksen lähtöaineesta peräisin olevia ravinteita, kuten fosforia ja kaliumia (mm. Lehmann and Joseph, 2015). Etenkin lähtöraaka-aineen tyyppiä menetetään pyrolyysissä, ja ravinteiden liukoisuus biohiilestä voi olla heikkoa. Kasvualustoihin ja viherrakentamiseen käytettävästä biohiilestä ei tulisi liueta ympäristöön kuten PAH-yhdisteiden tai raskasmetallien kaltaisia haitta-aineita. Näin ollen käytettävän biohiilen laatu tulisi varmistaa analyysein. Puupohjainen biohiili on hyväksytty kasvualustakäyttöön, Ruokaviraston listauksessa sen tyyppinimenä on ”Kasvipерäinen kasvualustahiili”.

Biohiilen ominaisuudet kasvualustoissa riippuvat muun muassa lähtömateriaalista, ja erilaiset biohiilet voivat antaa keskenään ristiriitaisia tuloksia. Tässä hankkeessa oli tarkoitus selvittää valikoitujen, tuotannon kannalta mielenkiintoisista raaka-aineista valmistettujen biohiilien ominaisuuksia kasvualustoissa ja viherrakentamisessa. Koska biohiilet valmistettiin jäte- ja sivuvirroissa, katsottiin turvallisimmaksi etsiä käyttökohteita kasvualustoista, jotka eivät tähtää ei ruoantuotantoon, eli käytännössä viherrakentamisesta. Kanta-Hämeessä mielenkiintoisin erityiskohde, jossa biohiiltä voidaan soveltaa sekä kasvualustaan että hulevesien hallintaan, ovat golffkentät. Käytännön kokeita tehtiin HAMK/HAMI:n hallitsemalla Lepaan golffkentällä sekä golf-kasvualustassa. Golf-kasvualustaan soveltuva biohiili voi sopia muuhunkin viherrakentamiseen, kuten pelikenttiin ja puistonurmiin.

Kasvatuskokeet

Koepyrolyysillä tuotettuja biohiiliä testattiin HAMK Lepaan kasvihuone-tiloissa. Kokeen yksityiskohdat ja tulokset on julkaistu opinnäytetyössä (Rosti, 2021). Kokeessa tutkitut biohiilet olivat puutarhajäterisuista tehtyä

biohiiltä, ”risuhiiltä”, puhdistamolietepohjaisesta mädätteestä tehtyä ”lietehiiltä” ja purkupuusta tehtyä ”puuhiiltä”. Kokeessa käytettiin sekä lannoittamatonta hiiltä että kaupallisella lannoitteella (Multicote) lisälannoitettuja hiiliä (Taulukko 8). Tavoitteena oli selvittää, parantaako biohiililisiä kasvua normaalilannoitetussa kasvualustassa ja ovatko biohiilen mahdollisesti sisältämät ravinteet kasveille käyttökelpoisessa muodossa (lannoittamattomat hiilet). Koekasvina käytettiin westerworldinraihienää (*Lolium multiflorum* var. *westerworldicum*) ja kasvualustana golfkenttöseosta (USGA; n. 20 % orgaanista ainesta ja 80 % hiekkaa), alustoihin lisättiin kutakin testattavaa biohiiltä 10 % (tilavuudesta). Koe kesti kuusi viikkoa, biomassa korjattiin, kuivattiin ja punnittiin kahden viikon välein. Kokeen päätyttyä tehtiin vielä niin kutsuttu ”näännytyskoe”, jossa jokaista käsittelyä edustavia ruukkuja jätettiin kastelematta 12 päivän ajan ja kasvien nuutumista seurattiin. Tavoitteena oli testata, parantaako biohiili kasvualustan kosteudenpidätyskykyä ja näin kasvien kuivuudenkestävyyttä. (Rosti, 2021.)

Eri biohiilikäsittelyjen vertailussa lietehiili tuotti eniten biomassaa (=suurin kuivapainokertymä) sekä lannoitetuista että lannoittamattomista käsittelyistä (K1 ja K2), sen sijaan risuhiilellä biomassan kertymä jäi hieman heikommaksi kuin muissa käsittelyissä (Kuvat 13–15). Tulokseen voi vaikuttaa esimerkiksi se, että lietehiili sisälsi muun muassa enemmän kalsiumia kuin muut hiilet, jolloin sen kalkitusvaikutus on voinut olla muita vahvempi (Rosti 2021). Todennäköisin selitys lietebiohiilen positiivisiin kasvuvaikutuksiin on sen muita biohiiliä korkeampi fosforipitoisuus (Taulukko 7). Myös kasvianalyseissä lietehiilikäsittelyn biomassan fosforipitoisuus oli korkein, mikä viittaa vahvasti siihen, että lietehiilen fosfori on ollut ainakin osittain kasveille käyttökelpoisessa muodossa (Kuva 13). Riikosen (2019) mukaan fosforin saatavuuden paraneminen kasveille biohiiltä käytettäessä voi johtua biohiilen itsensä sisältämästä fosforista, mutta myös siitä, että fosforin käyttökelpoisuus kasveille lisääntyy pH:n noustessa. Biomassan sisältämä typpi menetetään etenkin korkean lämpötilan pyrolyysissä suurimmaksi osaksi (mm. Weber & Quicker, 2018). Etenkin mädätetyn puhdistamolietteen typpi haihtui voimakkaasti jo pyrolyysiä edeltävässä biomassan uunikuivauksessa, vaikka tämä tehtiin alhaisessa lämpötilassa (55 °C). Yleensäkin biohiiltä ei voida pitää kasvun kannalta merkittävänä typen lähteenä, sillä sen mahdollisesti sisältämä typpi voi olla kasveille käyttökeltottomassa muodossa (Riikonen, 2019). Yllättäen kuitenkin lietehiilikäsittelyissä ilman lisälannoitetta kasvien tyyppipitoisuudet olivat hieman korkeampia kuin muilla lannoittamattomilla käsittelyillä (Kuva 13). Tämä viittaa siihen, että myös lietehiilen sisältämä typpi on ollut osin biosaatavassa muodossa.

Näännytyskokeen perusteella todettiin, että biohiilikäsittelyissä kasvit nuutuivatkin kontrolleja hitaammin, eli biohiili pidatti kosteutta kasvualustaan (Kuva 16). Sen sijaan eri biohiiliä sisältäneiden käsittelyiden välillä ei havaittu merkittäviä eroja (Rosti, 2021).

Taulukko 7. Kasvatuskokeessa käytettyjen biohiilien alkuainekoostumus. Biohiilet valmistettu pyrolyysikoelaitteella (600 °C, 20 min; kts. edellinen pääluku Biohiilen valmistus).

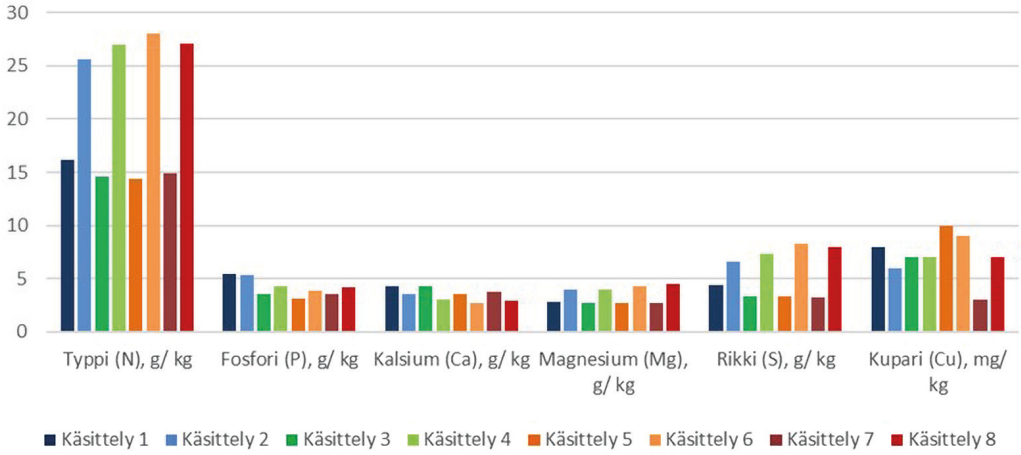
	Biohiili 1	Biohiili 2	Biohiili 3
Biohiilen lähtömateriaali	Mädäte*	Risujäte	Purkupuu
pH	7,68	8,35	8,21
Kuiva-aine -%	100	69	87
Tuhka-%	82,5	11,2	7,2
Pitoisuudet (% ka:sta):			
Org.aines	17,5	88,8	92,8
C	19,8	83,5	87,3
N	1,72	1,65	1,26
P	5,9	0,26	0,02
H	0,5	1,7	1,6
S	1,3	0,12	0,06
O	< 0,1	1,9	2,6

* Mädäte HS-Veden lietemädättämöstä

Taulukko 8. Kasvatuskokeen käsittelyt.

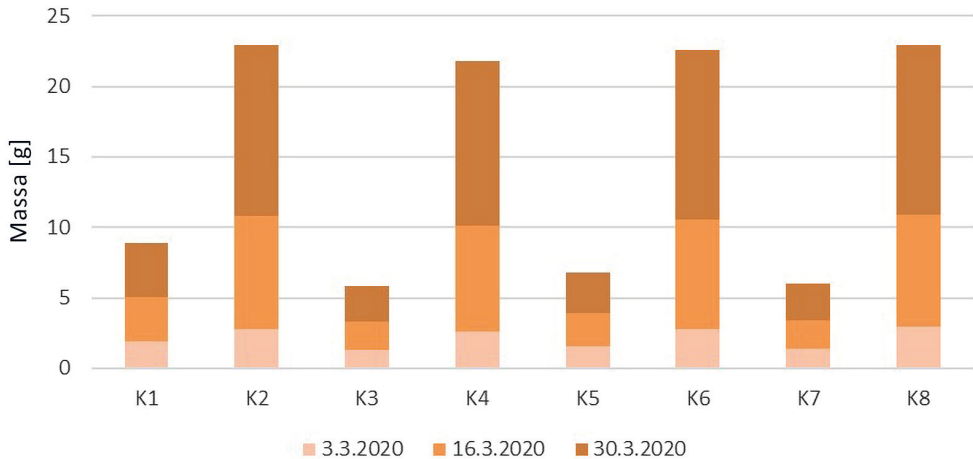
Käsittelyn tunnus	Käsittely
K1	Lietehiili, ei lannoitetta
K2	Lietehiili, Multicote-lisä
K3	Risuhiili, ei lannoitetta
K4	Risuhiili, Multicote-lisä
K5	Puuhiili, ei lannoitetta
K6	Puuhiili, Multicote-lisä
K7	Kontrolli, ei lannoitetta
K8	Kontrolli, Multicote-lisä

