



Jätevedenpuhdistamolietteen ja erilliskerätyn biojätteen pyrolysointi biohiileksi

Feasib Oy

Jenna Finnilä, Janne Keränen, Markus Latvala ja Tuuli Pohjola

2025



Euroopan unionin
osarahoittama



POHJOIS-
POHJANMAA
COUNCIL OF OULU REGION



naturpolis

feasib

Sisällys

1	Tiivistelmä	3
2	Biohiilen ominaisuudet ja laatuvaatimukset	4
2.1	Koostumus ja raaka-aineet	4
2.2	Sertifioinnit	6
2.3	Lainsäädäntö	7
3	Biohiilen hyödyntäminen	11
3.1	Maa- ja metsätalous	12
3.2	Viherrakentaminen	13
3.3	Teollisuus	14
3.4	Haitta-aineiden kerääminen	14
3.5	Hiilensidonta	15
4	Biohiilen tuotantoteknologiat	16
4.1	Nopea, keskinopea ja hidas pyrolyysi	16
4.2	Märkähiilto HTC	18
4.3	Muita pyrolyysitekologioita	20
5	Pilottitutkimus	21
5.1	Raaka-aineet ja tutkimusmenetelmät	21
5.2	Pyrolysointi	23
5.3	Pilottitutkimuksen tulokset ja tuotteen analysointi	25
6	Biohiilen markkinat	30
6.1	Biohiilen tuotanto	30
6.2	Biohiilialan teknologiatoimittajia	32
6.3	Biohiilimarkkinoiden tulevaisuudennäkymät Pohjoismaissa ja Suomessa	33
6.4	Biohiilen arvon määrittäminen	35
6.5	Sidosryhmäanalyysi	35
7	Biohiililaitoksen liiketoiminta ja kannattavuus	37
7.1	Liiketoimintaskenaariot ja Business Model Canvas	37
7.2	Kustannus- ja kannattavuuslaskelma	39
8	Tulevaisuuden visiot – liiketoimintaa jätevedenpuhdistamolietteestä	44
8.1	Jätevedenpuhdistamolietteiden tyypilliset käsittelyketjut Suomessa	44
8.2	Case-esimerkit	46
8.3	Tulevaisuuden visiot jätevedenpuhdistamolietteen käsittelylle	50
8.4	Lainsäädännön kehitys ja sen vaikutukset	53
8.5	Ympäristölliset ja taloudelliset näkökulmat	53
9	Johtopäätökset ja suositukset	54
10	Lähteet	55
11	Liitteet	60
11.1	Laitteiston pohjapiirros	

1 Tiivistelmä

Hiiliviisasta kiertotaloutta -hankkeen pitkän tähtäimen tavoitteena on nostaa Koillismaalla syntyvien sivuvirtojen hyödyntämistä ja samalla parantaa alueen omavaraisuutta. Osana hanketta toteutettiin tämä selvitys, jossa tarkastellaan Kuusamossa syntyvää jätevedenpuhdistamolietettä ja erilliskerättyä biojätettä paikallisesti tuotetun biohiilen raaka-aineena. Lisäksi kerättiin tietoa vaihtoehtoisista jätevedenpuhdistamolietteen käsittelymenetelmistä. Selvitystyön aineisto koottiin kirjallisuuskatsauksen avulla, haastattelemalla biohiili- ja jätevesialalla toimivia organisaatioita ja laskemalla kannattavuus Kuusamossa syntyvää raaka-ainemäärää vastaavalle biohiililaitokselle. Lisäksi valmistettiin pilot-mittakaavassa erä biohiiltä, joka analysoitiin EBC-sertifikaatin mukaisesti.

Biohiili on monipuolinen tuote, jonka laatu ja ominaisuudet vaihtelevat raaka-aineen ja tuotantomenetelmän mukaan. Sen hyödyntämismahdollisuudet ulottuvat maa- ja metsätaloudesta viherrakentamiseen, teollisuuden sovelluksiin ja hiilensidontaan. Jätevedenpuhdistamolietteelle tyypillinen käsittelymenetelmä on hidaspölylyysi, jonka päätuotteena saadaan biohiiltä. Lietehiilen hyödyntämisen haasteina voivat olla suuret raskasmetalli- ja PAH-yhdistepitoisuudet, mikä havaittiin myös pilot-tutkimuksessa tuotetun biohiilen osalta. Jätevedenpuhdistamolietteestä valmistettu biohiili on kuitenkin sallittu maaperäkäytössä, kun määrätyt prosessiolosuhteet ja kemialliset ominaisuudet täyttyvät. Sen sijaan erilliskerätylle biojätteelle pölylyysi ei ole sallittu käsittelymenetelmä Suomen nyky-lainsäädännön puitteissa. EU:n sivutuoteasetuksen tulkinta voi kuitenkin vaihdella jäsenmaittain. Esimerkiksi Italiassa erilliskerätyn biojätteen pölylyysi voi olla mahdollista (Määttä, 2025).

Biohiilimarkkinat kasvavat ja kehittyvät, mutta ovat pirstaloituneet pieniin ja suuriin tuottajiin sekä lukuisiin ominaisuuksiltaan vaihteleviin tuotteisiin. Korkeat investointikustannukset ja monimutkainen säätely hidastavat kasvua. Lietehiilen osalta tuotteita ei ole vielä kotimaan markkinoilla, ja kysyntä on epävarmaa. Pölylyysi poistaa jätevedenpuhdistamolietteestä haitta-aineita. Siksi lainsäädännön mahdollinen tiukentuminen haitta-ainepitoisuuksien osalta parantaa pölylyysin houkuttelevuutta käsittelymenetelmänä ja edistää liete-hiilen tuotantoa.

Kuusamossa syntyy vuosittain jätevedenpuhdistamolietettä noin 4 000 tonnia, erilliskerättyä biojätettä 1 000 tonnia ja lisäksi männynkuorta puutuoteteollisuuden sivuvirtana. Kokoluokaltaan 6 000 tonnia vuodessa syötettä käsittelevän biohiililaitoksen kannattavuuslaskelman perusteella, laitos ei ole taloudellisesti kannattava. Merkittävimmäksi tulonlähteeksi muodostuu vältetty jätteenkäsittelykustannus, mutta biohiilen hinnan ja CO₂-kompensaatiomarkkinoiden kehittyminen voivat parantaa kannattavuutta tulevaisuudessa. Kannattavuuteen vaikuttaa myös jätteiden käsittelykustannuksen muutos.

Kuusamon biohiililaitoksen kehittämisen kannalta keskeisiä tekijöitä ovat biohiilimarkkinoiden (alueellinen) potentiaali, teknologisten ratkaisujen kehittyminen ja skaalautuvuus sekä lainsäädännön kehittyminen. Myös alueellinen yhteistyö naapurikuntien kanssa jätevedenpuhdistamolietteen käsittelyn ja biohiilen käytön osalta voi luoda mahdollisuuksia laitosinvestoinnille.

2 Biohiilen ominaisuudet ja laatuvaatimukset

Biohiilen ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi, sillä biohiili ei ole yksittäinen tuote vaan tuoteryhmä. Merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat biohiilen ominaisuuksiin ovat käytetty raaka-aine, tuotantoprosessi ja sen olosuhteet sekä jälkikäsittely. (Riikonen, 2019)

Biohiilen ominaisuuksia voidaan kuvata muun muassa seuraavien kriteerien avulla:

- Käytetty raaka-aine ja pyrolyysilämpötila¹ (antaa yleiskuvan ominaisuuksista, erityisesti jos muita tarkempia tietoja puuttuu)
- Vety-hiili (H/C) tai happi-hiili (O/C) -suhde (kuvaava biohiilen odotettavissa olevaa stabiiliutta ja elinikää)
- Liukoisten kasviravinteiden pitoisuudet² (lannoitusvaikutus)
- Ominaispinta-ala (kuvaava huokoisuutta)
- Huokoskokojakauma (antaa käsityksen vaikutuksista maan vedenpidätyskykyyn)
- Kalkitusvaikutus ja pH¹
- KVK eli kationinvaihtokapasiteetti (kuvaava ravinteiden pidätyskykyä)
- Haitta-aineiden pitoisuudet² (erit. PAH-aineet)
- Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuus
- Raekoko (vaikuttaa käsittelyyn ja sekoitukseen ja on tärkeä myös maan fysikaalisten ominaisuuksien kannalta)

¹ Tulee ilmoittaa tuoteselosteessa, ² Osa tiedoista tulee ilmoittaa tuoteselosteessa. (Riikonen, 2019)

2.1 Koostumus ja raaka-aineet

Biohiili on biomassasta pyrolyysillä tuotettua hiiltä joka omaa korkean, yli 85 %:n hiilipitoisuuden. Rakenteeltaan biohiili on hyvin huokoista ja sillä on suuri pinta-ala, joten se pystyy sitomaan itseensä runsaasti vettä ja ravinteita.

Biohiilen raaka-aineeksi soveltuvat teknisesti kaikenlaiset biomassat, mutta tyypillisesti biohiili valmistetaan hakkeesta, sahanpurusta tai puun kuorista. Biohiilen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa raaka-ainevalinnoilla, lisäaineilla ja tuotanto-olosuhteilla. Ominaisuuksissa voi olla suuriakin eroja raaka-aineesta ja käsittelystä riippuen. Biohiiltä on mahdollista rikastaa tai jatkokäsitellä, esimerkiksi aktiivihieksi. (Bioenergia ry, 2024)

Puu	• Sahateollisuuden sivutuotteet (hake, puunkuoret), metsätähteet ja kierrätetty puu
Maatalousjätteet	• Maatalouden sivutuotteet, mm. olki ja kuivikelanta
Elintarviketeollisuuden jätteet	• Elintarviketeollisuuden jätteet, kuten hedelmien ja vihannesten kuoret, kahvinporot ja ruokajätteet
Liete ja jätevesiliete	• Biokaasulaitosten mädätysjäännökset, jätevedenpuhdistamoiden ja maatalouden lietteet
Muut biomassat	• Puutarhajätteet, mm. puiden lehdet, oksat ja heinät • Levät

Kuva 1. Biohiilen raaka-aineet (Bioenergia ry, 2024; Carbons, 2024).

2.1.1 Raaka-aineena jätevedenpuhdistamoliete ja erilliskerätty biojäte

Biohiilen raaka-aineena voidaan käyttää monipuolisesti erilaisia biomassoja. Jätevedenpuhdistamolietettä ja biojätettä käytettäessä biohiilen raaka-aineena tulee kuitenkin huomioida muun muassa lainsäädäntö ja esikäsittelyn tarve.

Jätevedenpuhdistamoliete sisältää runsaasti orgaanista ainesta ja ravinteita. Kun jätevedenpuhdistamolietettä käytetään biohiilen raaka-aineena, on tärkeää ottaa huomioon seuraavat seikat:

- **Haitta-aineet:** Jätevedenpuhdistamoliete voi sisältää raskasmetalleja, lääkkeitä ja muita haitta-aineita, jotka voivat vaikuttaa biohiilen laatuun ja käytettävyyteen. Pyrolyysi nähdään kuitenkin potentiaalisena keinona poistaa mikromuoveja ja orgaanisia haitta-aineita puhdistamopohjaisista lietteistä ja mädätteistä, mikä parantaisi niiden käyttömahdollisuuksia (Kymäläinen et al. 2020).
- **Kosteuspitoisuus:** Jätevedenpuhdistamoliete on usein hyvin kosteaa ja vaatii kuivauksen ennen pyrolyysiä (Suomen vesilaitosyhdistys ry, 2019).
- **Ravinteet:** Lietteestä valmistettu biohiili sisältää hiiltä ja fosforia, minkä ansiosta sillä on hyödyllisiä maanparannus- ja lannoitevaikutuksia. (Pöyry Finland Oy, 2019).

Erilliskerätty biojäte koostuu pääasiassa kotitalouksien ja ravintoloiden ruokajätteistä. Sen käyttö biohiilen raaka-aineena vaatii huomioimaan seuraavat asiat:

- **Lainsäädäntö:** Erilliskerätty biojäte kuuluu eläinperäisten sivutuotteiden käsittelyä koskevan EU:n sivutuoteasetuksen piiriin. Sivutuoteasetuksessa pyrolyysi ei ole sallittu käsittelymenetelmä, joten erilliskerättyä biojätettä ei voi Suomessa käyttää ainesosana biohiilen valmistuksessa. Biojätteestä valmistettu biohiili ei täytä Ruokaviraston [lannoitevalmisteiden kansallinen ainesosaluettelon](#), ainesosaluokka 9, pyrolyysihiihi -vaatimuksia. Biojäte biohiilen raaka-aineena rajaa pois käytön lannoitevalmisteena, maanparannusaineena sekä kasvualustana. Biojätteen esikäsittely esim. mädättämällä ei muuta tilannetta. (Venelampi, 2025; Alainen, 2025) EU:n asetuksen tulkinta voi kuitenkin vaihdella jäsenmaittain. Esimerkiksi Italiassa erilliskerätyn biojätteen pyrolyysi voi olla mahdollista (Määttä, 2025).
- **Lajittelu:** Biojätteen tulee olla hyvin lajiteltua, jotta se ei sisällä epäpuhtauksia, kuten muovia ja metallia, mitkä voivat vaikuttaa biohiilen käytettävyyteen. Tyypillisesti muovi ei aiheuta ongelmia itse pyrolyysissä, mutta vaikeuttaa biojätteen esikäsittelyä ja kuivausta merkittävästi. (Isokääntä, 2024)
- **Kosteuspitoisuus:** Kuten jätevedenpuhdistamoliete, myös biojäte on yleensä kosteaa ja vaatii kuivauksen ennen pyrolyysiä.
- **Homogeenisuus:** Raaka-aineen tulisi olla mahdollisimman tasakokoista, tasaisen hiiltymisen varmistamiseksi (Isokääntä, 2024).
- **Ravinteet ja orgaaninen aines:** Biojäte sisältää runsaasti orgaanista ainesta ja ravinteita, jotka voivat edistää biohiilen maaperää parantavia ominaisuuksia (Ippolito et al. 2020).

Ravinnekierron kannalta olisi oleellista selvittää, päätyvätkö raaka-aineiden ravinteet biohiileen ja ovatko ne kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Lupaavia tuloksia ravinnekierron toteutumisesta on saatu HS-Veden puhdistamopohjaisen ja BioKymppi Oy:n biojätepohjaisen mädätteen pyrolysointikokeista. Kokeissa havaittiin, että raaka-aineiden sisältämästä tyyppistä n. 20–30 % ja fosforista n. 100 % päätyi hiileen. Lisäksi kasvatuskokeiden ja kasvianalyysien perusteella kasvit kykenivät käyttämään hiilessä olevia ravinteita. Kasvatuskokeiden perusteella näyttäisi siltä, että kasviraavinteet tyyppiä lukuun ottamatta säilyvät tai jopa muuttuvat pyrolyysissä kasveille käyttökelpoiseen muotoon. (Kymäläinen et al. 2020) Kokeet suoritettiin osana tutkimusta, eikä kaupallista toimintaa ole muodostunut.

2.1.2 Puu tukimateriaalina pyrolyysissä

Biojätteen ja jätevedenpuhdistamolietteen pyrolysoinnissa puumateriaalin lisääminen prosessiin voi olla hyödyllistä useista syistä:

1. Pyrolyysiprosessin hallinta

- Kosteuspitoisuuden hallinta: Biojäte ja jätevedenpuhdistamoliete ovat usein hyvin kosteita, mikä heikentää pyrolyysiprosessin tehokkuutta. Puumateriaali, joka on yleensä kuivempaa, auttaa alentamaan kokonaiskosteuspitoisuutta ja parantaa pyrolyysin lämpötilan hallintaa. (Isokääntä, 2024; Risteelä, 2024)
- Lämpöarvon nostaminen: Puumateriaali sisältää enemmän energiaa per massa verrattuna kosteaan biojätteeseen tai jätevedenpuhdistamolietteeseen. Tämä auttaa ylläpitämään korkeampaa lämpötilaa pyrolyysiprosessin aikana, mikä on tärkeää tehokkaan pyrolyysin kannalta. (Suomen vesilaitosyhdistys ry, 2019; Isokääntä, 2024)
- Lämpötilan hallinta: Puumateriaali auttaa ylläpitämään tasaisen lämpötilan pyrolyysikammiossa, mikä on tärkeää prosessin tehokkuuden ja lopputuotteen laadun kannalta. (Isokääntä, 2024; Risteelä, 2024)

2. Biohiilen laatu

- Puumateriaalin lisääminen lisää myös hiilen osuutta lopputuotteessa ja parantaa siten tuotteen ominaisuuksia maanparannusaineena. (Suomen vesilaitosyhdistys ry, 2019)
- Haitallisten yhdisteiden hajottaminen: Korkeammat lämpötilat ja parempi pyrolyysiprosessin hallinta puumateriaalin avulla voi auttaa hajottamaan haitallisia orgaanisia yhdisteitä, kuten patogeenejä ja mikromuoveja. (Suomen vesilaitosyhdistys ry, 2019)

2.2 Sertifiointit

Biohiillelle on olemassa useita vapaaehtoisia sertifiointiohjelmia, joista tunnetuimmat ovat EBC (European Biochar Certificate) ja IBI (International Biochar Initiative). Syyskuussa 2023 julkaistiin WBC (World Biochar Certificate) sertifikaatti, joka pohjautuu EBC - sertifikaattiin, mutta siinä ei ole Euroopan lainsäädäntöön pohjautuvia vaatimuksia. WBC sertifikaatti on käytettävissä EU:n ja EFTA-maiden ulkopuolella. Jos biohiili valmistetaan EU:n tai EFTA-maiden ulkopuolella, mutta kaupataan näillä alueilla, tulee biohiilen sertifiointiin käyttää EBC-sertifikaattia WBC-sertifikaatin sijasta.

IBI-sertifikaatti sertifioi biohiilituotteita Yhdysvalloissa ja Kanadassa. IBI sertifioi ainoastaan biohiilen tuotteena, eikä se käsittele kestävyys, energiaan tai kasvihuonekaasutasapainoon tai elinkaarianalyysiin liittyviä kysymyksiä. (IBI, 2023)

Eurooppalaista biohiilisertifikaattia eli EBC:tä sekä maailmanlaajuisia biohiili sertifikaattia eli WBC:tä kehittää ja ylläpitää sveitsiläinen Ithaka Institute. Sertifikaatit omistaa Carbon Standards International ja ne perustuvat uusimpaan tutkimustietoon ja käytäntöihin. Sertifikaattien tarkoituksena on mahdollistaa ja taata kestävä biohiilen tuotanto, prosessointi ja myynti. Biohiilen tuottaja pystyy sertifikaatilla osoittamaan tuotteensa olevan kestävästi tuotettu ja täyttävän tarkat laatuvaatimukset. (EBC, 2023; WBC, 2023)

Eurooppalainen biohiili sertifikaatti (EBC) jakaa biohiilet seitsemään eri kategoriaan käyttötarkoituksen ja laatuvaatimusten perusteella (EBC, 2023).

- EBC-FeedPlus
- EBC-Feed
- EBC-AgroOrganic
- EBC-Agro
- EBC-Urban
- EBC-ConsumerMaterials
- EBC-BasicMaterials

Rehukäyttöön tarkoitetuissa EBC-PlusFeed ja EBC-Feed-sertifikaateissa on tarkemmat laatuvaatimukset haitta-aineiden, kuten PAH-yhdisteiden suhteen. (EBC, 2023)

Maailmanlaajuinen biohiilisertifikaatti (WBC) jakaa biohiilet kolmeen eri kategoriaan käyttötarkoituksen ja laatuvaatimusten perusteella (WBC, 2023).

- WBC-Premium
- WBC-Agro
- WBC-Material

2.3 Lainsäädäntö

Seuraavassa on esitetty selvityksen laatimishetkellä voimassa olevia säädöksiä ja toimintatapoja. Tyypillisesti nopeasti kehittyvien alojen ja uusien teknologioiden sekä raaka-aineiden muuttuessa on suositeltavaa seurata myös lainsäädännön kehittymistä ja mahdollisia muutoksia.

2.3.1 REACH

Biohiili luokitellaan EU-lainsäädännössä kemikaaliksi, joten biohiiltä myyntiin valmistavan toimijan on rekisteröitävä biohiili REACH-asetuksen mukaisesti. (TUKES, 2024)

Biohiilet rekisteröidään olemassa olevaan Charcoal-kategoriaan (Juva, 2023). Jos kyseessä on biohiiliseos, täytyy seoksen sisältämät aineet rekisteröidä erikseen (Yrjälä, 2024). Biohiilen rekisteröinti on kuitenkin haastavaa, sillä biohiili luokitellaan ECHA:n mukaan ns. UVCB-aineeksi (unknown or variable composition, complex reaction products or biological materials) eli koostumukseltaan tuntemattomiin tai vaihteleviin aineisiin, kompleksisiin reaktiotuotteisiin tai biologisiin materiaaleihin. (Juva, 2023; Yrjälä, 2024) Biohiilen rekisteröintiä varten tarvitaan siis tarkkoja tietoja sen alkuperästä, valmistusmenetelmästä, fysikaaliskemiallisista ominaisuuksista, käyttötarkoituksista ja mahdollisista vaaroista. (Juva, 2023)

REACH-asetuksen periaatteena on, että jokainen aine rekisteröidään vain kerran (Yrjälä, 2024). Biohiiliniemisiä kemikaaleja löytyy rekisteristä, jolloin biohiilituottaja voi mahdollisesti rekisteröidä valmistamansa biohiilen samaan yhteisrekisteriin, jos rekisteröitävä biohiili vastaa riittävästi ominaisuuksiltaan rekisterissä olevaa biohiiltä. Jos biohiilen yhteisrekisteröinti ei onnistu, yrityksen tulisi rekisteröidä biohiili itse ja tästä peritään maksu. REACH-rekisteröinti saattaa olla suhteellisen suuritoinen riippuen vaadittavasta rekisteröintiprosessista. (Juva, 2023). Jos biohiili valmistetaan jäteperäisestä materiaalista, jätteistä tuotetun uusiomateriaalin rekisteröintipoikkeusta (REACHin artikla 7 kohta d) voidaan hyödyntää. Tällöin aineen on oltava sama kuin aikaisemmin rekisteröity aine (aineiden samankaltaisuus on pystyttävä osoittamaan), ja hyödyntävällä yrityksellä on oltava käytettävissään aineen käyttöturvallisuustiedote (tai REACHin artikkelissa 32 vaaditut tiedot). (TUKES, 2024)

Biohiillelle on REACH-rekisteröintiä varten yrityskonsortio, johon voi liittyä mukaan samantyyppisen biohiilen REACH-hyväksyttämistä varten. Konsortion vetäjänä toimii saksalainen biohiiliyritys COALSTER GmbH. Biohiilen REACH-tunnus on EC No.:240–383–3; CAS No.: 16291–96–6. (Yrjälä, 2024)

Yrityskonsortion yhteystiedot ovat:

COALSTER GmbH
Ottostraße 1, 63741 Aschaffenburg
Puh. +49 6021 15086-40
Email: charcoal@coalster.eu
www.coalster.eu

2.3.2 CLP-asetus

Biohiilituotteita koskevat myös CLP-asetuksen (Classification, Labelling and Packaging) velvoitteet. Biohiiltä käsiteltäessä ja myyntiin pakattaessa on huomioitava Euroopan parlamentin ja Euroopan unionin neuvoston kemikaalien luokitusta, merkintöjä ja pakkaamista koskeva CLP-asetus. Kemikaalin valmistajan on tunnettava sen vaaraominaisuudet ja huomioitava ne pakkauksessa ja pakkausmerkinnöissä. (Juva, 2023; TUKES, 2024)

2.3.3 Lannoitelainsäädäntö

Biohiilen lannoitekäyttöön liittyvää lainsäädäntöä:

- Lannoitelaki ([711/2022](#))
 - Kansallinen lannoitevalmisteasetus ([964/2023](#))
 - Ruokaviraston ylläpitämä [lannoitevalmisteiden kansallinen ainesosaluettelo](#)
 - Hakemuksesta ainesosaluetteloon voidaan lisätä uusia ainesosia
 - Asetus lannoitevalmisteita koskevasta toiminnan harjoittamisesta ja sen valvonnasta ([965/2023](#))
- EU:n lannoitevalmisteasetus ([2019/1009](#))

Lannoitelaki ([711/2022](#))

Lannoitelain tavoitteena on korkealaatuisen kasvintuotannon, elintarvikkeiden laadun sekä ympäristön ja vesien tilan turvaamiseksi edistää hyvälaatuisten, turvallisten ja kasvintuotantoon sopivien lannoitevalmisteiden tarjontaa, lannoitevalmisteiden ja lannan asianmukaista käyttöä sekä tarvittavien tietojen antamista lannoitevalmisteiden ostajille ja käyttäjille.

Lannoitelakia sovelletaan lannoitevalmisteiden ja niiden ainesosien valmistukseen, markkinoille saattamiseen, käyttöön, varastointiin, kuljettamiseen, vientiin ja tuontiin. Tätä lakia sovelletaan lisäksi lannan käyttöön.

