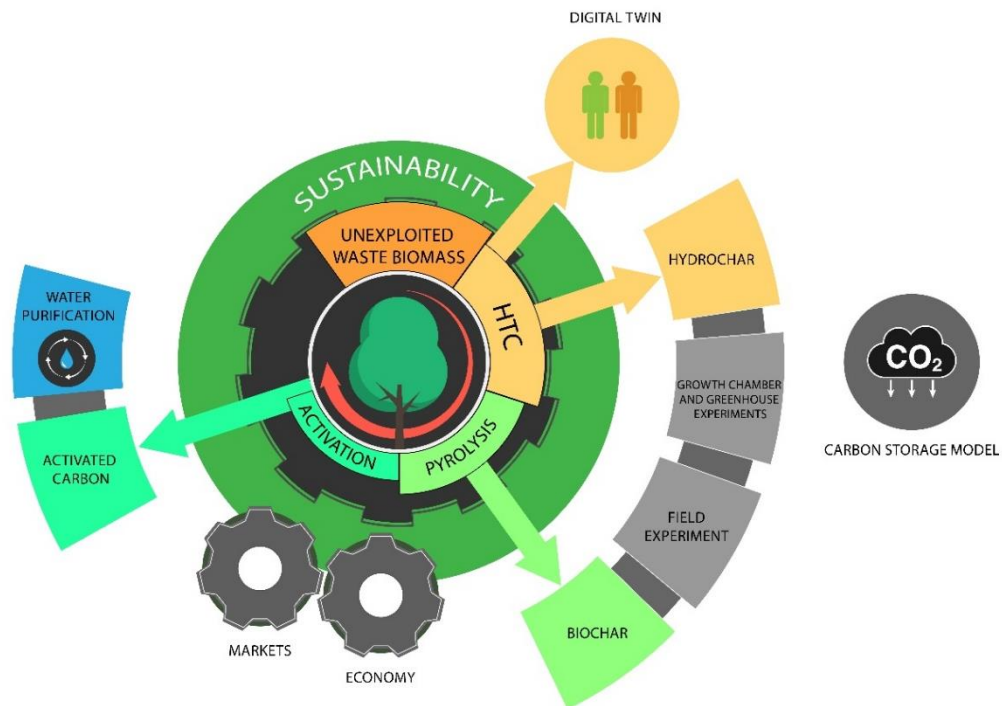


BioDigi

Orgaaniset sivuvirrat kestäviksi tuotteiksi digitalisaation keinoin



Loppuraportti

Hankeaika: 01.03.2022–31.10.2024 (32 kk)

Ohjelma: Hiilestä kiinni -tutkimus ja innovaatio-ohjelma, Viisautta maaperässä

Organisaatiot: Oulun yliopisto, Luonnonvarakeskus ja Vaasan yliopisto

Kirjoittajat: Satu Ojala, Tiina Laitinen, Velma Kimbi Yaah, Riku-Pekka Nikula, Riitta Keiski, Lea Hiltunen, Matti Salmela, Marleena Hagner, Ville Tuomi

1 Hankkeen esittely

1.1 Perustiedot hankkeesta

Hankkeen nimi: Organiset sivuvirrat kestäviksi tuotteiksi digitalisaation keinoin

Toteuttajat: Oulun yliopisto, Luonnonvarakeskus ja Vaasan yliopisto

Yhteistyökumppanit: Kiertokaari Oy, Stormossen Oy / Ab, Österbottens svenska producentförbund/Trädgårdsutskottet (ÖSP)

1.2 Hankkeen tavoitteet

Biodigi-hankkeen päätavoitteena oli löytää edullisia, pitkään hiiltä sitovia ja kestäviä menetelmiä biopohjaisten jäte- ja sivuvirtamateriaalien hyödyntämiseksi maataloudessa (maanparannus, kasvitautien hillintä) ja veden puhdistuksessa (korkean arvon lopputuotteet) älykkäällä tavalla digitaalisia työkaluja apuna käyttäen. Näiden toimien kautta pyrittiin sekä lisäämään uusiutuvien luonnonvarojen käyttöä useilla sektoreilla että tehostamaan talouden vihreää elpymistä mahdollisimman nopeasti ja tehokkaasti. Hankkeen osatavoitteet olivat:

1. Selvittää jättepohjaisten biohiilten soveltuvuutta maatalouskäyttöön sekä vaikutuksia kasvinterveyteen ja maaperän hiilidioksidi- ja kasvihuonekaasupäästöihin. Tavoitteen saavuttamisessa hyödynnetään kenttämittauksia sekä digitaalista mallia hiilen sitoutumisesta.
2. Löytää yhteydet raaka-aineen ominaisuuksien, valmistusmenetelmien ja tuotteen laadun välille
3. Löytää optimaalisia käyttökohteita eri raaka-aineista valmistetuille hiilituotteille
4. Selvittää korkeamman jalostusarvon hiilituotteiden tehokkuutta maataloudessa käytettävien torjunta-aineiden poistossa vedestä
5. Arvioida ja vertailla biohiilen valmistusmenetelmiä kestäväen kehityksen kannalta ottaen huomioon myös biohiilen mahdollisuudet hiilen varastoimiseksi maaperään.
6. Verrata hydrotermistä karbonointia ja pyrolyysiä hiilituotteiden valmistuksessa ja selvittää menetelmien teknistaloudelliset hyödyt ja haitat.
7. Optimoida tuotannon energiatehokkuus digitaalisen kaksosen avulla
8. Arvioida hiilituotteiden valmistuksen kustannustehokkuutta ja liiketoimintamahdollisuuksia

Biodigi hankkeen tavoitteet palvelivat erityisesti maankäyttösektorin ilmastotoimien tietopohjan vahvistamista liittyen mahdollisuuksiin vähentää maankäyttösektorin kasvihuonepäästöjä sekä hiilinielujen ja -varastojen vahvistamiseen ja ylläpitämiseen, jotka olivat keskeisiä maankäyttösektorin ilmastotoimenpidekokonaisuuden tavoitteita.

1.3 Yhteenvedo hankkeesta

Biodigi-hankkeen tavoitteena oli tukea Suomen hiilineutraalisuustavoitteita vähentämällä maankäytön kasvihuonepäästöjä ja luomalla uusia todennettuja hiilinieluja ja -varastoja edistäen yhdyskuntien ja kasvituotannon biojätevirtojen hyödyntämistä maanviljelyssä hiilituotteina. Hiilinielut todennettiin mittausten ja hankkeessa kehitetyn digitaalisen mallin avulla. Hiilituotteiden hyötykäytössä tavoitteena oli valmistusprosessin kustannus- ja energiatehokkuuden merkittävä parantaminen ja sitä kautta biohiilen hinnan alentaminen jopa kolmasosaan nykyisestä. Tavoitteen saavuttamiseksi hankkeessa tutkittiin jätekeskusten lajiteltujen biojätejakeiden sekä kasvihuoneiden sivuvirtojen koostumusta ja ominaisuuksia, jätejakeiden pyrolysointia ja hydrotermistä karbonointia sekä näiden tekijöiden vaikutuksia hiilituotteen maanparannus- ja kasvinterveyttä edistäviin ominaisuuksiin. Valmistuksen energiatehokkuutta optimoitiin digitaalisen kaksosen avulla. Hiilituotteita testattiin viljelykokeiden avulla (mm. peltoviljely-pilot) ja hiilten vaikutuksia perunan kasvitauhteihin selvitettiin. Hiilten vaikutusmekanismeihin maaperässä sekä

valmistusprosessin optimoimiseksi haettiin ratkaisuja kattavan materiaalikarakterisoinnin avulla. Osa hiilituotteista jalostettiin edelleen aktiivihiiiksi, joiden toimintaa testattiin maanviljelyksessä käytettävien torjunta-aineiden poistossa vedestä. Kokonaisvaltaisen lähestymistavan saavuttamiseksi hiilituotteiden tuotannon kestävyys arvioitiin monikriteerimenetelmän avulla. Kustannustehokkuus selvitettiin yksityiskohtaisella kustannusten arvioinnilla ja teknologian liiketoimintamahdollisuuksien tarkastelulla. Hanke toteutettiin monitieteisenä yhteistyönä Oulun yliopiston, Luonnonvarakeskuksen ja Vaasan yliopiston sekä usean yritysten välillä. Hankkeen vaikuttavuutta ja innovaatioiden saavuttamista tehostettiin aktiivisen vuorovaikutuksen ja viestinnän avulla.

Hankkeen vastuullisena tahona toimi Oulun yliopisto ja vastuullisena johtajana apulaisprofessori Satu Ojala. Hankkeen koordinaattorina toimi DI Tiina Laitinen Oulun yliopistosta. Luonnonvarakeskuksen vastuullisena henkilönä toimi erikoistutkija Lea Hiltunen ja Vaasan yliopiston vastuullisena henkilönä apulaisprofessori Ville Tuomi.

Hankkeen kokonaisbudjetti, kustannukset ja rahoitus.