Kasviravinteet käsittelyssä

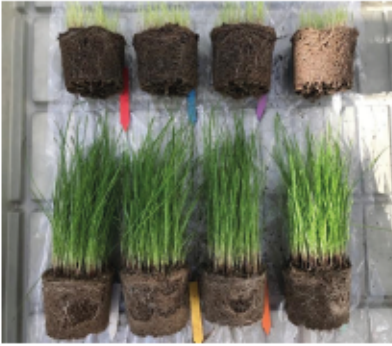


Kuva 13. Korjatun ja kuivatun biomassan kasviravinnepitoisuudet. Analysoitu Hortilab Oy:ssä. Käsittelyt ks. Taulukko 8. (Rosti, 2021)

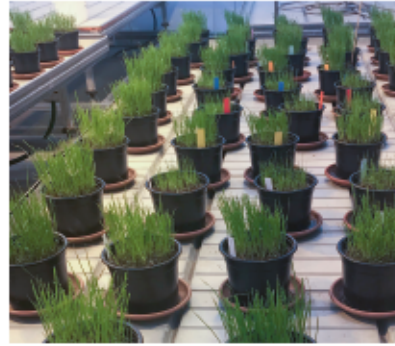
Kuivapainojen kertyminen käsittelyittäin



Kuva 14. Kuivapainojen kertyminen käsittelyittäin (K1-8) kasvatusjakson aikana. Käsittelyt ks. Taulukko 8. (Rosti, 2021)



Kuva 15. Kasvu kuuden viikon kasvatuksen jälkeen, tässä vaiheessa lisälannoittamattomien ruukkujen kasvu on jo hiipunut. (Kuva: Mervi Rosti)



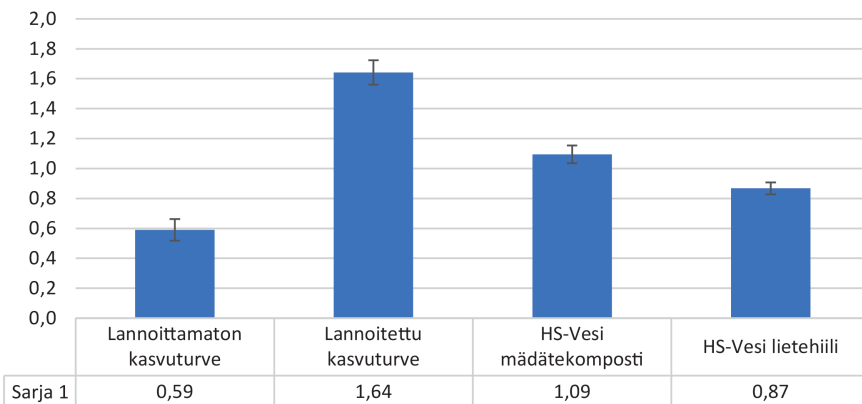
Kuva 16. Näännytyskokeen ruukut kolmantena päivänä näännytyskäsittelyn alusta. (Kuva: Mervi Rosti)

Lietehiilellä saatuja lupaavia tuloksia ja sen mahdollista kasvua parantavaa vaikutusta testattiin vielä erillisessä pienen mittakaavan kasvatuskokeessa HAMK:n Hämeenlinnan korkeakoulukeskuksen kasvatustiloissa. Kokeen tarkoitus oli verrata HS-Veden nykytuotetta eli kompostoitua puhdistamolietepohjaista kasvualustaa sekä HS-Veden lietemädätteestä HAMKissa tehtyä lietehiiltä. Kontrollikäsittelyinä olivat lannoittamaton ja lannoitettu kasvuturve. Kasvualustan pohjana oli kalkittu ja lannoittamaton kasvuturve, Kekkilä Airboost, johon lisättiin noin 1/20-tilavuusosa HAMKissa valmistettua ja etukäteen analysoitua erittäin niukkaravinteista puutarhajätekompostia. Kompostilisän tarkoitus oli lähinnä tuoda muuten käytännössä steriiliin turvepohjaan suotuisia mikrobeja. Typen määrä tasattiin laskennallisesti (lukuun ottamatta turvekontrollia) niin, että käsittelyjen ja kaupallisen lannoitekontrollin (Osmocote, tyyppiä 396 mg/l) typpipitoisuus alustassa oli sama. Tämä saavutettiin lisäämällä testattavaa materiaalia sen typpipitoisuuden perusteella laskettu määrä. Kokeessa haluttiin selvittää, ovatko HS-Veden nykyinen lietepohjainen kompostituote sekä lietteestä valmistettu lietehiili lannoitearvoltaan/kasvualustakäytössä toisiaan vastaavia vai muuttaako pyrolyysi lietepohjaisen tuotteen kasvualustaominaisuuksia. Koekasvina käytettiin edellisen kasvatuskokeen tapaan westerworldin raiheinää. Kasvatuskokeen pituus oli kuusi viikkoa kuten kasvihuonekokeessakin, ja ruukun yläpuolinen biomassa kerättiin kahden viikon välein. Näännytyskäsittelyä ei toistettu. Kokeen lopetuksen yhteydessä arvioitiin juuriston kunto, verrokkina lannoitekontrolli (Kuva 17). Terveen juuriston tuntomerkkejä ovat muun muassa vaalea väri, runsas haaroittuminen ja juurikarvoitus. Kaikki käsittelyt lukuun ottamatta kasvualustakontrollia tuottivat terveen juuriston.



Kuva 17. Neljän eri käsittelyn raiheinäkasvustoa ja juuristoa kokeen lopussa. Käsittelyt vasemmalta oikealle: lannoittamaton kasvuturve, lannoitettu (Osmocote) kasvuturve, HS-Veden mädätekomposti (=HS-Veden nykyinen kompostituote) ja HS-Veden mädätteestä HAMKin pyrolyysikoelaitteella tuotettu lietehiili. (Kuva: Annakaisa Elo, HAMK)

Massasaanto
kuivapaino (g)



Kuva 18. Raiheinäbiomassan kuivapainot kuuden viikon kasvatuksen jälkeen. Kuvaaajiin on laskettu rinnakaisten ruukkujen kuivapainojen keskiarvot ja hajonta keskiarvon keskivirheenä. Käsittelyt vastaavat kuin kuvassa 17: Lannoittamaton kasvuturve, Lannoitettu kasvuturve, HS-Vesi mädätekomposti ja HS-Veden mädätteestä tehty lietehiili.

Lietehiilikäsittelyssä kasvutulos oli kuivabiomassan perusteella noin 20 prosenttia pienempi kuin HS-Veden kompostituotteella ja molemmilla kasvu oli niukempaa kuin hidasliukoisella kaupallisella lannoitteella (Kuva 18). Kasvianalyyseiden perusteella lietehiilen fosfori näyttäisi kuitenkin olevan kasveille tämänkin kokeen perusteella käyttökelpoista (Taulukko 9). Vaikka laskennallisesti kaikissa käsittelyissä pyrittiin tasaamaan typen lähtömäärä kaupallista lannoitetta vastaavalle tasolle, niin sekä kompostoidun että pyrolysoidun puhdistamolietemädätteen tyyppi vaikuttaisi olevan joko huonommin kasvien saatavilla tai helpommin huuhtoutuvassa muodossa kuin lannoitekontrollissa. Typen niukkuus selittää molempien käsittelyiden lannoitekontrollia heikompaa kasvutulosta. Koska lietehiilikäsittelyssä alustassa kasvaneiden kasvien tyyppipitoisuus oli korkeampi kuin lannoittamattomassa turvekontrollissa kasvaneiden, voidaan päätellä, että lietehiilen tyyppi voi kuitenkin olla osittain kasvien käytettävissä (Kuva 18). Raiheinän kasvua saattoi tässä kokeessa rajoittaa nurmelle tarpeellisen kaliumin määrä, joka oli molemmissa HS-Veden tuotteissa kaupallista lannoitetta alhaisempi (Taulukko 9).

Lietehiilen käytännön etuja kompostoituu lietemädätteeseen verrattuna (=HS-Veden nykyinen kasvualustatuote) ovat pienempi tilavuus, hygieenisuus, helpompi varastoitavuus ja käsiteltävyys sekä helposti lannoitetuotteeksi soveltuva rakenne. Merkittävintä on, että käytetyssä pyrolyysilämpötilassa (n. 600 °C) voidaan olettaa suurimman osan mahdollisista orgaanista haitta-aineista hajonneen tai haihtuneen. Tässä kokeessa sekä HS-Veden kompostituotetta että lietehiiltä käytettiin alustassa varsin mallillisia määriä (noin 10 % tilavuudesta), mahdollisilla jatko- tai kenttäkasvatuskokeilla voitaisiin hakea sopivaa käyttömäärää lietehiilelle ja seurata lietehiilen pidempiaikaisia vaikutuksia.

Taulukko 9. Tärkeimmät kasvavinteet raiheinän kasvianalyyseissä 6 viikon kasvatuksen jälkeen. Analysoitu Hortilab Oy:ssä.