Biohiiltä kasvualustaksi tai maanparannuskäyttöön valmistavan ja myyvän tulee rekisteröityä lannoitealan toimijaksi Ruokaviraston ylläpitämään valvontarekisteriin. Lannoitealan toimijan tulee huolehtia vaatimusten mukaisesta kirjanpidosta, omavalvonnasta ja vuosi-ilmoituksista. (Juva, 2023)

Kansallinen lannoitevalmisteasetus ([964/2023](#))

Biohiilen on täytettävä lannoitevalmisteille asetetut laatu- ja turvallisuusvaatimukset. Tällaisia ovat muun muassa haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet ja hygieniavaatimukset. Lannoitevalmisteiden käytöstä ei myöskään saa aiheutua kasvi- tai eläintautien leviämisen tai ympäristön pilaantumisen vaaraa. Lannoitevalmisteet tulee luokitella ja merkitä joko kansallisen tai EU-lainsäädännön mukaan.

Markkinoille saatettavalla tuotteella on aina oltava asianmukaiset tuoteseloste- ja pakkausmerkinnät. (Ruokavirasto^a, 2023)

Taulukko 1. Haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet mg/kg kuiva-ainetta (Ruokavirasto^b, 2023).

Haitta-aine	Maanparannusaineet	Kasvualustat
As	40	10
Hg	1	0,5
Cd	1,5	1
Cr	300	200
Cu	600	150
Pb	100	50
Ni	70	50
Zn	1500	300
PAH ₁₆ *	6 mg/kg kuiva-ainetta	

* Koskee ainesosaluokka 9, pyrolyysihiili (MMM 964/2023)

Taulukko 2. Taudinaiheuttajia indikoivien mikro-organismien enimmäismääristä on säädetty orgaanista hiiltä sisältäville lannoitevalmisteille, maanparannusaineille ja kasvualustoille (Ruokavirasto^b, 2023).

Patogeeni	Enimmäismäärä
Salmonella spp	ei saa esiintyä 25 g:ssa tai 25 ml:ssa
Echerichia coli tai Enterococcaceae	1000 pmy 1 g:ssa tai 1 ml:ssa

Asetuksessa (964/2023) todetaan pyrolyysihiilen käytöstä lannoitevalmisteissa seuraavasti:

Lannoitevalmiste voi sisältää pyrolyysissa tai kaasutuksessa muodostuvia materiaaleja, jotka on saatu termokemiallisella konversiolla olosuhteissa, joissa hapen määrää on rajoitettu, yhdestä tai useammasta syötemateriaaleista, jotka sisältyvät Ruokaviraston ylläpitämään ainesosaluetteloon.

Termokemiallisen konversioprosessin on tapahduttava olosuhteissa, joissa hapen määrää on rajoitettu, siten, että lämpötila reaktorissa nostetaan kasvibiomassalla vähintään 180 celsiusasteeseen vähintään kahdeksi sekunniksi. Jos prosessissa käytetään materiaalina jätevesilietettä, lämpötila reaktorissa nostetaan vähintään 500 celsiusasteeseen vähintään viideksi minuutiksi.

Pyrolyysissa ja kaasutuksessa muodostuvien materiaalien moolisuhteen on oltava sellainen, että vedyn suhde orgaaniseen hiileen on alle 0,7, ja testit sen toteamiseksi on tehtävä sellaisten materiaalien vedettömälle ja tuhkatommalle osuudelle, joiden koostumuksesta alle 50 prosenttia on orgaanista hiiltä. Niissä saa olla enintään 6 milligrammaa PAH₁₆-yhdisteitä kilogrammassa kuiva-ainetta.

Asetus lannoitevalmisteita koskevasta toiminnan harjoittamisesta ja sen valvonnasta (965/2023)

Lannoitevalmisteita koskevasta toiminnan harjoittamisesta ja sen valvonnasta (965/2023) annetulla asetuksella säädetään talouden toimijan toiminnan luonnetta koskevista ilmoitettavista tiedoista ja ilmoitusmenettelyistä, tiedoston sisällöstä ja järjestämisestä, laatu järjestelmän sisällöstä, mitä tietoja lannoitevalmisteita sisältävästä erästä on ilmoitettava sekä siitä, milloin ja miten ennakoilmoitus on tehtävä. Lisäksi asetuksessa säädetään viranomaisten tarkastus- ja valvontamenettelyistä.

EU:n lannoitevalmisteasetus (2019/1009)

EU:n voimassa olevan lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) mukaan EU-lannoitevalmiste voi sisältää pyrolyysissä muodostuvia materiaaleja, jotka on saatu kasviperäisistä jättejakeista termokemiallisella konversiolla olosuhteissa, joissa hapen määrää on rajoitettu. Asetus rajaa syötemateriaaleista pois jätevesilietteet ja teollisuuslietteet sekä asetuksen (EY) N:o 1069/2009 soveltamisalaan kuuluvat eläimistä saatavat sivutuotteet tai niistä johdetut tuotteet. EU:n sivutuoteasetuksen tulkinta voi kuitenkin vaihdella jäsenmaittain (Määttä, 2025).

EU-lannoitelainsäädäntö asettaa raja-arvoja biohiillelle sekä lannoitevalmisteille, jotka sisältävät biohiiltä. Pyrolyysissä muodostuvan biohiilen raja-arvot on esitelty alla olevassa taulukossa (taulukko 3). Biohiiltä sisältävissä EU-lannoitevalmisteissa saa olla enintään 30 g klooria ja enintään 2 mg talliumia kilossa kuiva-ainetta.

Taulukko 3. EU:n lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) mukaiset ominaisuudet ja haitta-aineiden raja-arvot biohiillelle.

Ominaisuus/haitta-aine	Enimmäismäärä
H/C _{org} -suhde	0,7
PAH ₁₆	6 mg
WHO:n toksisuusekvivalenttia x PCDD/F -yhdisteitä	20 ng/kg KA
PCB-yhdisteiden 28, 52, 101, 138, 153 ja 180 yhteismäärä	0,8 mg/kg KA

3 Biohiilen hyödyntäminen

Biohiili on hyvin monikäyttöinen materiaali, jota voidaan hyödyntää useilla eri aloilla ja sovelluksissa. Sen käyttömahdollisuudet ulottuvat maanparannuksesta, viherrakentamisesta ja vedenpuhdistukseen aina teollisuuteen ja huipputeknologiaan saakka (kuva 2). (EBI, 2024; Välinen, 2024)



Kuva 2. Biohiilen käyttökohteet (EBI, 2024; Välinen, 2024)

Biohiilen hyödyntäminen tarjoaa laajasti erilaisia mahdollisuuksia, mutta siihen liittyy myös rajoitteita ja hidasteita. Biohiilen mahdollisuuksina nähdään erityisesti hiilensidonta, jätevirtojen hyödyntäminen sekä kasvava markkina. Pullonkauloina biohiilen hyödyntämiselle nähdään ympäristölupamenettelyiden vaihtelevuus ja kierrätysasteen laskentamenetelmät.

Taulukko 4. Biohiilen hyödyntämisen mahdollisuudet ja pullonkaulat (Sormunen, 2023; Riikonen, 2019).

Mahdollisuudet	Pullonkaulat
• Hiilen sidonta ja ilmastovaikutukset • Monipuolinen ja turvallinen tuote • Jätevirtojen hyödyntäminen raaka-aineena • Kasvava markkinapotentiaali	• Ympäristölupamenettely - tulkinat vaihtelevat. • Tuotantoprosessien päästöt • Kierrätyspuun biohiiletys - lasketaanko kierrätysasteeseen • Hiilibudjetointia ei tehdä - kustannukset nyt ns. hyöty tulevaisuudessa

3.1 Maa- ja metsätalous

Kompostoinnissa biohiiltä voidaan käyttää lisäaineena tai sekoittaa valmiiseen kompostiin. Kompostoinnin aikana biohiili ehkäisee typen hävikkiä ja saattaa nopeuttaa kompostointiprosessia, mahdollisesti mikrobien toimintaa stimuloimalla (Riikonen, 2019). Maanparannuskäytössä biohiiltä lisätään maaperään. Biohiilen huokoinen rakenne voi parantaa maaperän kykyä pidättää vettä ja ravinteita. Helsingin yliopistolla suoritettiin pitkäaikaisia viljelykokeita pohjoisen havumetsävyöhykkeen ilmastossa. Tulosten perusteella biohiili edesauttoi joissain tapauksissa kasvien typenoton lisääntymistä ja paransi maaperän kykyä pidättää nitraattia. Muita positiivia ympäristövaikutuksia olivat typen huuhtoutumisen ja dityppioksidipäästöjen vähentyminen. Myönteiset vaikutukset eivät olleet yhteneviä kaikilla koepelloilla, mutta kielteisiä vaikutuksiakaan ei ilmennyt. Koska pyrolysoitu hiili ei vapaudu ilmakehään ja siten lämmitä ilmastoa, on biohiilen lisääminen maaperään turvallinen keino kasvattaa peltojen maaperän hiilivarastoa. (Helsingin yliopisto, 2022)

Biojätepohjaista biohiiltä on valmistettu vihannes-, hedelmä- ja pähkinäkuorijätteestä, ja suoritettu viljelykokeita globaalisti useilla kasvillisuusvyöhykkeillä Aasiassa, Afrikassa ja Keski-Euroopassa. Tulosten perusteella biohiilen lisääminen on vaikuttanut positiivisesti kasvuun, lehtien kehitys ja satomäärään ja vesitalouteen, kun pyrolysointilämpötila on alle 500 °C. (Pradhan et al. 2024) Tulokset eivät välttämättä ole vertailukelpoisia Pohjoismaissa.

Metsätaloudessa boreaalisella alueella tutkimustietoa biohiilestä on vähäisesti saatavilla. Tutkimusalueilla käytetyt biohiilimäärät ovat olleet pieniä maatalouteen verrattuna (Riikonen 2019). Tämä johtuu siitä, että biohiili tulisi suojata eroosiolta peittämällä tai sekoittamalla se maahan, jolloin metsämaan juuristo tai kenttäkerros vahingoittuvat (Viherympäristöliitto, 2023). Pienillä taimilla tehdyt astiakokeet ovat olleet tuloksiltaan pääosin positiivisia, taimien kasvua on saatu lisättyä (Thomas ja Gale, 2015). Sen sijaan varttuneempiin puihin biohiililannoituksella ei ole havaittu merkittäviä vaikutuksia. Kokonaisuutena biohiilen käytöstä aiheutuu kustannuksia muttei merkittäviä hyötyjä metsätaloudessa, ja biohiilen laajamittainen levittäminen metsämaahan on haastavaa. (Riikonen, 2019)

Taulukko 5. Biohiilen hyödyntäminen maa- ja metsätaloudessa (Riikonen, 2019).

Käyttökohde	Potentiaaliset hyödyt	Muut tulokset	Lisätietoa
Maanparannus	Typen huuhtoutuminen pelloilta vesistöihin vähenee, voimakkaan kasvihuonekaasun dityppioksidin päästöt vähenevät, maaperän hiilivarasto kasvaa		Lietehiili on lisätty raaka-aineena Ruokaviraston tyyppiluokitukseen ja lannoitelainsäädäntöön
Kompostoinnin apuaine	Ehkäisee typen hävikkiä, nopeuttaa kompostointiprosessia	Voidaan lisätä jopa 50 %	
Metsälannoitus	Pienten taimien kasvun lisääntyminen	Biohiilen levittäminen metsämaahan haastavaa, kenttäkerros vahingoittuu helposti	Tutkimustuloksia rajallisesti saatavilla

3.2 Viherrakentaminen

Viheralalla biohiiltä käytetään nykyisin hulevesien käsittelyssä ja kasvualustoissa. Viherrakentamisessa biohiilen myönteiset vaikutukset liittyvät vedenpuhdistukseen, kasvien kasvuun ja hyvinvointiin sekä hiilensidontaan. Hulevesien luonnonmukainen hallinta suodatus- ja imeytysalueita rakentamalla on yleistynyt kaupunkialueilla. Biohiili sitoo epäpuhtauksia rakenteiden läpi virtaavasta hulevedestä. Biohiili voidaan sekoittaa maaperään tai kasvualustaan. Toinen vaihtoehto on asentaa erillinen biohiiltä sisältävä rakenne, jonka läpi vesi ohjataan. Tämä mahdollistaa biohiilen uusimisen tarvittaessa, mutta saattaa nopeamman virtaaman takia heikentää puhdistustehoa. Biohiilen valinnassa kannattaa kiinnittää huomiota siihen mitä haitta-ainetta halutaan erityisesti sitoa rakenteeseen. (Viherympäristöliitto, 2023)

Tavanomaisessa kasvualustassa biohiilen toivotaan lisäävän istutusten kasvua ja stressaavien kasvuolojen sietokykyä. Biohiili edistää ravinteiden pidätyskykyä ja vesitalousominaisuuksia: parantaa kasvillisuuden resilienssiä kuivuuskausina ja lisää maaperän vedenläpäisevyyttä tulva-aikana (Aalto yliopisto, 2024). Biohiileen kannattaa lisätä ravinteita sekoittamalla sitä esimerkiksi kompostiin tai lisäämällä kierrätyslannoitetta. Kaupungissa kasvien juuristotilasta on usein pulaa, jolloin biohiili parantaa rajatun maa-alueen ominaisuuksia (Viherympäristöliitto, 2023). Biohiilen vedenpidätyskyvyn takia sitä pidetään erinomaisena viherkattomamateriaalina, koska biohiili auttaa kasvillisuutta selviämään sateettomien jaksojen yli (Cao et al. 2014).

Useat kaupungit ovat tehneet kokeiluja biohiilen käytöstä viherrakentamisessa. Esimerkiksi Turussa istutetut katupuut ovat menestyneet hyvin biohiiltä sisältävällä kasvualustalla. Helsingissä rakennettiin Metsälään biohiilisuodatusalue, joka poisti tehokkaasti fosforia ja kiintoainesta. Samoin metallien, öljyjen ja PAH-yhdisteiden pitoisuus laski suodatusalueella. Molemmissa tapauksissa biohiili on valmistettu puusta. (Viherympäristöliitto, 2023) Helsingissä kaupungin hankkeessa biohiiltä on valmistettu puuhakkeesta ja ruokokasvista ja käytetty viherrakentamisen kohteissa. Biohiilen vaikutuksia testataan esimerkiksi urheilukentän nurmessa, Kalasataman perennaistutuksessa ja tammien kasvualustan kunnostuksessa (Aalto yliopisto, 2024).

Taulukko 6. Biohiili viherrakentamisessa.

Käyttökohde	Potentiaaliset hyödyt	Muut tulokset	Lisätietoa
Hulevedet: Hulevesialueiden suodatusrakenteet ja epäpuhtauksien sitominen kasvualustaan	Haitta-aineiden väheneminen hulevedestä, kuten fosfori, kiintoaines, metallit, öljy, PAH-yhdisteet	Valittu biohiili vaikuttaa mitä haitta-aineita pidättyy suodatuksessa	Käyttöesimerkeissä puupohjainen biohiili
Muut kasvualustat: kasvien kasvu ja hyvinvointi	Kasvun lisääntyminen, resilienssi kuivuutta ja tulvia vastaan	Suositellaan 10–15 % biohiiltä kasvualustaan ja ravinteiden lisäämistä	Käyttöesimerkeissä puupohjainen biohiili, Lietehiili on lisätty raaka-aineena Ruokaviraston tyyppiluokitukseen ja lannoitelainsäädäntöön

3.3 Teollisuus

Biokaasualalla pyrolysointi nähdään yhtenä ratkaisuna poistaa mikromuovia ja orgaanisia haitta-aineita puhdistamolietteestä syntyneestä mädätteestä (Kymäläinen, 2020). Myös Euroopan Biohiiliyhdistyksen raportissa esitellään vastaavia tutkimustuloksia, ja se esittää lietehiilen potentiaalisena fosforipitoisena, hiiltä sitovana lannoitteena. Raportti kokoaa tutkimustuloksia, joiden mukaan lietteen pyrolysointi poistaa patogeeneja, orgaanisia haitta-aineita, PFAS-aineita, PAH-yhdisteitä ja mikromuovia. (The European Biochar Industry Consortium, 2023). Tämä saattaa edesauttaa lietehiilen lannoitekäyttöä peltoviljelyssä.

Valmistavassa teollisuudessa biohiiltä voitaisiin lisätä erilaisiin komposiittimateriaaleihin, joihin lukeutuvat esimerkiksi (Thomsen, 2022)

- Biohiilipohjaiset epäorgaaniset komposiitit betonissa ja asfaltissa lisäaineina, täyteaineina ja hiilivarastona
- Vahvistetut muovit
- Biohiilipohjaiset orgaaniset rakennusmateriaalit eristämiseen, kosteudenhallintaan ja melunestoon
- Päällysteet ja maalit

Taulukko 7. Lietehiili biokaasualalla (Kymäläinen, 2020).

Käyttökohde	Potentiaaliset hyödyt	Muut tulokset	Lisätietoa
Biokaasulaitoksen mädätteen pyrolysointi biohiileksi	Mikromuovien ja orgaanisten haitta-aineiden poisto mädätteestä	Kasvatuskokeissa lietehiilen sisältämät ravinteet kasveille käyttökelpoisessa muodossa	Voi parantaa lietehiilen käyttömahdollisuutta peltoviljelyssä
Biokaasuprosessin tehostaminen lisäämällä lietehiiltä reaktorin syötteeseen	Prosessin stabilointi syötekuormaa nostettaessa, biokaasun rikkivetypitoisuuden aleneminen, pieni positiivinen vaikutus biokaasun metaanipitoisuuteen	Lietehiili konsentroituu mädätteeseen	Laboratoriomittakaavan koejärjestely, jossa käytettiin lietehiiltä

3.4 Haitta-aineiden kerääminen

Biohiili voi pidättää itseensä ja inaktivoida ympäristön haitta-aineita samaan tapaan kuin aktiivibiili. Tämä johtuu mm. suuresta ominaispinta-alasta, huokoisesta rakenteesta ja kemiallisista ominaisuuksista (Riikonen, 2019, Ahmad et al. 2014). Biohiili soveltuu erilaisiin vedenpuhdistussovelluksiin, kuten hulevesien sekä kaivos- ja metsäteollisuuden jätevesien puhdistukseen.

Biohiilen toimivuutta on tutkittu eri metalleille, ravinteille ja mikromuoveille. Biohiili voi sitoa itseensä erilaisia metalleja, kuten lyijyä, kadmiumia, kuparia, nikkeliä, kromia ja arseenia. Haitta-aineiden sitoutuminen biohiileen riippuu monista tekijöistä, kuten biohiilen ominaisuuksista, haitta-aineiden pitoisuuksista, veden pH:sta ja lämpötilasta. (Bayar et al. 2024, Koivusalo et al. 2023, Siipola et al. 2018).

Suomessa on tutkittu autotieltä virtaavan tulvaveden käsittelyä hiekkasuodatinta ja hiekka-biohiilisuodatinta vertaillen. Molemmat materiaalit paransivat veden pidättymistä suodatinrakenteeseen ja vähensivät luonnon kuormitusta metallien ja kiintoaineen osalta, mutta biohiilen lisäyksellä ei saavutettu selkeää parannusta koejärjestelyyn. (Koivusalo, 2023)

Usean tutkimuksen perusteella ruokajätteestä valmistettu biohiili toimii jätevesien puhdistuksessa poistaen orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä, metalleja ja raskasmetalleja. Tutkimukset ovat kuitenkin keskittyneet yksittäisiin ruoantähteisiin ja sekoitetusta yhdyskuntabiojätteestä tarvitaan lisää tietoa pyrolyysiolosuhteiden optimoimiseksi vedenpuhdistussovelluksia varten. Tutkimukset on toteutettu pääosin EU-alueen ulkopuolella. (Pradhan et al. 2024). Myös jätevesilietteestä valmistettua biohiiltä on käytetty vedenpuhdistuskokeissa. Suurin osa tutkimuksesta on keskittynyt yksittäisiin haitta-aineisiin, jolloin todellisissa olosuhteissa vallitseva moninainen haitta-aineiden seos vaikuttaa menetelmän tehokkuuteen. (Wang et al. 2020)

Taulukko 8. Tutkimuksia jätevedenpuhdistuksesta lietehiilikäsittelyllä.

Käyttökohde	Potentiaaliset hyödyt	Lisätietoa
Teollisen jäteveden käsittely lietehiilellä	Fenoleita ja PAH-yhdisteitä sitoutui jätevedestä lietehiileen	dos Reis et al. 2016
Rehevöityneen vesinäytteen käsittely lietehiilellä	Fosfaattia sitoutui vedestä lietehiileen	Yin,Liu ja Ren, 2019

3.5 Hiilensidonta

Biohiili on tällä hetkellä yksi lupaavimmista keinoista lisätä merkittävästi maaperän hiilivarastoa. Se on lähes ainoa hiilivarastoinnin teknologia, jonka käytöllä on nopea ja pysyvä positiivinen vaikutus paitsi ilmastoon, myös maaperän viljavuuteen, monimuotoisuuteen ja vesiensuojeluun sekä ravinteiden kierrätykseen kaupunkimaisilla alueilla. Lisäksi se on nykyisellään käyttövalmis ja käyttökelpoinen, toisin kuin monet muut lupaavat uudet hiilensidontan teknologiat.

Biohiilen hiilensidontapotentiaali on korkea. Raaka-aineena käytetyn biomassan hiiltä varastoituu maaperään biohiilen muodossa, ja lisäksi biohiilellä voi olla positiivinen vaikutus maaperän hiilensidontapotentiaaliin kasvien kasvua tukevien tekijöiden kautta. Biohiili kuuluu negatiivisten päästöjen teknologioihin (NET), koska noin 56–74 % raaka-aineena käytetyn biomassan hiilestä pystytään sen avulla varastoimaan maaperään tai muihin käyttökohteisiin. IPCC käyttää hiilensidontapotentiaalin lukuna 56 % ja the European Biochar Certificate 74 %. Vuosittain biohiilestä arvioidaan hajoavan ympäristöön 0,3 %. (Bioenergia ry, 2024)

Biohiilen tuotanto tarjoaa mahdollisuuden myydä hiilensidontaa ns. hiilikrediittien muodossa vapaaehtoisien päästökompensaation markkinoilla. Helpoiten tämä onnistuu hiilikrediittejä välittävän palveluntarjoajan kautta, kuten Puro.earth, Planboo, First Climate tai Blue Forest. Palveluntarjoajat takaavat välittämiensä hankkeiden todelliset ilmastohyödyt sertifioimalla ne jonkin luotettavan päästöhyvitysstandardin mukaisesti. (Juva, 2023)

Myyntiin asetettava kompensatio jaetaan yksiköihin, jotka vastaavat tiettyä päästövähennystä. Kompensatioyksikön eli hiilikrediitin hinta määräytyy paitsi kompensatiotavan, mutta myös maailmanlaajuisen kysynnän mukaan.

