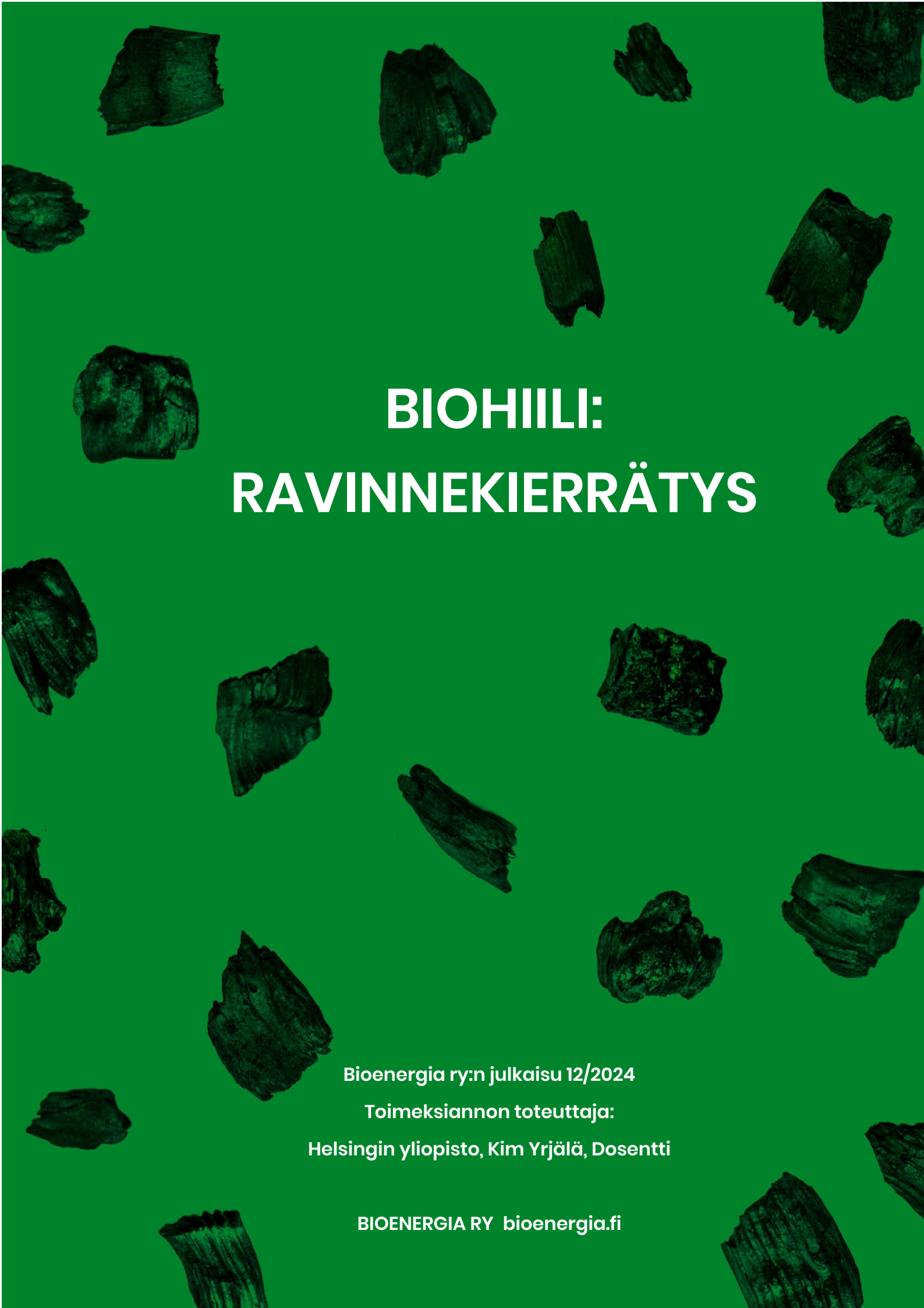




BIOHIILI: RAVINNEKIERRÄTYS

Bioenergia ry:n julkaisu 12/2024

Toimeksiannon toteuttaja:
Helsingin yliopisto, Kim Yrjälä, Dosentti

BIOENERGIA RY bioenergia.fi

Sisällysluettelo

1. Hankkeen tausta	3
2. Johdanto	4
3. Mikä biohiili on?	6
4. Minkälainen on pyrolyysiprosessi?	7
4.1. Suomessa pyrolyysiin käytetyt biomassat.....	7
5. Biohiili edesauttaa siirtymistä lineaarisesta taloudesta kiertotalouteen.....	9
6. Biohiilen kemialliset, fysikaaliset ja biologiset ominaisuudet	11
6.1 Tiheys.....	13
6.2 Partikkelikoko	14
6.3 Hiukkaskoko.....	14
6.4 Makro- ja mikrohuokoisuus	14
6.5 Ominaispinta-ala sekä hydrofobisuus (hydrophobicity)	15
6.6 Jauhettavuusindeksi	15
7. Biohiilen kemialliset ominaisuudet ja rakenne.....	16
7.1 C-H-O suhde ja pysyvä hiili	17
7.2.1 Mineralisoituvat yhdisteet.....	20
7.2.2 Polyaromaattiset hiilivedyt, PAH.....	20
7.3 Biohiilen ravinteet sekä raskasmetallit.....	21
7.3.1 Sertifiointiohjeet biohiilille liittyen raskasmetalleihin	21
7.3.2 Biohiilen makroravinteiden saatavuus ja lannoitevaikutus	22
7.4 pH ja kalkitusarvo.....	22
7.5 Kationinvaihtokapasiteetti (Cation exchange capacity, CEC).....	23
8. Biohiilen vaikutus ravinteiden kiertoon maataloudessa	24

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
 Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
 Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.

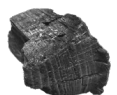


8.1 Pyrolyyttinen hiilen sitominen ja varastointi (PyCCS)	25
8.2 Biohiili maatalouden kasvihuonekaasujen hillinnässä.....	25
8.3. Biohiilipohjaiset lannoitteet.....	26
9. Biohiilen vuorovaikutus mikrobien kanssa	28
10. Biohiili kaupunkiympäristössä	29
11. Biohiilen käyttö ympäristön kunnostuksessa	31
11.1 Hulevedet.....	31
11.2 Viherkatot.....	32
12. Kaivannaisjätealueiden peittoratkaisujen uudet mahdollisuudet	34
13. Biohiili rakentamisessa	35
14. Biohiilen uudet käyttömahdollisuudet.....	36
15. Biohiilen tulevaisuuden näkymät	37
Kirjallisuus.....	38



1. Hankkeen tausta

Suomen biohiiliyhdistys liittyi Bioenergia ry:hyn vuonna 2022 ja sinne perustettiin biohiiliverkosto kehittämään biomassojen pyrolyysiä biohiilen tuottamiseksi Suomessa. Tämä taustakartoitusraportti on kirjoitettu biohiiliverkoston luotsaamassa Biohiilialan edistämishankkeessa vuosina 2023–2024. Hankkeen päärahoittajana oli Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksen Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelma. Lisäksi hanketta rahoitti MTK:n Säätiö sekä biohiiliverkoston biohiiliyritykset.