Ravinne g/kg	Kasvualustakontrolli	Lannoitekontrolli	Kompostoitu lietemädäte	Lietehiili
Typpi (N)	27,5	53,8	47,1	39,2
Fosfori (P)	2,66	9,2	8,09	8,96
Kalium (K)	41,3	82,9	32	41,9
Kalsium (Ca)	7,47	5,39	7,06	7,59

Biohiilen käyttö golfviheriöllä

Golfnurmen kasvatuskokeet

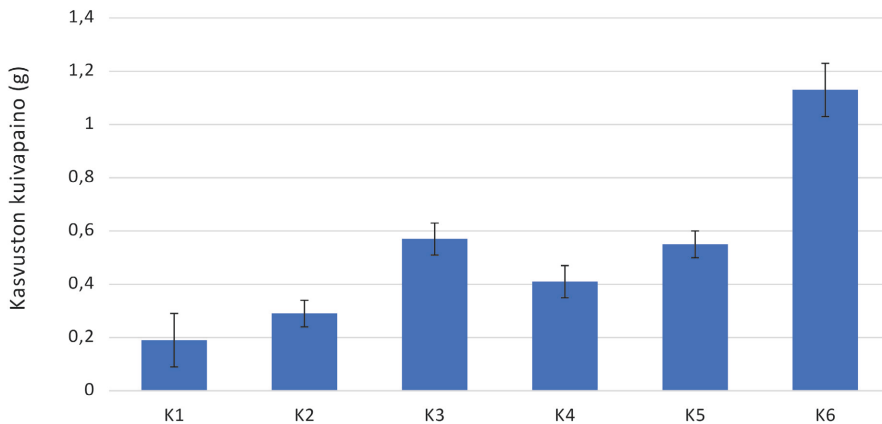
Hankkeessa valittiin alueellisesti kiinnostavaksi biohiilen erityissovelluskohteeksi golfkentät. Golfviheriöiden ylläpito vaatii voimakasta kastelua ja lannoitusta, jolloin on riskinä, että lannoitteita valuu ympäröiviin vesistöihin. Lisäksi kentän ylläpito, kuten kastelu ja ilmastus, vaativat huomattavia resursseja. Golfviheriöllä biohiilen on muun muassa todettu pidättävän kosteutta vettä helposti läpäisevässä kasvualustassa sekä estävän viheriön tiivistymistä ja parantavan sen ilmastusta (Vaughn ym., 2018). Biohiili ei kulu tai painu kasvualustassa samaan tapaan kuin golfkasvualustoihin lisättävät muut orgaaniset materiaalit, esimerkiksi turve. Lisäksi biohiili parantaa golfnurmen kasvua ja voi vähentää sekä lannoitteiden että torjunta-aineiden tarvetta (Vaughn ym., 2018). Näin ollen biohiili voisi estää mahdollisia ravinnevalumia golfkentältä ja vähentää kastelun tarvetta.

Ennen kuin hankkeen oma biohiilituotanto käynnistyi, tehtiin golfnurmen esikasvatuskokeita kaupallisella, kuusipuupohjaisella biohiilellä (Carbofex Oy). Näissä kokeissa käytettiin golfkasvualustaa (USGA) sekä golfnurmiseossiementä. Tarkoituksena oli selvittää kasvualustalle sopivinta biohiilimäärää ja lannoitusta sekä arvioida, onko biohiilellä vaikutusta nurmen kasvuun. Nestemäinen lannoite lisättiin biohiileen ennen sen sekoittamista kasvualustaan, siten että lannoitteen ravinnepitoisuus mukaili golfkentällä normaalisti käytettyä. Biohiilen pH säädettiin arvoon 7,0 ennen kasvualustaan sekoittamista. Typen määrä säädettiin kaikissa koealustoissa samaksi. Yksi käsittelyistä sisälsi biohiilen lisäksi 10 prosenttia niukkaravinteista puutarhajätekompostia, jolla ei laskennallisesti ollut itsessään lannoitusvaikutusta. Käsittelyjä oli kuusi: lannoitekontrolli, 5-tilavuusprosenttinen biohiili, 10-prosenttinen biohiili, 20-prosenttinen biohiili, 50-prosenttinen biohiili ja sekoitus, jossa oli 10 prosenttia biohiiltä ja 10 prosenttia niukkaravinteista kompostia. Toistojen määrä kokeessa oli viisi. Kasvatusaika oli neljä viikkoa, jonka jälkeen biomassa korjattiin, kuivattiin ja punnittiin.

Kasvatuskokeiden perusteella 10-tilavuusprosenttinen biohiili oli kasvun kannalta ihanteellisin, lisäksi jo 10-prosenttinen puutarhajätekomposti yhdistettynä biohiileen lisäsi kasvua tässä koejärjestelyssä n. 50 prosenttia (Kuvat 19 ja 20). Tätä ei voida selittää kompostin mahdollisesti tuomalla ravinnelisällä, koska kyseinen komposti oli etukäteen todettu erittäin niukkaravinteiseksi.



Kuva 19. Kuva koeruuksista, kasvuerot eri käsittelyiden välillä näkyivät selvästi. Vasemmassa reunassa 10-prosenttinen biohiili + 10-prosenttinen komposti. Kuva: Annakaisa Elo



Kuva 20. Golf-nurmen biomassakertymät esikasvatuskokeessa neljän viikon kasvatuksen jälkeen. Keskihajonta merkitty palkilla.

Golfkenttäkokeet

Kasvualustojen lisäksi hankkeessa testattiin biohiilen vaikutusta golfkenttien ravinnevalumien estämisessä HAMK/HAMIn hallinnoimalla Lepaan golfkentällä Hattulassa. Kokeen yksityiskohdat on esitetty opinnäytetyössä Lahti (2020) ”Biohiilen vaikutus golfviheriön kasvualustan ominaisuuksiin”. Kokeessa käytettiin Carbofex-kuusipohjaista biohiiltä, joka oli jauhettu lähelle USGA-alustan karkeutta (1–2 mm raekoko). Lepaan golfkentälle on rakennettu viheriön alle kentän rakennusvaiheessa 1 m²:n suuruisia lysimetrikoealoja, joista kulkee maanalaiset keräysputket kentän salaojakaivoihin, joihin voitiin sijoittaa keräysastiat (tarkemmin kts. Lahti, 2020). Kokeessa oli mukana neljä koealaa, joissa oli

50-prosenttista biohiiltä (+USGA), 20-prosenttista biohiiltä (+USGA) sekä biohiileton kontrolli (100 % USGA). 20-prosenttista biohiiltä sisältävä koeala toteutettiin sekä normilannoitettuna että luomulannoitettuna. Lepaan golfkenttä on aktiivipelikäytössä, ja kenttämestarin toiveena oli, että koealat eivät saa erottua muusta viheriöstä. Tämän vuoksi biohiilet sijoitettiin viheriön kasvukerroksen ja suodatuskerroksen väliin, jolloin niillä ei ollut vaikutusta nurmen kasvuun (Kuva 21). Koealojen kasvukerros pyrittiin irrottamaan mahdollisimman ehjänä ennen niiden auki kaivamista, ja se siirrettiin takaisin uudelleentäytön jälkeen. Nurmi palautuikin ennalleen nopeasti. Kahteen koealaan (50-prosenttinen biohiili sekä biohiileton kontrolli) sijoitettiin jatkuvatoimiset kosteusanturit kasvukerroksen alapuolelle. (Lahti, 2020.)

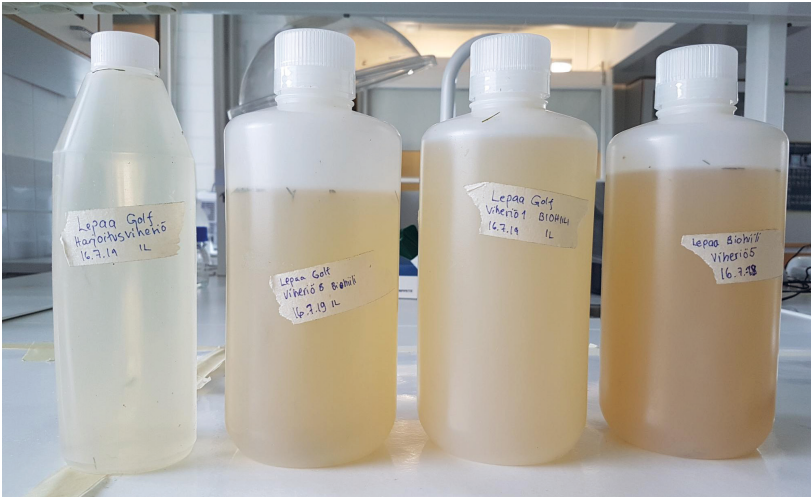


Kuva 21. Kokeen aloitus HAMK/HAMI Lepaan golfviheriöllä. Lysimetrikoealojen nurmi-kasvukerros poistettiin varovasti, koeala tyhjennettiin alkuperäisestä kasvualustasta ja täytettiin testiseoksella, tämän jälkeen alkuperäinen nurmikerros (n. 15 cm) siirrettiin takaisin testiseoksen päälle. (Kuvat: Annakaisa Elo, Iina Lahti)

Koejärjestely kentällä osoittautui odotettua haasteellisemmaksi. Lysimetrikoealat olivat olosuhteiltaan hyvin erilaisia, muun muassa maakerrosten paksuus ja veden poistoputken pituudet sekä kallistuskulmat vaihtelivat koealoilla, mikä vaikeutti näiden keskinäistä vertailua. Kesäkaudella 2019 (toukokuu-syyskuu) seurattiin kentän läpi suotautuvia vesiä (toukokuu-syyskuu), ja jo kokeen alussa havaittiin, ettei golfkentältä tule normaaleilla kastelumäärillä vertikaalisia suotovesivalumia lysimetriin saakka. Tätä kompensoitiin ylimääräisin kasteluin, jotta keräysastioihin saatiin tarpeeksi suotovettä analyysihin (Lahti, 2020).

Suotovesien analyysien perusteella havaittiin, ettei viheriöistä liennut mitattavia määriä ravinteita miltään koealalta suotautuviin vesiin. Ainoa selkeästi havaittava muutos ja ero eri koealojen välillä oli suotoveden värin kirkastuminen (Kuva 22). Tätä eroa ei saatu todennettua kiintoaineen pitoisuusmäärittäyksillä (TSS-tulokset). Veden väri johtuu todennäköisimmin USGA-alustan sisältämästä turpeesta (20 % alustasta). Biohiilen