Vapaaehtoinen kompensatio on Suomessa vielä niukkaa ja kattoi päästökompensaatiopalveluita tarjoaville yrityksille teetetyn kyselyn mukaan noin puoli prosenttia valtion kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2019. (Noki, 2022; Niemistö et al. 2021)

Suomessa biohiilen hiilensidontamarkkinat ovat vielä kehittyviä. Biohiilen hiilensidontakrediittien muodostumiseen, laskentaan, myyntiin ja ansaintalogiikkaan ei ole vielä olemassa yhtenäistä sertifiointijärjestelmää tai lainsäädäntöä. Kaupalliset toimijat käyttävätkin erilaisia sertifiointijärjestelmiä kuten "C-sink-sertifikaatti", "Biochar Project Criteria" ja "Biochar Methodology". (Bioenergia ry, 2024). Tulevaisuudessa yhtenevä sertifiointikehys on mahdollinen, sillä EU on hyväksynyt hiilenpoistoon ja hiiliviljelyyn liittyvän asetusehdotuksen vuonna 2024. Sen mukaan EU asettaa sertifiointiin vähimmäisvaatimukset, jotka edistävät korkeaa hiilen pysyvyyttä, tieteellisyyttä ja läpinäkyvyyttä menetelmissä. Vapaaehtoiisiin sertifiointijärjestelmiin EU asettaa minimitasot. (Yrjälä, 2024)

Vaasan kaupungissa tutkitaan biohiilen käyttömahdollisuuksia. Tavoitteena on tuottaa biohiilen avulla hiilivarastoja, joilla kompensoidaan rakentamisen hiilidioksidipäästöjä. Biohiilipilotissa kaupungin pyörätien rakenteeseen lisätään biohiiltä. Tämän lisäksi biohiiltä käytetään perinteisemmissä viherrakentamisen kohteissa kasvualustoissa ja huleveden käsittelyyn. Pilotti rakennettiin vuonna 2024. Käyttökokemuksia ja seurantatietoja on saatavilla vuonna 2025. Projektissa on tosin tunnistettu, että biohiili on huomattavan kallista muihin maanrakennuksessa käytettäviin materiaaleihin verrattuna. (Huusko, 2024)

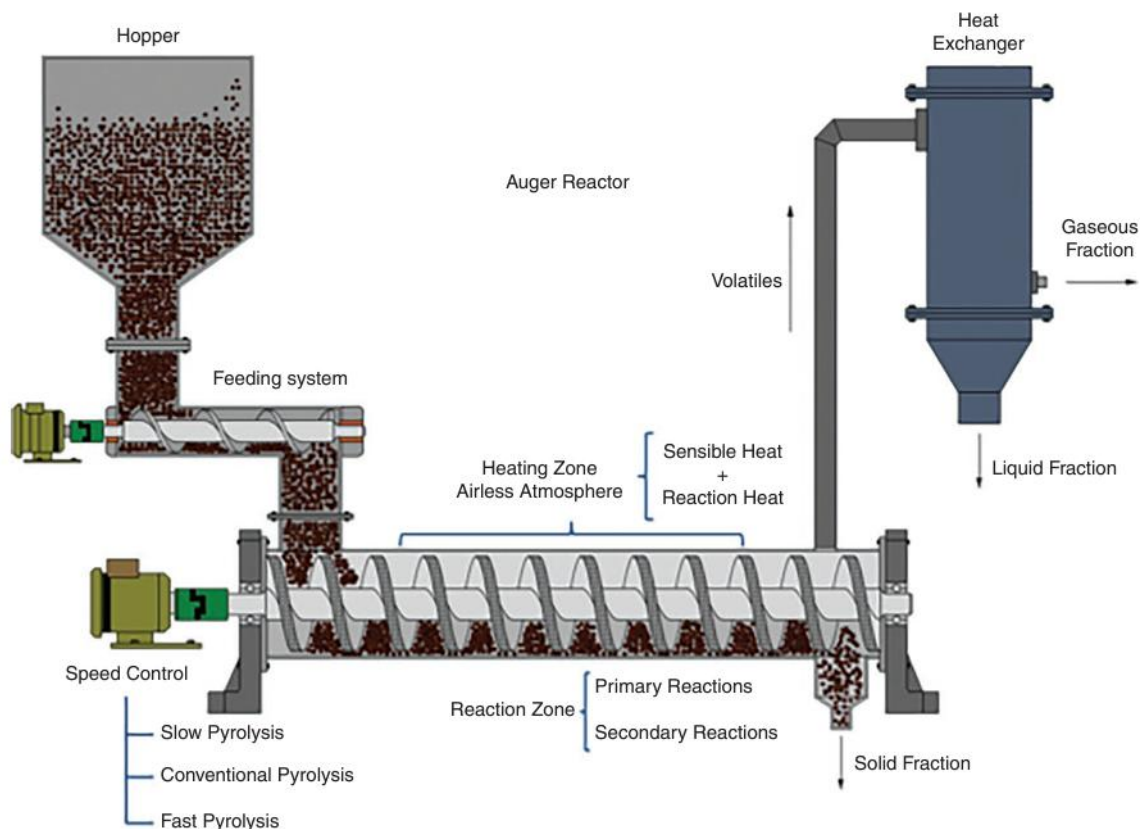
4 Biohiilen tuotantoteknologiat

Pyrolyysi on käsittelymenetelmä, jossa orgaanista ainetta kuumennetaan hapettomissa tai niukasti happea sisältävissä olosuhteissa. Syöte hajoaa kemiallisesti muodostaen kiinteää hiilijäännöstä eli biohiiltä, nestemäistä pyrolyysiöljyä ja pyrolyysikaasua. Biohiili koostuu pääosin hiilestä ja tuhkasta. Bioöljyssä on aromaattisia aineita, tervaa, vettä ja hapettimia. Kaasu sisältää muun muassa hiilimonoksidia, hiilidioksidia, metaania ja vetyä. Prosessissa käytetään yleensä noin 400–600 °C lämpötilaa. Kaasu hyödynnetään pääsääntöisesti polttamalla se prosessin lämmöntuotannossa. (Mikkola, 2024)

4.1 Nopea, keskinopea ja hidas pyrolyysi

Pyrolyysiteknologiat voidaan jakaa käsittelyaikansa perusteella nopeaan, keskinopeaan ja hidaspyrolyysiin. Nopeassa pyrolyysissa kuumennusaika on todella nopea (1–2 sekuntia) ja lämpötilan vaihteluväli tyypillisesti 300–750 °C. Raaka-aineen tulisi olla mahdollisimman kuivaa ja partikkelikooltaan pientä (alle 1 mm). Biomassa hajoaa muodostaen höyryä, aerosolia ja hivenen hiiltä. Menetelmässä syntyy erityisesti nestettä (bioöljyä), ja siksi se on lupaava menetelmä polttoöljyn, polttoaineiden ja kemikaalien valmistukseen. (Bridgewater ja Peacocke, 2000; Dahlquist, 2013; Kazawadi et al. 2021)

Keskinopean pyrolyysin kuumennusaika pitenee (10–30 sekuntia), ja lämpötila vaihtelee välillä 300–700°C. Raaka-aineen vesipitoisuus voi olla korkeampi, jopa 40 %. Samoin syötteen palakoko voi olla nopeaa pyrolyysia suurempi, noin 1–5 mm. Tuotteena syntyy erityisesti bioöljyä ja biohiiltä, joista bioöljyä enemmän. Prosessin etuna on laaja raaka-ainevalikoima ja lopputuotteen korkea laatu. On havaittu, että tietyillä raaka-aineilla sivutuotteiden jatkohyödyntäminen onnistuu ilman jatkokäsittelyä tai vain vähäisellä jatkokäsittelyllä muihin prosesseihin verrattuna. (Kazawadi et al. 2021; Soikkonen, 2022)



Kuva 3. Auger-tyyppinen hidaspYROLYYSILAITTEISTO (Campuzano et al. 2019).

HidaspYROLYYSIN päätuotteena on biohiili. Syötteen palakoko voi olla edellisiä menetelmiä selvästi suurempi, noin 5–50 mm. Kuumennusvaihe pidentyy edellisiin menetelmiin verrattuna: suurimmassa osassa reaktoreista se on 5–30 minuuttia, joissakin 25–35 tuntia. Prosessilämpötila on tyypillisesti 300–550 °C. Biohiilen saanto vähenee lämpötilan noustessa, mikä johtuu orgaanisen aineksen palamisesta korkeassa kuumuudessa ja selluloosamolekyylien hajoamisesta. HidaspYROLYYSIIN toteuttamiseen soveltuvat kiinteä peti-, Auger- ja pyöroöunireaktorit. (Kavan Kumar ja Panwar, 2024; Soikkonen, 2022)

Taulukko 9. PYROLYYSIMENETELMIEN vertailua (Kavan Kumar ja Panwar, 2024; Dahlqvist, 2013).

Tekniikka	Lämpötila	Käsittelyaika	Kaasun saanti	Bioöljyn saanti	Biohiilen saanti
Nopea pyrolyysi	300–1000	1–2 s	15–20 %	50–70 %	10–30 %
Keskinopea pyrolyysi	300–500	5–30 s	20–30 %	40–50 %	25–30 %
Hidas pyrolyysi	300–550	5–30 min, tai tunteja	20–50 %	20–50 %	25–35 %

Jätevesilietteelle tyypillinen käsittelymenetelmä on hidaspYROLYYSI, jolloin päätuotteena saadaan biohiiltä. Prosessiin saatetaan lisätä puumateriaalia parantamaan energiataloutta ja lietehiilen ominaisuuksia. Yleensä jätevesiliete on kuivattava pyrolyysilaitoksella: pyrolyysikaasu poltetaan laitoksen energiantuotannossa, ja hyödynnetään energiaa märän lietteen kuivaamiseen. Jätteen pyrolyysiin sovelletaan lähtökohtaisesti jätteenpolttolainsäädäntöä, joten savukaasujen käsittely toteutetaan jätteenpolttolaitosten tapaan. (Mikkola, 2024)

Pyrolyysin prosessiolosuhteilla vaikutetaan siihen, mihin jakeeseen syötteen haitta-aineet päätyvät. Merkitystä on erityisesti lämpötilalla, tehokkaalla lämmönsiirrolla ja haihtuvien aineiden poistolla reaktorista. Raskasmetalleista suurin osa kertyy hiilijakeeseen, joskin niukkaliukoisessa muodossa vähentäen ympäristöriskiä. Elohopea ja kadmium haihtuvat korkeissa lämpötiloissa ja päätyvät pyrolyysikaasuun. (Mikkola, 2024) Lannoitelainsäädännön lisäasetuksessa hyväksytään lietehiili lannoitevalmisteesta, kun prosessissa käytetään vähintään 500 °C lämpötilaa ja 5 minuutin viipymäaika (Asetus lannoitevalmisteista 964/2023).

4.1.1 Esimerkki jätevedenpuhdistamolietteen pyrolyysiprosessista koetoimintalaitoksella

1. Lietteen ja puumateriaalin vastaanotto ja varastointi

- Liette kuljetetaan lietesäiliöön
- Puumateriaali tuodaan teräksiseen varastosäiliöön

2. Terminen kuivaus

- Liette siirretään kuivaimeen pumpulla ja ruuvikuljettimella, puumateriaali siirretään kuivaimeen ruuvikuljettimella
- Termisessä kuivaimessa liikkuva hihna kuljettaa materiaalin kuivausuunin läpi, johon puhalletaan osittain kierrätettyä kuumaa ilmaa. Ilma lämmitetään pyrolyysikaasun polttamisesta saadulla energialla.
- Kosteaa poistoilmaa jäähdytetään ja puhdistetaan rikkihappopesurilla sekä hajua poistavalla biosuodattimella. Puhdistuksen sivutuotteena syntyy ammoniumsulfaattiliuosta.
- Kuiva liete-puu-seos siirretään välisäiliöön

3. Pyrolyysi

- Liette-puu-seos siirretään pyöröuuni-tyyppiseen pyrolyysireaktoriin (rotary kiln) ja tyytetään hapen määrän minimoimiseksi
- Pyrolyysin lämpötila-alue on noin 450–650 °C ja viipymäaika voidaan säätää välillä 30–120 min. Pyrolysoitu materiaali tyytetään uudestaan sen poistuessa reaktorista.
- Biohiili jäähdytetään kuljettimessa, jonka vipassa kiertää jäähdytysvesi. Biohiili kostutetaan vedellä tai ammoniumsulfaattiliuoksella. Valmis tuote siirretään kuljettimella ulkona sijaitsevaan varastosiiloon.

4. Pyrolyysikaasujen poltto

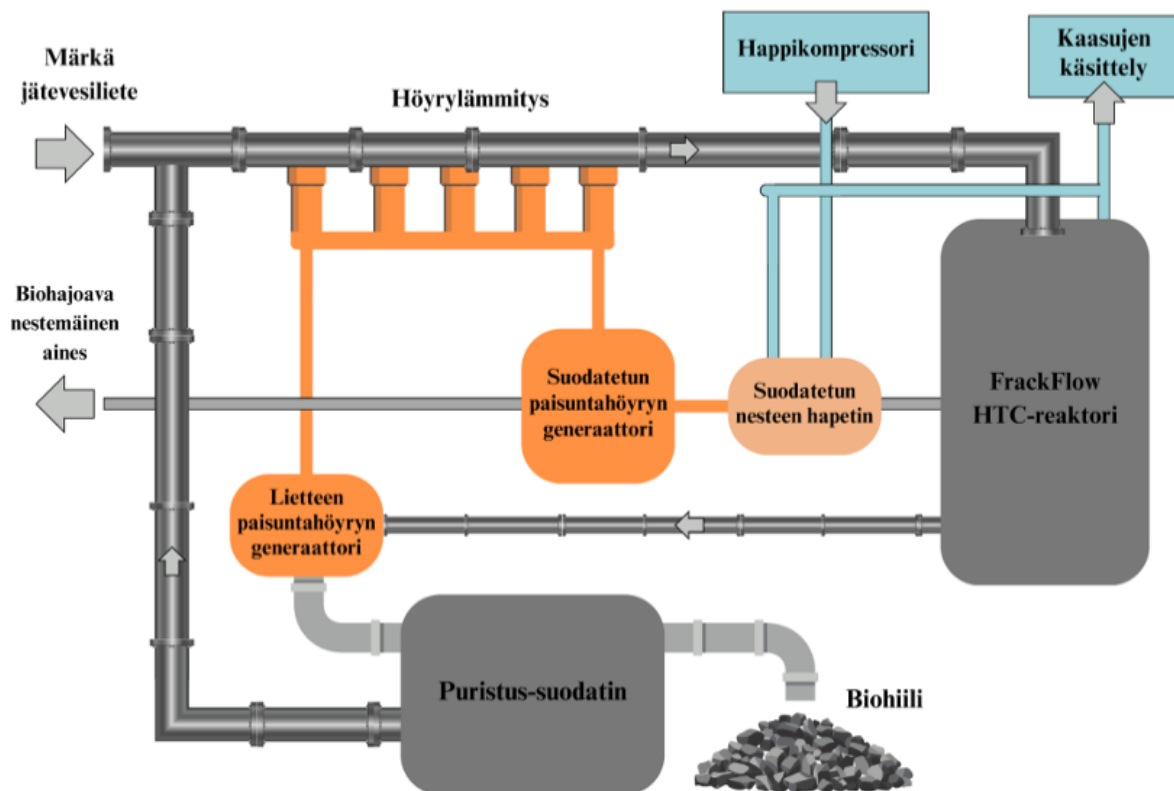
- Pyrolyysissä muodostuvat kaasut johdetaan suoraan polttoon. Polttoenergiaa hyödynnetään sekä pyrolyysiyksikön lämmityksessä, että lietteen kuivauksessa lämmönsiirtoöljyn välityksellä. Polttoyksikössä käynnistys- ja ylläpitopolttoaineena käytetään nestekaasua. Polton savukaasut puhdistetaan kuitusuodattimella. (HSY, 2024)

4.2 Märkähiilto HTC

Märkähiilto (Hydrothermal Carbonization HTC) käsittelee jätevesilietettä korkeassa lämpötilassa ja paineessa ilman esikuivausta. Prosessissa syntyy hiilipitoista lopputuotetta. HTC mahdollistaa lietteen käsittelyn energiatehokkaasti. Märkähiillossa paineen vaihteluväli on 0,6–6,4 MPa ja lämpötila vaihtelee 180–260 °C. Prosessi kestää useita tunteja, ja biomassa muuttuu biohiileksi. (Soikkonen, 2022; Ro et al. 2020) Prosessi tuottaa lämpöä, mutta useimmiten biomassaa täytyy lisäksi lämmittää ulkoisella energialla (Ylivainio et al.

2019). Märkähiiltotekniikalla on toteutettu muutamia teollisen mittakaavan demonstrointilaitoksia ja kaupallinen toiminta on alkutekijöissä (Vesilaitosyhdistys, 2019).

Liete syötetään reaktoriin märkänä, sen kuiva-ainepitoisuuden ollessa tyypillisesti n. 8–15 %. Lieite kuumennetaan joko ennen reaktoriin syöttämistä tai reaktorissa ja märkähiiltokäsittelyn jälkeen liete viilennetään lämmönvaihtimissa. Jäähdytetty liete kuivataan mekaanisesti suodatuspuristimella noin 50–70 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivauksesta saatava kiintoainefraktio johdetaan jatkokäyttöön, yleensä polttoon. Rejektivesi voidaan johtaa mädättämöön biokaasun tuotantoon. (Vesilaitosyhdistys, 2019; Ylivainio et al. 2019; Mendler, 2012)



Kuva 4. Esimerkki märkähiiltoprosessista (Suomela, 2024).

Järkki-hankkeessa tarkasteltiin laskennallisesti keskitettyjä biohiiltä tuottavia ja jätevesilietettä käsitteleviä laitoksia, ja hankkeeseen valittiin sekä HTC- että pyrolyysimenetelmää hyödyntävät biohiililaitoskonseptit. Molemmat prosessit sitovat hiiltä lopputuotteeseen ja mahdollistavat ravinteiden kierrätyksen. HTC-konseptissa jätevesilietteestä tuotetaan biokaasua ja mädäte ohjataan HTC-reaktoriin, jossa siitä syntyy biohiiltä. Biohiilen mekaanisesta erotuksesta jää jäljelle nestejää, joka käsitellään Järkki-hankkeen mallinnuksessa haihdutuksen ja höyrystrippauksen yhdistelmällä, ja saadaan tuotteina ammoniakkiliuosta ja puhdasta vettä. (Kinnunen et al. 2021)

Taulukko 10. Märkähiilto ja hidaspyrolyysi - prosessien vertailua (Kinnunen 2025; Kinnunen et al. 2021).

	HTC	Hidaspyrolyysi
Esikäsittely	Mekaaninen kuivaus	Mekaaninen kuivaus ja Terminen kuivaus
Prosessi	Energiatehokas, sillä termistä kuivausta ei tarvita	
Biohiilen laatu	Haitta-aineiden tuhoutumista, mikromuovit eivät häviä tuotteesta	Haitta-aineiden tuhoutumista, mukaan lukien mikromuovit
Sivutuotteet	Biohiilen erottamisesta syntyy nestejää, jonka käsittely on suunniteltava. Esimerkiksi ammoniakkiliuoksen tuotanto	Bioöljy ja pyrolyysikaasu

4.3 Muita pyrolyysiteknologioita

Pyrolyysiteknologiat voidaan jakaa myös termiseen ja katalyyttiseen prosessiin. Terminen menetelmä perustuu pyrolysoitavan materiaalin kuumentamiseen. Kun valmistetaan nestemäistä tuotetta eli bioöljyä, voidaan hyödyntää katalyyttistä menetelmää pyrolyysin yhteydessä parantamaan bioöljyn laatua. Korkea happipitoisuus tekee bioöljystä syövyttävää, ja katalyytteinä tyypillisesti käytettävät zeoliitit ja metallioksidit vähentävät bioöljyn happipitoisuutta. (Knaapi, 2019)

Muitakin pyrolyysiteknologioita esiintyy akateemisessa tutkimuksessa. Esimerkiksi

- Ligniiniin pohjaisesta materiaalista riisinkuoria käyttäen on tuotettu rikkihapon avulla sulfonoitua biohiiltä. Tuote sitoo erinomaisesti kadmiumia (Zhimao et al. 2021)
- Pyrolyysi tyhjiössä yhdistää hitaan ja nopean pyrolyysin ominaisuuksia ja bioöljyn saanto kasvaa (Kavan Kumar ja Panwar, 2024)
- Aurinkoenergialla toimivia pyrolyysilaitteistoja on tutkittu ja onnistuttu tuottamaan optisilla rakenteilla reaktoriin pyrolyysin vaatima lämpötila (Sobek ja Werle, 2021)

5 Pilottitutkimus

5.1 Raaka-aineet ja tutkimusmenetelmät

Tämän työn alkuperäisenä suunnitelmana oli hiiltää vain jätevedenpuhdistamolietteen ja yhdyskuntabiojätteen seosta. Oulun Vesi, Kiertokaari ja SFTec Oy toteuttivat jätevedenpuhdistamolietteen ja mädätysjäännöksen pyrolyysikokeita marraskuussa 2022. Tämän työn koesuunnittelua varten haastateltiin Oulun Veden edustajaa ja pilotkokeen käytännön toteutuksesta (kuivaus ja pyrolysointi) vastanneen SFTec:n edustajaa.

Oulun Veden ja Kiertokaaren kokeissa erä koko oli vajaan kuution verran ja jokaiseen erään sekoitettiin 1/3 kuivattua jätevedenpuhdistamolietettä tai mädätysjäännöstä ja 2/3 puuta. Puuraaka-aineena käytettiin mäntyhaketta, risuja, oksia tai jättepuuta.

Haastatteluissa nousi esiin jätevedenpuhdistamolietteen pyrolysointiin liittyen:

- Jätevedenpuhdistamoliete tulee kuivata ennen pyrolysointia. Riittävä kuiva-ainepitoisuus riippuu käytettävästä pyrolysointilaitteistosta, mutta tyypillisesti pyrolysointia varten raaka-aineen tulee olla kuiva-ainepitoisuudeltaan vähintään 80 %.
- Mitä tasakokoisempaa pyrolysoitava massa on, sitä tasaisemmin raaka-aine hiiltyy. Tämä on huomioitava erityisesti seoksia pyrolysoitaessa. Puuraaka-aineeksi ei kuitenkaan suositella sahanpurua lietteen sekaan: massasta saattaa tulla niin tiivis, etteivät pyrolyysikaasut pääse siitä läpi.
- Pyrolysointi vaatii riittävän korkean lämpötilan. Jätevedenpuhdistamoliete on energiaköyhää eikä riitä yksinään nostamaan prosessin lämpötilaa riittävän korkeaksi pilot-mittakaavassa. Tästä syystä prosessiin on lisättävä korkeamman lämpöarvon omaavia tuotteita, kuten puuta. (Risteelä, 2024; Isokääntä, 2024)

SFTec Oy on testannut myös biojätteen kuivausta. Biojätteen kuivauksessa haasteita asettaa biojätteen heterogeenisuus koon suhteen sekä sen sisältämät epäpuhtaudet kuten muovi ja metalli. Suositeltavaa on biojätteen murskaus tasakokoiseksi ja epäpuhtauksien poisto ennen kuivausta ja pyrolyysiä. Muovi ei aiheuta ongelmia pyrolyysiprosessissa. Sen sijaan kuivausvaiheessa voi syntyä ongelmia, sillä muovipakkauksen sisällä oleva biojäte ei kuivu. (Isokääntä, 2024)

Haastatteluista saatujen tietojen perusteella jätevedenpuhdistamolietteen ja erilliskerätyn biojätteen joukkoon tulee lisätä puuta parantamaan seoksen energiasisältöä pilotoinnin onnistumiseksi. Puun osuudeksi pilot-kokeessa valikoitui 70 % koe-erän raaka-aineesta. Puuaineksena käytettiin havupuuhaketta ja männynkuorta. Männynkuorella haluttiin korvata osa hakkeesta, sillä sen saatavuus Kuusamossa on hyvä, toisin kuin hakkeella.

Jätevedenpuhdistamolietteenä käytettiin Operon Group Oy:n Haapaveden jätevedenpuhdistamon termisesti kuivattua lietettä. Haapaveden jätevedenpuhdistamolla fosforin saostuskemikaalina käytetään polyalumiinikloridia. Kuusamon jätevedenpuhdistamolla käytetään fosforin saostuskemikaalina sekä ferrisulfaattia että polyalumiinikloridia. Kuusamon jätevedenpuhdistamoliete sisältää oletettavasti ferrisulfaatin käytöstä johtuen enemmän rautaa, mutta vähemmän alumiinia kuin Haapaveden jätevedenpuhdistamoliete. Kuivan jätevedenpuhdistamolietteen raekokoon vaikuttaa käytetty kuivatusmenetelmä sekä laitteisto. Kuusamon jätevedenpuhdistamolla lietettä ei kuivata termisesti, jolloin sen kuiva-ainepitoisuus jää n. 20–30 %:iin. Liete on tällöin vielä liian märkää pyrolysoitavaksi. Kuusamossa ei ole jätevedenpuhdistamolietteen termiseen kuivaukseen soveltuvaa laitteistoa.

Kuusamossa muodostuu vuodessa n. 4 500 t jätevedenpuhdistamolietettä ja n. 1 000 t yhdyskuntabiojätettä. Näiden määrät suhteutettiin toisiinsa ja yhdessä nämä jakeet muodostivat 30 % koe-erän raaka-aineesta. Pyrolysoitavien jakeiden sekaan lisättiin myös biojätteen mukana tullutta muovia.

Taulukko 11. Jakeiden seossuhteet pyrolysoinnissa.

Jae	Seossuhde, %
Puuhake	45
Männynkuori	25
Jätevedenpuhdistamoliete	25
Biojäte	5

Pyrolyysin onnistumisen kannalta on oleellista, että jakeet ovat riittävän kuivia. Pyrolysointiin käytetyn laitteen valmistajan suositus oli, että kosteuspitoisuus on alle 20 %. Kokeessa käytetyt jakeet olivat riittävän kuivia lukuun ottamatta yhdyskuntabiojätettä. Erilliskerätty biojäte kuivattiin Feasib Oy:n laboratoriossa lämpökaapissa. Biojätteen koostumus oli hyvin heterogeenistä ja se sisälsi huomattavan erikokoisia jätteitä sekä muovia. Biojätteen loppukosteuspitoisuudeksi arvioitiin 15–25 %. Muiden raaka-aineiden kosteuspitoisuudet olivat: havupuuhake n. 12 %, männynkuori alle 20 % ja jätevedenpuhdistamoliete n. 10 %.



Kuva 5. Pilottitutkimuksessa pyrolysoidut jakeet.

5.2 Pyrolysointi

Pyrolyysi suoritettiin Amacee 800 hidaspYROLYysi -laitteistolla (kuva 6). Pyrolysoitavat jakeet pakattiin laitteistoon kolmessa korissa (kuva 7), joissa jokaisessa oli samat seossuhteet (taulukko 11) ja sekaan laitettiin biojätteen mukana tullutta muovia. Yhteen koriin mahtui 100 l, jolloin pyrolysoitavaa massaa oli yhteensä 300 l.