KUSTANNUKSET			RAHOITUS		
	Budjetti	Kustannukset		Budjetti	Kustannukset
Palkat	405 087.07	417 976.07	MMM:n rahoitusosuus	861 247.10	860 407.78
Henkilösivukulut	195 167.93	201 313.19	Muu rahoitus	10 000.00	9 550.96
Matkakulut	17 000.00	9 590.94	Omarahoitusosuus	359 105.90	359 195.23
Ostopalvelut	90 130.00	70 156.51	YHTEENSÄ	1 230 353.00	1 229 153.97
Muut kustannukset yhteensä, josta	522 968.00	530 117.27			
- tarvikkeet	38 700.00	28 947.75			
- yleiskustannukset	475 168.00	491 197.21			
- muut kustannukset	9 100.00	9 972.31			
YHTEENSÄ	1 230 353.00	1 229 153.97			

BioDigi-hankkeen aikana toteutettujen kasvatuskokeiden aikana havaittiin, että hiilikäsittely vaikuttaa taimettumiseen ja biomassaan kasvin kasvun varhaisessa vaiheessa lajikohtaisesti. Hiilituotteet nostavat maaperän pH:ta sekä ravinne- ja hiilipitoisuutta hiilituotteesta ja lisäystasyydykseen riippuen. Haitallisia vaikutuksia ilmeni vain vähän ja vain korkeammilla lisäystasyydyksillä. Hiilten vaikutukset kasvuun ovat vaihtelevia ja olosuheriippuvaisia. Peltokokeissa biohiilellä ei havaittu olevan vaikutusta perunakasvuston kehitykseen tai perunasadon määrään kahden kasvukauden aikana. Kokeissa saatiin kuitenkin viitteitä mahdollisista vaikutuksista perunan maalevintäisten tautien esiintymiseen. Tämä tulos pitää kuitenkin vielä varmentaa. Biohiilellä käsiteltävien peltolohkojen CO₂-hengityksessä ei havaittu tilastollisesti merkittäviä eroja kontrollilohkoihin verrattuna. Ruukkukokeissa merkittäviä eroja kuitenkin havaittiin. Hiilituotteiden valmistusolosuhteita ja -prosessia vaihtelemalla saadaan erilaisia hiilituotteita samoistakin raaka-aineista. Olosuhteiden optimointi tuotteen toimivuuden perusteella on haastavaa, koska kasvivaikutukset ovat moninaiset. Hankkeessa kehitetyllä digitaalisella kaksosella voidaan optimoida hydrohiilen valmistuksen energiatehokkuutta. Vedenkäsittelyyn kehitetyistä materiaaleista Diuronin ja atrasiinin poistossa parhaiten toimi kaliumhydroksidillä aktivoitu hiilituote. Parhaimmassa tapauksessa saavutettiin yli 90 % Diuronin poistuma. Biohiilet, jotka on valmistettu purkupuusta, kuusihakkeesta ja puutarhajätteestä vaikuttavat kestävämmiltä vaihtoehdoilta hiilituotteiden valmistukseen teknisen suorituskyvyn ja ympäristöllisen kestävyuden kannalta. Hydrotermisen karbonoinnin aikana muodostuva nestejake laskee hydrohiilen ympäristöllistä kestävyttä. Hyötykäyttökohteiden löytäminen nestejakeille (ml. pyrolyysinesteet) olisi tärkeää. Kustannuslaskelmat osoittavat, että bio- ja hydrohiilen kannattavuus on periaatteessa riittävä. Suomessa hiilituotteiden markkinat ovat pienet, mutta niiden odotetaan kasvavan. Jos julkishallinto tukee biohiilen käyttöä, hiilikompensaatioiden käyttö lisääntyy ja tuotantoa saadaan kehitettyä kohti teollista mittakaavaa, laskee biohiilen hinta todennäköisesti ja käyttö lisääntyy. Hankkeen toteutusaikana valmistui 2

tieteellistä lehtijulkaisua ja 7 valmistuu myöhemmin. Hankkeen tuloksia esiteltiin 3 konferenssissa. Lisäksi hankkeessa tehtyä tutkimusta esiteltiin useassa suurelle yleisölle tarkoitettussa tilaisuudessa.

2 Hankkeen toteutus ja toteutusvaiheen arviointi

2.1 Menetelmät ja aineisto

Raaka-aineet ja eri hiilituotteet **karakterisoitiin** kattavasti. Keskeisiä analyysejä olivat alkuainekoostumuksen selvittäminen (CHNOS, CS, XRF, SEM-EDS), pinta-ala ja huokosanalyysit (N₂ fysisorptio), kemiallisen koostumuksen analyysit (ATR-FTIR, Raman), ja elektronimikroskopia (FESEM) sekä röntgendiffraktio mittaukset. Lisäksi osan hiilituotteista PAH-pitoisuudet (Eurofins) ja raskasmetallipitoisuudet (ICP) selvitettiin. **Nesteiden koostumusta** selvitettiin FT-ICRMS:n avulla (Joensuun yliopisto). Hankkeen aikana tutkittiin myös **kasvihuonekaasupäästöjä** kaasu FTIR-mittausten avulla.

Hiilituotteita valmistettiin sekä **hitaalla pyrolyysillä** että **hydrotermisellä karbonoinnilla** (ts. märkäpyrolyysi). Laboratoriokokeiden lisäksi peltoviljelyssä käytettyä biohiiltä valmistettiin myös ulkoisen toimijan (SoilCare) puolesta käyttäen hankkeessa valikoituja raaka-aineita (puutarhajäte ja purkupuuta). Hydrotermistä karbonointia toteutettiin usealla eri raaka-aineella ja eri prosessiolosuhteissa digitaalisen kaksosen kehittämistä varten. Kokeissa vaihdeltiin karbonointiaikaa, lämpötilaa, pH-tasoa ja raaka-aine/vesisuhdetta. Pyrolyysikokeissa olosuhteet valittiin käytetyn raaka-aineen perusteella. Hankkeen aikana raaka-aineina käytettiin purkupuuta, puutarhajätettä, kasvihuoneiden viherjätettä, biokaasun tuotannon mädätysjäännöstä. Lisäksi referenssinä käytettiin kuusipohjaista biohiiltä.

Osa bio- ja hydrohiilistä aktivoitiin kemiallisesti fosforihapon tai kaliumhydroksidin avulla tai fysikaalisesti hiilidioksidin avulla. Käsittelyn tavoitteena oli parantaa hiilten pintaominaisuuksia haitta-aineiden adsorption tehostamiseksi. Näin valmistettujen aktiivihiilten toimintaa testattiin atrasiinin ja diuronin poistossa vedestä.



Kestävyyden arvioinnissa käytettiin monikriteerimenetelmää (MCA) ja analyyttistä hierarkiaproessimenetelmää (AHP). MCA tarjoaa kattavan kestävän kehityksen periaatteisiin pohjautuvan arvioinnin arviointikohteelle, jossa usein otetaan huomioon tekniset, taloudelliset, ympäristöön ja sosiaaliseen kestävyysliittyvät kysymykset. AHP-menetelmä edustaa puoliobjektiivista lähestymistapaa painotusten ja suositusten määrälliseen arviointiin. Menetelmässä kriteereitä verrataan kriteeriparien välillä. Kestävyyden arvioinnissa tehtiin kaksi arviointia. Arvioinnissa 1 tarkasteltiin kahden eri hiilen valmistusprosessin, pyrolyysin ja hydrotermisen karbonoinnin, kokonaiskestävyyttä. Kestävyyden arvioinnissa 2 tarkasteltiin eri biomassoista valmistettujen hiilituotteiden käyttöä maaperässä. Arvioinneissa

käytettiin seuraavia biomassoja hiilituotteiden raaka-aineena: puutarhajäte, purkupuuta (käsittelemätön), viherjäte tomaattien kasvatuksesta ja mädätysjäätös biokaasun valmistuksesta.

Digitaalisen kaksosen ja biohiilen hiilensidontakyvyn mallinuksissa käytettiin Matlab®-ohjelmistoa sekä hankkeen aikana kerättyä mittaustietoa. Hydrotermisen karbonoinnin tilamallit identifioitiin N4SID-menetelmällä ja simuloinneissa käytettiin malliprediktivistä säädintä prosessin säätämiseen. Biohiilen hiilensidontakyvyn mallinuksissa käytettiin double exponential -mallirakennetta, joka sovitettiin hiilidioksidimittauksista laskettuihin aikasarjoihin. Mallin kaikki parametrit kalibroitiin käyttäen rajoitettua differentiaalievoluutiota, jossa rajoitukset parametrien arvoille määritettiin kirjallisuudesta. Hiilidioksidivuon laskennassa tarkasteltiin CO₂-pitoisuuden lineaarisesta muutosta mittauksen aikana.

Kasvatuskokeissa selvitettiin eri materiaaleista valmistettujen hiilituotteiden potentiaalia maanparannusaineina maanviljelyssä. Kokeissa tutkittiin, miten eri hiilituotteet ja -käsittelyt vaikuttavat erilaisiin indikaattorikasveihin varhaisessa vaiheessa kasvua ja ilmeneekö hiilillä haitallisia, kasvua hidastavia vaikutuksia. Kokeet toteutettiin ohjelmoitavissa kasvatuskaapeissa, ja käsittelyinä olivat kylvöaika (välittömästi hiilen lisäyksen jälkeen tai 3 vk myöhemmin), hiilituote (7 erilaista bio- tai hydrohiiltä) ja hiilituotteen lisäystaso (5, 10 tai 50 t/ha). Koeasetelmalla voitiin tutkia myös eri tekijöiden välisiä vuorovaikutuksia, esimerkiksi sitä, onko hiilituotteen vaikutus sama vai erilainen eri lisäystasoilla. Käsittelymaaperistä otettiin näytteet kaupallisia **viljavuusanalyysijä** varten, jotta hiilenlisäyksen kemiallinen maaperävaikutus saataisiin selville. Ohran, retiisin ja rypsin siemenet kylvettiin peltomaahan, joka oli kerätty Lumijoen peltokokeelta ja johon hiilituotteet oli sekoitettu jauhetuina. Kasveista seurattiin taimettumista 1 vko ja 2 vk kylvöstä, ja maanpäällinen biomassa mitattiin 5 vk kokeen aloituksesta. Kasveista kerättiin näytteitä myös **ravinneanalyysijä** varten. **Tilastollisten analyysien** avulla aineistosta voitiin tutkia, miten eri hiilikäsittelyt vaikuttivat itsenäisesti ja yhdessä kasvien kasvuun koeolosuhteissa.

Bio- ja hydrohiilen vaikutuksia **hiilidioksidin (CO₂) vapautumiseen maasta** selvitettiin kasvihuoneessa tehdyllä astiakokeella. Kokeessa oli mukana neljä eri materiaaleista tuotettua biohiiltä (purkupuuta, puutarhajäte, tomaattikasvusto, mädäte) ja kaksi hydrohiiltä (purkupuuta, mädäte) sekä kaupallinen biohiilituote (kuusi) ja käsittelemätön kontrolli. Hiilet (10 t/ha vastaava määrä) sekoitettiin peltomaahan ja maan kosteus pidettiin tasaisena (50 % maan vedenpidätyskyvystä). Jokaisesta käsittelystä oli kolme toistoa. Hiilidioksidin vapautumista monitoroitiin Vaisalan M170 käsikäyttöisellä CO₂-analyysaattorilla ja -anturilla (GMP34312) 12 kuukauden ajan. Tuloksia käytettiin biohiilen hiilensidontakyvyn mallinuksissa.