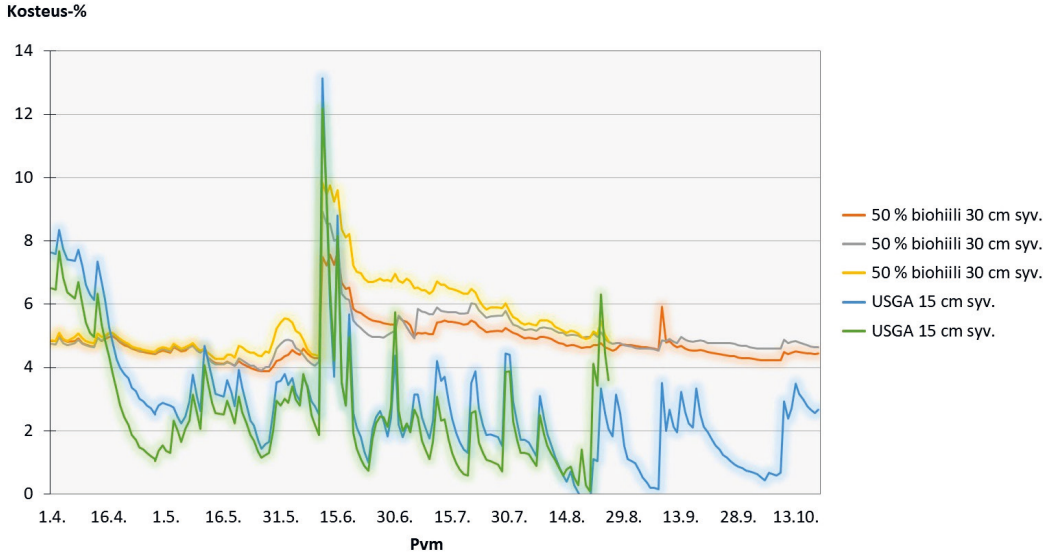
ei havaittu irtoavan suotoveteen. Kosteusmittausantureiden data kalibroitiin laboratorioissa tehtyjen biohiili-hiekkaseos-koemittausten ja näiden avulla tehtyjen kosteuskäyrien perusteella. Tämä kalibrointi oli tulosten tulkinnan ja luotettavuuden kannalta tärkeää, sillä kentällä käytetyt kosteusmittarit oli optimoitu hiekalle, jonka sähkönjohtavuus poikkeaa huomattavasti biohiiltä sisältävästä matriisista. Laboratorioissa tehdyistä kosteusmittaustuloksista huomattiin, että puhdas biohiili pidatti vettä paremmin kuin golfviheriöllä tavallisesti käytetty USGA-kasvualusta. Myös biohiiltä osittain sisältävä kasvualusta pidatti vettä paremmin kuin tavallinen USGA-alusta. Golfkentälle sijoitetut mittarit kuitenkin mittasivat USGA-kasvualustalle keskimäärin suurempia kosteuspitoisuuksia kuin biohiiltä sisältävälle alustalle. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että biohiiltä sisältävä kasvualustakerros oli syvemmällä maan alla kuin USGA-kasvualusta. Sadevedestä ja kasteluista tuleva vesi ei välttämättä imeytynyt biohiilikerrokseen asti vaan jäi pintaan. (Lahti, 2020.)



Kuva 22. Golfkentältä kerättyjen vesien värieroja, vasemmalta oikealle: 50-prosenttinen biohiili, 20-prosenttinen biohiili, 20-prosenttinen biohiili, ei biohiiltä. (Kuva: lina Lahti)

Kaudella 2020 päätettiin koaloja ylläpitää normaalilla golf-lannoitteella kasteluveden mukana päivittäin noin viikon ajan niin sanotussa kyykytyskokeessa, jotta lysimetreistä kerättäviin vesinäytteisiin saataisiin mitattavia määriä ravinteita mahdollisten käsittelyerojen selvittämiseksi. Näytteitä oli tarkoitus kerätä nyt myös suoraan biohiilikerroksesta maakairan avulla. Inhimillisen erehdyksen vuoksi koaloille lisättiin viikon lisälannoite jo ensimmäisellä kastelukerralla ja lisäksi annosteltu lannoitemäärä oli huomattavasti suunniteltua korkeampi. Jo ensimmäisten vesinäyteanalyysojen perusteella todettiin että kokeesta ei tulla saamaan informatiivisia tuloksia. Sen sijaan kosteusanturidataa kerättiin koaloilta

koko kausi 2020 ja tämän kokeen tulokset on havainnollistettu Kuvassa 23, jossa on esitetty kalibroidut kosteuskuvaajat. Kuvaajasta nähdään, että maaperän kosteus biohiilikoealalla on verrokkaa korkeampi, biohiili myös tasaa kosteusvaihtelua ja säilyttää maaperän kosteuden tasaisempaan.



Kuva 23. Lepaan golf-koealojen kosteusmittausdataa vuodelta 2020.

Golfviheriöillä tehdyn kokeen johtopäätöksinä voidaan todeta, että golfkentän mahdolliset hule- tai valumavedet virtaavat todennäköisesti enemmän vertikaalisesti kuin suoraan kentän maakerrosten läpi, ja ilman lisäkastelua lysimetriin kertyvä vesimäärä jäi niukaksi tai olemattomaksi. Näin ollen mahdolliset biohiilipohjaiset ravinnevalumia estävät vesiensuodatusratkaisut olisi järkevintä sijoittaa kentän reuna-alueille. Tämän kokeen sekä kenttämestarin kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella voidaan todeta, että biohiilen potentiaaliset edut golfviheriöillä, esimerkiksi kosteuden tasaaminen, saataisiin parhaiten hyödynnettyä, kun biohiili otetaan mukaan jo kentän perustamis- tai kunnostusvaiheessa, joko kasvualustaan sekoitettuna tai muissa rakenteissa. Mikäli tavoitteena on golfnurmen tai muun pelinurmen/viheralueenurmen hyvä kasvu niin optimaalisiin biohiililisäysmäärä näyttäisi olevan kasvihuonekokeen perusteella 10 tilavuusprosenttia. Kasvua voidaan parantaa vielä mahdollisella kompostilisällä. Kentän ilmastusta voidaan parantaa biohiilen avulla muun muassa lisäämällä viheriön ilmastusreikiin nykykäytännön vastaisesti hiekansijaan biohiiltä. Tällaista käytäntöä on harjoitettu Yhdysvalloissa (Vaughn, 2018). Golfkentältä saatuja tuloksia voidaan soveltaa useiden muiden viheralueiden hoidossa, esimerkiksi pelinurmilla tai puistoviheriöillä. Viheralueiden kasvualustaan sijoitettuna biohiili toimii myönteisten maanparannusominaisuuksien lisäksi myös pitkäikäisenä hiilinieluna.

Jätteidenkäsittelyalueen suotoveden käsittely

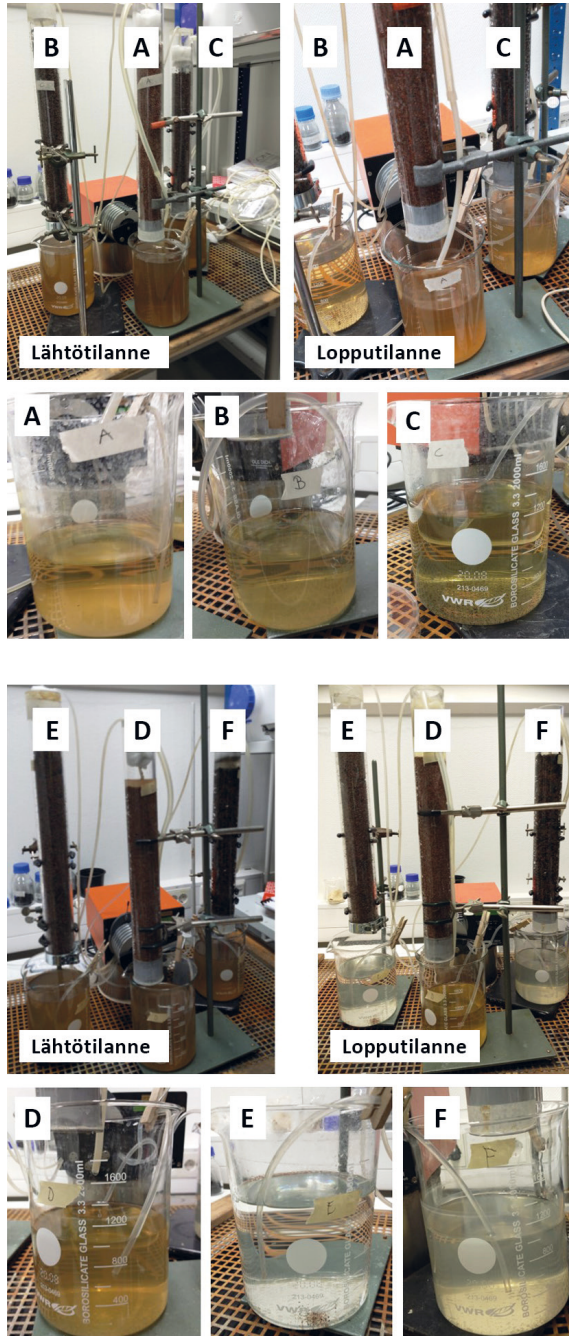
Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeessa testattiin hankkeessa valmistettuja biohiiliä Kiertokapulan Karanojan jätteidenkäsittelyalueen suotovesien käsittelyssä. Suodatuskokeita tehtiin sekä laboratorio- että pilottimittakaavassa. Käsittelyratkaisut suunniteltiin kirjallisuuden perusteella, mukaillen etenkin “Port of Tacoma” -hankkeessa toimivaksi todettuja ratkaisuja (Fichthorn ym., 2014).

Laboratoriotason suodatuskokeet

Laboratoriotason suodatuskokeissa käytettiin Mayt Oy:n laitteella tuotettua purkupuubiohiiltä ja omalla pyrolyysikoelaitteella HS-Veden lietemädätteestä valmistettua lietehiiltä. Kontrollina käytettiin suodatushiekkaa.

Suodatuskokeet tehtiin polykarbonaattiputkessa (korkeus 470 mm, halkaisija 50 mm), jonka alapää suljettiin muoviverkolla (Kuva 24). Koetoinnin alussa laboratoriosuodatusten olosuhteita, etenkin suotonesteen syöttöä ja virtausta, optimointiin toimivien koelosuhteiden löytämiseksi. Koetta varten sekoitettiin kaupallisesta suodatushiekasta (n. 1–3 mm) ja murskatuista ja seulotuista hiilistä (2–5 mm) suodatusmassa tilavuussuhteessa (hiili:hiekka) 3:7. Suodatinmassan päälle putken yläpäähän asetettiin synteettistä vanua suodatinmassan paikallaanpitämiseksi. Suodatettava neste oli kahden litran dekantterilasissa, josta sen virtaus ohjattiin suodatinputkiin säädettävällä letkupumpulla. Kussakin koejärjestelmässä käytettiin kolmea eri putkea, joissa yhdessä nesteen virtaus oli ”ylhäältä alas”, toisessa ”alhaalta ylös”, kolmas putki oli hiekkakontrolli, jossa virtaussuunta oli ylhäältä alas. Virtausnopeus oli 10 ml/min.

Suotovettä kierrätettiin suodattimessa viiden vuorokauden ajan, näytteet otettiin suotovedestä ennen koetta sekä suodatuskokeen aikana kolmena päivänä. Näytteistä analysoitiin kokonaistyyppi (N-tot), kokonaisfosfori (P-tot), orgaaninen aines (COD) ja sulfaatti (SO_4^{2-}) HAMK:n laboratoriossa.