Jakeet pakattiin koriin siten, että puuhaketta laitettiin ensin korin pohjalle. Tämän jälkeen jätevedenpuhdistamoliete laitettiin korin keskelle ja männynkuori reunoille. Näiden päälle laitettiin biojäte + muovia. Korin pinnalle laitettiin jälleen puuhaketta. Kori jouduttiin pakkaamaan näin siitä syystä, että jätevedenpuhdistamoliete oli kooltaan sen verran pientä, että jos sen olisi laittanut korin reunoja vasten, olisi se päässyt tulemaan ulos reunan verkon väleistä. Lisäksi pakkausjärjestyksellä pyrittiin varmistamaan pyrolyysikaasujen liikkuminen.



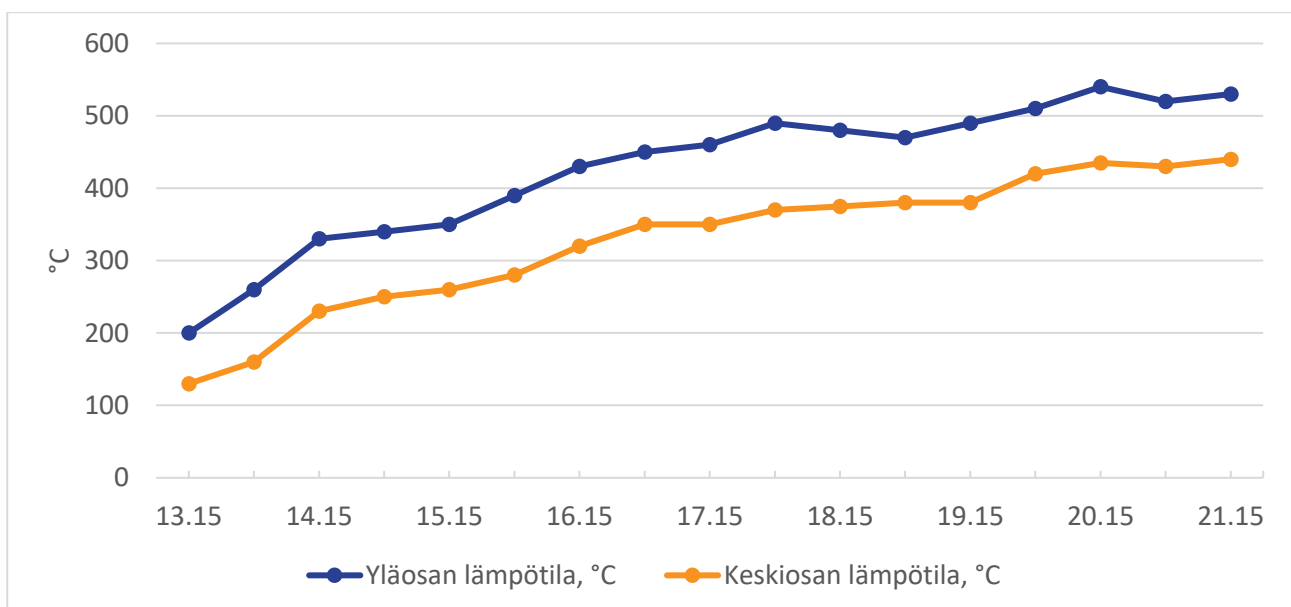
Kuva 6. Amacee 800 -laitteisto ja korien pakkaaminen laitteistoon.



Kuva 7. Jakeet pakattiin kolmessa samanlaisessa korissa pyrolysointilaitteistoon.

Pyrolysointi toteutettiin torstaina 14.11.2024. Pyrolysointi aloitettiin sytyttämällä tuli klo 12.15. Klo 13.50 jakeet alkoivat muodostaa kaasua, mutta muodostuva kaasu ei riittänyt nostamaan laitteiston lämpötilaa.

Laitteistolla tehdyissä aiemmissa puumateriaalien pyrolyysikokeissa kaasun muodostumisen alettua ei ole tarvinnut käyttää ulkopuolista puuta tulen ylläpitoon, vaan näissä kokeissa muodostuvan kaasun palaminen on riittänyt prosessin läpivientiin. Tässä kokeessa tulta jouduttiin ylläpitämään ulkopuolisella puulla koko pyrolyysin keston ajan, sillä kaasua muodostui niukasti. Koe lopetettiin klo 21.15. Kokeen aikana lämpötiloja mitattiin laitteiston yläosassa ja keskiosassa olevista mittauspaikeista.



Kuva 8. Pyrolysoinnin aikana mitatut lämpötilat.

5.3 Pilottitutkimuksen tulokset ja tuotteen analysointi

Pyrolyysin tuloksena saatiin n. 80 litraa biohiiltä. Laitteistossa ylimpänä olleen korin sisältö oli täysin pyrolysoitunut hiileksi. Keskimmaisessa korissa reunat olivat hiiltyneet hyvin, mutta keskellä oli hiiltymätöntä jätevedenpuhdistamolietettä. Alimmaisessa korissa jakeet olivat hiiltyneet reunoilta, mutta pohjassa ja keskellä oli paljon hiiltymätöntä haketta ja jätevedenpuhdistamolietettä. Pyrolysoinnin aikana muodostui biohiilen lisäksi tislettä n. 15 litraa sekä todella pieni määrä tervaa.

Laitteiston sekä saatujen tuotteiden haju kokeen jälkeen oli todella voimakas ja tarttuva. Jopa ulkoilmassa niitä käsitellessä haju tuntui hyvin voimakkaana. Hajun syyksi arveltiin jätevedenpuhdistamolietettä, vaikkei se ennen pyrolysointia haissut erityisen vahvasti. Laitteistolla aiemmin tehdyissä kokeissa ei ole ilmennyt hajuhaittaa.

Pyrolysoinnin jälkeen täysin hiiltynyt massa eroteltiin heikosti hiiltyneestä. Täysin hiiltynyt ja jäähtynyt massa (yläkori ja keskikorin reunat) pakattiin säilytysastioihin. Pyrolysointikorista säilytysastiaan siirrettäessä jakeet sekoittuivat keskenään. Tästä sekoittuneesta massasta pyrittiin ottamaan mahdollisimman edustava näyte (10 litraa). Massan sekoittamisella pyrittiin varmistamaan kaikkien jakeiden päätyminen näytteeseen. Massa oli kuitenkin hyvin heterogeenistä ja näytteen koontivaiheessa ei pystytty mitenkään takaamaan seossuhteiden säilymistä, koska pyrolysoitava massa sekoittui keskenään, kun korit purettiin säilytysastioihin. Lisäksi hakkeet, männynkuori ja osa biojätteestä näyttivät samalta hiiltyneenä.

Tämä 10 litran näyte lähetettiin EBC-sertifikaatin mukaiseen analyysiin Eurofins Environment Testing Finland Oy:lle. Analysoiva laboratorio oli Eurofins Umwelt Ost GmbH (Freiberg). Alla olevissa taulukoissa on esitelty biohiilen analyysitulokset.



Kuva 9. Hakkeesta, männynkuoresta, jätevedenpuhdistamolietteestä ja biojätteestä pyrolysoitua biohiiltä.

Taulukko 12. Analyysit alkuperäisestä näytteestä sekä gravimetriset analyysit (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
Kosteuspitoisuus	% (w/w)	3,0	DIN 51718: 2002-06
Irtotiheys	kg/m ³	250	DIN EN ISO 17828: 2016-05
Irtotiheys < 3 mm	kg/m ³	193	Internal Methode VDLUFA-Methode A 13.2.1, Tiheysmittaus
Vedenpidätyskyky	%	124,3	DIN EN ISO 14238, A: 2014-03
Gravimetriset analyysit	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
Tuhkapitoisuus (550°C)	% (w/w)	50,4	DIN 51719: 1997-07
Tuhkapitoisuus (550°C)	% (w/w)	51,9	DIN 51719: 1997-07

Taulukko 13. Alkuainemääritykset ja suhdeluvut (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	1. mittaus	2. mittaus	Menetelmä
Hiili (C)	% (w/w)	40,8	42,0	DIN 51732: 2014-07
Orgaaninen kokonaishiili (TOC)	% (w/w)	40,2	41,4	Internal Method Calculation [Env Germany], Laskennallinen
Epäorgaaninen kokonaishiili (TIC)	% (w/w)	0,6	0,6	DIN 51726: 2004-06
Karbonaatti - CO ₂	% (w/w)	2,0	2,1	DIN 51726: 2004-06
Vety (H)	% (w/w)	1,6	1,6	DIN 51732: 2014-07
Kokonaistyyppi	% (w/w)	1,51	1,56	DIN 51732: 2014-07
Rikki (S), kokonais	% (w/w)	0,12	0,13	DIN 51724-3: 2012-07
Happi (O)	% (w/w)	3,0	3,1	DIN 51733, laskennallinen
H/C suhde (molaarinen)		0,46		Internal Method Calculation [Env Germany], Laskennallinen
H/Corg suhde (molaarinen)		0,46		
O/C suhde (molaarinen)		0,055		
H/C suhde (molaarinen)		0,45		
H/Corg suhde (molaarinen)		0,46		
O/C suhde (molaarinen)		0,055		

Taulukko 14. Liukoiset alkuaineet (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
pH (CaCl ₂)		7,1	DIN ISO 10390: 2005-12
suolapitoisuus	g/kg	5,25	BGK III. C2: 2006-09
suolapitoisuus	g/l	1,01	BGK III. C2: 2006-09
Johtokyky 1,2 t paineessa	mS/cm	< 0,01	Internal Method SAA-H-Lf-Pflanzenkohle.040
Johtokyky 2 t paineessa	mS/cm	< 0,01	
Johtokyky 3 t paineessa	mS/cm	0,02	
Johtokyky 4 t paineessa	mS/cm	0,02	
Johtokyky 5 t paineessa	mS/cm	0,03	

Taulukko 15. Alkuaineet mikroaaltohajotuksella DIN 22022-1 mukaisesti (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
Arseeni (As)	mg/kg	1,4	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01
Kadmium (Cd)	mg/kg	< 0,2	
Lyijy (Pb)	mg/kg	7	
Sinkki (Zn)	mg/kg	212	
Elohopea (Hg)	mg/kg	< 0,07	DIN 22022-4: 2001-02
Nikkeli (Ni)	mg/kg	< 1	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01
Mangaani (Mn)	mg/kg	160	
Kupari (Cu)	mg/kg	123	
Kromi (Cr)	mg/kg	< 1	
Boori (B)	mg/kg	16	
Hopea (Ag)	mg/kg	< 5	

Taulukko 16. Alkuaineet (550) tuhkatusta näytteestä, boraattihajotus DIN 51729 (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
Kalsium kalsiumoksidina, CaO	% (w/w)	3,6	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09
Rauta rautatrioksidina, Fe ₂ O ₃	% (w/w)	0,7	
Magnesium magnesiumoksidina, MgO	% (w/w)	0,6	
Pii piidioksidina, SiO ₂	% (w/w)	3,0	
Rikki rikkiatrioksidina, SO ₃	% (w/w)	0,3	
Fosfori fosforipentoksidina, P ₂ O ₅	% (w/w)	26,0	
Natrium natriumoksidina, Na ₂ O	% (w/w)	1,0	
Kalium kaliumoksidina, K ₂ O	% (w/w)	1,3	

Taulukko 17. Makroravinteet (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
Kokonaistyyppi	g/kg	15,1	DIN 51732: 2014-07
Kokonaistyyppi	g/kg	15,6	DIN 51732: 2014-07
Fosfori fosforipentoksidina, P ₂ O ₅	g/kg	135	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09
Rikki rikkitrioksidina, SO ₃	g/kg	1,6	
Natrium natriumoksidina, Na ₂ O	g/kg	5,0	
Kalium kaliumoksidina, K ₂ O	g/kg	6,5	
Kalsium kalsiumoksidina, CaO	g/kg	18,8	
Magnesium magnesiumoksidina, MgO	g/kg	3,0	
Rauta (Fe)	g/kg	2,4	
Pii (Si)	g/kg	7,4	

Taulukko 18. PAH (Eurofins, 2024).

Analyysi	Yksikkö	Tulos	Menetelmä
Naftaleeni	mg/kg	28	DIN EN 17503, Procedure 10.2.3: 2022-08
Asenaftyleeni	mg/kg	0,3	
Asenafteeni	mg/kg	1,0	
Fluoreeni	mg/kg	1,0	
Fenantreeni	mg/kg	9,6	
Antraseeni	mg/kg	2,5	
Fluoranteeni	mg/kg	1,9	
Pyreeni	mg/kg	3,0	
Bentso(a)antraseeni	mg/kg	0,6	
Kryseeni	mg/kg	0,6	
Bentso(b)fluoranteeni	mg/kg	0,3	
Bentso(k)fluoranteeni	mg/kg	< 0,1	
Bentso(a)pyreeni	mg/kg	0,2	
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	mg/kg	< 0,1	
Dibentso(a,h)antraseeni	mg/kg	< 0,1	
Bentso(g,h,i)peryleeni	mg/kg	0,1	
Bentso(e)pyreeni	mg/kg	0,2	
Bentso-(j)-fluoranteeni	mg/kg	n,b,	
Summa 8 EFSA-PAH (ei LOQ)	mg/kg	1,8	Internal Method berechnet
Summa 16 EPA-PAH (poisl. LOQ)	mg/kg	49,1	

Taulukko 19. Biohiilen analyysitulosten vertailu EBC-sertifikaatin mukaisiin raja-arvoihin. Vihreällä merkattu alittuneet raja-arvot ja oranssilla ylittyneet. Yksiköt mg/kg. (EBC, 2024)

Analyyysi	Biohiili	FeedPlus	Feed	Agro-Organic	Agro	Urban	Consumer materials	Basic materials
H / C _{org}	0,46	< 0.4		< 0.7				
Pb	7	10	10	45	120	120	120	Ilmoitus, ei raja-arvoa sertifiointille
Cd	< 0,2	0,8	0,8	0,7	1,5	1,5	1,5	
Cu	123	70	70	70	100	100	100	
Ni	< 1	25	25	25	50	50	50	
Hg	< 0,07	0,1	0,1	0,4	1	1	1	
Zn	212	200	200	200	400	400	400	
Cr	< 1	70	70	70	90	90	90	
As	1,4	2	2	13	13	13	13	
16 EPA PAH	49,1	6 ± 2,4	CSI ilmoitus	6 ± 2,4	6 ± 2,4	CSI ilmoitus	CSI ilmoitus	CSI ilmoitus
8 EFSA PAH	1,8	1						4
Bentso(e)pyreeni	0,2	1						
Bentso(j)-fluoranteeni	n.b.	1						

Taulukko 20. Biohiilen analyysitulosten vertailu kansallisen lannoitevalmisteasetuksen ([964/2023](#)) mukaisiin haitallisten aineiden enimmäispitoisuuksiin. Yksiköt mg/kg. (Ruokavirasto^b, 2023).

Haitta-aine	Biohiili	Maanparannusaineet	Kasvualustat
As	1,4	40	10
Hg	< 0,07	1	0,5
Cd	< 0,2	1,5	1
Cr	< 1	300	200
Cu	123	600	150
Pb	7	100	50
Ni	< 1	70	50
Zn	212	1500	300
PAH ₁₆ *	49,1	6 mg/kg kuiva-ainetta	

* Koskee ainesosaluokka 9, pyrolyysihiili (MMM 964/2023)

Tulosten perusteella kokeessa tuotettu biohiili voidaan kaupata EBC-sertifikaatin mukaisesti EBC-BasicMaterials -nimikkeellä. EBC-BasicMaterials -biohiiltä ei saa käyttää maataloudessa tai muissa maaperäsovelluksissa, mutta sitä voidaan hyödyntää perusteollisuudessa, kuten rakennusmateriaalien, tieasfaltin, elektroniikan, jätevesiviemäreiden ja komposiittimateriaalien, kuten suksien, veneiden, autojen ja rakettien valmistuksessa, ilman ympäristölle ja käyttäjille aiheutuvia riskejä. (EBC, 2024)

Tuotetun biohiilen käyttöä eniten rajaavimmat haitta-aineiden raja-arvojen ylitykset EBC-sertifioinneissa olivat kuparin ja 8 EFSA PAH osalta. Näiden ylittyminen rajasi pois EBC-ConsumerMaterials ja EBC-Urban sertifioinnit.

EBC- ConsumerMaterials kattaa kaikki tarvittavat ympäristövaatimukset muiden kuin maaperäsovellusten osalta ja olisi mahdollistanut biohiilen käytön tuotteissa, jotka voivat joutua suoraan ihokosketukseen kuluttajien tai elintarvikkeiden kanssa, esim. kahvikupit, muoviset tietokonekotelot, hammasharjat, matot, tekstiilit, kukkaruukut, makean veden putket jne. EBC-Urban sertifiointi olisi mahdollistanut biohiilen käytön kaupunkiympäristössä mm. puiden istutuksessa, puistojen kunnossapidossa, jalkakäytävien koristeena, koristekasveissa sekä sadeveden viemäröinnissä ja suodatuksessa. (EBC, 2024)

EBC-Agro sertifiointi, joka sisältää Eu:n lannoitevalmisteasetuksen mukaiset raja-arvot, ylittyi kuparin, 8 EFSA PAH ja 16 EPA PAH osalta. Myös kansallisen lannoitevalmisteasetuksen mukaiset haitta-aineiden raja-arvot ylittyivät 16 EPA PAH (PAH₁₆) osalta. Tällöin tuotettua biohiiltä ei saa käyttää lannoitteena, maanparannusaineena tai kasvualustoissa.

Kokeessa valmistettu biohiili ei täytä Ruokaviraston [lannoitevalmisteiden kansallinen ainesosaluettelon](#), ainesosaluokka 9, pyrolyysihiili -vaatimuksia raaka-aineiden (erilliskerätty biojäte) ja PAH₁₆ -pitoisuuden osalta. Ainesosaluokan vaatimus vedyn ja orgaanisen hiilen suhdeluvun osalta täyttyi (alle 0,7).

PAH-yhdisteitä syntyy pyrolyysissä ja ne voivat sitoutua biohiileen pyrolyysin aikana. PAH-yhdisteiden pitoisuutta voi olla mahdollista hallita minimoimalla pyrolyysikaasujen kontaktia biohiilen kanssa sekä optimoimalla hiilten jäähtymistä. (Suomen vesilaitosyhdistys ry, 2019).

6 Biohiilen markkinat

6.1 Biohiilen tuotanto

Euroopassa ja Pohjoismaissa biohiilimarkkinat ovat kehittyneet merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana ja jatkavat edelleen kasvuvaihettaan. Biohiili tarjoaa mahdollisuuksia hiilensidontaan, ravinteiden kierrätykseen, jätehuoltoon sekä uusiutuvan energian tuotantoon. Markkinoiden kasvua kuitenkin hidastavat lainsäädännön, taloudellisen kannattavuuden ja teknologisen tehokkuuden haasteet. (European Biochar Market Report, 2023–2024)

Euroopassa biohiilimarkkinat ovat pirstaloituneet suurten ja pienten toimijoiden kokonaisuudeksi. Vuonna 2023 Euroopassa toimi 171 biohiilen tuotantolaitosta, jotka tuottivat yhteensä 75 000 tonnia biohiiltä vuosittain. Pohjoismaiden osuus tästä oli noin 28 %, eli noin 21 000 tonnia vuodessa. Tuotannossa käytetään laajaa raaka-ainevalikoimaa, kuten puuhaketta, olkea ja jätevesilietettä. Raaka-aineiden moninaisuuden takia biohiilituotteiden ominaisuudet, kuten huokoisuus ja ravinnepitoisuus vaihtelevat. Ominaisuuksiltaan laaja tuotevalikoima pirstaloi markkinoita ja vaikeuttaa yhtenäisen hinnan määrittämistä. Haaste korostuu erityisesti tilanteissa, joissa lopputuotteet ovat keskenään huomattavan erilaisia ominaisuuksiltaan ja käyttökohteiltaan. (European Biochar Market Report, 2023–2024)

Biohiilen käyttöä ohjaa kasvava kysyntä erityisesti hiilensidontan ja ravinteiden kierrätyksen aloilla. Suurimpia sovelluskohteita ovat maatalous, vedenpuhdistus, maisemointi ja rakentaminen. Markkinoiden kysyntäpotentiaalia lisäävät erityisesti maatalouden tarve parantaa maaperän hiilivarastoja ja vähentää kemiallisten lannoitteiden käyttöä. Euroopan hiilimarkkinat tarjoavat taloudellisia kannustimia biohiilen tuottajille hiilikompensaation myötä. (European Biochar Market Report, 2023–2024)

Pohjoismaissa biohiilimarkkinat ovat monipuoliset mutta mittakaavaltaan pienet. Ruotsissa ja Norjassa biohiilen sovelluskohteet vaihtelevat maatalouden hiilensidonnasta teollisuuden käyttöön. Esimerkiksi Norjassa OBIO:n ja Vow:n hankkeet pyrkivät laajentamaan tuotantomittakaavaa, ja suunnitteilla on useita suuria biohiilen tuotantolaitoksia (Salo et al. 2024).

Suomessa biohiilen tuotanto on keskittynyt pienimuotoisiin ja pilottimittakaavan laitoksiin, joten tarjontaa on toistaiseksi vähän. Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) kokeilee jätevedenpuhdistamolietteen ja puuhakkeen yhdistelmää biohiilen tuotannossa. Biohiilen käytön pääkohteet Suomessa ovat maatalous, vedenpuhdistus ja hiilensidonta. Suomessa Carbofex Oy ja GRK tuottavat yhteensä 5 000 tonnia biohiiltä vuodessa. Stora Enso on pilotoimassa ligniiniin perustuvaa biohiilen tuotantoa, jonka tavoitteena on akkuhiilien valmistus. (Salo et al. 2024)

Taulukko 21. Esimerkkejä Pohjoismaissa toimivista biohiilen tuotantolaitoksista.

Maa	Laitos	Vuosi	Raaka-aine	Kapasiteetti	Tuote/sovellus
Suomi	Stora Enso	2022	Kraft-ligniini	Ei tiedossa	Hiilituote akkuihin
Suomi	Carbofex	2022	Puuhake	2 000 tn/a	Biohiili, ylijäämälämpö kaukolämmöksi
Suomi	HSY	2022	Puuhake ja jätevedenpuhdistamoliete	Pilot-laajuus	Biohiili viherrakentamiseen
Suomi	GRK	2023	Biomassat, sahateollisuuden sivuvirrat	3 000 tn/a	Biohiili viherrakentamiseen, ylijäämälämpö pellettien kuivaukseen
Tanska	Stiesdal	2023	Maatalous- ja metsätalouden sivuvirrat	15 000 tn/a (suunniteltu)	Biohiili ja bioöljy
Norja	OBIO	2023	Ei tiedossa	Ei tiedossa	Biohiili eläinrehuksi ja kuivikkeeksi
Norja	Vow	2023	Ei tiedossa	10 000 tn/a (suunniteltu)	Biohiili metalliteollisuuteen
Ruotsi	NSR	2023	Puutarhajäte	1 500 tn/a	Biohiili viherrakentamiseen, Koulutus- ja tutkimustoiminta
Ruotsi	Envigas AB	Tavoite 2025	Puuhake ja metsäteollisuuden sivuvirrat	10 000 t/a	Biohiili terästeollisuuteen ja bioöljy

6.2 Biohiilialan teknologiatoimittajia

Biohiilialalla toimii kasvava joukko yrityksiä, jotka kehittävät ja myyvät pyrolyysiteknologiaa. Alla oleviin taulukoihin on koottu Suomessa ja Euroopassa toimivia alan yrityksiä.

Taulukko 22. Suomalaisia biohiilialan teknologiatoimittajia.

Yritys	Toimintamuoto	Toiminta-alue/maa	Kuvaus toiminnasta
Carbofex Oy	Teknologia-toimittaja ja tuotetoimittaja	Suomi	Carbofex tuottaa biohiiltä biomassasta, kuten puusta. Nokialla sijaitsevan demolaitoksen tuotantokapasiteetti on noin 1000 tonnia biohiiltä, 600 tonnia öljyä ja 8000 MWh lämpöä vuodessa. Tuotteet soveltuvat maaperän parannukseen, hiilensidontaan ja energiantuotantoon.
Ecomation Oy	Teknologia-toimittaja	Suomi	Ecomation Oy valmistaa pyrolyysilaitteistoja, joilla voidaan käsitellä erilaisia jättemateriaaleja, kuten muovia, jätevedenpuhdistamolietteitä ja biomassoja. Laitosten kapasiteetti vaihtelee asiakkaan tarpeiden mukaan.
Puhi Oy	Teknologia-toimittaja sekä tuotetoimittaja	Suomi	Puhi Oy keskittyy erityisesti rakennus- ja puujätteen pyrolyysiin, ja heidän laitteistonsa on suunniteltu käsittelemään merkittäviä määriä puupohjaista jätettä. Puhi Oy biohiilituotanto on suunnattu erityisesti viherrakentamiseen ja maatalouden sovelluksiin.

Taulukko 23. Eurooppalaisia biohiilialan teknologiatoimittajia.