Jätepohjaisten biohiilien soveltuvuutta maatalouskäyttöön selvitettiin pelto-olosuhteissa tehdystä ruutukokeesta, jossa koekasvina oli **peruna**. Koe perustettiin teollisuusperunatuotannossa olevalle viljelylohkolle satunnaistettujen täydellisten lohkojen koeasetelman mukaisesti. Kokeessa oli puutarhajätteestä ja purkupuusta tuotettua biohiiltä sekä kaupallinen biohiilituote (kuusi) ja käsittelemätön kontrolli. Jokaisesta käsittelystä oli neljä toistoa. Biohiili (10 t/ha) levitettiin ja muokattiin maahan syksyllä 2022 ja käsittelyjen vaikutuksia seurattiin kahden kasvukauden (2023 ja 2024) ajan. Viljelijä teki koealueen hoitotoimenpiteet normaalien käytäntöjensä mukaisesti. Kasvukauden aikana havainnoitiin kasvuston kehitystä (taimettuminen, kehitysaste, kasvuston terveys), maan ominaisuuksia (viljavuus, liukoinen ja kokonaistyyppi, orgaaninen hiili, kosteus ja lämpötila), hiilidioksidin vapautumista maasta ja kasveista sekä sadon määrää (kokonaissato, kokojakauma) ja laatua (fysiologiset ja tautivioitukset, tärkkelys- ja ravinnepitoisuus).

Hiilidioksidin vapautumista peltomaasta mitattiin peltokokeen koeruuduilta Vaisalan CO₂-anturilla (GMP343) ja siihen kytketyllä Vaisalan MI70-mittarilla kasvukausien 2023 ja 2024 aikana. Mittausta varten jokaiselle koeruudulle asennettiin lieriön muotoinen teräksinen mittauskammio (halkaisija 315 mm). Mittaukset aloitettiin keväällä maan sulettua ja niitä jatkettiin syksyllä maan jäätymiseen saakka. Mittauksia tehtiin keväällä ja alkukesästä viikon, myöhemmin kahden viikon välein. Mittausaika oli kaksi minuuttia,

paitsi keväisin ja syksyisin maan ollessa kylmempi mittausaika oli viisi minuuttia. Tuloksia käytettiin biohiilen hiilensidontakyvyn mallinnuksessa.

Kustannustehokkuutta ja liiketoimintamahdollisuuksia tutkittiin Vaasan yliopiston tutkimuksissa määrällisillä ja laadullisilla menetelmillä. Määrällisiä menetelmiä käytettiin bio- ja hydrohiilen tuotannon kannattavuutta laskettaessa. Laskennassa keskityttiin kustannusten arviointiin ja tuotantoon investoimisen kannattavuutta kuvaavan nykyarvon (NPV) laskemiseen eri vaihtoehdoilla. Laskennassa vertailtiin biohiilen ja hydrohiilen valmistusta eri raaka-aineita (puujäte, tomaatinlehdet ja puutarhajäte, sekä mädäte) käyttäen. Lisäksi tehtiin kassavirta-analyysi kolmella eri skenaariolla (paras ja huonoin tapaus, sekä perustapaus). Lopuksi tehtiin herkkyyshanalyysi molemmille tuotannoille. Liiketoimintamahdollisuuksia tutkittiin laadullisin menetelmin eli haastattelujen, aikakauslehtiaineistojen ja Asiakastiedon talouslukujen, sekä aiempien markkinatutkimusten avulla. Tällaista tutkimusta voi sanoa laadulliseksi tutkimukseksi, jossa on mukana määrällistä aineistoa lisäämässä tutkimuksen luotettavuutta. Aineisto analysoitiin sisällönanalyysien ja kuvailevien tilastojen avulla. Yhteenvetona edellisistä laadittiin markkinointisuunnitelman runko eli lista asioista, jota markkinoinnin suunnittelussa kannattaa ottaa huomioon.

2.2 Aikataulu ja resurssit (sis. toteutuksen organisaatio ja yhteistyökumppanit)

Hanke toteutettiin 01.03.2022–31.10.2024 (32 kk) välisenä aikana. Hankkeella oli käytössä n. 120 henkilötyökuukautta hankkeen tutkimuksen toteuttamiseksi. Hankkeessa toimi yhteensä 30 henkilöä. Hankkeen työpakettien ja tehtävien ohjaukseen sekä tulosten arviointiin osallistui 2 henkilöä. Lisäksi hankkeen tehtävien toteuttamiseen osallistui opiskelijoita ja ulkomaisia tutkimusharjoittelijoita mm. Erasmus+ rahoituksen kautta.

Oulun yliopisto, Ympäristö- ja kemiantekniikan tutkimusyksikkö

Oulun yliopiston vastuulla oli hankkeen koordinointi, hiilituotteiden valmistus (hydroterminen karbonointi ja pyrolyysi) ja karakterisointi, vedenpuhdistuskokeet, kasvihuonekaasujen mittausta, biohiilen hiilensidontakyvyn datapohjainen mallinnus, digitaalisen kaksosen kehittäminen hydrotermisestä prosessista ja kestävyuden arviointi.

Luonnonvarakeskus

Luonnonvarakeskuksen vastuulla hankkeessa oli jättepohjaisten biohiilituotteiden pilotointi peltoviljelyssä sekä maanparannuspotentiaalin selvittäminen kasvatusta kaappikokeiden avulla. Luonnonvarakeskus vastasi myös CO₂-mittausten järjestämisestä.

Vaasan yliopisto

Vaasan yliopiston vastuulla oli arvioida hiilituotteiden liiketoimintamahdollisuuksia ja kustannuksia. Lisäksi heidän vastuullaan oli markkinointisuunnitelman rungon tekeminen.

Yhteistyö hankkeen aikana onnistui hyvin. Hankkeen aikana järjestettiin 7+2 ohjausryhmän kokousta ja useita sisäisiä kokouksia (noin 1 kerta/kk) hankkeen tehtävien toteutukseen liittyen. Hankkeen toteutuksen yhteydessä valittiin vuosittain erilaisia yhteisiä teemoja, joihin kyseisen vuoden aikana panostettiin enemmän. Näitä teemoja olivat yleinen/julkinen tiedotus, tieteelliset julkaisut ja datan avaaminen. Teemojen jakaminen tietyille ajanjaksoille auttoi keskittymään tiettyyn asiaan kerrallaan ja edisti teemojen toteuttamista hyvin.

Yritysyhteistyö

Hankkeen aikana tehtiin yhteistyötä Kiertokaari Oy:n ja Stormossen Oy:n kanssa, jotka ovat alueellisia jätekeskuksia. Lisäksi mukana hankkeessa olivat ÖSP, Närpiön alueen kasvihuoneviljelijät sekä Taavittila Oy viljelijä Lumijoelta. Yritysten ja ÖSP:n roolina hankkeessa oli tuoda tietoa bio/hydrohiilen valmistukseen soveltuvista biomassoista ja toimittaa niitä hankkeen tehtävän tutkimuksen käyttöön. Viljelijä osallistui peltokokeiden toteuttamiseen.

Yrityspalautteen mukaan hankkeen organisointi ja yhteistyö hankkeen ulkopuolisten toimijoiden kanssa sujui hyvin. Saadut tulokset luovat pohjaa sivuvirtojen hyödyntämiseen sekä hiiltoprosessien kehittämiseen. Yritykset toivoivat lisää tulosten eteenpäin viemistä käytäntöön saakka sekä tutkimuksen aihealueen eteenpäin viemistä jatkohankkeissa.

2.3 Kustannukset ja rahoitus

Hankkeen aikana tehtiin useampi budjetinmuutosesitys, jotka kohdistuivat momenttisiirtoihin. Tässä on esitettyä hankkeen lopussa voimassa ollut budjetti ja toteutuneet kokonaiskustannukset.

Oulun yliopiston budjetti, kustannukset ja rahoitus.

KUSTANNUKSET			RAHOITUS		
	Budjetti	Kustannukset		Budjetti	Kustannukset
Palkat	240 038.00	250 494.10	MMM:n rahoitusosuus	483 347.90	484 166.56
Henkilösivukulut	112 817.00	117 732.28	Muu rahoitus	5 601.00	5 610.80
Matkakulut	10 000.00	4 753.60	Omarahoitusosuus	201 548.10	201 889.15
Ostopalvelut	33 000.00	17 488.78	YHTEENSÄ	690 497.00	691 666.51
Muut kustannukset yhteensä, josta	294 642.00	301 197.75			
- tarvikkeet	23 000.00	17 685.41			
- yleiskustannukset	264 642.00	276 170.29			
- muut kustannukset	7 000.00	7 342.05			
YHTEENSÄ	690 497.00	691 666.51			

Luonnonvarakeskuksen budjetti, kustannukset ja rahoitus.

KUSTANNUKSET			RAHOITUS		
	Budjetti	Kustannukset		Budjetti	Kustannukset
Palkat	104 239.07	106 318.51	MMM:n rahoitusosuus	263 640.00	261 981.69
Henkilösivukulut	53 161.93	54 222.44	Muu rahoitus	3 099.00	3 079.48
Matkakulut	5 500.00	4 276.99	Omarahoitusosuus	109 889.00	109 198.38
Ostopalvelut	57 130.00	52 667.53	YHTEENSÄ	376 628.00	374 259.54
Muut kustannukset yhteensä, josta	156 597.00	156 774.08			
- tarvikkeet	15 700.00	11 262.64			
- yleiskustannukset	138 797.00	142 881.44			
- muut kustannukset	2 100.00	2 630.00			
YHTEENSÄ	376 628.00	374 259.55			

Vaasan yliopiston budjetti, kustannukset ja rahoitus.

KUSTANNUKSET			RAHOITUS		
	Budjetti	Kustannukset		Budjetti	Kustannukset
Palkat	60810.00	61163.27	MMM:n rahoitusosuus	114259.60	114259.60
Henkilösivukulut	29189.00	29358.36	Muu rahoitus	1300.00	1300.00
Matkakulut	1500.00	560.64	Omarahoitusosuus	47668.40	47668.40
Muut kustannukset yhteensä, josta	71729.00	72145.74	YHTEENSÄ	163228.00	163228.00
- yleiskustannukset	71729.00	72145.74			
YHTEENSÄ	163228.00	163228.00			

2.4 Raportointi, julkaisut ja seuranta

Tieteelliset lehtiartikkelit

Julkaistut lehtiartikkelit:

Kimbi Yaah VB, Ahmadi S, Martinez-Quimbayo J, Morales-Torres S, Ojala S. Recent technologies for glyphosate removal from aqueous environment: A critical review. *Environmental Research* (2024) vol. 240, part 2, 117477.