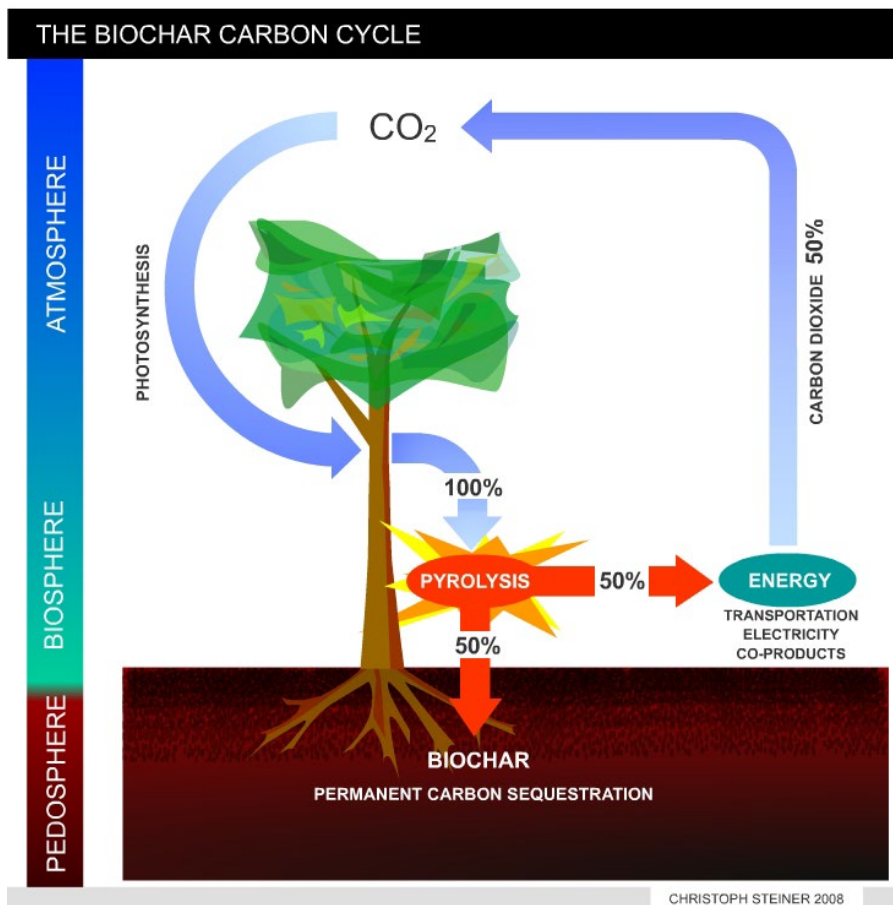
2. Johdanto

Biohiilellä on mahdollisuus olla merkittävä tekijä osana globaalia systeemistä kestävyysmuutosta lähitulevaisuudessa, koska siihen perustuva teknologia ja sen käyttötarkoitukset ovat hyvin tiedossa ja niiden potentiaali ympäristön kannalta kestävämpinä ratkaisuinä on tunnustettu. Tieteellinen pohja on huomattavasti vahvistunut viime vuosina ja nyt haetaan käytännön biohiilisovelluksia. Uusia pyrolyysilaitoksia perustetaan enenevässä määrin Suomen lisäksi muissa pohjoismaissa kuten Ruotsissa ja Tanskassa, missä on samantyyppiset pohjoismaiset yhteiskunnat ja päämäärät hiilineutraaliuuden saavuttamiseksi 2030-luvulla.

Julkisuudessa on ihmetelty, miksi biohiilen tuotanto on lähtenyt 'niin nihkeästi liikkeelle', vaikka siitä on paljon puhuttu viimeisten 10 vuoden aikana. Yksi selitys hitaaseen tuotannon kasvuun voi olla, että koska se edustaa paikallista kestävästä kiertotaloutta, se samalla vaatii monen toimijan ja asiantuntijan hyvää yhteistyötä ja tämän lisäksi vielä sääntelyn kehittämistä, jotta liiketoiminta voidaan aloittaa. Voidaan todeta, että biohiili yhdistää monta keskeistä globaaliin kestävyteen liittyvää seikkaa ja näkökohtaa. Ensiksikin sen raaka-aine, biomassa, syntyy yhteyttämisen kautta, kun kasvit käyttävät auringonvaloa sekä hiilidioksidia elintoimintojen ylläpitämiseen. Suuri osa fotosynteesissä syntyneestä hiilestä siirtyy biomassaan kasvin eri osiin ja osa kasvin juuriin ja sieltä maaperään mikrobien ja pieneläinten käyttöön.

Tähän asti biomassaa luonnonmateriaalina on hyödynnetty tuhlaten. On syntynyt paljon jätettä, joka on saanut hajota itsestään kaatopaikoilla tai se on poltettu, jolloin on syntynyt ilmastoon lisää CO₂-kasvihuonekaasua. Kiertotalouden periaatteiden mukaan voidaan osa maa- ja metsätalouden ainevirroista muuttaa lähes hajoamattomaan biohiilen muotoon vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. Maaperän laatua voidaan parantaa käyttämällä biohiiltä sitomaan haitta-aineita ja samaan aikaan luomalla maaperään hiilivarastoja.





Kuva 1. Hiilen kierto ja biohiili osana ravinnekiertoa (Christoph Steiner, 2008, SoilFixer).

Teknisiä parametreja:

Tässä Bioenergia ry:n biohiilen taustakartoitus selvityksessä käsitellään myös teknisiä parametreja, joita on hyvä tuntea, kun esim. suunnitellaan biomassojen pyrolyysiä.

Lisäksi on hyvä tietää biohiilen monista ominaisuuksista, jotta löydetään sopivin biohiili määrättyyn käyttötarkoitukseen.