Yritys	Toimintamuoto	Toiminta-alue/maa	Kuvaus toiminnasta
Vow ASA	Teknologia-toimittaja	Norja	Pyrolyysiteknologiaan erikoistunut yritys, joka tarjoaa Biogreen-teknologiaa erityisesti jätevedenpuhdistamoiden lietteen ja biomassojen käsittelyyn. Kapasiteetti vaihtelee asiakkaan tarpeiden mukaan ja teknologia on skaalautuva eri kokoluokan laitoksiin.
Pyreg GmbH	Teknologia-toimittaja	Saksa	Tuottaa biohiiltä erityisesti jätevedenpuhdistamolietteestä (80 % kuiva-ainepitoisuus) ja biomassasta. Teknologia on käytössä kunnallisissa jätevedenpuhdistamoissa, ja kapasiteetti on 1 600 tn/a biohiiltä suurimmalla laitteistolla.
Bioforcetech	Teknologia-toimittaja	Italia	Modulaaristen kuivauslaitteistojen yksikkökapasiteetti on 1 000 tonnia vuodessa. Syötteenä voidaan käyttää mm. jätevedenpuhdistamoiden lietteitä ja biomassoja.
Ingelia	Teknologia-toimittaja	Espanja	Ingelia käyttää hydrotermistä karbonisaatiota biomassan käsittelyyn. Raaka-aineeksi soveltuu mikä tahansa biomassa kosteuden ollessa 30–90 %. Tuotteina syntyy sekä hiiltä että ravinnepitoista nestemäistä lannoitetta. Modulaarisen laitteiston vuosikapasiteetti alkaa 7 000 tn/a biomassaa.
TECAM Group	Teknologia-toimittaja	Espanja	TECAM toimittaa pyrolyysilaitoksia kokonaistoimituksena, raaka-aineena voidaan hyödyntää mm. muovia, jätevedenpuhdistamolietettä ja puuraaka-ainetta.

6.3 Biohiilimarkkinoiden tulevaisuudennäkymät Pohjoismaissa ja Suomessa

Tässä työssä haastateltiin viittä toimijaa Suomessa ja Euroopassa, ja selvitettiin heidän näkemyksiään biohiilimarkkinan tulevaisuudennäkymistä. Aineistoa täydennettiin kirjallisuuskatsauksella. Tulosten perusteella koottiin kokonaiskuva biohiilen markkinaa edistävästä ja hidastavista tekijöistä.

Pohjoismaiden biohiilimarkkinoilla nähdään potentiaalia erityisesti hiilensidonnan ja ravinteiden kierrätyksen aloilla. Lietehiilen yleistymistä voivat vauhdittaa sääntelykehityksen vahvistuminen, kuten hiilikrediittijärjestelmien kehittyminen, sekä teknologisten innovaatioiden lisääntyminen, jotka mahdollistavat kustannustehokkaamman tuotannon. Pilottihankkeet, kuten Stora Enson ligniiniin perustuva biohiilituotanto ja HSY:n kokeilut jätevedenpuhdistamolietteellä, luovat pohjan uusille liiketoimintamalleille ja teknologioille. (Salo, 2024; yrityshaastattelut)

Yhteistyö sidosryhmien, kuten teknologiatoimittajien, tuottajien ja loppukäyttäjien välillä, on avainasemassa biohiilen markkinoiden kasvun tukemisessa. Yrityshaastatteluissa korostettiin tarvetta parantaa tiedonvaihtoa ja yhteistyötä koko arvoketjussa, mikä voisi helpottaa uusien liiketoimintamallien ja markkinamekanismien kehittämistä. Tämän lisäksi EU:n Carbon Removal Certification Framework (CRCF) voi tarjota selkeän viitekehyksen hiilensidontaan liittyville toimenpiteille, mikä edistäisi biohiilen kysyntää ja sen hyväksyntää osana vihreää siirtymää (European Biochar Market Report, 2023–2024).

Kehityksen esteenä Suomessa ovat usein korkeat alkuinvestoinnit, rajallinen kysyntä sekä epätietoisuus biohiilen sovelluskohteiden taloudellisista hyödyistä. Vaikka tutkimusta on tehty paljon, biohiilimarkkinoiden laajentuminen edellyttää lisää julkista tukea ja selkeämpää lainsäädäntöä. Lisäksi biohiilen sivutuotteiden, kuten pyrolyysiöljyn ja kaasujen, kaupallistaminen voisi parantaa tuotannon kannattavuutta. Markkinoiden kehityksessä tärkeää on myös yhteistoiminta eri sidosryhmien välillä sekä tiedon jakaminen uusista liiketoimintamalleista (European Biochar Market Report, 2023–2024; Salo et al. 2024).

Ajurit markkinoiden kehittymiselle

- Hiilensidontamarkkinoilla tulevaisuuden potentiaalia
- Fossiilisten ravinteiden vähentyminen lisää ravinnekierron merkitystä
- Jätevedenpuhdistamolietteen laatuvaatimusten (haitta-ainepitoisuudet) kiristyminen lainsäädännössä lisäisi biohiilen tuotannon houkuttelevuutta
- Kotimaiset pilotlaitokset ja laitokset luovat pohjan uusille liiketoimintamalleille ja teknologioille

Haasteet ja hidasteet markkinoiden kehittymiselle

- Korkeat investointikustannukset
- Markkinoiden hajanaisuus vaikeuttaa hinnan määrittystä
- Hiilikrediittien vakiintumattomat käytännöt
- Kuluttajien ja teollisuuden rajallinen tietoisuus biohiilen hyödyistä
- Monimutkainen säätely luo epävarmuutta

Yrityshaastatteluissa selvitettiin näkemyksiä jätevedenpuhdistamolietteestä valmistetun lieteihiilen markkinoista. Lainsäädännöllisesti lieteihiilen valmistus ja käyttö maaperäsovelluksissa on mahdollistettu Suomessa. Toistaiseksi lieteihiilelle ei kuitenkaan ole olemassa markkinoita; kotimaista kaupallista valmistusta ei ole vielä aloitettu. Koetoimintaa on sen sijaan harjoitettu muutaman viime vuoden aikana.

Tuotannon näkökulmasta lietehiilen valmistus on kiinnostavaa, sillä pyrolysointi poistaa jätevedenpuhdistamolietteestä haitta-aineita kuten lääkettäjämiä ja mikromuoveja. Tämä on suurin lietehiilen valmistusta edistävä ajuri, mikäli tulevaisuudessa jätevedenpuhdistamolietteen laatuvaatimukset kiristyvät. Tuotannon kannattavuutta voisi parantaa maltillisella jätevesimaksun korotuksella. Epävarmuutta suuremman lietehiililaitoksen rakentamiseen tuo edelläkävijän rooli; kokemusta tai referenssi kohteita ei juurikaan ole saatavilla.

Asiakkaan näkökulmaa lietehiilen markkinaan ei vielä tunneta hyvin. Maatalouskäytössä viljelijöiden maksukyky on rajallinen ja tuotteen mielikuva saattaa olla negatiivinen. Viherrakentamisen alalla lietehiileen saatetaan suhtautua myönteisemmin. Lisäksi lietehiili poikkeaa ominaisuuksiltaan puuperäisestä biohiilestä, joten sen järkevät käyttökohteet ja ominaisuudet täytyy todentaa.

Liete hiili: Ajurit markkinoiden kehittymiselle

- Kaupunkien viherrakentamisessa liete hiilellä saattaa olla maatalouskäyttöä suurempi kysyntäpotentiaali
- Vesimaksujen maltillisella korotuksella voi kattaa pyrolyysin tuotantokustannuksia
- Lainsäädännön tiukentuminen haitta-aine-pitoisuuksien (kuten lääkettäjämiä ja mikromuovien osalta) kasvattaisi pyrolyysin houkuttelevuutta
- Verrokkina Tanskassa pyritään saamaan pyrolysoitu jätevesiliete maatalouden käyttöön julkisella tuella

Taulukko 24. Tunnistetut liete hiilen tuotantoon liittyvät haasteet.

Ongelma	Vaikutus	Lähde
Korkeat investointikustannukset	Pyrolyysilaitoksen perustamiskustannukset ovat korkeat, mikä vaikeuttaa uusien laitosten perustamista.	Sweco, 2024; Haastattelut
Jätevedenpuhdistamolietettä sisältävälle liete hiilelle ei ole olemassa vielä markkinoita	Kasvattaa investoinnin riskiä	Feasib, 2024; Haastattelut
Maatalouskäytössä viljelijöiden maksukyky on rajallinen ja tuotteen mielikuva saattaa olla negatiivinen	Rajaa potentiaalista asiakaskuntaa	Feasib, 2024; Haastattelut
Raskasmetallipitoisuudet liete hiileissä	Rajoittaa käyttöä maataloudessa, koska raskasmetallien hallinta edellyttää lisäkäsittelyä.	Sweco, 2024; Haastattelut
Rajoitettu infrastruktuuri ja logistiikka	Korkeat kuljetuskustannukset ja logistiikan puutteet rajoittavat biohiilen jakelua ja käyttöä.	Sweco, 2024; Haastattelut
Monimutkainen sääntelykehys	Sääntelyn tulkin varaisuus ja tilannekohtaisuus biohiileen liittyen luo epävarmuutta markkinoilla.	Sweco, 2024; Haastattelut

6.4 Biohiilen arvon määrittäminen

Markkinoiden hajanaisuus vaikeuttaa biohiilen hinnan määrittelyä. Esimerkiksi raaka-aineiden moninaisuus vaikuttaa merkittävästi biohiilen ominaisuuksiin ja tätä kautta myös sen markkinakelpoisuuteen eri sovelluskohteissa. (Salo et al. 2024). Tämä koskee erityisesti lietehiiltä, jossa raaka-aineiden moninaisuus ja niihin liittyvät laatuvaatimukset tekevät hintamekanismeista epäselviä.

Swecon vuonna 2024 Digipolikselle laatiman raportin ”Digipolis Biohiilen teknologiaselvitys” mukaan biohiilen hinnoittelu vaihtelee huomattavasti eri sovelluskohteiden ja segmenttien välillä.

Hiilensidonnalla vapaaehtoisilla markkinoilla biohiilikrediittien arvo on ollut keskimäärin 160 €/t CO₂ (helmikuu 2024), mikä tarkoittaa, että yksi tonni biohiiltä, joka sitoo 2,8 tonnia CO₂, voi tuottaa kompensaatiotuloa noin 500 €/t biohiiltä. Tämä tekee hiilensidonnasta yhden lupaavimmista käyttökohteista biohiilimarkkinoilla, erityisesti Pohjoismaissa, joissa hiilikrediittijärjestelmien odotetaan kehittyvän nopeasti.

Biohiilen markkinahinta Euroopassa vaihtelee 300–2 000 €/t käyttötarkoituksesta riippuen. Alhaisempaan hintahaarukkaan sijoittuvat teollisuuden sovellutukset, kuten terästeollisuus, kun taas kuluttajille suunnatut tuotteet, kuten kasvualustat, voivat saavuttaa korkeampia hintoja. Maatalouskäyttöön soveltuvan biohiilen maksukyky on kuitenkin huomattavasti alhaisempi, mikä asettaa haasteita markkinoiden laajentumiselle ilman merkittäviä taloudellisia tukimekanismeja.

Digipoliksien raportti korostaa myös biohiilituotannon taloudellisia haasteita. Case-esimerkissä kannattavuuden saavuttamiseksi biohiilen myyntihinnan tulisi asettua tasolle 480–610 €/t, kun biohiiltä tuotetaan puuhakkeesta noin 6 500 tonnia vuodessa. Tämä edellyttää korkealaatuisten tuotteiden markkinointia ja lisätuloja kaukolämmöstä (190–320 €/t biohiiltä) sekä hiilensidonnasta (450 €/t biohiiltä). Ilman edellä mainittua lisäarvoa biohiilen käyttö maataloudessa ja viherrakentamisessa saattaa jäädä marginaaliseksi.

6.5 Sidosryhmäanalyysi

Biohiilen markkinaan vaikuttavat sidosryhmät ja toimintaympäristö, joita on hahmoteltu Kuvassa 13. Toiminnan ytimessä on biohiilen tuottaja, joka voi vaikuttaa muun muassa tuotannon laatuun, hintaan ja jakeluun. Tuottajalle merkityksellisiä sidosryhmiä ovat esimerkiksi loppukäyttäjät, teknologian kehittäjät ja lainsäädäntö. Poliittisilla päätöksillä on mahdollista vaikuttaa biohiilimarkkinan kehitykseen esimerkiksi tukipolitiikalla ja hiilensidonnalla markkinan yhtenäistämällä.

Kilpailutilanne ja biohiilen kilpailukyky korvaaviin tuotteisiin kuten maanparannusaineisiin ja lannoitteisiin nähdessä vaikuttaa markkinan kehittymiseen. Raaka-aineiden saatavuudella ja hinnanvaihtelulla on merkitystä tuotannon määrään. Hiilensidonnalla markkinoiden kehittyminen voi lisätä biohiilen tuottajan tulovirtaa. EU:n ilmastopolitiikka asettaa tavoitteita hiilensidonnalle, joka voi edesauttaa biohiilimarkkinan kasvua.



Kuva 10. Biohiilen tuotannon toimintaympäristö.

7 Biohiililaitoksen liiketoiminta ja kannattavuus

7.1 Liiketoimintaskenaariot ja Business Model Canvas

Kuusamossa on tarjolla jäte- ja sivutuotevirtoja biohiilen raaka-aineeksi ja potentiaalinen laitoksen sijoituspaikka bio- ja kiertotalousalue Kuubiassa. Biohiililaitoksen rakentaminen olisi vaihtoehtoinen tapa käsitellä Kuusamossa syntyvä jätevedenpuhdistamoliete ja erilliskerätty biojäte, jotka tällä hetkellä kuljetetaan Ouluun jatkokäsittelyä varten. Tässä työssä vertaillaan kahta liiketoimintaskenaariota, ja kuvaillaan liiketoimintamalli Business Model Canvas- menetelmän avulla.

BMC on keino visualisoida yrityksen potentiaalinen liiketoimintamalli. Sen avulla kuvataan kuinka organisaatio tuottaa lisäarvoa ja miten se muutetaan liikevoitoksi. Kokonaiskuvan saamiseksi ja idean työstämisen avuksi BMC tiivistetään yhdelle sivulle. BMC-mallissa on yhdeksän elementtiä kuvaamassa liiketoimintamallia tarkemmin. Vasemmalle on ryhmitelty tehokkuuteen liittyvät tekijät ja oikealle arvonluontiin vaikuttavat tekijät. Keskelle kirjataan arvolupaus: se kuvaa tuotteita ja palveluita, jotka tuottavat arvoa valituille asiakassegmenteille.

7.1.1 Skenaario 1 / Best case - skenaario

- Kuusamon biohiililaitoksen syötteinä käytetään jätevedenpuhdistamolietettä, biojätettä, sivutuotteena syntyvää männynkuorta
- Lainsäädäntö muuttuu niin, että erilliskerättyä biojätettä voidaan käyttää pyrolyysin raaka-aineena ja maaperäkäytössä
- Syntyvää biohiiltä voidaan laatunsa puolesta hyödyntää kasvualustana, lannoitteena, maanparannusaineena, kompostoinnissa, biokaasuprosesseissa, ympäristörakentamisessa ja hiilensidonnassa

Business Model Canvas- mallin muotoilussa hyödynnettiin seuraavia tietoja: Vuonna 2024 valmistuneessa diplomityössä toteutettiin sidosryhmäkysely biohiilen käytön kiinnostavuudesta. Kyselyyn osallistui 32 vastaajaa. Biohiilen hyödyntämisestä liiketoiminnassaan kiinnostuneet vastaajat mainitsivat potentiaalisiksi käyttökohteiksi erityisesti biohiilen kasvualustana ja hiilikrediitteinä. Lisäksi kiinnostusta kohdistui lannoitekäyttöön ja hulevesirakenteisiin. (Määttä, 2024)

Biohiilen raaka-aine ja prosessilämpötila vaikuttavat tuotteen ominaisuuksiin ja sitä myöten käyttökohteisiin. Maataloudessa tärkeimmät ominaisuudet liittyvät ravinteiden sitomiskykyyn, ja matalammassa lämpötilassa (alle 550 °C:ssa) tuotettu hiili soveltuu tähän käyttöön. Viherrakentamisessa huokoisuus ja veden sekä ravinteiden sidontakyky ovat oleellisia biohiilen ominaisuuksia. Näihin vaikuttaa biohiilen raekoko. Korkeassa yli 550 °C asteen lämpötilassa syntyvän hiilen suurempi huokoisuus parantaa haitta-aineiden sidontakykyä biosuodatuksessa. (Välinen ja Tuohimaa, 2024) Liiketoimintasuunnitelmassa oletetaan biohiilen prosessilämpötilaksi noin 500 °C astetta, jolloin biosuodatus hulevesirakenteissa jää pois käyttökohdevalikoimasta.

Arvolupaukseen poimittiin kirjallisuuskatsauksen ja yrityshaastattelussa esiin nousseita näkökulmia ja kustannusrakenteeseen käytettiin kannattavuuslaskennan tietoa.

Avainkumppanuudet - Kuusamon kaupunki - Puuraaka-aineen toimittaja - Jäteveden puhdistamo ja jätehuolto-yhtiö - Hiilikompensaatiota tarjoavat yritykset		Tulovirrat - Biohiilen myynti - Hiilikrediittien myynti (hiilikompensaatio) - Lietteen nykyisen kuljetus- ja käsittelykustannusten vältetty kustannus
Avaintoiminnot - Asiakaskartoitus - Biohiilen tuotteistaminen - Pyrolyysilaitoksen rakentaminen - Tuotannon ylösajo ja operointi - Huolto ja kunnossapito - Raaka-aineen ja tuotteen logistiikka - Hiilikrediittien kauppa kompensatiomarkkinoilla - Biohiilen myynti ja markkinointi	Arvolupaus - Lisää hiilinielua, arvoa hiilensidonnassa - Edistää kiertotaloutta - Pyrolyysissä jätevedenpuhdistamolietteen sisältämät lääkejäämät ja mikromuovit poistuvat biohiili-tuotteesta - Jätevedenpuhdistamolietteen ja biojätteen kuljetuskustannukset vähentyvät - Biohiili on tuotteena jätevedenpuhdistamolietettä kevyempää kuljettaa	Asiakassuhteet - Julkisen sektorin kokeilujen ja kysynnän hyödyntäminen - Tuotteen hyödyntäminen Koillismaan viherrakentamisessa - Hiilikompensaatioita tarjoavien yritysten kanssa tehdään yhteistyötä
Avainresurssit - Jätevedenpuhdistamoliete, erilliskerätty biojäte, männynkuori - Biohiililaitos - Sähkö, nestekaasu - Hallinnon, myynnin ja tuotannon henkilöstö		Jakelukanavat - Toimitus logistiikkayrityksen kautta - Asiakaskohtainen nouto - Hiilikrediittien markkinat verkossa
Kustannusrakenne - Hiilikompensaatiota tarjoavat yritykset - Kaavoitus ja luvat - Suunnittelu ja rakennuttaminen - Laitosinvestointi - Maa-alue ja hallirakennus - Raaka-aineet (männynkuori) - Tuotanto: Henkilöstö, energia, kemikaalit, huolto- ja kunnossapito, muut kustannukset - Logistiikka		Asiakassegmentit - Hiilikompensaatiota tarjoavat yritykset - Kuusamon kaupunki ja muut kunnat (viherrakentaminen) - Maatalouden toimijat - Biohiilen jatkojalostajat viherrakentamiseen tai lannoitekäyttöön - Hiilikrediittien välittäjäyritykset

Kuva 11. Skenaario 1 Business Model Canvas.

7.1.2 Skenaario 2 / Nykyskenaario

- Kuusamon biohiililaitoksen syötteinä käytetään jätevedenpuhdistamolietettä, biojätettä ja sivutuotteena syntyvää männynkuorta
- Nykyinen lannoitelainsäädäntö ei salli erilliskerätyn biojätettä pyrolyysihiilen raaka-aineena
- Syntyvä biohiili täyttää EBC-sertifikaatin Basic Material-luokan vaatimukset ja sitä voidaan hyödyntää perusteollisuuden raaka-aineena (rakennusmateriaalien, tieasfaltin, elektroniikan, jätevesiviemäreiden ja komposiittimateriaalien, kuten suksien, veneiden, autojen valmistus)

Erilliskerätty biojäte kuuluu eläinperäisten sivutuotteiden käsittelyä koskevan EU:n sivutuoteasetuksen piiriin. Koska sivutuoteasetuksessa ei ole sallittu pyrolyysiä biojätteen käsittelymenetelmänä, siitä ei voi valmistaa biohiiltä maaperäkäyttöön. EU:n sivutuoteasetuksen tulkinta voi kuitenkin vaihdella jäsenmaittain (Määttä, 2025). Jätevedenpuhdistamolietteen, biojätteen ja männynkuoren seoksesta valmistettua biohiiltä voisi EBC-sertifikaatin mukaisesti käyttää Basic Material- luokassa teollisuuden raaka-aineena. Kuusamon raaka-ainevolyymillä biohiiltä syntyisi vajaa 1 000 tonnia vuodessa. Tämä on teollisuuskäyttöä ajatellen sen verran pieni määrä, että liiketoiminnallista potentiaalia ei synny.

7.2 Kustannus– ja kannattavuuslaskelma

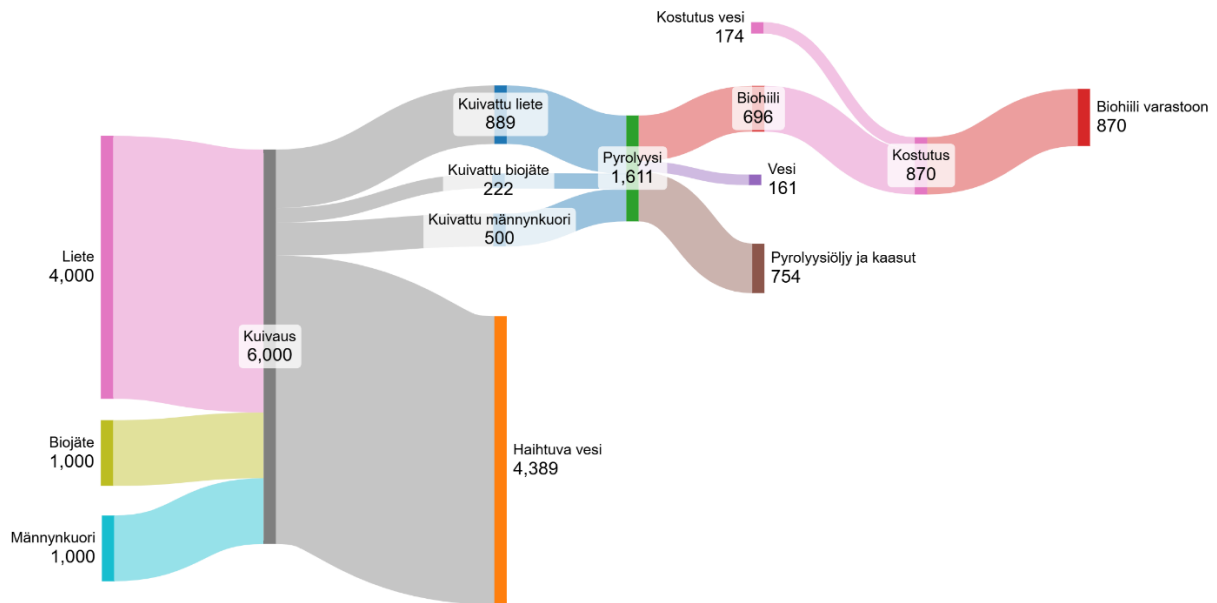
Tässä työssä haastateltiin viittä suomalaista ja eurooppalaista toimijaa, jotka toimittavat biohiilen tuotantoteknologiaa ja/tai tuottavat biohiiltä. Haastattelujen teemoihin sisältyivät pyrolyysitekniikan mahdollisuudet, skaalautuvuus, prosessiparametrit, kustannustaso, tulevaisuudennäkymät ja näkemykset lietehiilen markkinoista. Haastattelujen perusteella valittiin kannattavuuslaskennan kohteeksi hidaspyrolyysiin perustuva tuotantoteknologia, josta oli saatavilla hyvin tietoa. Kannattavuuslaskennan lähtötiedoissa hyödynnettiin soveltuvin osin myös muiden haastattelujen tuloksia ja tehtiin muutama tarkentava hintatiedustelu.

Esimerkkilaitoksen kokoluokka valikoitui Kuusamossa vuosittain syntyvän jätevedenpuhdistamolietteen ja erilliskerätyn biojätteen mukaan. Lisäksi laskennalliseen raaka-aineseokseen otettiin mukaan Kuusamossa sivutuotteena syntyvää männynkuorta syötteen energiasisällön kasvattamiseksi. Puuraaka-aineen osuus syötteessä on noin 20 % kuten verrokkina toimineella pyrolyysilaitoksella. Pilottitutkimuksessa puun osuus oli 70 % syötteestä, johtuen laitteen huomattavasti pienemmästä mittakaavasta.