Nikula RP, Ahmadi S, Kimbi Yaah VB, Haq H, Tuomi V, Ruusunen M. Identification and control of hydrothermal carbonisation process with energy consumption assessment. *Energy Conversion and Management: X* (2024), 100808. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100808>

Arvioitavaksi lähetetyt käsikirjoitukset:

Hagner M, Salmela MJ, Ahmadi S, Kimbi Yaah VB, Ojala S, Laitinen T, Hiltunen LH. Biochar and hydrochar from organic side-streams induce species-specific responses in plants. *Journal of Environmental Management* (Submitted)

Haq, H., Ahmadi, S., Kimbiyaah, V., Nikula, RP., Tuomi, V., Laitinen, T. & Ruusunen, M. (2024). Biochar and hydrochar production for soil amendment applications. (Submitted)

Valmisteilla olevat käsikirjoitukset:

Kimbi Yaah VB, Ahmadi S, Ojala S. Effects of different activation methods on the performance of digestate derived hydrochar in the removal of Diuron from aqueous solution. Ensimmäinen käsikirjoitusversio valmis.

Tuomi, V., Haq, H., Laitinen, T., et.al. (2024). Markets and business opportunities for biochar in Finland.

Suunnitellut käsikirjoitukset:

Laitinen, T. et al. Biohiilen valmistuksen ja maaperä käytön kestävyden arviointi.

Nikula RP. et al. Biohiilen hiilensidontakyvyn mallinnukseen liittyvä käsikirjoitus

Hiltunen et al. Biohiili perunantuotannossa

Konferenssiesitykset ja abstraktit

Salmela MJ, Hagner M, Laitinen T, Ahmadi S, Kimbi Yaah VB, Ojala S, Hiltunen LH. 2024. Experiments in controlled conditions provide beneficial information on the applicability of biochar in potato production. *NIBIO BOOK 10(4)* 186. ISBN: 978-82-17-03558-9, ISSN: 2464-1189. https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/3154156/NIBIO_BOK_2024_10_4.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hiltunen L, Ahmadi S, Hagner M, Hafiz H, Keiski R, Kimbi Yaah VB, Laitinen T, Nikula RP, Ojala S, Ruusunen M, Salmela M, Tuomi V. 2024. BioDigi - Orgaaniset sivuvirrat kestäviksi tuotteiksi digitalisaation keinoin.

Suomen Maataloustieteellisen seuran tiedote no 41, 277. ISSN 0358-5220 ISBN 978-951-9041-69-8 on line https://www.smts.fi/sites/smts.fi/files/Abstraktikirja%202024_final.pdf

Salmela MJ, Ahmadi S, Hagner M, Hiltunen L, Kimbi Yaah VB, Laitinen T, Ojala S. 2024. BioDigi: Hiilituotteiden vaikutukset kasveihin ovat lajikohtaisia. Suomen Maataloustieteellisen seuran tiedote no 41, 226. ISSN 0358-5220 ISBN 978-951-9041-69-8 on line

https://www.smts.fi/sites/smts.fi/files/Abstraktikirja%202024_final.pdf

Ahmadi S, Kimbi Yaah VB, Nikula RP, Laitinen T, Ojala S, Ruusunen M, Salmela M, Hagner M, Hiltunen L.

Hydrothermal carbonization of construction wood waste into a valuable product. International Symposium on Chemical Reaction Engineering: ISCRE 28, 16.–19.6.2024 (poster presentation) <https://www.iscre28.org/>

Raportit

Tiina Laitinen, Satu Ylinampa, Riitta Keiski, Ville Tuomi, Hafiz Haq ja Satu Ojala. Bio- ja hydrohiilen valmistuksen ja maaperäkäytön kestävyden arviointi, sisäinen raportti (työpaketti 7)

Tuomi, V. & Haq, H. Liiketoimintamahdollisuuksien ja kustannusten arviointi (työpaketti 6)

Viestintä

Hankkeen aikana viestintä ja tiedotus on ollut aktiivista. Hankkeen tutkijat ovat mm. osallistuneet useisiin suuren yleisön tiedotukseen liittyviin tapahtumiin, kuten Tyrnävän perunamarkkinat ja Tutkijoiden yö. Yhteensä hankkeen aikana on osallistuttu noin 25 tapahtumaan, jossa hanketta tai hankkeen tuloksia on esitelty. Nämä tapahtumat ovat arviolta tavoittaneet jopa 25 000 henkilöä. Raportin liitteenä on taulukko kaikista hankkeen aikana toteutuneista viestintätoimista.

2.5 Toteutusvaiheen arviointi

Peltokokeella saatiin tietoa biohiilen lyhytaikaisista vaikutuksista viljelyolosuhteissa. Kokonaisvaikutusten (hiilensidontakyvyn, kasvi- ja maaperävaikutusten) selvittämiseksi **tarvitaan kuitenkin pitkäaikaisia peltotestauksia**. Etenkin mahdollisten satovaikutusten odotetaan näkyvän vasta monen vuoden kuluttua biohiilen lisäyksestä.

Kasvihuonekaasumittausten tekeminen toteutettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen laboratoriomittakaavassa kasvatustaapissa kasvatettujen kasvien avulla. Tähän toteutustapaan päädyttiin, koska hankkeen käyttöön ei saatu ajoissa kenttämittauksiin soveltuvia laitteistoja. Haasteena oli lähennä sähkön saatavuusongelmat peltoviljelyssä käytetyllä pellolla.

Hankkeen aikana **viestintään** panostettiin keskipertoa enemmän resursseja. Viestintään saatiin hyvin apua myös rahoittajalta mm. osallistuminen Studio Lipasto -lähetukseen sekä Biodigi –videon valmistukseen. Aktiivisen viestinnän kautta saatiin hyvää näkyvyyttä hankkeen teemaan liittyen, ja samalla voitiin esitellä ajankohtaista tutkimustoimintaa ja hankkeessa saatuja tuloksia. Tutkijoiden yön yhteydessä järjestettiin kaksi kertaa ohran kasvatustyöpaja, jossa osallistujat kylvivät siemenet tilaisuuden aikana ja saivat ohjeet ohran kasteluun ja seurantaan ja tulosten toimittamiseen valokuvamuodossa kokeen päättyessä. Tämä työpaja oli erittäin onnistunut, ja vastauksiakin kasvatuksen tuloksista saatiin.

Hankkeen tutkimusaineisto vahvisti kirjallisuudessa esitettyä havaintoa, jonka mukaan **lyhyestä mittaussarjasta voi seurata mallinnustuloksena biohiilen lyhyt viipymäaika**. Useiden vuosien mittaiset mittaussarjat voivat parantaa ennusteita. Lisäksi CO₂-mittausten rinnalla voidaan mitata biohiilen hengityksen osuutta kokonaishengityksestä (isotooppimittaukset), mistä voi olla apua hiilensidontakyvyn mallinnuksessa.

Hydrotermisen karbonoinnin yhteydessä mitattu **kokonaisenergiankulutus** vaihteli odottamattomasti, mikä teki mittauksista ja tuloksen tarkastelusta haasteellisia. Tarkalla aikaresoluutiolla tehty mittaaminen voisi auttaa taustasyiden hakemisessa.

Kasvatustaapin- ja peltokokeisiin liittyvät **kasvi- ja maa-analyytit** teetettiin ostopalveluna, jonka toteuttaja valittiin kilpailutuksen perusteella. Analyysitulosten pitkät toimitusajat ja analyysien ajoittainen uusintatarve aiheuttivat lisätyötä ja epävarmuutta. Jatkossa kilpailutuksessa on syytä painottaa muitakin kuin hintakriteereitä.

Hankkeen aikana yhteistyö partnereiden välillä sekä rahoittajan suuntaan on sujunut erinomaisesti. Esimerkiksi sisäiset työpajat, fokusoidumpien tutkimuskokonaisuuksien toteuttaminen, suunnitelmat julkaisujen suhteen ja niiden toteuttamiseen liittyvät keskustelut ovat lisänneet tutkijoiden osaamista ja ymmärrystä eri aloilta. Kokouksia järjestimme eri toimipaikoilla ja kävimme myös tutustumassa partnereiden tutkimusympäristöihin. Vierailimme myös yrityksissä. Esimerkkinä hankkeen yhteistyön toimimisesta on mittausaineiston saaminen eri osatehtävien käyttöön hyvissä ajoin hankkeen aikana, mistä oli paljon hyötyä esimerkiksi datapohjaisessa mallinnuksessa. Monitieteisyys on ollut vahva elementti hankkeen toteuttamisen aikana ja sitä kautta on pystytty ammentamaan uutta tietoa ja tutkimustarpeita myös jatkoa ajatellen. Yhteistyö toteutui myös erityisen hyvin tiedotuksen yhteydessä. Osallistuminen

Tyrnävän perunamarkkinoille, Tutkijoiden yöhön, Studio lipaston lähetykseen sekä BioDigi –videon tekemiseen JOM-lehden järjestämää USA:ssa järjestettyä seminaaria varten oli aktiivista hankkeen toimijoiden sekä rahoittajan taholta.

Osaaminen ja tieto hydrotermisen karbonoinnin soveltuvuudesta erilaisille jätebiomassoille lisääntyi hankkeen aikana. Hydroterminen karbonointi soveltuu erityisesti kosteille biomassoille, ja parantaa arviointien mukaan valmistuksen kokonaiskestävyyttä verrattuna pyrolyysiin. Hankkeen aikana saatiin hyvin monipuolista tietoa käytetyistä raaka-aineista ja hiilituotteista. Saatua tietoa on kuitenkin haasteellista sovittaa kasvatuskokeissa saatuihin tuloksiin oikeanlaisen valmistustavan valitsemiseksi, koska vaikutukset olivat riippuvaisia mm. käytetyistä kasvilajeista ja kylvöajasta. Tulosten varmistamiseksi tarvitaan useita toistoja ja kattavampia sekä pitkäaikaisempia kasvatuskokeita.