Kuva 24. Kuvat laboratoriosuodatuskoejärjestelystä sekä suodatetuista vesistä eli suodoksista. Ylhäällä: A) 100 % suodatushiekka, suunta alhaalta ylös, B) 30 % purkupuubiohiili + 70 % suodatushiekka suunta alhaalta ylös, C) 30 % purkupuubiohiili + 70 % suodatushiekka suunta ylhäältä alas. Alhaalla: D) 100 % suodatushiekka suunta alhaalta ylös, E) 30 % lieteihiili + 70 % suodatushiekka ylhäältä alas F) 30 % lieteihiili + 70 % suodatushiekka alhaalta ylös. (Kuvat: Annakaisa Elo, HAMK)

Kokonaistypen, kokonaisfosforin, orgaanisen aineen (COD) ja sulfaatin (SO_4^{2-})suodatustulokset on esitetty Taulukossa 10.

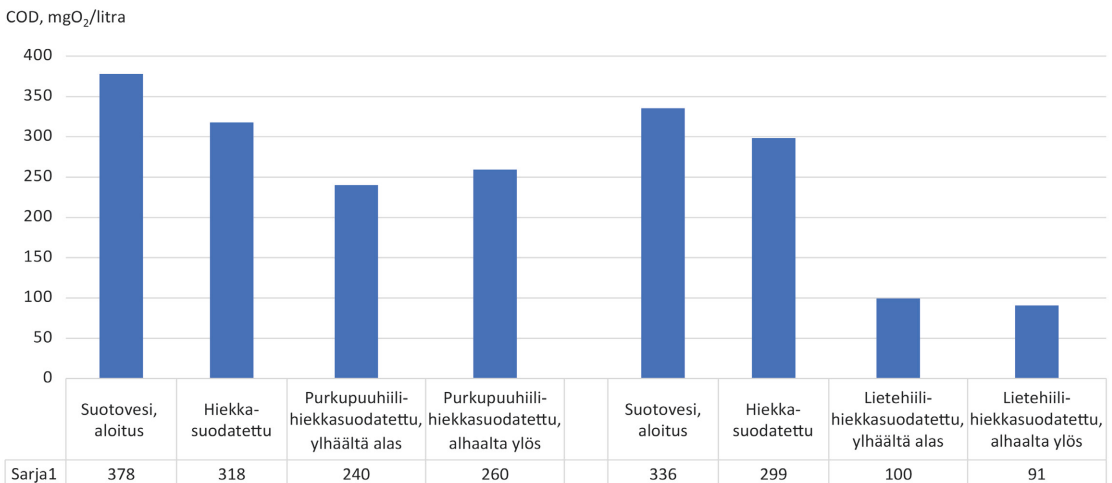
Taulukko 10. Suotoveden ja sen kahden suodatusjakson suodosten analyysitulokset (kokonaistyyppi ja -fosfori, COD ja sulfaatti) ja pitoisuuksien muutokset (vähenemä-% laskettu suhteessa suotoveden pitoisuuteen). Kolmen suodattimen suodatinmateriaalit: hiekka (100 %), purkupuuhiili/hiekka (30/70 %), lieteihiili/hiekka (30/70 %).

Näyte	N _{tot} [mg/l]	vähene- mä [%]	P _{tot} [mg/l]	vähene- mä [%]	COD [mgO ₂ /l]	vähene- mä [%]	(SO ₄ ²⁻) [mg/l]	vähene- mä [%]
Suotovesi 25.11.2020	187		0,57		378		352	
Hiekka 26.11.2020	145	22 %	0,48	16 %				
Hiekka 27.11.2020	135	28 %						
Hiekka 30.11.2020	115	38 %	0,28	51 %	318	16%	428	-13 %
Purkupuuhiili alhaalta ylös 26.11.2020	146	22 %	0,4	31 %				
Purkupuuhiili alhaalta ylös 27.11.2020	134	28 %						
Purkupuuhiili alhaalta ylös 30.11.2020	117	37 %	0,28	50 %	260	31%	403	-7 %
Purkupuuhiili ylhäältä alas 26.11.2020	146	22 %	0,28	51 %				
Purkupuuhiili ylhäältä alas 27.11.2020	132	29 %						
Purkupuuhiili ylhäältä alas 30.11.2020	104	45 %	0,27	53 %	240	37%	402	-6 %
<i>Suotovesi 2.12.2020</i>	<i>179</i>		<i>0,53</i>		<i>336</i>		<i>340</i>	
Hiekka 3.12.2020	147	18 %	0,47	12 %				
Hiekka 4.12.2020	141	21 %	0,36	32 %				
Hiekka 7.12.2020	118	34 %	0,28	47 %	299	11%	422	-26 %
Lietehiili ylhäältä alas 3.12.2020	125	30 %	1,32	-147 %				
Lietehiili ylhäältä alas 4.12.2020	118	34 %	1,41	-163 %				
Lietehiili ylhäältä alas 7.12.2020	89	50 %	1,47	-175 %	100	67%	580	-94 %
Lietehiili alhaalta ylös 3.12.2020	132	26 %	1,69	-217 %				
Lietehiili alhaalta ylös 4.12.2020	129	28 %	1,67	-213 %				
Lietehiili alhaalta ylös 7.12.2020	98	45 %	1,26	-136 %	91	70%	518	-74 %

Yleisenä huomiona tuloksista voi todeta, että virtaussuunnalla ei näyttänyt olevan juurikaan merkitystä suodatustulokseen, vaikka pumpatessa nestettä alhaalta ylöspäin oli suotonesteen viipymä suodatinmassassa pidempi. Kokonaistypen (N-tot) vähenemä oli hieman parempi lietehiilellä (45–50 % vähenemä) kuin purkupuuhiilellä (37–45 %), joka vastasi tässä ominaisuuksiltaan eniten havupuupohjaista biohiiltä. Molempien hiilien typenpoistokyky oli hivenen parempi kuin pelkällä suodatushie- kalla (34–38 %).

Suotoveden fosforipitoisuus on alhainen (n. 0,5 mg/l). Purkupuubiohiili ja pelkkä hiilisuodin poistivat fosforia hyvin samankaltaisesti, noin 50 prosenttia suotoveden fosforista (Taulukko 10). Sen sijaan lietehiilestä liu- keni suotoveteen runsaasti fosforia, pitoisuuksien kasvaessa korkeimmil- laan yli kolminkertaisiksi. Tämä tukee osaltaan kasvatuskokeiden tulosta, jonka mukaan lietehiilen fosfori vaikuttaisi olevan liukoisessa muodossa.

COD-tulokset olivat mielenkiintoisia (Taulukko 10; Kuva 25). Yllättäen lietehiili osoittautui tehokkaaksi liuenneen orgaanisen aineen poistami- ssa. Tämä näkyi selvästi myös suotonesteen värin muutoksena, liete- hiilisuodatettu suotovesi oli täysin kirkasta. Kokeen perusteella ei pysty osoittamaan, johtuvatko muutokset lietehiilen sisältämästä hiilestä, sen sisältämistä mineraaleista vai näiden yhdistelmästä. Kumpikaan tutki- tuista hiilistä ei suodattanut merkittävästi suotoveden sulfaattia (SO₄²⁻). Kaikissa suodatuksissa sulfaattipitoisuudet hivenen kasvoivat, eniten liete- hiilisuodatuksessa, mikä osoittaa mahdollista sulfaatin liukenemistä suodinmateriaalista.



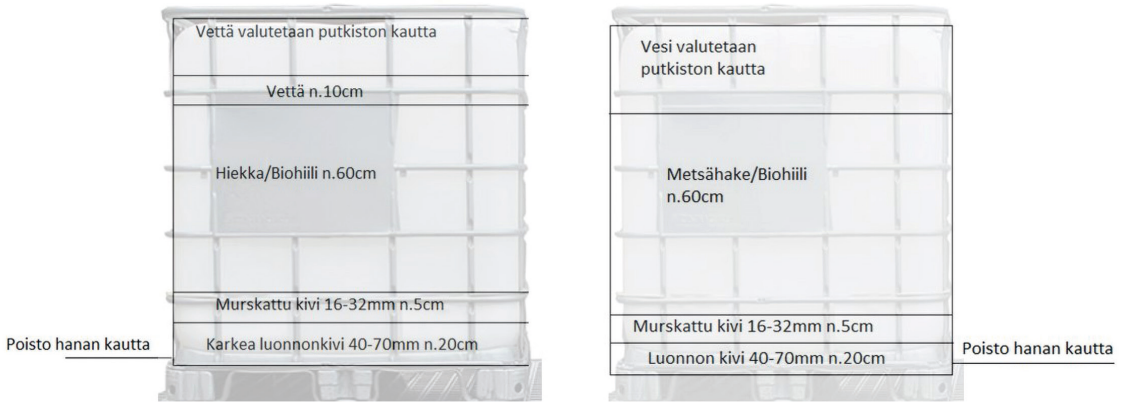
Kuva 25. Suotoveden COD-pitoisuuden muutokset suodatuksissa.

Yhteenvedona voi todeta, että molemmilla jätemateriaaleista valmistetuilla hiilillä on mielenkiintoisia, toisistaan poikkeavia suodatusominaisuuksia. Lietehiilestä irtoaa suodatettavaan nesteeseen runsaasti fosforia, mikä on lannoitekäytössä suotuisa, mutta vedensuodatuksessa yleensä vältettävä ominaisuus. Toisaalta lietehiilellä näyttäisi olevan mielenkiintoisia suodatusominaisuuksia, joita kannattaa vielä tutkia lisää.

Kenttäsuodatuskokeet Karanojan alueella

Hankkeessa tehtiin pilot-mittakaavan suodatuskokeilu Kiertokapula Oy:n Karanojan jätteidenkäsittelyalueella kesäkaudella 2020. Jätteenkäsittelyalueen täyttöalueiden suotovedet ja alueen pintavalumavedet ohjataan avonaiseen suotovesialtaaseen, joka on pinta-alaltaan noin 15 hehtaaria ja josta vedet ohjataan edelleen jätevedenpuhdistamolle. Vuonna 2018 viemäriverkkoon ohjattiin suotovettä noin 64 886 m³ eli 178 m³/vrk. Suotovesi sisältää ravinteita (N ja P), hajuhaittoja aiheuttavaa sulfaattia, jonka verran metalleja sekä orgaanisia yhdisteitä, lähinnä vähäisiä määriä öljyhiilivetyjä, joiden kaikkien pitoisuuksia seurataan lakisääteisesti. Pilotin tarkoituksena oli tutkia biohiilen käyttöä suotoveden puhdistukseen, lähinnä typen ja sulfaatin osalta.