7.2.1 Massatase

Kannattavuuslaskelma on laadittu laitokselle, jossa käytetään syötteenä jätevedenpuhdistamolietettä, erilliskerättyä biojätettä sekä männynkuorta. Syötteen määrä on yhteensä 6 000 tn/a. Materiaalit kuivataan siten, että niiden kosteus on 10 % ennen pyrolyysivaihetta. Tämä tarkoittaa merkittävän vesimäärän haihduttamista syötteestä. Osa tarvittavasta energiasta syntyy kuitenkin pyrolyysireaktion tuottamasta pyrolyysiöljystä ja kaasusta, jonka energiasisältö hyödynnetään kuivausprosessissa. Lisäenergian tarve on noin 2 kWh/kg tuotettua biohiiltä. Kuivauksen jälkeen materiaalin määrä on 1 611 tn/a. Materiaaliosuus syötetään prosessiin 90 % kuiva-ainepitoisuudessa, ja syntyvän kuivan biohiilen määrä on 696 tn/a.

Biohiilen saantona on käytetty vastaavan laitoksen toteutunutta saantoa (48 % syötteen kuiva-aineesta). Tämän jälkeen biohiili vaatii vielä kostutuksen pölyämisen estämiseksi, mikä myös kasvattaa tuotteen massaa. Kostutuksen jälkeen vuosittain syntyvän biohiilen määrä on n. 870 tn ja kuiva-ainepitoisuus 80 %.



Kuva 12. Sankey-kaavio laitoksen massataseesta.

7.2.2 Investointi

Investoinnin kustannusarvioon on käytetty Tecam Group:in (Espanja), Kuusamon mitoituksen perusteella laatimaa pyrolyysilaitteiston budjettitarjousta, joka on annettu 20.1.2025. Kokonaislaitetoimitukseen sisältyvät esim. pyrolyysiuuni, sen syöttöjärjestelmä, hiilenjäähdytin, kosteutin, polttokammio, poltin, polttoilmapuhallin, typpigeneraattori, ilmanjäähdytin sekä savukaasujen käsittelyjärjestelmä. Laitteiston pohjapiirros on esitetty liitteessä 1. Kuivauslaitteiston osalta on käytetty kyseessä olevan syötemäärän ja laadun perusteella SFtec Oy:n antamaa kustannusarviota MH12-laitteistosta, johon sisältyy myös hajunhallintajärjestelmä. Hallirakenteiden osalta on käytetty suomalaisen Best-Hall Oy:n antamaa kustannusarviota 600 m² hallista paikoilleen pystytettynä valmiille perustukselle.

Taulukko 25. Investointikustannukset.

Investoinnit	€ (Alv 0 %)
Halli 600 m ²	220 000 €
Pyrolyysilaitteisto	3 743 000 €
Rahti	92 000 €
Kuivauslaitteisto	1 100 000 €
Asennuskustannukset	200 000 €
Muut kulut 15 %	803 250 €
Yhteensä	6 158 250 €

Muut asennuskulut perustuvat haastatteluaineistoon ja arvioon tämän kokoluokan laitoksen asennuksista. Rahdin kustannus perustuu pyrolyysilaitteiston toimittajan arvioon noin 45 tonnin laitteiston kuljetuksesta Espanjasta (Polinyà) Kuusamoon.

Laskelma sisältää 15 % kustannusvarauksen muihin kuluihin. Niihin voi lukeutua esimerkiksi investoijan oman henkilöstön suunnittelu- ja työnjohtokustannuksia investoinnin aikana, kaavoitus, luvitus, vakuutukset, tontti, siihen liittyvä infrastruktuuri ja käyttöpääoma. Mikäli prosessi rakennetaan jo olemassa olevan teollisuuslaitoksen tai toiminnon yhteyteen, muita kustannuksia voi olla mahdollista pienentää. Edullisia sijainteja voivat olla esimerkiksi kaukolämpölaitokset tai jäteveden ja erilliskerätyn biojätteen käsittelyalueet. Kuusamossa bio- ja kiertotalousalue Kuubiossa toimii Kuusamon energia- ja vesiosuuskunnan jätevedenpuhdistamo.

7.2.3 Käyttökustannukset

Raaka-aineena ja energialähteenä käytettävän männynkuoren hinnaksi on arvioitu 30 €/tonni. Vuosittain käytettävä määrä on n. 1 000 tn. Lisäenergian tarve on laskettu toimivan biohiililaitoksen toteutuneen energiankulutuksen (2 kWh/kg biohiiltä) perusteella siten, että energiakustannuksena on käytetty 0,18 €/kWh.

Työvoiman osalta on suuri merkitys, toteutetaanko projekti ns. Greenfield -projektina – eli täysin uutena ja itsenäisenä toimintona, vai jo olemassa olevan teollisen toiminnon yhteyteen. Jälkimmäinen vaihtoehto tarjoaa kustannussäästöjä, jos voidaan hyödyntää olemassa olevaa työvoimaa, eikä laitokselle tarvitse luoda uutta organisaatiota. Esimerkiksi haastatellun jätealan toimijan biohiililaitoksen työvoiman lisätarpeeksi on kokemusten perusteella arvioitu vain 0,5 henkilötyövuotta. Tässä laskelmassa työvoiman tarpeeksi on kuitenkin käytetty 1,5 henkilötyövuotta, koska verrokkilaitoksella toiminta on koeluontoista ja Kuusamoon tuleva laitos olisi jatkuvatoiminen. Huoltokustannuksiksi on arvioitu vastaavan toimivan laitoksen kokemusten perusteella n. 75 000 €/a.

Taulukko 26. Käyttökustannukset.

Käyttökustannukset	€ (Alv 0 %)
Männynkuori	30 000 €
Työvoima	90 000 €
Ostoenergia	313 200 €
Huolto	75 000 €
Yhteensä €/a	508 200 €

7.2.4 Biohiilen tuotantokustannus

Laitoksen tuotantomäärä on 870 tn/a biohiiltä. Sen investointikustannus on noin 6,15 M€ ja käyttökulut 0,51 M€ vuodessa. Laskelma on laadittu 15 vuoden jaksolle 5 % korolla. Biohiilen tuotantokustannus, eli kriittinen hintapiste on 1 266 €/tn. Jaksotetun investoinnin osuus on hieman suurempi; 682 €, kun taas käyttökustannusten osuus on 584 €.

Taulukko 27. Biohiilen tuotantolaitoksen investointi- ja käyttökustannukset.

CAPEX	
Biohiilen tuotanto	870 tn/a
Investointi	6 158 250 €
Laskenta-aika	15 vuotta
Jaettu 15 vuodelle	410 550 €
Korko	5 %
CAPEX, €/a	593 300 €/a
CAPEX, €/tn	682 €/tn
OPEX	
Biohiili	870 tn/a
Käyttökulut, €/a	508 200 €
OPEX, €/tn	584 €/tn
Biohiilen tuotantokustannus	1 266 €/tn

7.2.5 Tulovirrat

Laitoksen tuottamat tulot muodostuvat biohiilen myynnistä, CO₂ -kompensaatiosta sekä jätevedenpuhdistamolietteen ja erilliskerätyn biojätteen käsittelyn vältetystä kustannuksesta. Näistä merkittävin tuloerä on vältetyt jätteenkäsittelykustannukset.

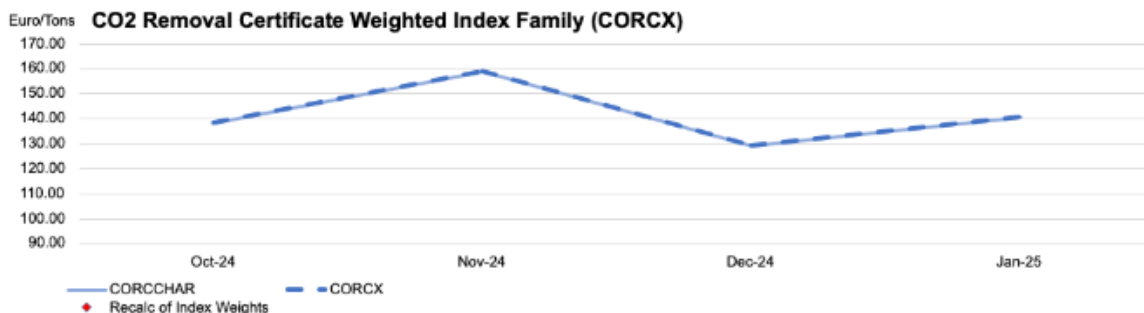
Biohiilen myynnistä saatava tonninhinta (250 €/tn) on arvioitu melko alhaiseksi johtuen biohiilen laadusta ja paikallisen hyödynnettävyyden rajallisuudesta. Mikäli biohiilimarkkina kehittyy suotuisasti ja hintaa on mahdollista nostaa, se parantaa laitoksen kannattavuutta. Globaalisti biohiilen myyntihinta on liikkunut välillä 300–2 000 €/tn, mutta tähän vaihteluväliin asettuvat kaikki laatuluokat ja käyttötarkoitukset (Irish Farmers Journal, 2023).

Taulukko 28. Biohiililaitoksen tuotot.

Tuotot	Määrä, tn	Hinta, €	Vuosituotto, €
Biohiilen myynti	870	250	217 500
CO ₂ -kompensaatio (tn/a x 2,8)	2 436	65	157 512
Vältetty jätehuoltokustannus	5 000	100	500 000
Yhteensä			875 012

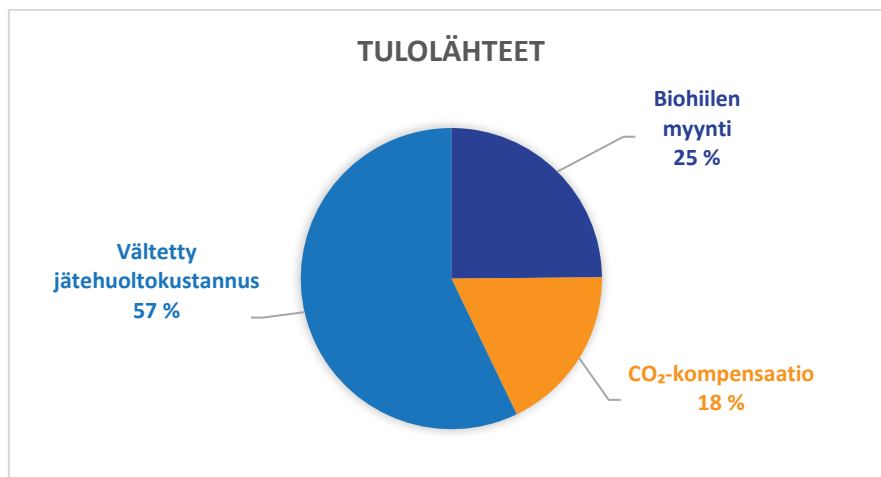
Teoreettinen maksimi biohiilitonnin sitomalle hiilidioksidille on 3,5 tnCO₂ (Suonperä, 2024). Johtuen biohiilen sisältämistä epäpuhtauksista ja vedystä, realistisena arviona on laskelmassa kuitenkin käytetty 2,8 tnCO₂/tonni biohiiltä. Myytävän hiilikompensaation vuotoinen määrä olisi tällöin yhteensä 2 436 tnCO₂/a.

CO₂-kompensaatiosta saatavan tuoton määrä (64,66 €/tnCO₂) on arvioitu Energiaviraston vuoden 2024 toteutuneen keskihinnan mukaan (Energiavirasto, 2024). Vaihtoehtoisena lukuna voitaisiin käyttää myös esim. vapaaehtoisen hiilimarkkinan kauppapaikan, puro.earth -sivuston marraskuun 2024 keskihintaa (160 €/tnCO₂), mikä vaikuttaisi merkittävästi laskelman lopputulokseen (Puro.earth, 2025). Myös CO₂-kompensaation markkinat hakevat muotoaan, minkä vuoksi on käytetty konservatiivisempaa hinta-arviota.



Kuva 13. Sidotun hiilidioksiditonin hinta Puro.earth -sivustolla helmikuussa 2025 (Puro.earth, 2025).

Kaikki kolme laitoksen ennakoitua tulonlähdettä ovat luonteeltaan herkästi muuttuvia. Tarkastelu esim. 5 vuoden päästä voi antaa täysin toisen tuloksen, mikäli esimerkiksi jätteiden käsittelykustannukset nousevat tai biohiilen ja CO₂-kompensaation markkinat lähtevät kehittymään voimakkaasti ja kysyntäperusteisesti. Muita lisätuloja laitokselle olisi mahdollisesti saatavissa kuivauksessa syntyvän vesihöyryn hukkalämmön hyödyntämisestä sekä kuivauksen sivuvirtana syntyvän ammoniumsulfaatin kaupallistamisesta. Näitä ei ole kuitenkaan huomioitu tässä laskelmassa.



Kuva 14. Suurin yksittäinen tulonlähde on vältetty jätehuoltokustannus.

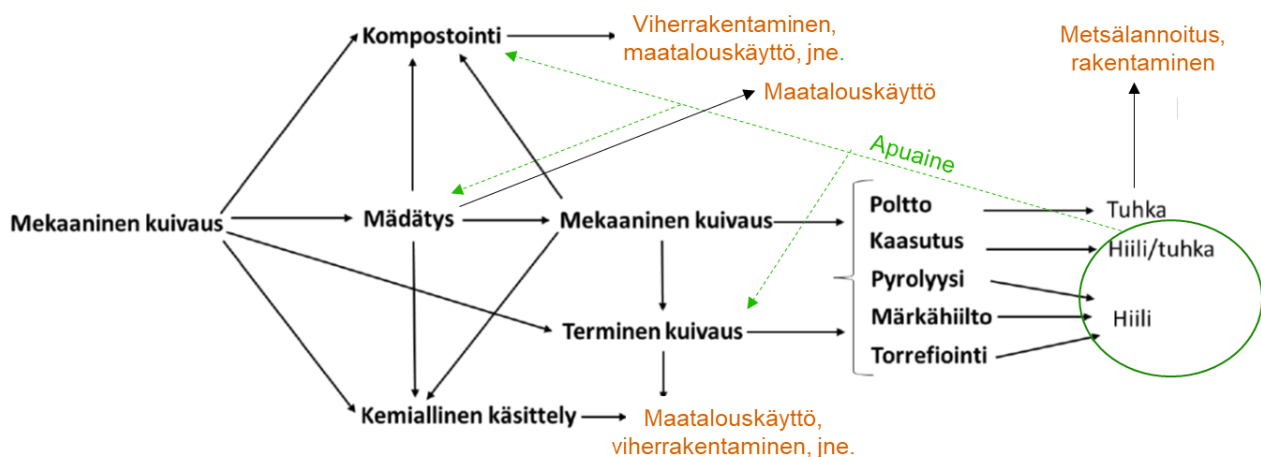
7.2.6 Laitoksen kannattavuus

Biohiilen vuotuinen tuotantokustannus on 1 266 €/tonni ja biohiilestä saadaan tuloa 1 006 €/tonni. **Laskelma osoittaa, että investointi ei ole kannattava.** Käytetyillä oletuksilla takaisinmaksuaikaa ei voida laskea, ja investoinnin nettonykyarvo on negatiivinen (-2 350 869 €).

8 Tulevaisuuden visiot – liiketoimintaa jätevedenpuhdistamolietteestä

8.1 Jätevedenpuhdistamolietteiden tyypilliset käsittelyketjut Suomessa

Jätevedenpuhdistamolietteen käsittelytavat voidaan yleisesti ottaen jakaa kolmeen pääryhmään: biologisiin, kemiallisiin ja termisiin menetelmiin. Biologisiin menetelmiin kuuluvat mädätys ja kompostointi, joissa hyödynnetään luonnollisia mikrobeja. Kemiallisista käsittelyistä yleisimpiä ovat kalkkistabilointi ja Kemicond-märkähapetus. Kalkkistabilointi tapahtuu emäksisissä ja Kemicond-käsittely happamissa olosuhteissa. Termisistä käsittelyistä käytetyimpiä ja tunnetuimpia ovat terminen kuivaus, poltto ja pyrolyysi. (Kinnarinen, 2022)



Kuva 15. Jätevedenpuhdistamolietteiden käsittelyketjujen yleiskaavio tyypillisine käyttökohteineen, sis. termisessä käsittelyssä syntyvän jäännöshiilen käyttömahdollisuudet käsittelyketjussa (Kinnarinen, 2022).

8.1.1 Biologiset menetelmät: mädätys ja kompostointi

Suomessa mädätettiin vuonna 2020 yli 75 % yhdyskuntalietteestä, josta osa jatkokäsittellään kompostoimalla. Suomessa mädätys tapahtuu tyypillisesti mesofiilisenä märkämädätyksenä, jossa prosessin lämpötila on n. 30–45 °C ja kiintoainepitoisuus korkeintaan 15 %. Yhdyskuntalietteet tyypillisesti hygienisoidaan mädätysprosessin yhteydessä taudinaiheuttajien tuhoamiseksi. Hygienisoinnissa lietteen lämpötila nostetaan 70 °C:een tunnin ajaksi. Mädätyksessä syntyy mädätysjäännöksen lisäksi raakabiokaasua, jota voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön tuotantoon, tai se voidaan jatkojalostaa liikennepolttoaineeksi.

Suomessa kompostoitiin vuonna 2020 n. 60 % yhdyskuntalietteestä. Kompostoinnissa mikrobit hajottavat orgaanista ainesta hapen läsnä ollessa. Lietteen tai mädätteen kompostointia edeltää yleensä mekaaninen kuivaus 20 % kuiva-ainepitoisuuteen. Lietteen ja mädätteen kompostointi vaatii usein sekaan runsaasti tukiainetta, esim. haketta, kuorta, turvetta tai olkea, jotta olosuhteet saadaan mikrobin hapensaannin kannalta otolliseksi kompostoinnille. Usein tukiainetta tarvitaan enemmän kuin varsinaista syötettä.

Kompostointi alkaa muutaman viikon mittaisella aktiivivaiheella, jossa prosessin hapensaanti yleensä varmistetaan puhaltamalla kompostiin ilmaa ja mahdollisesti kääntelemällä sitä. Aktiivivaiheen jälkeen komposti siirretään jälkikypsytykseen aumoihin, mikä voi kestää yli vuoden. Tämän jälkeen komposti voidaan hyödyntää sellaisenaan tai jatkojalostaa multatuotteiksi. (Kinnarinen, 2022)

8.1.2 Kemialliset menetelmät: kalkkistabilointi ja KemiCond

Suomessa jätevedenpuhdistamolietteiden kemiallinen käsittely suoritetaan kalkkistabiloimalla poltetulla (CaO) tai sammutetulla kalkilla (Ca(OH)₂) tai kemiallisesti hapettamalla käyttäen KemiCond-menetelmää. Kalkkistabiloinnissa taudinaiheuttajat kuolevat pH:n noustessa, jolloin liete hygienisoituu. Kalkkia lisätään tyypillisesti n. 6–10 % lietteen kuiva-ainemäärästä, jolloin pH:n tulisi nousta yli 12:een vähintään kahden tunnin ajaksi. Kalkkistabilointi suoritetaan yleensä mekaanisesti kuivatulle lietteelle ja käsittelyn jälkeen seoksen kuiva-ainepitoisuus on n. 40 %. Käsittelyssä lietteen määrä kasvaa johtuen kalkin lisäämisestä. Kalkkistabiloitua lietettä voidaan tarvittaessa jälkikypsyttää useita kuukausia. (Kinnarinen, 2022)

KemiCond-menetelmä jakautuu kolmeen vaiheeseen:

1. Happamoituminen, jossa lietteen pH säädetään happamaksi rikkihapolla.
2. Hapettaminen, jossa liete hapetetaan vetyperoksidilla. Tämä vaihe hygienisoi lietteen ja parantaa sen käsiteltävyyttä.
3. Flokkulointi, jossa lietteen sekaan lisätään polymeerejä muodostamaan suurempia hiutaleita ja siten helpottamaan mekaanista kuivausta. (Kemira)

Kemiallisen käsittelyn jälkeen lietettä voidaan käyttää maataloudessa tai viherrakentamisessa (Kinnarinen, 2022).

8.1.3 Termiset menetelmät

Termisessä kuivauksessa lietteestä haihdutetaan vettä lämmön avulla ja lopputuotteena saadaan hygienisoitua ja kuivaa lietettä. Kaikki termiset menetelmät sisältävät kuivauksen joko erillisenä vaiheena, prosessiin integroituna kuivauksena tai polttokattilassa tapahtuvana veden haihtumisena, ennen kuin palaminen pääsee käyntiin. (Kinnarinen, 2022)

Lämpötila termisessä kuivauksessa on n. 70–180 °C ja viipymäaika n. 30–120 min riippuen tekniikasta, lämmönlähteestä ja kuivauksen tavoitetasosta. Terminen kuivaus on erittäin energiantensiivinen prosessi ja tästä syystä termisen kuivauksen taloudellinen käyttö vaatii, että saatavilla on edullinen energianlähde, esim. biokaasua käyttävän CHP-laitoksen, lietteen polton tai teollisuusprosessien ylijäämälämpö. (Pöyry Finland Oy, 2019).

Kuivattu liete voidaan hävittää polttamalla sellaisenaan tai yhdessä muiden polttoaineiden kanssa. Lietteen sisältämä fosfori sitoutuu tuhkaan, mutta ei ole kasveille helposti hyödynnettävässä muodossa. (Berninger et al. 2017) Yhdyskuntajätteen polttolaitoksella syntyvää tuhkaa voidaan hyödyntää, kun tuhka käsitellään metallien poistamiseksi. Käsiteltyä jätteenpolton tuhkaa voidaan käyttää väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa, jos se täyttää asetuksessa [843/2017](#) (ns. MARA-asetus) asetetut vaatimukset.

Pyrolyysissä orgaaninen aines jakaantuu kiinteään ja kaasufraktioon sekä höyryihin, jotka tiivistyvät jäähtyessään pyrolyysiöljyksi. Pyrolysointi pienentää merkittävästi lietteen tilavuutta ja massaa. Lietteen pyrolysointi vaatii ensin termisen kuivauksen. Pyrolysoitaessa lietettä pyritään yleensä tuottamaan hyödynnettävää pyrolyysihiiltä, jolloin käytetään tyypillisesti hidasta pyrolyysiä. Lietteestä valmistetun pyrolyysihiilen mahdollisia käyttökohteita voivat olla mm. käyttö maanparannusaineena, kompostoinnin lisäaineena, suodatusmateriaalina ja polttoaineena. Pyrolyysikaasujen kontakti kiintoaineen kanssa tulee minimoida, jotta kaasujen sisältämät haitta-aineet, erityisesti PAH-yhdisteet, eivät sitoutuisi hiilifraktioon. (Pöyry Finland Oy, 2019)

Jätevedenpuhdistamolietteen pyrolysoinnissa lämpötila-alue on tyypillisesti noin 450–650 °C ja viipymäaika noin 15–30 min. Tämän lämpötila-alueen valintaa tukevat seuraavat seikat:

- Orgaanisten haitta-aineiden ja lääkeaineiden pitoisuudet on valtaosin todettu vähäisiksi > 400 °C lämpötiloissa tehdyissä pyrolyysikokeissa.
- Valtaosa käytetyistä muoveista (> 95 %) hajoaa lämpötiloissa < 450 °C.
- Lämpötilan nostaminen mainitun alueen yläpuolelle lisää prosessin energiantarvetta ja vähentää orgaanisen hiilen määrää pyrolyysihiilessä.
- Olemassa olevat laitokset toimivat tällä lämpötila-alueella.
- Pyrolyysilaitteiden valmistajat suosittelevat prosessiparametreiksi tässä suuruusluokassa olevia lämpötiloja ja viipymäaikoja. (Pöyry Finland Oy, 2019)

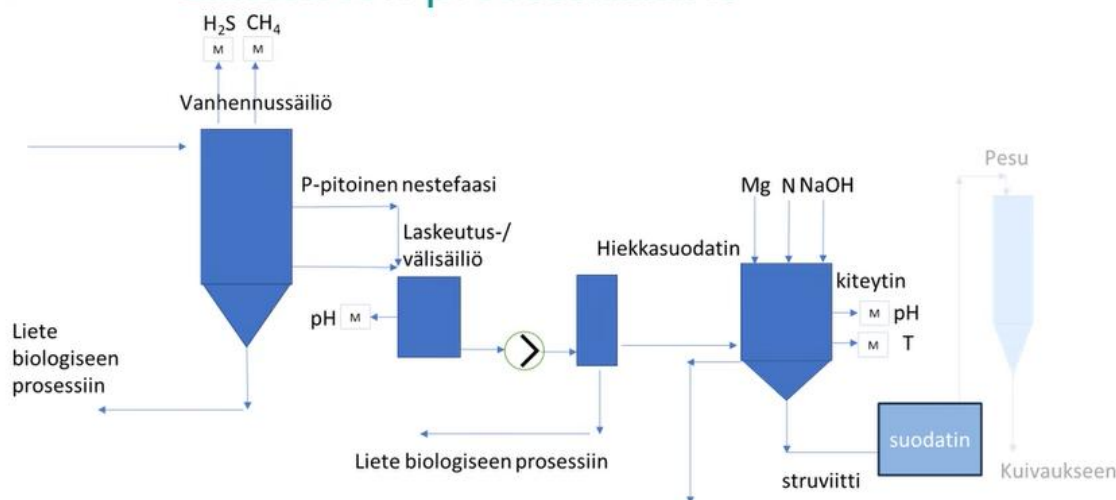
8.2 Case-esimerkit

8.2.1 Huittisten jätevedenpuhdistamo – Struviitin saostaminen

Huittisten jätevedenpuhdistamolla on käytössä biologinen käsittelyprosessi, jossa fosforia ei saosteta kemiallisesti, vaan jäteveden käsittelyolosuhteita muokkaamalla fosfori saostuu jätevedestä lietteeseen. Suomessa vielä harvinainen biologinen BioP-prosessi mahdollistaa struviitin saostamisen kesäaikaan ja tulvakausten ulkopuolella. Huittisilla biologinen prosessi on käytössä noin puolet vuodesta, ja muulloin fosforin poisto jätevedestä hoidetaan kemiallisella jälkisaostuksella prosessin loppuvaiheessa. (Taube & Puhakka, 2025)

Struviittia saostamalla saadaan lietteestä talteen laadukas lannoite, joka toimii perinteisiä tuotteita paremmin. Typeä, magnesiumia ja fosforia sisältävän struviitin ravinteet ovat kasveille helposti hyödynnettävässä muodossa, mikä vähentää vesistöjen ravinnekuormaa. Vaikka kyseessä on investointi, säästöjä syntyy kemikaalikulutuksen vähentyessä. Lisäksi lietteen massa kevenee, jolloin kuljetuskustannukset alenevat. (Taube & Puhakka, 2025)

Huittisten jätevedenpuhdistamolle on rakennettu pilot-laitteisto struviitin saostamiseen ja kehitystyötä on tehty useammassa hankkeessa, parhaillaan prosessia optimoidaan BioStruvi-hankkeessa. Pilot-laitokselle ohjataan lietettä vanhennussäiliöön, jossa fosfori liukenee lietteestä nestejakeeseen. Tämän jälkeen kiintoaines erotetaan nesteestä kahdessa vaiheessa. Nesteä jatkaa kiteytyssäiliöön, jossa struviitti kiteytyy säätämällä pH sopivaksi ja lisäämällä Magnesium-yhdistettä. Lopuksi tuote suodatetaan. Liette viipyy vanhennussäiliössä noin viikon ja koko prosessin kesto on 1,5–2 viikkoa. Tavoitteena on hallita vanhennusvaihetta paremmin ja nopeuttaa sen kestoa, jolloin tuotantosykli lyhentyy. (Taube & Puhakka, 2025)



Kuva 16. Struviitin saostamisen prosessikaavio.