3 Tulokset ja niiden arviointi

3.1 Tulosten esittely, merkitys ja vieminen käytäntöön

Biodigi-hankkeen päätavoitteena oli löytää edullisia, pitkään hiiltä sitovia ja kestäviä menetelmiä biopohjaisten jäte- ja sivuvirtamateriaalien hyödyntämiseksi maataloudessa (maanparannus, kasvitautien ehkäisy) ja veden puhdistuksessa (korkean arvon lopputuotteet) älykkäällä tavalla digitaalisia työkaluja apuna käyttäen.

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 1:

Kasvatuskokeissa havaittiin tilastollisten testien avulla, että hiilikäsittelyt vaikuttivat taimettumiseen ja biomassaan varhaisessa vaiheessa kasvua, mutta lajikohtaisella tavalla. Hiilituotteet tyypillisesti lisäsivät maaperän pH:ta, ravinne- ja hiilipitoisuutta, mutta muutosten taso verrattuna pelkkään peltomaahan oli riippuvainen käytetystä hiilituotteesta ja sen lisäystasyyppisestä. Kasvuun lähtöä hidastavia vaikutuksia ilmeni etenkin tomaattibihiilellä korkealla lisäystasyyppisellä, mikä voi olla seurausta kyseisen biohiilen suoloista.

Hiilikäsittelyt vaikuttivat eri tavoin ohraan, retiisiin ja rypsiin, ja samalla käsittelyllä saattoi olla positiivisia vaikutuksia yhdessä mutta negatiivisia vaikutuksia toisessa lajissa. Esimerkiksi aikaisempi kylvö heikensi taimettumista ja biomassaa ohralla, mutta paransi niitä retiisillä. Rypsiällä kylvöaika vaikutti biomassaan mutta ei taimettumiseen. Etenkin ohralla ja rypsiällä käsittelyiden yhteisvaikutukset olivat merkitseviä, mistä syystä kasvien vasteet eivät ole tarkasti arvioitavista pelkästään yksittäisten käsittelyiden päävaikutusten avulla.

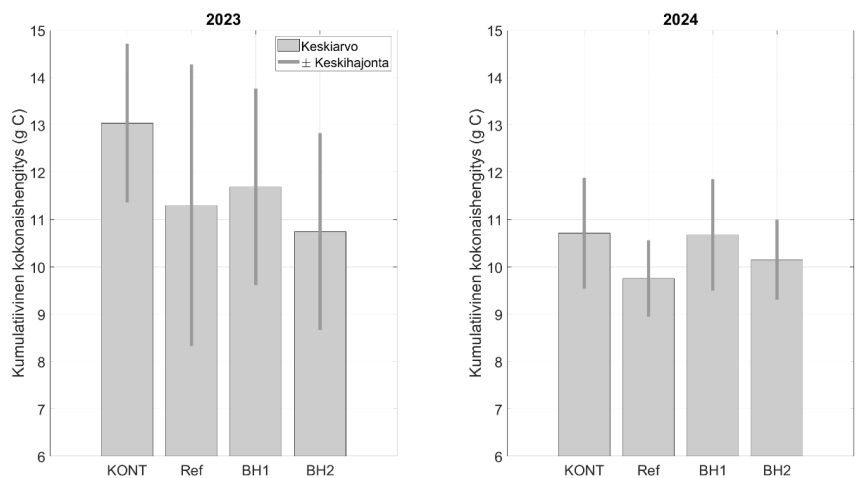
Haitallisia vaikutuksia kasveihin ilmeni vain vähän ja tyypillisesti korkeimmalla lisäystasyyppisellä, mutta lajien väliset erot käsittelyvasteissa viittaavat siihen, että biohiilten vaikutukset kasvuun ovat vaihtelevia ja olosuhderiippuvaisia.



Biohiilikäsittelyt eivät vaikuttaneet biohiilen levitystä seuranneen kahden kasvukauden aikana maan ravinnetilaan, perunakasvuston kehitykseen tai perunasadon määrään. Tulokset ovat yhdenmukaisia aiemmin lauhkealla vyöhykkeellä pelto-oloissa tehtyjen perunatutkimusten kanssa. Huomioitavaa kuitenkin on, että biohiilen pitkäaikaisvaikutuksia ei ole seurattu. **Peltokokeessa** saatiin viitteitä siitä, että

biohiilikäsittelyllä voisi olla vaikutuksia perunan maalevintäisten tautien esiintymiseen, kuten perunarupeen (*Streptomyces* spp.) ja kuorirokkoon (*Spongopora subterranea* f.sp *subterranea*). Perunarupea esiintyi enemmän ja kuorirokkoa vähemmän biohiilellä käsitellyissä koeruuduissa. Erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä, joten asian vahvistaminen vaatii tuloksia useammalta vuodelta. Biohiilellä tiedetään olevan taudinaiheuttajia ja tuholaisia hillitseviä vaikutuksia, mutta vaikutukset ovat paikka-, isäntäkasvi-, tuhonaiheuttaja- ja biohiilikohtaisia. Biohiilen mahdolliset vaikutusmekanismit taudinaiheuttajiin ovat moninaiset, mukaan lukien kasvien puolustusmekanismien käynnistyminen, maan olosuhteiden muutos taudinaiheuttajille epäedulliseksi ja/tai hyödylliselle mikrobistolle suotuisaksi ja suorat vaikutukset taudinaiheuttajiin ja niiden tuottamiin yhdisteisiin. Vaikutusmekanismi täytyy selvittää erikseen jokaisessa tapauksessa ja sen todentaminen vaatii monivaiheista tutkimusta laboratoriosta pelto-oloihin.

Biohiilellä käsiteltyjen peltolohkojen **CO₂-hengityksessä** ei havaittu tilastollisesti merkittäviä eroja kontrollilohkoihin (kuva alla). Tämän takia biohiilen hengitystä ei voitu suoraan arvioida vertaamalla biohiilikäsitellyjen lohkojen mittausdataa kontrollilohkojen mittausdataan. Sen sijaan biohiilen mineralisoituminen arvioitiin osana double exponential -mallin kalibrointia yhtenä kalibroitavana parametrina. Kalibrointien perusteella labiilin fraktion keskimääräinen viipymisaika (*MRT*) oli 3.4 vuotta. Stabiilin fraktion viipymisaika oli 24.7 vuotta vuoden 2023 datan perusteella, kun taas koko aineisto vuoteen 2024 saakka tuotti hieman pitemmän viipymisaajan, joka oli 26.5 vuotta. Viipymäajat olivat tasolla, joka on esitetty tutkimuskirjallisuudessa hiilidioksidimittauksiin pohjautuvien kenttäkokeiden analyyseissa. Ne olivat kuitenkin selvästi lyhemmät kuin satojen tai tuhansien vuosien mittakaava, joka on päätelty kirjallisuudessa biohiilten H/C_{org}-moolisuhteiden tai aromaattisen rakenteen perusteella. Tulevina vuosina kerättävä mittausaineisto samalta pellolta tulee vielä vaikuttamaan myöhempiin ennusteisiin.



Kumulatiivinen hengitys mittausjakson sadan ensimmäisen päivän aikana vuosina 2023 (vas.) ja 2024 (oik.) erikseen. KONT viittaa kontrollialueeseen, Ref referenssibiohiili-, BH1 purkupuubiohiili- ja BH2 puutarhajätebiohiilikäsitelyihin alueisiin.

Ruukkukokeissa sen sijaan nähtiin tilastollisesti merkittäviä eroja biohiilikäsitellyjen ja kontrolliruukkujen välillä. Mädätteen hydrohiilellä ja biohiilellä käsiteltyjen ruukkujen hiilidioksidivuot olivat tilastollisesti suuremmat kuin kontrolliruukkujen vuot. Vaihtelu hydrohiilen vuon aikasarjoissa oli kuitenkin suurta ja kumulatiivisessa tarkastelussa tilastollisesti merkittävä ero katosi. Puusta valmistetuille bio- ja hydrohiilille saatiin muita tapauksia pitemmät viipymäajat: purkupuubiohiili 23.2 vuotta, purkupuuhydrohiili 24.3 vuotta ja referenssihiili 16.4 vuotta (stabiilit hiilifraktiot). Ruukkukokeiden CO₂-pitoisuuksien aikasarjat sisälsivät epälinearisuuksia, mikä vaikeutti hiilidioksidivuon laskentaa.



Päätulokset liittyen tavoitteeseen 2:

Valmistustavan ja olosuhteiden vaikutukset tuotteen laatuun selvitettiin kattavien karakterisointien avulla. Vaikka raaka-aineista ja tuotteista saatiin kattavasti tietoa selville, tietojen yhdistäminen kasvatuskokeiden kautta vaikutuksiin maanparannuksessa on haastavaa. Tämä johtuu siitä, että eri kasvit eri kasvatusolosuhteissa reagoivat eri tavalla hiilisyöksiin. Varmistetun tiedon saamiseksi lisäkokeet olisivat tarpeen. Hydrohiilen valmistuksessa havaittiin, että lämpötilan nostaminen ja hiiltoajan lisääminen nostaa hydrohiilen hiilipitoisuutta.

CHNOS analyysit eri raaka-aineille ja niistä valmistetuille bio- ja hydrohiillelle. (RA: raaka-aine, BH: biohiili, HH: Hydrohiili)

	Purkupuuhuu			Puutarhajäte			Viherjäte (tomaatti)			Mädätysjäännös			Kuusihake	
	RA	BH	HH	RA	BH	HH	RA	BH	HH	RA	BH	HH	RA*	BH**
C	51	85	56	40	78	53	31	34	34	42	46	41	52	86
H	6.2	3.0	5.7	5.0	2.8	5.3	4.5	1.0	1.4	5.8	5.0	5.0	5.9	1.0
N	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	0.7	5.0	2.4	2.6	4.8	4.8	3.0	0.0	0.3
O	39	7	33	28	9	28	32	22	22	22	15	16	44	4
S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.0	0.1	0.1	0.6	0.4	0.4	0.0	0.0

* Alakangas et al. (2016) *Properties of indigenous fuels in Finland*. VTT Technology 272.