Suodatusratkaisut suunniteltiin kirjallisuuden perusteella, mallina käytettiin ”Port of Tacoma” -hankkeen kehittämiä ja testaamia ratkaisuja (Fichthorn ym., 2014). Kirjallisuuden perusteella suunniteltiin sekä pilot-tisuodattimen rakenne että suodatinmateriaalin koostumus (suodattimen tilavuus 1 m³, tilavuussuhde hiekka:hiili = 7:3). Hiekka-hiilisuodattimen rinnalle rakennettiin metsähake-hiilisuodatin, jossa metsähake korvasi hiekan. Suodattimet rakennettiin IBC-konttiin kuvassa 26 esitetyn piirroksen mukaisesti. Suodatinmateriaaleina käytettiin suodatushiekkaa (1–2 mm) tai haketta sekä murskattua ja seulottua purku/jätepuubiohiiltä. Ennen suodatuskokeen aloitusta biohiilen pölyjäte pestiin huuhtelemalla suodattimet puhtaalla vedellä. Suotovesi pumpattiin suoraan tasausaltaasta kumpaankin suodattimeen, ja suodattimen läpäissyt vesi palautettiin tasausaltaan toiseen osaan. Virtaus kumpaankin suodattimeen säädettiin alussa noin 20 l/min. Hake-hiilisuodatin otettiin käyttöön myöhemmin kuin hiekka-hiilisuodatin, ja siitä on vähemmän seurantadataa.

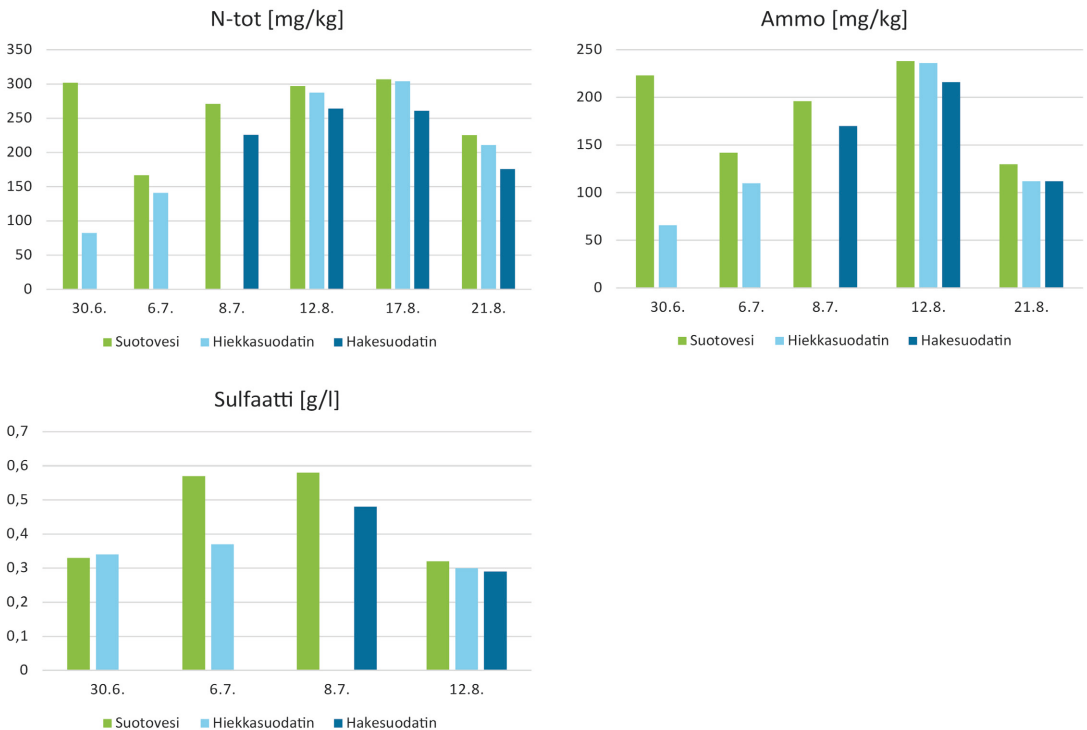


Kuva 26. Suotoveden käsittelykontit, kaaviokuvana ja kuva toteutuksesta. (Kuva: Jarkko Nummela, HAMK)

Sekä kokonaistypen (N-tot) että ammoniumtypen (ammo) vähenemä oli hiekka-hiilisuoitimella ensimmäisen suodatusviikon ajan hyvä, mutta putosi nopeasti tämän jälkeen (Kuva 27). Olosuhteet suotoveden tasaustaassa poikkesivat kokeen aikana normaalitilasta, sillä altaassa tehtiin kunnostus- ja ruoppaustöitä. Altaan vesitilavuus oli normaalia pienempi, ja vedessä oli havaittavaa kiintoainesta, lisäksi lämpimän sään vuoksi altaassa oli runsasta leväkaskvustoa. Vedestä ei poistettu kiintoainesta ennen sen ohjaamista suodatinkonttiin. Näin ollen levä ja kiintoainet tukkivat suodatintimen noin viikon kuluessa, jolloin allas alkoi tulvia yli ja virtausnopeutta jouduttiin säätämään. Levä näkyi myös alkuvaiheen suotoveden ammonium/kokonaistyyppi-suhteessa, sillä suotoveden

itsessään sisältämä typpi on pääasiassa ammonium-muodossa. Pienempi vesimäärä näkyi myös normaalitasoa korkeampana ravinteiden määränä, muun muassa ammoniumtyypitaso oli noin kaksinkertainen normaaliin tasoon (n. 80–120 mg/l) verrattuna (Kuva 27).

Suodattimien ylivuotoa ehkäistiin virtausnopeutta laskemalla, jolloin suodatimeen alkoi muodostua biofilmiä. Suodatinta yritettiin puhdistaa muuttamalla veden virtaussuuntaa alhaalta ylös, mutta tästä ei ollut hyötyä suodatustehon kannalta (Kuva 27). Hake-hiilisuodattimen suodatus-teho jäi heikommaksi kuin hiekka-hiilisuodattimen, toisaalta suodatinolosuhteet olikin suunniteltu hiekka-hiilisuodattimelle. Hiekka-hiilisuodatinseos vaikutti lupaavalta suotoveden typen poistossa, mutta suodatusratkaisu tukkeutui nopeasti näissä normaalia vaativimmissa olosuhteissa. Samansuuntaisia havaintoja ja kokemuksia on saatu muistakin biohiilisuodatinratkaisuista Suomessa, suodattimen tehoon ja käytännön toimivuuteen vaikuttaa erittäin paljon suodattimen suunnittelu, virtausolosuhteet ja mahdollinen tukkeutuminen kiintoaineksella ja/tai biofilmillä (mm. Särkilähti, 2020).



Kuva 27. Hiekka-hiilisuodatuksen sekä hake-hiilisuodatuksen vaikutus jätteenkäsittelyalueen suotoveden kokonaistypen, ammoniumtypen ja sulfaatin määrään. Koe aloitettu 30.6.

Yhteen hiileen – biohiilen ympärille sijoittuva osaamis- ja yritysekosysteemi Kanta-Hämeeseen

Biohiili tutuksi

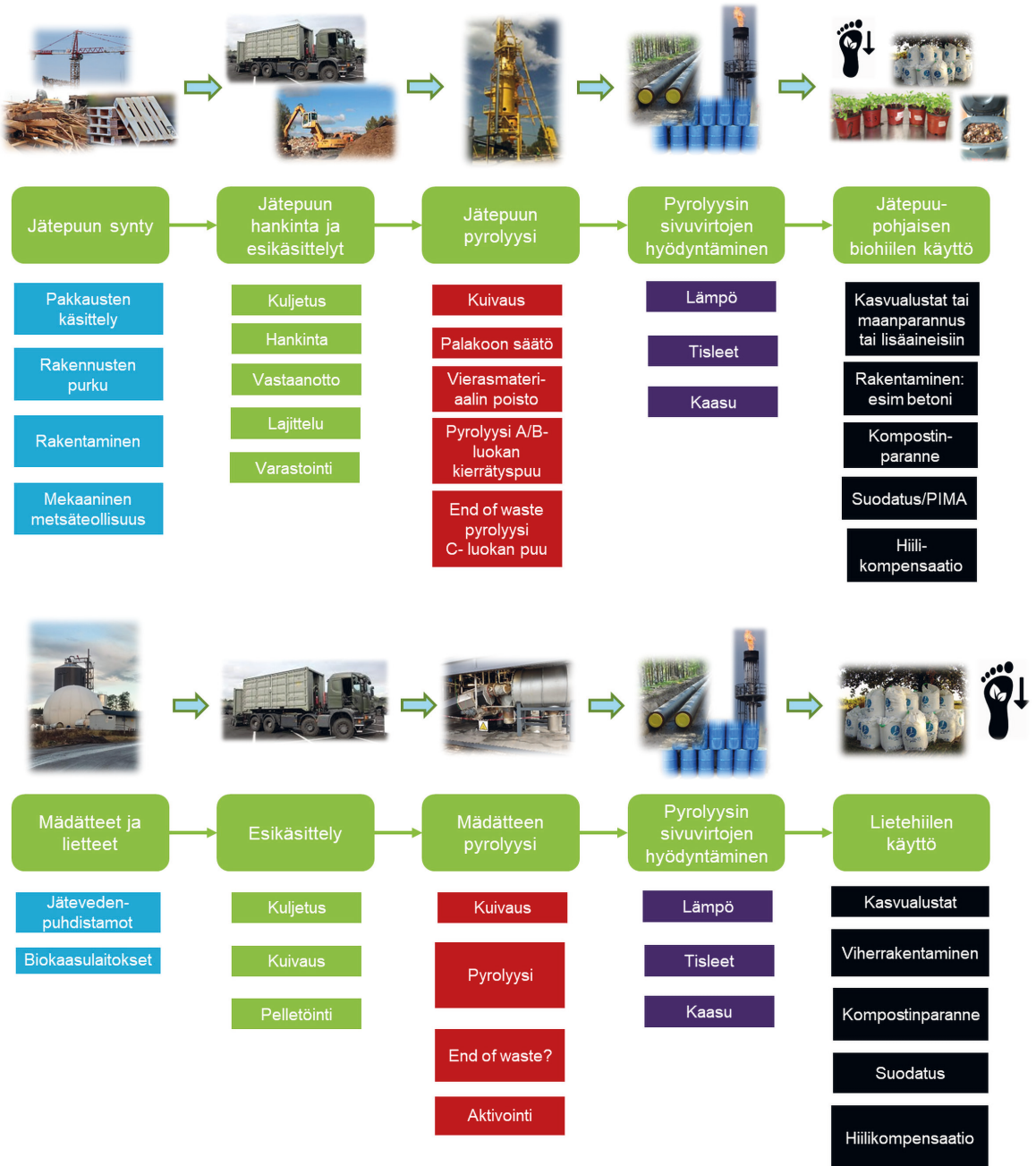
Hankkeen lähtötilanteessa biohiili ja sen sovellukset olivat Kanta-Hämeen alueella varsin tuntemattomia. Lähtöolettamuksena oli, että yleisen biohiilitietoisuuden nosto lisää hyväksyntää, kiinnostusta ja vahvistaa uskoa uusien liiketoimintamahdollisuuksien suuntaan. Käytännössä tarvittiin toimia, joilla herättää ja innostaa yrityksiä, hallintoa ja yksittäisiä kansalaisia näkemään biohiilen mahdollisuudet hiilineutraalin kiertotalouden toteuttamisessa. Tiedon tuottaminen, jakaminen ja viestintä olivat hankkeen keskeisiä toimenpiteitä. Tässä hanke onnistui. Kokeellispainotteen työn ja demonstraatioiden kautta saatiin alueelle uutta tietoa, osaamista ja konkreettista näytettävää ja näkyvyyttä. Tekemisestä ja tapahtumista viestittiin somekanavilla (hankkeen [www-sivu](#), HAMK ja HAMK Bio Twitter ja Facebook). Hankkeen aikana havaittiin selvä käänne myös median ja yritysten kiinnostuksessa. Ensimmäisenä vuonna toteutettuun työpajaan osallistuivat vain hankkeen ohjausryhmässä mukana olevat yritykset. Viimeisenä syksynä järjestettyyn yritys-verkkotilaisuuteen saatiin mukaan jo lähes 20 toimijaa alueen yrityksistä, kehittämisorganisaatioista ja kaupungeista. Samalla myös hankkeen yhteistyökumppanit saivat positiivista näkyvyyttä, toisaalta myös yhteistyökumppanit toivat hankkeelle näkyvyyttä omissa viestintäkanavissaan.