Pilot-vaiheessa yhdestä tuotantoerästä syntyy noin 2 kg struviittia. BioStruvi-hankkeessa on laskettu teoreettiseksi struviitin tuotannoksi 11–38 tonnia puolen vuoden tuotantokyklin aikana. Nestefaasista saadaan talteen fosforia 87–97 % ja tyypeä 27–49 %. Struviittia on mahdollista kiteyttää eri osista jätevesiprosessia ja näin kasvattaa ravinteiden talteenoton kokonaissaantoa. (Taube & Puhakka, 2025)

Struviitin saostuksen kannattavuutta ei ole vielä laskettu tarkkaan. Arvion mukaan laitos olisi kannattava, mutta takaisinmaksuaika asettunee lähemmäs kymmentä vuotta. Myös struviitin markkina-arvon määrittely on melko ongelmallista, paikallisten viljelijöiden kanssa on syytä käydä keskusteluja ja tehdä markkinatutkimusta. (Taube & Puhakka, 2025)

Taulukko 29. Struviitin saostamisen hyödyt ja haasteet.

Plussat	Miinukset
• Syntyy laadukasta lannoitetta: helposti kasvien hyödynnettävissä • Struviitti vähentää ravinnevalumaa vesistöön • Kemikaalien kulutus vähenee muihin menetelmiin verrattuna • Lieite on kevyempää ja siten edullisempaa kuljettaa • Markkinoilta on saatavissa konttiratkaisuja, joten prosessi on skaalattavissa	• Ei sovellettavissa suoraan suurimmalle osalle puhdistamoista, sillä tarvitaan biologinen käsittelyprosessi • Struviitin saostaminen vaatii vielä kehitystyötä: • Struviitti saostuu toistaiseksi hienojakoisena, kun käyttökelpoisempi muoto on raekooltaan suurempaa • Prosessin läpimenoaikaa on syytä lyhentää

8.2.2 Haapaveden jätevedenpuhdistamo – jätevedenpuhdistamolietteen terminen kuivaus ja poltto

Haapaveden jätevedenpuhdistamolla jätevedenpuhdistamoliette kuivataan ensin lingolla, jonka jälkeen se kuljetetaan lietteen kuivaamolle termistä kuivausta varten. Termisen kuivauksen jälkeen kuivat jätevedenpuhdistamolietterakeet poltetaan Nevel Oy:n voimalaitoksessa. Haapavedellä jätevedenpuhdistamolietettä muodostuu vuodessa n. 5 200 t. Haapavedellä päädyttiin aikanaan lietteen kuivaukseen ja polttoon lietteen suuren määrän vuoksi, sillä kompostille olisi ollut haastava löytää riittävästi käyttökohteita. Mädätys oli silloin teknologiana hyvin uusi. Lisäksi kunnan kaukolämpö ja Valio tarvitsivat uuden energiaratkaisun, mikä sai Vapon rakentamaan voimalaitoksen. Kuivaamon rakennustyöt aloitettiin vuonna 2004. Kuivaamoinvestointia, kuivausta ja sen operointia varten perustettiin oma yhtiö. (Orava, 2025)

Terminen kuivaus suoritetaan Veolian/Krügerin BioCon-nauhakuivurilla, jossa on kolme kuivauskammia. Ensimmäisessä kammiossa kuivausilman lämpötila on 180 °C, toisessa ja kolmannessa 100 °C. Lietteen viipymäaika kuivurissa on 1 h. Kuivauskapasiteetti on 1,8–2,2 t/h, riippuen lietteen laadusta. Lingolla kuivatun ja termiseen kuivaukseen syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee 9–13 % välillä. (Orava, 2025; Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2019)

Kuivausprosessin energianlähteenä käytetään kuivaamon vieressä toimivan Nevel Oy:n voimalaitoksen höyryä, josta lämpö siirretään lämmönvaihtimilla kuivausilmaan. Kuivattu jätevedenpuhdistamoliette poltetaan samassa voimalaitoksessa. Kuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuus on n. 90 % ja lämpöarvo on ollut 2,5–3,0 MWh/t. Lietteestä on saatu noin 35 % kuivauksen kuluttaman höyryn energiasta. Kuivatulla lietteellä on hyväksyntä lannoitevalmisteenä. (Orava, 2025; Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2019)

Taulukko 30. Terminen kuivaus ja poltto -käsittelyketjun plussat ja miinukset (Orava, 2025).

Plussat	Miinukset
• Lietteen määrä pienenee merkittävästi, siitä päästään kokonaan eroon • Ei negatiivisia julkisuustekijöitä, mm. haju- ja pölyhaittoja tai kasoja • Haitta-aineet eivät ole vaaraksi ympäristölle, mm. mikromuovit • Liette hygienisoituu hyvin • Kuivattu jätevesirae mahdollista hyödyntää lannoitteena • Poltossa saadaan energiaa talteen	• Ravinteiden häviäminen • Käsittelyn kustannukset, noin 2-3 kertaa kalliimpaa kuin mädättäminen • Kuivauksessa korroosio aiheuttaa huolto- ja uusimistarpeita • Poltossa haasteena ympäristölupa-ehtojen päästöarvot. Voivat katkoa polttoa, jolloin lietettä voidaan joutua varastoimaan

Haapaveden puhdistamolla ei ollut tietoa siitä, miten Nevel Oy käsittelee tuhkan polton jälkeen. Nevel Oy:n ympäristöluvan (PSAVI/5200/2020, nro 40/2023) mukaisesti ”Lento- ja pohjatuhkan haitta-ainepitoisuudet ja liukoisuudet sekä hyötykäyttö- ja kaatopaikkakelpoisuus tutkitaan säännöllisesti vähintään kerran vuodessa. Kaikki toiminnassa muodostuva lento- ja pohjatuhka pyritään ohjaamaan ensisijaisesti hyötykäyttöön.” (PSAVI, 2023)

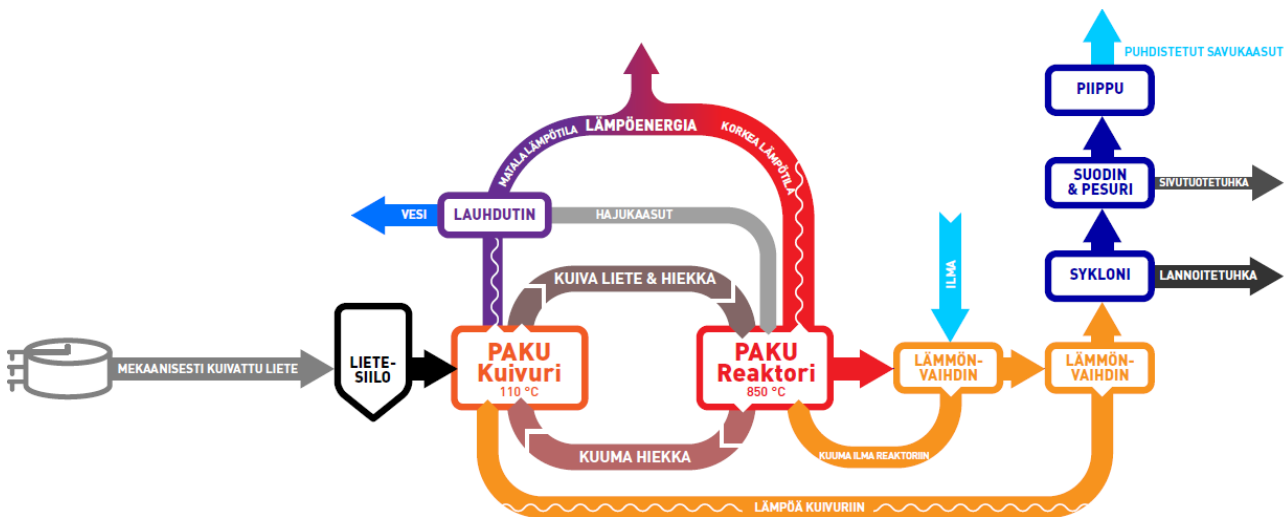
Teknologian kehittymisen suhteen Haapavedellä nähtiin, että jos yhdyskuntalietteen käsittelyvaatimukset tiukkenevat esim. haitta-aineiden takia, niin poltto saattaa yleistyä. Jollei poltto tule pakolliseksi lainsäädännön vaatimusten puitteissa, niin teknologialla ei nähdä tulevaisuutta kalliiden kustannusten vuoksi. Lietteen käsittelyn kilpailutuksissa mädättäminen on menestynyt hyvin. (Orava, 2025)

8.2.3 Rovaniemen jätevedenpuhdistamo – PAKU -prosessi

Rovaniemen jätevedenpuhdistamoilla syntyy vuodessa n. 8 000 t jätevedenpuhdistamolietettä. Viime vuosina lietteestä on käsitelty noin puolet PAKU-prosessissa ja lähivuosien tavoitteena on koko lietemäärän käsittely menetelmällä. PAKU-prosessi otettiin käyttöön Rovaniemellä vuonna 2019. (Pekkala, 2025)

PAKU-prosessi koostuu kahdesta leijupetikattilasta, joista toisessa tapahtuu lietteen kuivaus ja toisessa poltto. Jätevedenpuhdistamolta pumpataan lingolla 23 % kuiva-ainepitoisuuteen kuivattu jätevedenpuhdistamoliete kuivaukseen. Kuivausvaiheessa lämpötila on 110 °C ja lietteen sekaan sekoitetaan kuumaa hiekkaa. Liete kuivataan 95 % kuiva-ainepitoisuuteen ja lietteen lämpöarvo on ollut n. 4,5–5 MWh/t. (Pekkala, 2025; Laasonen, 2025)

Kuivauksesta hiekan ja lietteen seos johdetaan polttoyksikköön, jossa lämpötila on 850 °C ja lietteen viipymä muutamia minuutteja. Hiekka palautetaan poltosta kuivaukseen. PAKU-prosessi on lähes energiaomavarainen, mutta käynnistysvaiheessa (ensimmäiset 20 h) tarvitsee riittävien lämpötilojen saavuttamiseksi hieman nestekaasua ja polttoöljyä. Prosessi tuottaa ylijäämlämpöä n. 6000 MWh vuodessa, joka hyödynnetään kaupungin kaukolämpöverkossa. (Pekkala, 2025; Laasonen, 2025)



Kuva 17. PAKU-prosessin toimintaperiaate (Endev Oy, 2025).

Prosessissa syntyy fosforipitoista tuhkaa, joka olisi hyödynnettävissä lannoitteena. Tuhkassa oleva fosfori on hitaasti liukenevaa, jolloin se olisi optimaalinen metsäravinne. Rovaniemeltä löytyy valmiina rakeistamo, mutta ongelmana on liian vähäinen tuhkan määrä. Ajatuksena on ollut rakeistaa PAKUssa ja läheisellä polttolaitoksella syntyvä tuhka metsälannoitteeksi, mutta tällä hetkellä se ei onnistu polttolaitoksella poltettavien materiaalien vuoksi. Lisäksi lainsäädännön muutokset tuovat haasteita lannoitekäyttöön. Tulevaisuuden visiona on rakentaa toimiva arvoketju metsälannoituspuolelle. Tällä hetkellä tuhka varastoidaan, jotta se voidaan tulevaisuudessa hyödyntää. (Pekkala, 2025; Laasonen, 2025)

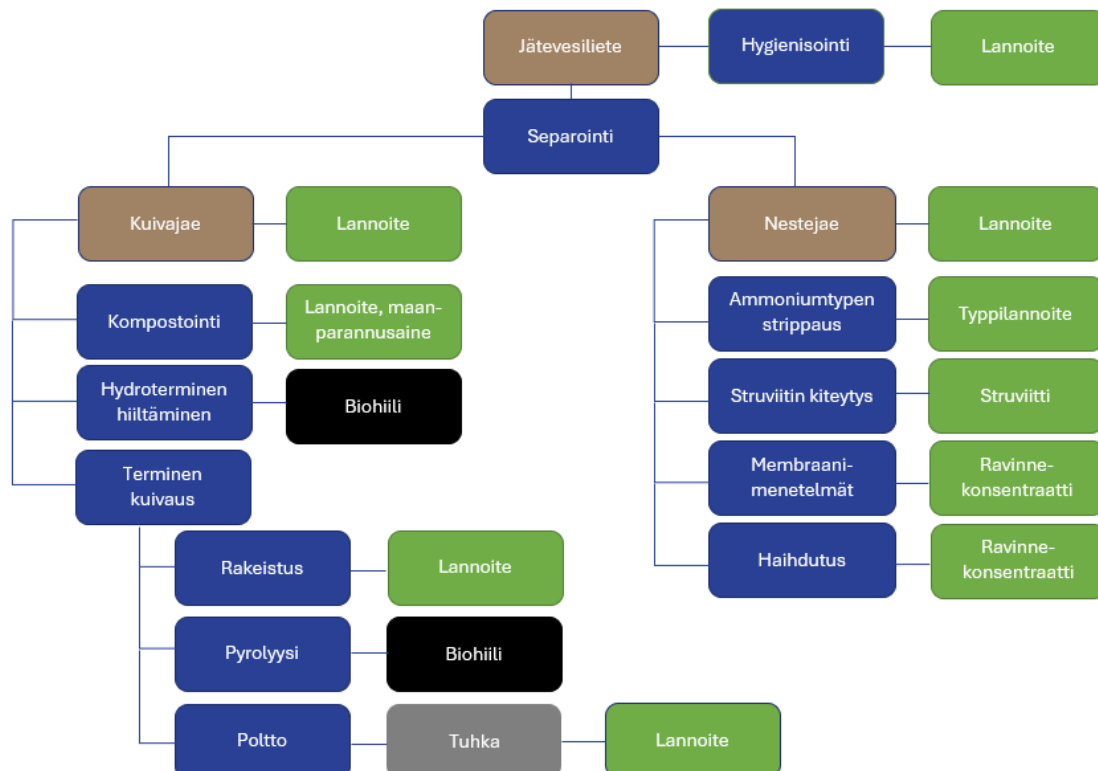
PAKU-prosessin lisäksi Rovaniemeltä viedään jätevedenpuhdistamolietettä ympäryskuntiin useisiin käsittelypaikkoihin ja esimerkiksi osa siitä mädätetään. Kuitenkin suhteellisen pienille ja vaihteleville lietemäärille biokaasulaitosten porttimaksut sekä kuljetus ovat merkittävä osa lietteen käsittelykustannusta. Rovaniemellä PAKU-prosessi on kustannuksiltaan kannattavin jätevedenkäsittelymenetelmä. (Pekkala, 2025; Laasonen, 2025)

Taulukko 31. PAKU-prosessin plussat ja miinukset.

Plussat	Miinukset
• Käynnistysvaihetta lukuunottamatta energiaomavarainen • Haitta-aineet häviävät • Fosforipitoinen tuhka mahdollista hyödyntää lannoitteena • Ylijäämälämpö voidaan hyödyntää kaukolämpönä • Kustannustehokas ratkaisu Rovaniemen lietemäärille	• Typpi hukataan prosessissa • Uuden teknologian haasteet • Tavoitteena saada varmatoimisemmaksi • Polttoa koskevat samat päästöraja-arvot kuin suurta jätepolttolaitosta

8.3 Tulevaisuuden visiot jätevedenpuhdistamolietteen käsittelylle

Suomessa on pitkään käytetty yhdistelmää, jossa kemiallinen ja biologinen puhdistus täydentävät toisiaan, ja jätevedenpuhdistamoliete käsitellään pääsääntöisesti anaerobisesti mädättämällä. Lietteen mädätyksen suosio on kasvanut, sillä se tarjoaa mahdollisuuden biokaasun tuotantoon ja ravinteiden kierrätykseen. Käsittelyketjun haasteena on kuitenkin mädätysjäännöksen peltokäyttö, sillä lainsäädäntö ja elintarviketeollisuus voivat asettaa rajoituksia yhdyskuntajätevesillä lannoitettujen peltujen ravinnontuotantokäyttöön.



Kuva 18. jätevedenpuhdistamolietteen mahdollisia käsittelyketjuja ja ravinteiden talteenotto-mahdollisuuksia.

EU:n päivitetyn jätevesidirektiivin myötä jätevedenkäsittelyn vaatimukset tulevat tiukentumaan, erityisesti ravinteiden poiston ja energiatehokkuuden osalta. Uusina vaatimuksina mukaan tulee myös mikroepäpuhtauksien poisto, joka vaatii teknologisia päivityksiä puhdistamoilta. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2024)

Jätevedenpuhdistamolietteen käsittelyssä on kehitteillä useita uusia menetelmiä, jotka ovat jo pilotointivaiheessa, mutta eivät vielä laajassa käytössä. Näiden menetelmien teknologian valmiustasot vaihtelevat, mutta ne tarjoavat lupaavia mahdollisuuksia lietteen hyödyntämiseen.

8.3.1 Teknologioita struviitin kiteytykseen

Struviitiksi kiteyttäminen on suositeltavaa etenkin jätevedenkäsittelylaitoksille, joissa on tehostettu fosforin biologinen erottaminen (EBPR) sekä mädättäminen, sillä mädätyksen aikana biologisesti poistettu fosfori vapautuu uudelleen nestefaasiin fosfaatiksi. Mädätetyn lietteen kuivauksesta jäävä liuos eli rejekti sisältää suuria määriä fosforia, ammoniumia sekä magnesiumia, mikä mahdollistaa fosforin kierrätyksen struviittikiteytyksen avulla. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016)

- **MagPrex (ent. AirPrex)** -prosessi koostuu kahdesta peräkkäisestä jatkuvatoimisesta reaktorista ja niissä muodostuu struviittikiteitä. Ensimmäisessä reaktorissa on kaksi osaa, sisäosassa tapahtuu mädätetyn lietteen ilmastus ja ulommassa osassa laskeutus. Lisäksi struviitin muodostumiseen tarvittava magnesium lisätään tähän reaktoriin. Ensimmäisessä reaktorissa laskeutetaan isoimmat struviittikiteet ja toisessa reaktorissa loput, pienimmät kiteet. Menetelmä on käytössä täydessä mittakaavassa. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016)
- **The Ostara Pearl** -prosessin lopputuotteena saadaan struviittilannoitetta, joka sisältää 5 % typpeä, 28 % fosforia ja 10 % magnesiumia. Struviitin kiteytyksessä hyödynnetään siemenkiteitä. Struviitti saadaan kiteytymään lisäämällä magnesiumkloridia ja prosessin pH säädetään natriumhydroksidin avulla arvoon 7,2–8. Menetelmä on käytössä täydessä mittakaavassa. (Finnilä, 2018)
- **NuReSys** -prosessin toimintaperiaate perustuu kahteen reaktoriin, joissa ensimmäisessä reaktorissa lietteen tai rejektiveden pH nostetaan syöttämällä tankkiin ilmaa. Toiseen reaktoriin lisätään magnesiumkloridia, jolloin magnesium reagoi fosforin ja typen kanssa muodostaen struviittirakeita. NuReSys-prosessi poistaa lietteen fosforia 80 prosenttisesti. Menetelmä on käytössä täydessä mittakaavassa. (NuReSys, 2025)
- **PHOSPAQ**-prosessissa on ilmastettu täyssekoitusreaktori, johon käsiteltävä vesi syötetään reaktorin alaosaan ja magnesiumkemikaalina käytettävä MgO reaktorin yläosaan. Lisäksi prosessin pH säädetään välille 8,2–8,3 ilmastuksen avulla. Saostuneet struviittipartikkelit erotetaan nestefaasista hydro syklonin avulla. Menetelmä on käytössä täydessä mittakaavassa. (Huusko, 2023)
- **ANPHOS**-teknologia on panosprosessi, joka koostuu kahdesta prosessivaiheesta: strippaus- ja reaktiosäiliöstä. Strippaussäiliössä jätevedestä poistetaan hiilidioksidiä ja nostetaan sen pH-arvoa. Sen jälkeen vesi pumpataan reaktiosäiliöön, jossa veteen lisätään magnesiumia struviitin kiteyttämiseksi. Struviitti laskeutuu reaktorin pohjalle. (Colsen, 2025)

8.3.2 Muita kiteytykseen perustuvia menetelmiä:

- **CalPlex** -prosessissa fosfori saostetaan fermentoidusta lietteestä kalsiumhydroksidin avulla brushiittina ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Menetelmä toimii lietteille, jotka on käsitelty biologisella fosforinpoistolla. (Centrisys, 2025)
- **Crystalactor** -prosessin päätuotteena on kalsiumfosfaatti, mutta käyttämällä eri saostuskemikaaleja, voidaan tuotteena saada myös sinkkifosfaattia tai struviittia. Siemenkiteinä prosessissa toimii hiekka tai mineraaleista valmistetut kiteet. (Finnilä, 2018)
- **P-Roc** -prosessissa biologiseen fosforinpoistoon yhdistetään fosforin talteenotto kalsiumfosfaatiksi kiteyttämisen avulla. Kiteytyksessä käytetään hyödyksi kalsium-silikaattihydraattipellettejä. Fosforin talteenottotehokkuus on 30–45 %. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016; Kinnarinen, 2022)

8.3.3 Polttotekniikoita:

- **MEPHREC** -prosessissa jätevesiliete kuivataan 80 % kuiva-ainepitoisuuteen ja puristetaan briketeiksi kuonaa muodostavien aineiden ja koksen kanssa. Prosessin välituotteena syntyvät briketit jatkokäsittellään kuilu-uunissa 1450–2000 °C lämpötilassa ja lopputuotteena saadaan fosforipitoinen kuonafraktio (sis. mm. piifosfaattia), jonka mukana n. 80 % fosforista saadaan talteen. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016; Kinnarinen, 2022)

8.3.4 Tuhkan käsittelytekniikoita:

- **ASH DEC** on termokemiallinen prosessi, jossa fosfori otetaan talteen lisäämällä tuhkan sekaan magnesium- ja kalsiumkloridia ja antamalla niiden reagoida 20–30 minuuttia 800–1050 °C:ssa. Fosforin talteenottoasteeksi saadaan 90–98 %. Menetelmässä raskasmetallit höyrystyvät pois ja lopputuote on fosforirikas tuhka. Menetelmää on testattu pilot-mittakaavassa. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016; Kinnarinen, 2022)
- **PASH** -prosessi perustuu lietteenpolton tuhkan uuttoon suolahapolla, minkä jälkeen struviittia ja kalsiumfosfaattia saostetaan kalkilla uuttoliuoksesta n. 90 % tehokkuudella. Menetelmää on testattu pilot-mittakaavassa. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016; Kinnarinen, 2022)
- **SEPHOS** -menetelmässä lietteenpolton tuhkaa uutetaan ensin rikkihapolla, minkä jälkeen pH:ta nostetaan natriumhydroksidilla ja alumiinifosfaattipitoinen sakka otetaan talteen. (Kinnarinen, 2022)
- **THERMPHOS** -menetelmässä elektrotermisellä prosessilla saadaan lietteenpolton tuhkasta fosforia talteen. Prosessi ei sovellu runsaasti rautaa sisältäville lietteille, joten sen soveltaminen Suomen olosuhteissa ei ole järkevää. (Kinnarinen, 2022)
- **BioCon** -prosessissa tuhkaa uutetaan rikkihapolla ja uuttoliuosta käsitellään ioninvaihdolla. Tuotteena on fosforihappo. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry, 2016; Kinnarinen, 2022)

8.3.5 Muita menetelmiä:

- **Aqua Reci** -prosessissa lietettä hapetetaan ylikriittisellä vedellä korkeassa lämpötilassa ja paineessa (> 221 bar ja > 374 °C), jolloin orgaaninen hiili hajoaa CO_2 :ksi, typpi N_2 :ksi ja fosfori hapettuu P_2O_5 :ksi.