** Kaupallinen biohiili

Hydrohiilen valmistuksen olosuhteiden vaikutus valittujen alkuaineiden osuuteen (p-%). Raaka-aineena purkupuuhuu, kokeen alussa pH = 7

T (°C)	Biomassa:vesi -suhde	Aika (h)	C	P	K	Ca	S
180	1:3	4	57.4	0.15	0.03	0.22	0.02
180	1:5	4	57.7	0.15	0.05	0.25	0.01
180	1:3	6	57.5	0.16	0.01	0.16	0.01
180	1:5	6	57.9	0.14	0.05	0.24	0.01
200	1:3	4	60.1	0.17	0.04	0.20	0.02
200	1:5	4	59.1	0.15	0.04	0.24	0.01
200	1:3	6	64.8	0.14	0.04	0.19	0.01
200	1:5	6	59.9	0.14	0.04	0.21	0.01

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 3:

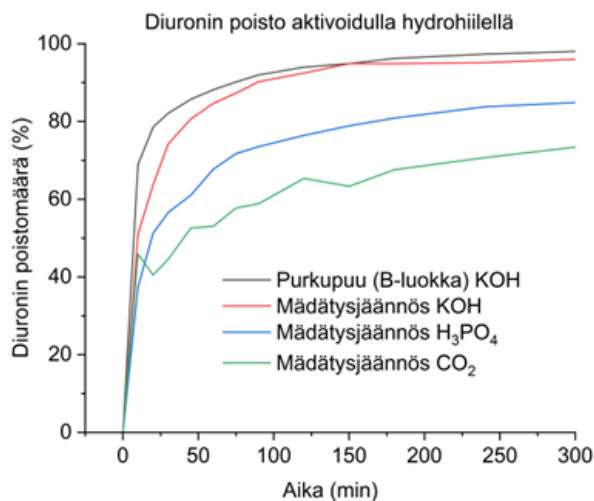
Lähtökohtaisesti tiedettiin, että mädätettä ja B-luokan purkupuuta ei voida käyttää peltoviljelyssä nykyisen ohjeistuksen mukaisesti. Mädäte kuitenkin soveltui kasvatuskaappien kokeellisissa olosuhteissa testattavaksi siinä missä muutkin hiilituotteet. Alkuaineanalyysien perusteella mädäte sisältää hieman suurempia määriä rautaa, kalsiumia, piitä ja fosforia verrattuna muihin käytettyihin raaka-aineisiin. Myös puutarhajätteessä ja tomaatin viherjätteessä oli merkittäviä määriä kalsiumia. Tomaattiviherjäte sisälsi kaliumia noin kymmenkertaisesti muihin raaka-aineisiin verrattuna. A-luokan purkupuussa ja kuusihakkeessa on lähtökohtaisesti enemmän hiiltä kuin muissa käytetyissä raaka-aineissa.

Laskelmien mukaan keskikokoisen jätekeskuksen sivuvirroista (ml. tomaattiviherjäte, puutarhajäte, purkupuuhuuhonta, mädäte) voidaan saada ~2 900 t/a biohiiltä tai ~4 300 t/a hydrohiiltä. Keskikokoisen maatilan (27 ha) biohiilen tarve on noin 270 t kertalisäyksenä. Tämänhetkiselällä biohiilentuotantotasolla saadaan katettua noin 25 maatilan biohiilen tarve. Maatiloja Suomessa on yli 40 000 kappaletta. Hyödyntämällä sivuvirroista saatu biohiili maatiloilla, voidaan kattaa 10 maatilan biohiilen tarve vuodessa. Mädätteen osuus biohiilestä on noin 350 t/a ja hydrohiilestä 270 t/a. Tämä osuus täytyisi ohjata muuhun käyttöön, kuten aktiivisuuden jälkeen vedenpuhdistusmateriaaliksi, metallurgiseksi hiileksi (riippuen mm. mädätteen kalsiumpitoisuudesta) tai viherrakentamiseen.

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 4:

Vedenpuhdistusadsorbenttien valmistuksessa raaka-aineina käytettiin B-luokan purkupuuta ja biokaasun tuotannon mädätysjäätöstä. Molemmista valmistettiin sekä bio- että hydrohiiltä, joita aktivoitiin kemiallisin ja fysikaalisin menetelmin. Valmistuksesta havaittiin, että käytetty hiiletysmenetelmä vaikuttaa aktivoituneen materiaalin rakenteeseen. B-luokan purkupuusta tehdyn bio/hydrohiilen hiilipitoisuus oli tasolla 75–85%, kun mädätteestä tehdyn tuotteen hiilipitoisuus jäi tasolle 25-50%. Kaliumhydroksidillä aktivoituneen hiilen pinnalla on enemmän mm. adsorptiota tehostavia rakenteellisia ominaisuuksia nk. defektipaikkoja. Kaliumhydroksidiaktivoinnilla saavutettiin myös suurimman hiilen pinta-ala, jotka olivat luokkaa 240 m²/g, joka saavutettiin referenssibiohiilen tapauksessa. Biohiilellä, joka valmistettiin B-luokan purkupuusta vastaava pinta-ala oli noin 65 m²/g ja mädätteellä 125 m²/g. Vastaavasti hydrohiilillä kaliumhydroksidiaktivoinnilla päästiin ominaispinta-alaan noin 200 m²/g B-luokan purkupuun tapauksessa ja 135 m²/g mädätteen tapauksessa. Fosforihappoaktivoinnilla ja hiilidioksidiaktivoinnilla saavutettiin aina pienemmät ominaispinta-alat riippumatta raaka-aineesta ja sen hiiletysmenetelmästä. Hankkeessa valmistetuilla vedenpuhdistukseen tarkoitetuilla hiilillä ei ole kovin suuri ominaispinta-ala valmistuksessa käytetyn matalan lämpötilan vuoksi, mutta niiden pinnalla on adsorptiossa toimivia kemiallisia funktionaalisia ryhmiä.

Vedenpuhdistuskokeista yleisesti ottaen voidaan sanoa, että kaliumhydroksidillä aktivoituneet materiaalit toimivat paremmin atrasiinin ja Diuronin poistossa. Referenssibiohiilen tapauksessa saavutettiin yli 90% poistuma. Tämä voidaan selittää hiilen suuremmalla ominaispinta-alalla sekä materiaalin pinnan ominaisuuksilla. Mädätteestä ja B-luokan purkupuusta hydrotermisen karbonoinnin ja kaliumhydroksidin avulla valmistetut adsorbentit toimivat lähes yhtä hyvin kuin referenssibiohiilestä valmistettu materiaali. Fosforihapolla aktivoitu referenssibiohiili ja mädätebiohiili sekä hiilidioksidilla aktivoitu mädätebiohiili eivät toimineet riittävän hyvin atrasiinin ja Diuronin poistossa. Yleisesti atrasiini on hankalampi poistaa vedestä näillä adsorbenteilla kuin Diuron. *Tästä aihepiiristä on valmisteilla tieteellinen artikkelijulkaisu.*



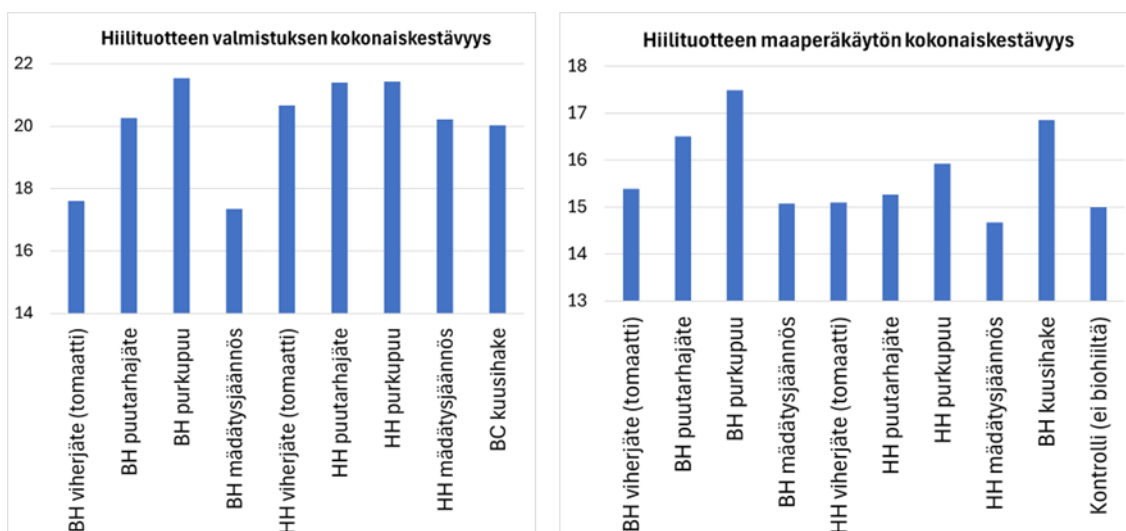
Diuronin poistotehokkuus aktivoitulla hydrohiilellä, kun muuttujina hydrohiilen raaka-aine ja aktivointikäsitely.

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 5:

Bio- ja hydrohiilien valmistusmenetelmien kestävyden arviointi osoitti, että biohiilet, jotka on valmistettu purkupuusta, kuusihakkeesta ja puutarhajätteestä olivat kestävimpiä vaihtoehtoja teknisen suorituskyvyn ja ympäristöllisen kestävyden näkökulmista. Biohiilen ominaisuudet (maaperäkäyttö huomioiden) sekä pyrolyysin alhaisempi energiankulutus nostivat biohiilen valmistuksen teknisen suorituskyvyn kestävyttä. Ympäristöllisen kestävyden osalta erityisesti hydrotermisen karbonoinnin aikana muodostuva HTC-neste laski hydrohiilten ympäristöllistä kestävyttä. Taloudellisen ja sosiaalisen kestävyden näkökulmista hydrohiilten valmistus oli kestävämpi vaihtoehto eri biomassaraaka-aineesta riippumatta. Hydrohiilten edullisempi hinta sekä alhaisemmat investointi- ja tuotantokustannukset nostivat hydrohiilten valmistuksen taloudellista kestävyttä biohiilen valmistukseen verrattuna. Merkittävin vaikutus sosiaaliseen kestävyteen oli terveys- ja turvallisuusnäkökulmilla. Biohiilen korkeampi itsesyttymisriski sekä raaka-aineen syttymisriski kuivauksen aikana laskivat biohiilen valmistuksen turvallisuusnäkökulmia. Hiilituotteiden valmistuksen kokonaiskestävyyttä tarkasteltaessa kestävimiksi vaihtoehtoina nousi purkupuusta valmistettu biohiili sekä purkupuusta ja puutarhajätteestä valmistetut hydrohiilet.