Viestintää asukkaiden ja kansalaisten suuntaan toteutettiin biohiilinäytöksillä, joiden yhteydessä tuotiin biohiiltä konkreettisesti näkyviin ja annettiin biohiilitietoutta. Tilaisuuksiin osallistunut yleisö otti asian hyvin positiivisessa hengessä vastaan. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että biohiileen suhtaudutaan positiivisesti ja innostuneesti, kun se esitellään suurelle yleisölle helposti lähestyttävässä, käytännönläheisessä ja konkreettisessa muodossa.

Biohiilitoimintaympäristö Kanta-Hämeessä

Hankkeen päätavoite oli määrittää toimintaedellytykset ja toimintamalli Kanta-Hämeeseen sijoittuville biohiileen pohjautuville alueellisille kiertotalousratkaisuille ja uudelle liiketoiminnalle. Tätä tavoiteltiin hahmottamalla alueellisia kiertotalousratkaisuja edellä saatujen hanketulosten pohjalta sekä kartoittamalla ja kokoamalla toimijaverkoston.

Rakennusjätepuu biohiilen raaka-aineena ja siitä tuotetun biohiilen käyttömahdollisuudet rakennusosalalla nousivat hankkeen myötä laajan kiinnostuksen kohteeksi. Kierrätyspuulle ja puhdistamolietteelle hahmotettiin kokonaistoimintaketjut, joita käsiteltiin yrityksille suunnatussa työpajassa (Kuva 28). Näiden lisäksi alueen yritysten kanssa käytiin hankkeen aikana yrityskohtaisia keskusteluja. Lähimmäs kokonaisratkaisua päästiin rakennusjätepuun osalta. Yleinen päätelmä on, että alueella on runsaasti puujätettä tuottavaa tai käsittelevää yritystoimintaa, lisäksi biohiilituotteelle on kysyntää ja sovelluksia, mutta biohiilen tuottaja puuttuu. Hankkeen tulosten perusteella purku-/jätepuu on erittäin potentiaalinen biohiilen raaka-aine, josta on mahdollista tuottaa erilaisiin sovelluksiin taipuvaa korkealaatuista biohiiltä, mikäli koko raaka-aineketju on toimiva ja raaka-aineen lajittelu ja dokumentointi on luotettavaa.



Kuva 28. Jätepubiohiilen ja lietehiilen ympärille rakentuvat yritysverkostot/toimijaketjut.

Hankkeen aikana nousi esiin Hämeenlinnan ja etenkin Karanojan – Moreenin alueen keskeinen ja edullinen sijainti mahdollisen biohiililaitoksen sijoituspaikaksi. Tälle alueelle suuntautuu jo tällä hetkellä huomattava osa biohiilituotannon kannalta potentiaalisista raaka-ainevirroista, alue sijaitsee logistisesti Kanta-Hämeen keskiössä ja siellä toimii myös Loimua Oy:n aluelämpöverkko. Karanoja ale on hyvä esimerkki alueesta, josta löytyisi monia toimintoja integroitavaksi biohiilen tuotannon kanssa: on paitsi raaka-aineita myös biohiilen käyttökohteita (hule- ja suotovesien hallinta, kompostointi, biokaasulaitos, jätetäytön kaasujen suodatus), ja tuotanto voitaisiin integroidasi myös alueen energiatuotantoon. Raaka-ainekartoituksen pohjalta hankkeessa tehtiin energialähtöinen tarkastelu biohiilituotannon sijoittumisesta Karanojan alueen lämpöverkon yhteyteen (Tiainen, 2020). Selvityksen mukaan Kanta-Hämeen jäte- ja sivuvirtojen pyrolyysiprosessin sivutuotelämmöllä voidaan kattaa prosessin oman lämmöntarpeen lisäksi nykyisen aluelämpöverkon tarve, kun jäteään pois vesipitoiset puhdistamolietteet.

Tässä hankkeessa keskityttiin pääosin biohiileen ja sen valmistuksen raaka-aineisiin ja sovelluksiin. Pyrolyysiprosessissa syntyy kuitenkin biohiilen ja palamiskelpoisten kaasujen lisäksi öljyjä ja tisleitä. Öljyjä voidaan varastoida ja käyttää joko energiaksi tai erilaisissa teollisuusprosesseissa. Pyrolyysissä syntyy myös huomattavia määriä vesiliukoista pyrolyysinesettä, jolle Suomen/Euroopan mittakaavassa vasta haetaan käyttökohteita (Vuori ja Kangas, 2017). Biohiilen tuotannon ja liiketoiminnan kannattavuutta ja ilmastohyötyjä (hiilensidonnan maksimointi) voidaan nostaa kaasujen, öljyjen ja tisleiden talteenotolla ja hyödyntämisellä.

Valmista alueellista toimintamallia ja toimijaverkostoa ei tämän hankkeen aikana saavutettu. Hankeaika oli tähän liian lyhyt, huomioiden toimintakentän valmiudet biohiileen liittyen eli se, että käytännössä aihe oli hankkeen käynnistyessä pääosin täysin vieras useimmille toimijoille. Yritystyöpajoissa tuotiin esiin esimerkinomaisesti Karanojan alueelle sijoittuva malli, joka tuo esiin biohiilen roolin ja mahdollisuudet yhtenä keskeisenä osana alueen kiertotaloustoimintojen kehittämistä. Mallin taustalla on tämän hankkeen tuloksia käytännön kokeiluista ja laskennallisista tarkasteluista. Liiketoimintamielessä hanke toi näkyvästi ja aktiivisesti esiin biohiiltä yhtenä hiilipäästöjen/hiilijalanjäljen kompensatiivälineenä, jonka avulla biohiilituottaja voi saada merkittävää lisätuloa. Tällä voi olla ratkaiseva rooli myös liiketoimintamallin ajurina, esimerkkinä biohiili tuotteena, jolla voi lisätä ravinnekierron kannattavuutta biokaasulaitosten yhteydessä. Kompensatiivälinearvo on tässä vaiheessa lähinnä marginaalinen, mutta aiheen ympärille on syntynyt maailmanlaajuisesti sekä kysyntää että hiilikompensatiomarkkinapaikkoja ja kompensatiota välittäviä yrityksiä. Yksi esimerkki on Puro.earth, hiilidioksidin poistosertifikaatteja myyvä yritys. Nämä niin kutsutut CORK-sertifikaatit perustuvat kestäviin CO₂-poistomenetelmiin, kuten biohiileen. Muita vastaavia ovat tällä hetkellä muun muassa kansainvälistynyt Compensate sekä sveitsiläistaustainen South Pole.

Hankkeen tulokset ovat osaltaan edistämässä uusia biohiili-investointeja, liiketoimintamahdollisuuksia ja uutta yritystoimintaa. Tällä hetkellä Kanta-Hämeen alueella on erinomaiset edellytykset edetä kohti kaupallista biohiilituotantoa ja sen ympärille rakentuvaa kiertotalousliiketoimintaa.

Alueellisia biohiilihankkeita muualla

Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hankkeen kanssa osittain päällekkäin tai sen aikana on käynnistetty muitakin biohiilen tuotantoon ja käyttöön liittyviä alueellisia hankkeita. Tällaisia ovat muun muassa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy:n (Xamk) ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n (Miksei) toteuttama Biohiilellä puhtaampi ympäristö ja uutta liike-toimintaa Etelä-Savoon – Bioli -hanke 2017–2019. Hankkeen tavoitteena oli edistää uusien kaupallistettavien biohiilituotteiden kehittämistä ja testausta, kehittää uusia sovelluksia ympäristöturvallisuuden alalla sekä luoda konkreettisia edellytyksiä biohiileen perustuvan liiketoiminnan syntymiselle Etelä-Savoon. Hanketta rahoittivat Etelä-Savon maakuntaliitto, Euroopan aluekehitysrahastosta, Metsäsairila Oy ja Suur-Savon Energiasäätiö.