Fosforin talteenotto suoritetaan seuraavassa prosessivaiheessa saostamalla fosfaattia joko CaO:lla tai MgO:lla. (Kinnarinen, 2022)

8.4 Lainsäädännön kehitys ja sen vaikutukset

EU:n uusi yhdyskuntajätevesidirektiivi ([\(2024/3019\)](#)) asettaa tiukempia vaatimuksia jätevedenpuhdistamolietteen käsittelylle, erityisesti ravinteiden poiston ja talteenoton sekä energiatehokkuuden osalta. Esimerkiksi fosforin talteenotto tulee olemaan keskeisessä asemassa, sillä direktiivi tulee asettamaan vähimmäistavoitteita fosforin kierrätykselle, ottaen kuitenkin huomioon käytettävissä olevat teknologiat ja resurssit sekä fosforin talteenottamisen taloudellisen kannattavuuden. Lisäksi direktiivi tuo vaatimuksia mikroepäpuhtauksien, kuten raskasmetallien, mikromuovien, lääkejäämien ja kemiallisten aineiden poistolle.

8.5 Ympäristölliset ja taloudelliset näkökulmat

Tulevaisuuden jätevedenpuhdistamolietteen käsittelyssä korostuvat kiertotalous ja ympäristöystävällisyys. Keskeisinä tavoitteina ovat arvokkaiden ravinteiden talteenotto ja kierrätys, haitallisten aineiden kulkeutumisen estäminen ympäristöön ja ruokaketjuun sekä jätevedenkäsittelyn energiatehokkuus. Ravinteiden, kuten fosforin ja typen tehokas kierrättäminen vähentää luonnonvarojen kulutusta ja keinolannoitteiden tarvetta. Tämä parantaa huoltovarmuutta ja edistää maatalouden kestävyyttä. Määdätyksessä syntyvällä biokaasulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, mikä mahdollistaa hiilijalanjäljen pienentämisen. (SYKE, 2022). Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna jätevedenkäsittelyyn liittyvistä lainsäädännön vaatimuksista ja ympäristöllisistä näkökulmista nousee esiin seuraavia mahdollisuuksia:

Ravinteiden talteenotto ja kierrätys:

- Mahdollinen tulovirta myytävistä ravinteista
 - Mahdollisia myytäviä ravinteita sisältäviä tuotejakeita: mädätysjäännös, komposti, biohiili, struviitti, ravinnekonstraatti sekä erilaiset tuotteistetut lannoitevalmisteet
 - Yhteiskunnallisesti vähentää riippuvuutta keinolannoitteista sekä parantaa huoltovarmuutta, mitkä vähentävät riskejä lannoitteiden suurille hinnanvaihteluille ja toimitusketjujen häiriöille
- Käsittelyprosessin tehokkuuden paraneminen
 - Ravinteiden ja mikroepäpuhtauksien poistovaatimukset voivat vaatia uusien teknologioiden käyttöönottoa ja investointeja, mitkä voivat tehostaa jätevedenkäsittelyprosessia
 - Esimerkiksi vähentää kemikaalien tarvetta prosessissa
- Porttimaksut ja jätevedenkäsittelymaksut
 - Lainsäädännön vaatimusten tiukentuminen voi vaatia investointien tekemistä, jolloin hintojen nosto on usein perusteltua

Energiatehokkuus:

- Osa jätevedenkäsittelyteknologioista tuottaa uusiutuvaa energiaa, jolla voi korvata (fossiilisen) ostoenergian määrää
- Osa jätevedenkäsittelyteknologioista voi tuottaa esim. hukkalämpöä, jonka voi myydä sitä tarvitsevalle lähellä sijaitsevalle taholle
- Jätevedenkäsittelyprosessin energiatehokkuuden paraneminen vähentää energiankulutusta ja siten ostettavan energian määrää

9 Johtopäätökset ja suositukset

Biohiili on laaja tuoteryhmä, jonka ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi raaka-aineen, tuotantoprosessin ja pyrolyysin olosuhteiden mukaan. Biohiilen monipuolisuus mahdollistaa sen käytön useilla eri sektoreilla. Potentiaalisimmat käyttökohteet ovat maa- ja metsätalous, viherrakentaminen ja hiilensidonta. Biohiilen hyödyntäminen maaperäkäytössä tarjoaa merkittäviä ympäristöhyötyjä, mutta sen käyttöä hidastavat muun muassa lainsäädäntö ja markkinoiden kehittymättömyys.

Mikäli jätevedenpuhdistamolietteestä ja biojätteestä tuotetaan biohiiltä, tulee ottaa huomioon erityisesti esikäsittelyn tarve sekä lainsäädäntö. Jätevedenpuhdistamolietteestä valmistettua biohiiltä voidaan hyödyntää maaperäkäytössä, kunhan se täyttää lainsäädännön määrittämät käsittely- ja haitta-ainevaatimukset. Erilliskerätty biojäte kuuluu EU:n sivutuoteasetuksen piiriin, jossa pyrolyysiä ei ole sallittu käsittelymenetelmänä Suomessa. EU:n asetuksen tulkinta voi kuitenkin vaihdella jäsenmaittain. Ruokaviraston mukaan erilliskerättyä biojätettä ei voi käyttää ainesosana biohiilen valmistuksessa Suomessa.

Jätevedenpuhdistamolietteelle tyypillinen käsittelymenetelmä on hidaspyrolyysi, jolloin päätuotteena saadaan biohiiltä. Lietehiilen tuotannossa erityisenä haasteena on sen suuri kosteuspitoisuus, jolloin tuotantokustannukset kasvavat kuivauksen myötä. Lisäksi suuret raskasmetalli- ja PAH-yhdistepitoisuudet biohiilessä voivat rajoittaa biohiilen käyttömahdollisuuksia, mikä havaittiin myös pilottitutkimuksessa tuotetun biohiilen kohdalla.

Kannattavuuslaskelman perusteella biohiililaitoksen nykyinen liiketoimintamalli ei ole taloudellisesti kannattava, sillä investoinnin nettonykyarvo on negatiivinen. Merkittävin tulonlähde on vältetty jätteenkäsittelykustannus, mutta biohiilen myynnin ja CO₂-kompensaatiomarkkinoiden kehittyminen voivat parantaa kannattavuutta tulevaisuudessa. Lisäksi kannattavuus paranee, jos jätteiden käsittelykustannus kasvaa tulevaisuudessa. Muita lisätuloja laitokselle olisi mahdollisesti saatavissa kuivauksessa syntyvän vesihöyryn hukkalämmön hyödyntämisestä sekä kuivauksen sivuvirtana syntyvän ammoniumsulfaatin kaupallistamisesta. Hukkalämmön hyödyntämiseen on ainakin kaksi vaihtoehtoa: hukkalämmön hyödyntäminen biohiililaitoksen todennäköisen sijaintipaikan, Kuubion alueella tai lämpövirran ohjaaminen kahden kilometrin päässä sijaitsevaan kaukolämpöverkkoon. Hukkalämmön hyödyntämisvaihtoehtojen kustannusvertailu vaatii tarkempaa laskentaa.

Kuusamon biohiililaitoksen kehittämisen kannalta on keskeistä seurata lähitulevaisuudessa toimintaympäristön muutoksia:

- Syntykö paikallista biohiilen kysyntää
- Tuottaako yhteistyö naapurikuntien kanssa lisää syötevolyyymia laitoksen kapasiteetin kasvattamiseksi
- Muuttuuko nykyinen jätteenkäsittelykustannus
- Aleneeko teknologian kustannustaso
- Kehittykö ja vakiintuuko hiilensidonnan markkinapaikka
- Onko lainsäädännön puitteissa mahdollista saada erilliskerätty biojäte mukaan biohiilen raaka-ainevalikoimaan

10 Lähteet

- Aalto yliopisto 2024. Helsingin biohiilihanke. Verkkosivu, saatavilla: <https://www.aalto.fi/fi/muotoilun-laitos/helsingin-biohiilihanke>
- Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee S S ja Ok Y S. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review, *Chemosphere*, Vol 99, 19-33.
- Alainen, T. 2025. Ylitarkastaja, Kasvien tuonti- ja lannoitejaosto, Ruokavirasto. Erilliskerätty biojäte biohiilen raaka-aineena / soveltuvuus maaperäkäyttöön? Sähköpostiviesti 23.1.2025. Vastaanottaja: Tuuli Pohjola.
- Bayar, J., Ali, N., Dong, Y. *et al.* 2024. Biochar-based adsorption for heavy metal removal in water: a sustainable and cost-effective approach. *Environ Geochem Health* 46, 428.
- Berninger, K., Phil, T., Kasanen, P., Mikola, A., Tynkkynen, O. & Vahala, R. 2017. Jätevesien fosfori hyötykäyttöön – teknologioita ja ohjauskeinoja. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 62/2017. Valtioneuvoston kanslia.
- Bioenergia ry. 2024. Biohiili. Verkkosivu. Saatavilla: <https://www.bioenergia.fi/biohiili/>
- Bridgewater, AV. ja Peacocke, GVC. 2000. Fast pyrolysis processes for biomass. Elsevier, vol. 4 (1), s.1-73.
- Cao, C. T., Farrell, C., Kristiansen, P. E., Rayner, J. P. 2014. Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*, 71, 368-374.
- Campuzano F, Brown RC, Martínez JD. 2019 Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renew Sustain Energy Rev*, 102:372–409.
- Carbons. 2024. Tuotekortti, biohiilien laatukriteerit. Verkkodokumentti. Saatavilla: <https://carbons.fi/wp-content/uploads/2023/01/Carbons-BIOHIILIEN-LAATUKRITEERIT-TUOTEKORTTI-.pdf>
- Centrisys. 2025. Pre-Digestion P-Recovery. Verkkosivu, saatavilla: <https://www.centrisys-cnp.com/calprex>
- Colsen. 2025. P-recovery with struvite. Verkkosivu, saatavilla: <https://www.colsen.nl/en/services/p-recovery-struvite>
- Dahlquist, E. 2013. Technologies for Converting Biomass to Useful Energy, Taylor & Francis Group.
- dos Reis, G.S., Adebayo, M.A., Sampaio, C.H. *et al.* 2017. Removal of Phenolic Compounds from Aqueous Solutions Using Sludge-Based Activated Carbons Prepared by Conventional Heating and Microwave-Assisted Pyrolysis. *Water Air Soil Pollut* 228, 33
- EBC. 2023. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Carbon Standards International (CSI), Frick, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 10.3 from 5th Apr 2022.
- EBC. 2024. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Carbon Standards International (CSI), Frick, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 10.4 from 20th Dec 2024.

EBI. 2024. What is Biochar? Verkkosivu. Saatavilla: <https://old.biochar-industry.com/biochar/>

Endev Oy. 2025. Endev-prosessi. Verkkosivu, saatavilla: <https://www.endev.fi/paku-prosessi/>

Energiavirasto. 2024. Päästökaupan huutokauppatulot 418 miljoonaa euroa. Verkkosivu, saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/paastokaupan-huutokauppatulot-418-miljoonaa-euroa>

Eurofins. 2024. Tutkimustodistus, AR-24-GQ-007150-01. Näytteen nimi: Biohiili. Näytenumero: 748-2024-00011242. Päivämäärä 13/12/2024. Toimitettu: jenna.finnila@feasib.com. Feasib Oy, Jenna Finnilä.

European Biochar Market Report. 2023–2024. Saatavilla: <https://old.biochar-industry.com/2024/european-biochar-market-report-2023-2024-available-now/>

Finnilä, J. 2018. Anaerobisen jätevedenkäsittelyn jälkeinen fosforin ja typen talteenotto. Kandidaatintyö. Kemianteekniikka. LUT-yliopisto.

Helsingin yliopisto. 2022. Biohiili voi olla lupaava keino hillitä maatalouden ympäristövaikutuksia. Verkkosivu Saatavilla: <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/ilmastonmuutos/biohiili-voi-olla-lupaava-keino-hillita-maatalouden-ymparistovaikutuksia>

HSY. 2024. Helsingin seudun ympäristöpalvelut. Prosessikuvaus. Saatavilla: <https://www.hsy.fi/lietehiilihanke/prosessi/>

Huusko, M. 2023. Ravinteiden saostaminen struviittina biokaasulaitosten rejektivesistä. Pro gradu -tutkielma. Kemian tutkinto-ohjelma. Oulun yliopisto.

Huusko, S. 2024. Vaasassa pyöräillään pian biohiilellä. Power Point-esitys. Saatavilla: <https://oulu.com/kiertotalousklusteri/>

IBI. 2023. Certification Program. Verkkosivu. Saatavilla: <https://biochar-international.org/standard-certification-training/certification-program/>

Ippolito, J-A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J-M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M-L., Sigua, G., Novak, F., Spokas, K., Borchard, N. 2020. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. Biochar Volume 2, s. 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>

Irish Farmers Journal. 2023. Biochar making €300 to €2,000 per tonne. Verkkosivu, saatavilla: <https://www.farmersjournal.ie/news/news/biochar-making-300-to-2-000-per-tonne-763428>

Isokääntä, J. 2024. Toimitusjohtaja. SFTec. Haastattelu 19.9.2024.

Juva, K. 2023. Biohiilituotantoa maataloille – sääntelyn aakkosia biohiilialasta kiinnostuneille. ProAgria, KieMaRa-hanke. Verkkosivu. Saatavilla: <https://www.proagria.fi/blogit/ilmasto-muutoksessa/biohiilituotantoa-maatiloille-saantelyn-aakkosia-biohiilialasta-kiinnostuneille>

Kavan Kumar V ja Panwar N L. 2024. Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review, *Clean Energy*, Vol 8, (4) s. 61–78.

Kazawadi, D., Ntalikwa, J. ja Kombe K, 2021. A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar, ProQuest, vol. 21, s. 1-10.

Kemira. Kemira KemiCond – Superior sludge conditioning. Saatavilla: <http://www.kemifloc.cz/userfiles/Kemira%20KemiCond.pdf>

Kinnarinen, T. 2022. LieteKierto-hankkeen loppuraportti. LUT Scientific and Expertise Publications, Tutkimusraportit – Research Reports, 119. LUT yliopisto.

Kinnunen V., Kymäläinen M, Tiainen S., Koskela O., Honkasaari M., Järvi S, Kunttu I., Somersalo V., Vartiainen P., Alhonoja K., Karjala R., Alarotu, M. ja Mykkänen E., 2021, Jäteveden ravinteet keskittäen kiertoon. Järkki-hankkeen loppuraportti.

Kinnunen, V. 2025. Senior Process Engineer, Gasum Oy. Haastattelu 16.1.2025.

Knaapi J., 2019. Pyrolyysiöljyn kemikaalit ja jalostus polttonesteiksi vetykäsittelyllä. Kandinaatintyö. Tampereen yliopisto, Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta.

Koivusalo, H., Dubovik, M., Wendling, L., Assmuth, E., Sillanpää, N., & Kokkonen, T. (2023). [Performance of Sand and Mixed Sand–Biochar Filters for Treatment of Road Runoff Quantity and Quality](#). *Water*, 15(8), 1631.

Kymäläinen, M., Elo, A. & Kainulainen A. 2020. Biohiilellä monia kytkentöjä biokaasutuotantoon. Biokierto ja biokaasu 1/2020. Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Saatavilla: https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/11/Biokierto-ja-Biokaasu_01_2020.pdf

Laasonen, A. 2025. Talousjohtaja, Endev Oy. Haastattelu 31.1.2025.

Maa- ja metsätalousministeriön (MMM) asetus lannoitevalmisteista 964/2023. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230964#Pdm46263583038816>

Mendler. 2012. Positionspapier zur hydrothermale Carbonisierung (HTC-Verfahren). Hunziker Betatech AG 11. Winterthur, Dezember 2012.

Mikkola, P. 2024. Jätteen pyrolyysilaitoksen ympäristölupa – opas toiminnanharjoittajille ja lupa- ja valvontaviranomaisille, Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Raportteja 6/2024.

Määttä, J. 2025. Sähköpostiviesti 14.2.2025. Vastaanottaja: Tuuli Pohjola.

Määttä, K. 2024. Biohiili liiketoiminnan kehittäminen Suomessa. Diplomityö. Oulun yliopisto.

Niemistö, J., Seppälä, J., Karvonen, J. & Soimakallio, S. 2021. Päästökompensaatiot ilmastonmuutoksen hillinnän keinona Suomessa – nyt ja tulevaisuudessa. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:12.

Noki, J. 2022. Kompensaatiokäyttöön tuotetun biohiilen arvoketjun kiertotalousmalli. Opinnäytetyö. Lappeenranta–Lahden teknillinen yliopisto LUT.

NuReSys. 2025. Technology. Verkkosivu, saatavilla: <https://nuresys.com/technology/>

Orava, H. 2025. Käyttöpäällikkö, vedenkäsittely, Pohjois-Suomi. Operon Finland Oy. Haastattelu 13.1.2025.

Pekkala, S. 2025. Vesiliiketoiminnan johtaja, Neve Oy. Haastattelu 23.1.2025.

Pradhan, S., Parthasarathy, P., Mackey, H.R. *et al.* 2024. Food waste biochar: a sustainable solution for agriculture application and soil–water remediation. *Carbon Res.* 3, 41.

PSAVI. 2023. Haapaveden voimalaitoksen toiminnan olennainen muuttaminen. Nevel Oy. Lupapäätös nro 40/2023. Dnro PSAVI/5200/2020. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto 16.3.2023. Saatavilla: <https://dynasty.haapavesi.fi/djulkaisu/kuulutus/6381456083946545121.1678956839659.PDF>

Puro.earth. 2025. CORC Carbon Removal Indexes. Verkkosivu, saatavilla: <https://puro.earth/corc-carbon-removal-indexes>

Pöyry Finland Oy. 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. Suomen Vesilaitosyhdistys ry.

Riikonen, A. 2019. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. Saatavilla: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-19-19.pdf>

Risteelä, S. 2024. Prosessi-insinööri. Oulun Vesi. Haastattelu 12.9.2024.

Ro K, Libra J ja Alvarez-Murillo A, 2020. Comparative Studies on Water- and VaporBased Hydrothermal Carbonization: Process Analysis, EBSCOhost, vol. 13 (21), s. 1.

Ruokavirasto^a. 2023. Lannoitevalmisteiden vaatimukset. Verkkosivu. Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/>

Ruokavirasto^b. 2023. Haitalliset aineet, taudinaiheuttajat ja epäpuhtaudet. Verkkosivu. Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/>

Salo E, Weber K, Hagner, M ja Näyhä A. 2024. Nordic perspectives on the emerging biochar business, *Journal of Cleaner Production* 475.

Siipola, V., Källi, A., Wendling, L., Karlsson, M., Björnström, M. & Koukkari, P. 2019. Biohiilen valmistus ja käyttö vedenpuhdistukseen - metsäteollisuuden sivuvirtojen jatkojalostus ja hyödyntäminen ei-energiakäyttöön. Co-Carbon-loppuraportti. VTT.

Sobek S, Werle S. 2021. Solar pyrolysis of waste biomass: a comparative study of product distribution, in situ heating behavior, and application of model-free kinetic predictions. *Fuel*, 292.

Soikkonen, O. 2022. Biohiilen valmistusprosessit. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto.

Sormunen, A. Jätteestä biohiiltä. Jätehuoltopäivät 2023. GRK. Esitys. Saatavilla: https://jatehuoltoyhdistys.fi/wp-content/uploads/2023/10/KE-14.25-SORMUNEN_Jatteesta-biohiilta-Annika-Sormunen-041023.pdf

Suomela N. 2024. Jätevesilietteen jatkokäsittely ja ympäristövaikutukset eräissä metsäteollisuusintegraatissa. Kandidaatin työ, ympäristötekniikka. LUT-yliopisto.

Suomen vesilaitosyhdistys ry. 2016. Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa. Suomen vesilaitosyhdistys ry. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 42. Helsinki. Saatavilla: https://www.vvy.fi/site/assets/files/1666/jatevedenkasittelyn_teknis-taloudellinen_selvitys_21042016.pdf

Suomen Vesilaitosyhdistys ry. 2019. Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. Saatavilla: https://www.vvy.fi/site/assets/files/2916/puhdistamolietteen_termiset_kasittelymenetelmät_ja_niiden_soveltuvuus_suomeen.pdf

Suomen Vesilaitosyhdistys ry. 2024. EU tiukentaa jätevesien käsittelyvaatimuksia: uusia velvoitteita puhdistamoille. Verkkosivu, saatavilla: <https://www.vvy.fi/ajankohtaista/uutiset/paivitetty-yhdyskuntajattevesidirektiivi-tiukentaa-jatevedenpuhdistamoiden-vaatimuksia/>

Suonperä, E. 2024. Risut ja rangat hiilivarastoksi biohiilettämällä. Biohiilen aika. Verkkosivu, saatavilla: <https://kestavyysloikka.ymparisto.fi/risut-ja-rangat-hiilivarastoksi-biohiilettamalla/>

SYKE. 2022. Jätevesien ravinteet hyötykäyttöön. SYKE Policy Brief, näkökulmia ympäristöpolitiikkaan. Saatavilla: https://issuu.com/suomenymparistokeskus/docs/syke-pb-jatevedet_30-11-2022 www.syke.fi/

Sweco. 2024. Biohiilen teknologiaselvitys. Saatavilla: https://static1.squarespace.com/static/62bd38319e995a0965dc9306/t/664f1d5c0613582d00746a45/1716460926625/Biohiilen+teknologiaselvitys+-+Loppuraportti_Lopullinen.pdf

Taube, P. & Puhakka, I. 2025. Projektipäällikkö/asiantuntija, Prizztech Oy. Haastattelu 9.1.2025.

The European Biochar Industry Consortium. 2023. EBI's Position Paper. Saatavilla: <https://old.biochar-industry.com/2023/ebi-position-paper/>

Thomas, S. C., Gale, N. 2015. Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. New Forests, 46(5-6), 931-946.

Thomsen, T. 2022. Introduction to Production and Use of Biochar 2022: working towards a more circular and bio-based Danish economy. Roskilde Universitet.

TUKES. 2024. Tiettyjä aineryhmiä koskevat poikkeukset REACH-asetuksen mukaisista velvoitteista. Verkkodokumentti. Saatavilla: <https://tukes.fi/kemikaalit/reach/soveltamisala/poikkeukset-ryhmittain>

Venelampi, O. 2025. Jaostopäällikkö, Kasvien tuonti- ja lannoitejaosto, Ruokavirasto. Erilliskerätty biojäte biohiilen raaka-aineena / soveltuvuus maaperäkäyttöön? Sähköpostiviesti 20.1.2025. Vastaanottaja: Tuuli Pohjola.

Viherympäristöliitto. 2023. Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, -rakentamiseen ja kunnossapitoon, Viherympäristöliiton julkaisu 73.

Välinen, N. 2024. Yhteiset suuntaviivat kasvavalle biohiilialalle. Bioenergia ry. Biohiilialan edistämishanke. Blogi. Saatavilla: <https://www.bioenergia.fi/2024/06/11/yhteiset-suuntaviivat-kasvavalle-biohiilialalle/>

Välinen N. ja Tuohimaa N., 2024. Suositukset biohiilelle maaperäkäytössä. Bioenergia ry:n julkaisu.

Wang X, Guo Z, Hu Z, Zhang J. 2020. Recent advances in biochar application for water and wastewater treatment: a review. PeerJ 8

WBC. 2023. World Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar and its Certification. Carbon Standards International, Frick, Switzerland, (<http://www.european-biochar.org>), version 1.0 from 15th September 2023.

Zhimao Z, Daqing Y, Shifei L, Fei X, Ying L, Ruixia L, Zhaohui C. 2021. Sustainable production of value-added sulfonated biochar by sulfuric acid carbonization reduction of rice husks, Environmental Technology & Innovation, Vol 24

Ylivainio, K., Jermakka, J., Wikberg, Hanne & Turtola, E. 2019. Lämpökemiallisen käsittelyn vaikutus jätevesilietefosforin lannoitusarvoon: Jätevesien fosfori kiertoon lannoitteeksi (PRecover) hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 67 s.

Yrjälä, K. 2024. Biohiili: lainsäädäntö. Bioenergia ry:n julkaisu 6/2024. Bioenergia ry. Biohiilialan edistämishanke.

11 Liitteet

LIITE 1. Laitteiston pohjapiirros

Feasib Oy