Bio- ja hydrohiilien maaperäkäytön kestävyden arviointi osoitti, että biohiilet purkupuusta, kuusihakkeesta ja puutarhajätteestä ovat parhaimmat vaihtoehdot kokonaiskestävyyden näkökulmasta. Hiilituotteiden käyttö maaperässä on ympäristöllisen kestävyden näkökulmasta kannattavampaa. Haasteena on kuitenkin taloudellisen kestävyden haasteet, kuten hiilituotteen korkea hinta.

Kestävyden arvioinnin tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että tutkimustuloksia erityisesti hydrohiilten maaperäkäytöstä on rajallisesti saatavilla. Lisäksi osa hiilituotteiden vaikutuksista saattaa tulla esiin vasta usean vuoden kuluttua hiilituotteen ikäännyttyä. Tästä johtuen pitkäaikaista usean vuoden kestävä tutkimusta tarvitaan alalle lisää.



Hiilituotteiden valmistuksen ja käytön kokonaiskestävyys eri biomassaraaka-aineilla.

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 6:

Tulosten perusteella pyrolyysi vaikuttaa toistaiseksi keskimäärin kannattavammalta kuin HTC-tuotanto. Kannattavuus riippuu kuitenkin monesta tekijästä, kuten raaka-aineista, joista vertailuissa ollut mädäte oli kannattavuuden kannalta paras. Mitään tuotantoa ei kannata lisätä ilman laskelmia, joihin sisältyy käytettävän raaka-aineen hinta ja saatavuus ja muut operatiiviset kustannukset. Lisäksi nettohyötyarvon pitäisi olla aina positiivinen. Tästä näkökulmasta pyrolyysi on toistaiseksi kannattavampi hiilituotteen

valmistusmenetelmä. Tämä on yhdensuuntaista sen kanssa, että kansainvälisesti pyrolyysiä käytetään enemmän.

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 7:

Tulokset osoittivat, että hydrotermisen karbonoinnin sähkönkulutus riippuu ensisijaisesti prosessointilämpötilasta sekä -ajasta. Syötteen vesipitoisuudella tai pH-arvolla ei havaittu selvää vaikutusta sähkönkulutukseen. Lämpötilalla (180 ja 200 °C) oli negatiivinen korrelaatio tuotetun hydrohiilen määrään ja saantoon, mutta positiivinen korrelaatio hydrohiilen hiilipitoisuuteen. Prosessointiajalla (4 ja 6 h) ei ollut vaikutusta saantoon tai hiilipitoisuuteen. Tulokset viittaavat siihen, että energiatehokkuutta voidaan optimoida suosimalla matalaa lämpötilaa sekä lyhyttä prosessointiaikaa tavoiteltaessa korkeaa hydrohiilen saantoa. Jos prosessoinnin tavoitteena on korkea hiilipitoisuus, energiatehokkuutta voidaan optimoida asettamalla prosessointiaika lyhyeksi ja lämpötila korkeaksi. Prosessin toimintaa voidaan simuloida hankkeessa kehitetyllä digitaalisella kaksoella, mikä mahdollistaa energiankulutuksen ennustamisen jo prosessoinnin suunnitteluvaiheessa. Datapohjaista menetelmää testattiin hankkeessa laboratoriomittakaavan sovelluksessa. Kaupallinen soveltaminen vaatisi lisäksi datasetin keräämistä teollisesta reaktorista sekä mallin sovittamista aineistoon.

Päätulokset liittyen tavoitteeseen 8:

Tulokset osoittivat, että bio- ja hydrohiilen kannattavuus näyttää periaatteessa riittävältä kustannuslaskelmien perusteella. Joka tilanteessa kannattavuutta pitää kuitenkin arvioida erikseen, koska kannattavuuteen vaikuttaa moni tekijä ja tuotantoa ei kannata käynnistää tai lisätä, mikäli kannattavuuslaskelmissa nettohyöty ei ole positiivinen. *Hiilituotteiden markkinat ovat Suomessa pieniä, mutta ne kasvavat todennäköisesti, jos valmistuksen kustannustehokkuutta onnistutaan lisäämään.* Toistaiseksi liiketoiminta ei ole ollut kovin kannattavaa tuotteiden kalleuden vuoksi. Raaka-aineita pitäisi saada riittävän edullisesti, tuotannon pitäisi sijaita lähellä raaka-aineita ja tuotannon koon pitäisi olla suurempaa ja päästä teollisen mittakaavan tuotantoon. Myös hiilituotteen hyödyt pitää osata todistaa ja viestiä, jossa hiilituotetta voi myydä. Markkinoinnin pitäisi olla suunnitelmallista ja sen suunnitteluun sisältyy paljon samoja asioita kuin liiketoimintamallin suunnitteluun, koska molempiin kuuluu ajatus liiketoimintamahdollisuuksien etsimisestä. Jos julkishallinto tukee biohiilen käyttöä ja hiilikompensaatioiden käyttö lisääntyy ja tuotantoa saadaan kehitetyksi kohti teollista mittakaavaa, tulee biohiilen hinta todennäköisesti laskemaan ja käyttö lisääntymään. Haasteena on kuitenkin biohiilen käyttöön aiemmin kuuluneet väitteet hyvin monista käyttömahdollisuuksista ja biohiilestä useimpien lehtijuttujen perusteella syntyvä mielikuva biohiilestä enemmän harrastustoimintana kuin liiketoimintana. Menneisyys ei kuitenkaan kerro, mitä tulevaisuudessa tapahtuu ja haastattelujen perusteella kehitys tulee olemaan myönteistä. Kestävän kehityksen näkökulmasta biohiilen käytön järkevyyttä pitää taloudellisen kannattavuuden lisäksi pohtia ympäristövaikutusten kannalta ja sosiaalisten vaikutusten kannalta, mm. biomassan vaihtoehtojen käyttötapojen vuoksi. Tämän tutkimuksen tuloksia voi yleistää koskemaan hiilituotteita yleensä, siis muutakin kuin biohiiltä, vaikka se pääasiallisena tutkimuskohteena olikin. Tulevaisuudessa pitäisi tutkia biohiilituotteisiin kohdistuvaa sääntelyä, sillä se vaikuttaa liiketoimintaan, sekä sopivan hinnan määrittelyä ja hyötyjen todentaminen ja niiden viestiminen.

Tulosten vieminen käytäntöön

Jätepohjaisten biomassojen hyödyntäminen voisi lisätä liiketoimintamahdollisuuksia ja samalla vähentää biomassojen kompostoinnista tai läjityksestä aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. Biohiilen käytön lisääntyminen maataloilla edellyttää tuotantoon liittyvien hyötyjen tarkempaa todistamista, biohiilen hinnan laskemista esim. lisääntyneen tuotannon kautta ja laajemmin biomassajätevirtoja hyödyntämällä, tai biohiilen käytön

synnyttämän lisäarvon (esim. CO2 kauppa, kasvien terveysvaikutukset) kautta. Hankkeen tuloksista voivat pääasiassa hyötyä maanviljelijät, jätekeskukset sekä kasvihuonetuottajat.

Lisäksi hankkeessa kehitettiin markkinointisuunnitelman runko, jonka avulla mikä tahansa yritys voi aloittaa liiketoiminnan suunnittelun käytännössä. Tämä edistää liiketoiminnan syntyä, koska yritys ei saa yleensä rahoitusta ilman liiketoimintasuunnitelmaa ja siihen kuuluvaa markkinasuunnitelmaa.

Merkitys

Hankkeen aikana saatiin laajasti uutta tieteellistä tietoa, joka on julkaistu ja julkaistaan arviolta seitsemässä tieteellisessä artikkelijulkaisussa. Borealiselta vyöhykkeeltä on vain harvoja esimerkkejä biohiilivaikutuksista ja esim. meta-analyyseissä alue on aliedustettu. Liiketoimintamahdollisuuksien tutkimista liittyen bio- ja hydrohiileen on tehty vähän, vaikka muiden tuotteiden osalta sitä löytyy huomattavasti enemmän.

Hankkeen aikana käynnistettiin Aamu Mykkäsen kandidityö yhteisohjauksena Oulun yliopiston ja Luonnonvarakeskuksen kanssa. Työ liittyy biohiilten lannoiteympäykseen ja saatujen hiilituotteiden kasvivaikutuksiin.

Hankkeen aikana käynnistyi myös Kiertokaaren aloitteesta Vilma Palatsin diplomityö (Oulun yliopisto), joka liittyy biohiilen valmistamiseen ja käyttömahdollisuuksiin.

BioDigi-hankkeen toteutuksen aikana Oulun yliopistolla vieraili useita kansainvälisiä harjoittelijoita Erasmus+ Global rahoituksen kautta, ja joiden tehtävät liittyivät hiilituotteiden kestävyden arviointiin sekä aktiivihiilen valmistukseen ja käyttöön vedenpuhdistuskokeissa. Töiden tulokset raportoidaan osana BioDigi-hanketta.

3.2 Jatkotoimenpiteet

Tuloksia hyödynnetään jatkohankkeen tutkimuksen pohjana. Jatkohankkeessa hiilimateriaalien sovelluksia laajennetaan, peltokokeita jatketaan ja painotusta kohdennetaan kasvinterveys- ja maan mikrobisto - vaikutusten tutkimiseen.

Biohiilen maaperävaikutusten todentaminen edellyttää pitkäjänteistä useamman vuoden seuranta. Tähän olisi hyvä ohjata rahoitusta. Biohiilen maaperävaikutuksia tutkittaessa kannattaa ottaa huomioon, että olosuhteet kasvien kasvulle ovat eri vuosina erilaiset. Vaikutukset saattavat tulla paremmin esille "huonoina" vuosina kuin "hyvinä" vuosina.

Hydrohiilen valmistuksen mahdollisuuksia Suomessa olisi hyvä selvittää. Märkäpyrolyysi menetelmänä soveltuu paremmin kosteille raaka-aineille kuin tyypillisesti käytetyt pyrolyysimenetelmät. Bio/hydrohiilen valmistuksen vaihtoehtoisten raaka-aineiden saatavuutta Suomessa olisi tärkeä kartoittaa tarkemmin.

Olisi myös mielenkiintoista selvittää minkälainen on hiilituoteliiketoimintaan liittyvä logistiikan kestävyys, tai ainakin kustannukset ja päästöt, koska ne ovat esim. Kuljetusalan yritysten kehityskohteita, ja näitä ei otettu BioDigi-hankkeessa huomioon.