Syksyllä 2020 aloitettiin EAKR Pohjois-Karjalan liiton rahoittama Pohjois-Karjalan biohiiliohjelma, Black-Green-hanke, tavoitteena tuottaa uutta ja jalostaa olemassa olevaa biohiilitietoa Pohjois-Karjalan ja Suomen biotaloussektorin käyttöön. Pohjois-Karjalasta on muodostumassa merkittävä modernin reaktiivisen hiilen tuotanto-, tuotekehitys- ja jatkojalostuskeskittymä. Tällä hankkeella tuotetaan tietoa tuotteista, markkinoista, valmistuksen prosesseista ja kestävydestä sekä raaka-aineiden ja tuotteiden logistiikasta. Hankkeen pääpartnerina toimii Luonnonvarakeskus, ja sen osatoteuttajia ovat Itä-Suomen yliopisto, Business Joensuu ja Karelia-ammattikorkeakoulu kukin omiin vahvuuksiinsa nojautuen. Hankkeen toiminta-aika on 1.11.2020–28.02.2023.

Ruotsissa Lundin kaupungin alueella on käynnissä huomattavaa näkyvyyttä saanut Rest till Bäst -hanke, jossa pyritään alueellisten jäte- ja sivuvirtojen hyödyntämiseen biohiilen valmistuksen kautta (<https://biokol.org/en/>). Alueellisia sivuvirtoja ovat puutarhajäte, maataloussivuvirrat, puhdistamoliete ja levät. Valmistettu biohiili käytetään alueellisesti muun muassa viherrakentamisessa. Hankkeen päärahoittajana on Vinnova, ja mukana on 15 partneria, mukaan lukien yliopistot (mm. SLU) ja useita yrityksiä. Myönteisten tulosten perusteella alueelle on perustettu biohiilen tuotantolaitos, jossa on kaksi Pyreg-1500 biohiilen tuotantoyksikköä. Ruotsissa biohiilihankkeita tuetaan lisäksi esimerkiksi Klimatklivet rahoitus-/investointiohjelman kautta, ja tällä rahoituksella on rakennettu tähän mennessä 14 biohiililaitosta 40–60 prosentin tuella (Salo, 2021).

LÄHTEET

- Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. (2016). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258.
- Elo A, Kymäläinen M, Lahti I, (28.2.2020). Biohiilituotantoon soveltuvat jäte- ja sivuvirrat Kanta-Hämeen alueella. Saatavilla: <https://www.hamk.fi/projektit/biohiili-biohiilesta-bisnesta-hameeseen/#materiaalit-ja-linkit>
- Boateng A.A., Garcia-Perez M., Mašek O., Brown R. & del Campo B. (2015). Biochar Production Technology. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.) *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd Edition. Routledge. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=1975245>
- Bucheli T. D., Hilber I. & Schmidt H. P. (2015). Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated aromatic compounds in biochar. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd Edition. Routledge. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=1975245>
- EBC (2012). European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. Version 9.3E of 11th April 2021. <http://european-biochar.org>
- Gustafsson M. (15.03.2019). Climate positive energy. Esitelmä tilaisuudessa: Kestävää liiketoimintaa biohiilestä -tapahtuma. Biohiilestä bisnestä Hämeeseen hanketapahtuma ja Suomen biohiiliyhdistyksen kevätkokous. HAMK. Saatavilla: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Mattias-Gustafsson-pieni.pdf>
- Fichthorn A., Rehe B. & Myers D. (2014). Project Report: Biofiltration: West Hylebos Log Yard. Noudettu 28.04.2021 <https://aapa.files.cms-plus.com/AwardsCompetitionMaterials/Tacoma%202014%20Comprehensive%20Environmental%20Management.pdf>
- Hilber I., Bastos A.C., Loureiro S., Soja G., Marsz, A. Cornelissen, G. & Bucheli, T.D. (2017). The different faces of biochar: contamination risk versus remediation tool. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(2), 86–104.
- HSY. (2021). Lietehiili. Verkkosivu. Haettu 26.4.2021. <https://www.hsy.fi/lieteihiilihanke/>.
- Häkämies S., Lähdesmäki-Josefsson K. & Pitkämäki A. (2019). Puupohjaisen rakennus- ja purkujätteen kiertotalous. Loppuraportti 20.12.2019. Gaia Consulting Oy Katja Lehtonen, Ytekki Oy.
- Kuoppamäki K., Hagner M., Valtanen M. & Setälä H. (2019). Using biochar to purify runoff in road verges of urbanised watersheds: a large-scale field lysimeter study. *Watershed Ecology and the Environment* 1:15–25 <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2019.05.001>

- Kymäläinen M., Elo A. & Kainulainen A. (2020). Biohiilellä monia kytkentöjä biokaasutuotantoon. *Biokierto ja Biokaasu* 1/2020, 8–9. https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/11/Biokierto-ja-Biokaasu_01_2020.pdf
- Lahti I. (2020). Biohiilen vaikutus golfviheriön kasvualustan ominaisuuksiin. Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö. Bio- ja elintarviketekniikka. Hämeen ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202004286338>
- Lassilantuomi S. (2020). Rakennusjätepuu biohiilen raaka-aineena ja biohiilen käyttösovellukset rakennusallalla. Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö. Bio- ja elintarviketekniikka. Hämeen ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020110222081>
- Lehmann J. (2007). Bioenergy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 381–387. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2)
- Lehmann J. & Joseph S. (2015). Biochar for environmental management: an introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd Edition. Routledge. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=1975245>.
- Mašek O., Ronsse F. & Dickinson D. (2016). Biochar production and feedstock. In Simon Shackley, et al. (Eds.), *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. Routledge. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=4415591>
- 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>
- Riikonen A. (2019). *Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa*. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:19, Helsingin kaupunki.
- Rosti M. (2021). Kolmen eri biohiililaadun vaikutus raiheinän satoon kasvihuoneastiakokeessa. Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö. Puutarhatalous. Hämeen ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202103223671>
- Salo E. (2021). Biohiilen markkinat. Esitelmä BlackGreen -hankkeen webinaarissa 31.03.2021.
- Sarvi M., Hagner M., Velmala S., Soinne H., Uusitalo R., Keskinen R., Ylivainio K. & Rasa K. (2021). Bioavailability of phosphorus in granulated and pyrolyzed broiler manure. *Environmental Technology & Innovation*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101584>
- Seppälä T. (2020). Rakennus- ja purkupuumateriaalissa esiintyvät nykyisin säädellyt ja haitalliset aineet: Selvitystyö: RAPUPUU-hanke.

Ammattikorkeakoulututkimnon opinnäytetyö. Energia- ja ympäristötekniikka.
LAB ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020120726545>

Särkilahti M. (2020). Biosuodatin Hiedanrannan vanhalla sellukaatopaikalla. Esitys Biohiili hulevesien puhdistuksessa -webinaarissa. Circvol -hanke. Oulu 16.9.2020. Haettu 28.04.2021 osoitteesta: <https://www.ouka.fi/documents/18161254/19559701/Biosuodatin+sellukaatopaikalla.pdf/4cb939d7-8f20-4a3b-b533-47567b7118ad>

Tammeorg P., Soronen P.A., Riikonen A., Salo E., Tikka S.M., Koivunen M., Salonen A.-R., Kopakkala T.P. & Jalas M. (2021). Co-Designing Urban Carbon Sink Parks: Case Carbon Lane in Helsinki, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.672468>

Tianen S. (2020). Biohiilituotannon integrointi Karanojan – Moreenin alueelle. Hiilinegatiivisen aluelämmön tuottaminen paikallisella biohiilituotannolla. Osaraportti 2. Ammattikorkeakoulututkimnon raportti, Bio- ja elintarviketekniikka. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Tianen S. (2020). Infograafi: Puhdistamolietteestä lietehiileksi. 12/2020. <https://www.hamk.fi/projektit/biohiili-biohiilesta-bisnesta-hameeseen/#materiaalit-ja-linkit>

Sormo E., Silvani L., Thuneb G., Gerber H., Schmidt P., Smebye A. & Cornelissen G. (2020). Waste timber pyrolysis in a medium-scale unit: Emission budgets and biochar quality. *Science of the Total Environment*, 718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137335>

Vaughn S.F., Dinelli F.D., Jackson M.A., Vaughan M.M. & Peterson S.C. (2018). Biochar-organic amendment mixtures added to simulated golf greens under reduced chemical fertilization increase creeping bentgrass growth. *Industrial Crops and Products*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.036>

Vuori E. & Kangas N. (2017). Ihmeaine biohiili. *Puutarha & Kauppa*. Haettu 25.4.2021. <https://www.puutarhakauppa.fi/index.php/uusin-juttu/79-ihmeaine-biohiili>

Weber K. & Quicker P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>

Åhlström S. (2020). Biohiilen valmistaminen rakennusjätepuun käsittelyratkaisuna. Ammattikorkeakoulututkimnon opinnäytetyö. Kestävä kehitys. Hämeen ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020092920789>

Biohiili on noussut viime vuosina kasvavan mielenkiinnon kohteeksi sekä tiedeessä että käytännön sovelluksissa, erityisesti kiertotaloudessa. Sitä voidaan tuottaa monista muuten ehkä vaikeasti kierrätettävistä jäte- ja sivuvirroista ja käyttää lukuisissa eri sovelluksissa maaperän parannuksesta aina vesien käsittelyyn ja teknisiin tuotteisiin.

Biohiilellä on merkitystä maailmanlaajuisesti konkreettisena, pitkäaikaisena ja kustannustehokkaana hiilen sitojana ja täten hiilikompensaatiovälineenä. Biohiilen kaupallinen tuotanto on kuitenkin vielä rajoittunutta, ja tuotteen korkea hinta on hillinnyt kysyntää etenkin suuren mittakaavan käyttösovelluksissa.

Kanta-Hämeessä vuosina 2018–2020 toteutettu Biohiilestä bisnestä Hämeeseen -hanke selvitti, voisiko alueellinen biohiilen tuotanto tarjota vaikeasti hyödynnettäville jäte- ja sivuvirroille kestävän hyödyntämiskäytännön. Samalla hankkeessa on etsitty luontevaa alustaa alueelliselle osaamis- ja yritys yhteistyölle biohiilen valmistukseen ja käyttöön pohjautuvan kiertotalouden ympärille. Tässä julkaisussa esitellään hankkeen keskeisimmät toimenpiteet ja tulokset.

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

E-JULKAISU

ISBN 978-951-784-835-0

ISSN 1795-424X

HAMKIN E-JULKAISUJA 5/2021