Sammanfattning av projektet

Målet av Biodigi-projektet var att stöda Finlands målet om klimatneutralitet genom att minska utsläppen av växthusgaser från markanvändning och skapa nya verifierade kolsänkor och förråd, främja utnyttjandet av bioavfallsströmmar från samhällen och växtproduktion som kolprodukter i jordbruket. Kolsänkor verifierades med hjälp av mätningar och en digital modell utvecklad i projektet. I den fördelaktiga användningen av kolprodukter var målet att avsevärt förbättra kostnaden och energieffektiviteten i tillverkningsprocessen och därigenom sänka priset på biokol till upp till en tredjedel av det nuvarande priset. För att nå målet undersökte projektet sammansättningen och egenskaperna hos sorterade bioavfallsfraktioner från avfallscentraler och sidoströmmar från växthus, pyrolys och hydrotermisk karbonisering av avfallsfraktioner samt effekterna av dessa faktorer på markförbättringen och växthälsöfrämjande egenskaper av kolprodukten. Energieffektiviteten i tillverkningen optimerades med hjälp av en digital tvilling. Kolprodukter testades med hjälp av odlingsexperiment (t.ex. fältodlingspilot) och effekterna av kol på potatisväxtsjukdomar undersöktes. Lösningar söktes för kolets effektmekanismer i marken och för att optimera tillverkningsprocessen med hjälp av omfattande materialkaraktisering. En del av kolprodukterna förädlades vidare till aktivt kol, vars funktion testades för att avlägsna bekämpningsmedel som används inom jordbruket från vatten. För att uppnå ett heltäckande angreppssätt utvärderades hållbarheten i produktionen av kolprodukter med hjälp av en multikriteriemetod. Kostnadseffektiviteten undersökte genom en detaljerad kostnadsutvärdering och undersökning av teknikens affärsmöjligheter. Projektet genomfördes som ett tvärvetenskapligt samarbete mellan Uleåborgs universitet, Naturresursuniversitetet och Vasa universitet och flera företag. Projektets effektivitet och uppnåendet av innovationer förbättrades genom aktiv interaktion och kommunikation.

Ansvarig för projektet var Uleåborgs universitet och ansvarig föreståndare var biträdande professor Satu Ojala. Tiina Laitinen, PhD, från Uleåborgs universitet, var koordinator för projektet. Specialforskare Lea Hiltunen var ansvarig för Naturresurscentrum och biträdande professor Ville Tuomi var ansvarig för Vasa universitet.

Den övergripande projektbudgeten, kostnader och finansiering

KOSTNADER			FINANSIERING		
	Budget	Kostnader		Budget	Kostnader
Lön	405 087.07	417 976.07	JSMs ekonomiska bidrag	861 247.10	860 407.78
Lönebikostnader	195 167.93	201 313.19	Övriga finansiering	10 000.00	9 550.96
Resekostnader	17 000.00	9 590.94	Självfinansieringsandel	359 105.90	359 195.23
Köptjänster	90 130.00	70 156.51	TOTALT	1 230 353.00	1 229 153.97
Totala övriga kostnader, varav	522 968.00	530 117.27			
- tillbehör	38 700.00	28 947.75			
- allmänna kostnader	475 168.00	491 197.21			
- övriga kostnader	9 100.00	9 972.31			
TOTALT	1 230 353.00	1 229 153.97			

Under de odlingsförsök som genomfördes under BioDigi-projektet fann man att kolbehandling påverkar groning och biomassa i den tidiga fasen av växttillväxten, beroende på art. Kolprodukter höjer jordens pH och närings- och kolhalt, beroende på kolprodukten och tillsatsnivån. Biverkningarna var minimala och endast vid högre tillskotts nivåer. Kolets effekter på tillväxten är varierande och beroende av förhållandena. I fältförsöken visade sig biokol inte ha någon effekt på utvecklingen av potatisvegetationen eller mängden potatisavkastning under de två växtsäsongerna. Försöken gav dock indikationer på möjliga effekter på förekomsten av potatisjordburna sjukdomar. Detta resultat måste dock fortfarande verifieras. Inga statistiskt signifikanta hydrokolskillnader observerades i CO₂-andningen hos fältblocken behandlade med biokol jämfört med

kontrollblocken. Signifikanta skillnader observerades dock i tester i krukor. Genom att variera tillverkningsförhållandena och processen för kolprodukter kan olika kolprodukter erhållas från samma råmaterial. Att optimera förhållandena utifrån produktens funktionalitet är utmanande eftersom växteffekterna är mångfaldiga. Den digitala tvillingen som utvecklats i projektet kan användas för att optimera energieffektiviteten i hydrokolproduktionen. Av de material som utvecklats för vattenbehandling var kolprodukten aktiverad med kaliumhydroxid bäst för att avlägsna diuron och atrazin. I bästa fall uppnåddes mer än 90 % diuroborttagning. Biokolar tillverkade av rivningsvirke, granflis och trädgårdsavfall framstår som mer hållbara alternativ för produktion av kolprodukter vad gäller teknisk prestanda och miljömässig hållbarhet. Den flytande fraktionen som bildas under hydrotermisk karbonisering minskar hydrokolens miljömässiga hållbarhet. Att hitta användbara användningsområden för flytande fraktioner (inklusive pyrolysvätskor) skulle vara viktigt. Kostnadsberäkningarna visar att lönsamheten för bio- och hydrokol i princip är tillräcklig. I Finland är marknaden för kolprodukter liten, men den förväntas växa. Om den offentliga förvaltningen stödjer användningen av biokol ökar användningen av kolkompensationer och produktionen kan utvecklas mot industriell skala, priset på biokol kommer sannolikt att minska och användningen ökar. Under genomförandet av projektet slutfördes 2 vetenskapliga tidskrifter och 7 kommer att slutföras senare. Resultaten av projektet presenterades vid 3 konferenser. Dessutom presenterades den forskning som bedrivs i projektet vid flera evenemang avsedda för allmänheten.

Summary of the project

The aim of the Biodigi project was to support Finland's carbon neutrality goals by reducing the greenhouse gas emissions of land use and creating new carbon sinks and storages, thus promoting the utilization of sorted biowaste flows from communities and plant production. The carbon sinks were verified using measurements and a mathematical model developed during the project. The aim of the project was to significantly decrease production costs and improve energy efficiency of the carbonation processes, and thereby reduce the price of the products to one third of the current level. To reach this aim, the research focused on the properties and characteristics of different waste biomasses (e.g., sorted biowaste from landfill sites and side streams of vegetable production) and their pyrolysis and hydrothermal carbonization, and on the effects of novel carbon products on soil quality and plant health. The energy-efficiency of the production was verified with the help of a digital twin. The carbon products were tested in a plant experiment in growth chambers and in the field where the effects of carbons on potato diseases were investigated. The prevailing mechanisms were searched via a comprehensive characterization of the materials. Part of the bio/hydrochars were processed further to activated carbons, the efficiency of which was evaluated in the removal of agricultural chemicals from water. To reach a comprehensive view, the sustainability of the products and processes was evaluated using the multicriteria analysis (MCA) method. Cost-efficiency of carbon products was evaluated using a detailed estimation of the costs and an analysis of possible business models. The project was realized in a multidisciplinary collaboration between the University of Oulu, Natural Resources Institute Finland, University of Vaasa, and several companies. The impact and innovativeness of the project were enhanced through active interaction and communication.

The responsible partner of the project was the University of Oulu and the responsible leader Associate Professor Satu Ojala. The project was coordinated by M.Sc. (Tech.) Tiina Laitinen from the University of Oulu. The project responsible person of Natural Resources Institute Finland was Senior Scientist Lea Hiltunen and the responsible person for the University of Vaasa was Associate Professor Ville Tuomi.

Total budget, costs and financing of the project.

COSTS			FUNDING		
	Budget	Costs		Budget	Costs
Salaries	405 087.07	417 976.07	Ministry funding share	861 247.10	860 407.78
Indirect employee costs	195 167.93	201 313.19	Other funding	10 000.00	9 550.96
Travel costs	17 000.00	9 590.94	Self funding	359 105.90	359 195.23
Services	90 130.00	70 156.51	In total	1 230 353.00	1 229 153.97
Total other costs, of which	522 968.00	530 117.27			
- Equipment	38 700.00	28 947.75			
- Overheads	475 168.00	491 197.21			
- Other costs	9 100.00	9 972.31			
In total	1 230 353.00	1 229 153.97			

Plant experiments carried out during the BioDigi project showed that carbon treatment affects seedling emergence and biomass in the early stages of plant growth in a species-specific manner. Carbon products increase soil pH and nutrient and carbon content depending on the carbon product and its application rate. Only few detrimental effects on plant growth were observed at higher carbon application rates. The effects of carbon on growth are varied and depend on environmental conditions. In the field experiment, biochar was found to have no effect on potato growth or yield during two growing seasons. However, the field experiment provided indications of possible effects of biochar on the occurrence of soil-borne diseases in potato. This result requires further verification. No statistically significant differences were observed in CO₂ respiration of field parcels treated with biochar compared to control parcels. However, significant differences were observed in pot experiments.

By varying the production conditions and process of carbon products, different carbon products can be obtained from the same raw materials. The optimization of conditions based on the functionality of the product is challenging because of the varied plant effects. The digital twin developed in the project can be used to optimize the energy efficiency of hydrochar production. Part of the carbon products were activated for water purification applications. In the removal of the Diuron and Atrazine, the carbon products activated by potassium hydroxide showed the highest removal percentage. In the best case, a removal of over 90% of Diuron was achieved.

Biochars produced from demolition wood, spruce chips and garden waste appear to be more sustainable alternatives for the production of carbon products in terms of technical performance and environmental sustainability. The liquid fraction formed during hydrothermal carbonization reduces the environmental sustainability of hydrochar. Finding utilisation possibilities for the liquid fractions (including pyrolysis liquids) would be important. Cost calculations show that the profitability of biochar and hydrochar is sufficient in principle. In Finland, the market for carbon products is small, but it is expected to grow. If the public administration supports the use of biochar, the use of carbon offsets will increase, production can be developed towards an industrial scale, the price of biochar will likely decrease, and its use will increase.

During the project, two scientific journal publications were completed and seven will be completed later. The results of the project were presented at three conferences. In addition, the research carried out in the project was presented at several events intended for the general public.