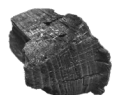


3. Mikä biohiili on?

Biohiili (eli biochar) on pysyvä hiiliyhdiste, jota tehdään biomassoista lähes hapettomissa olosuhteissa 350–900 °C:n lämpötilassa. Pyrolyysissä syntyvälle materiaalille on annettu kemiallisfysikaalisia raja-arvoja, joiden pitää täyttyä, jotta voidaan puhua biohiilestä. Jos pyrolyysiä tehdään alhaisemmassa lämpötilassa vähemmän kuivasta biomassasta hydrotermisellä käsittelyllä (220–280 °C) syntyvä hiiliyhdiste ei ole biohiiltä (biochar) vaan HTC-hiiltä, märkähiiltä (hydrochar), joka ei täytä biohiilen fysikaaliskemiallisia kriteereitä ja sen hiiliprosentti (C) on pienempi, jolloin se on vähemmän pysyvä hiiliyhdiste (Zhang ym. 2019).

Biohiili on huokoista, hiilipitoista materiaalia, joka on tuotettu kasvien biomassojen pyrolyysillä ja sitä voidaan käyttää niin, että sen sisältämä hiili jää pitkäaikaiseksi hiilinieluksi tai että se korvaa fossiilisen hiilen teollista valmistusta. Biohiiltä ei ole tehty poltettavaksi (EBC).

Jos pyrolyysin lämpötilaa nostetaan kohti 1000 °C astetta ja sen yli, syntyy aktiivihiihtä, joka on paljon arvokkaampi tuote. Aktiivihiihtä käytetään mm. suodattimina ja puhdistustarkoituksissa hyvin huokoisen rakenteensa ansiosta. Aktiivihiihten valmistus vaatii enemmän korkeiden lämpötilojen teknisiä ratkaisuja ja on siksi kalliimpaa kuin biohiilen valmistus.



4. Minkälainen on pyrolyysiprosessi?

Biomassa pitää saada suhteellisen kuivaksi ennen pyrolyysin aloittamista. Biomassa voi kuivua 200 °C asti ilmassa, höyryssä, työssä sekä muissa kaasuissa. Tämän jälkeen materiaali alkaa paahtua torrefiointiprosessissa (220–280 °C), joka muistuttaa kahvin paahtamista tai puun kuumakäsittelyä. Sellulaarinen eli solun sisäinen vesi häviää ja samalla pieniä määriä orgaanisia kaasuja. Kun varsinainen biohiilen pyrolyysi alkaa n. 350 °C:ssa, vapautuu ei-kondensoituja ja pysyviä kaasuja (CO, H₂, CO₂, CH₄ etc.) ja vettä sekä niiden lisäksi pyrolyysinestettä, puuetikkaa ja pienempiä hiilivetyjä ja partikkeleita (Joseph, S. & Taylor, P.).

Jotta voidaan varmistua, että biomassa pyrolysoituu kokonaan on tärkeää säätää optimaalisiksi 1) pyrolyysin maksimi lämpötila, 2) pyrolyysin viipymäaika ja 3) partikkelikoko.

Yleensä hitaassa pyrolyysissä yhdistetään isommat partikkelit, pidempi viipymäaika keskikorkeaan lämpötilaan (500–650 °C) kun taas nopeassa flash-pyrolyysissä yhdistetään pienet partikkelit, lyhyt viipymäaika korkeaan prosessilämpötilaan (700–800 °C).

4.1. Suomessa pyrolyysiin käytetyt biomassat

Puubiomassasta saadaan laadukasta huokoista biohiiltä. Suomessa on lähinnä käytetty kuusi-, mänty-, paju- sekä koivubiomassaa biohiilen tuottamiseen (Taulukko 1).

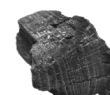
Taulukko 1. Suomessa käytetyt biomassat pyrolyysiä varten.

Biomassa	Pyrolyysin lähtöaine	Pyrolyysi (pyr) lämpötila	Viite
Kuusi	Kuusen kaarna	Hidas pyr, 450 °C	Kalu ym. 2022
Kuusi		Jatkuva pyr, 500–600 °C	Kalu ym. 2022
Mänty	Männyn kaarna	375 °C, 475 °C	Heikkinen ym. 2019
Paju		Jatkuva pyr, 450 °C	Kalu ym. 2022
Paju		475 °C	Heikkinen ym. 2019
Paju		550 °C	Heikkinen ym. 2021
Koivu		375 °C, 475 °C	Hagner ym. 2015
Harvennustähteet	Hake	450 °C	Kalu ym. 2022

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



Harvennustähteet	Hake	450 °C	Soinne ym. 2020
Ohra	Olki	460 °C	Heikkinen ym. 2021
Ketun lanta		350 °C, 450 °C	Heikkinen ym. 2021
Minkin lanta		350 °C, 450 °C	Heikkinen ym. 2021

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



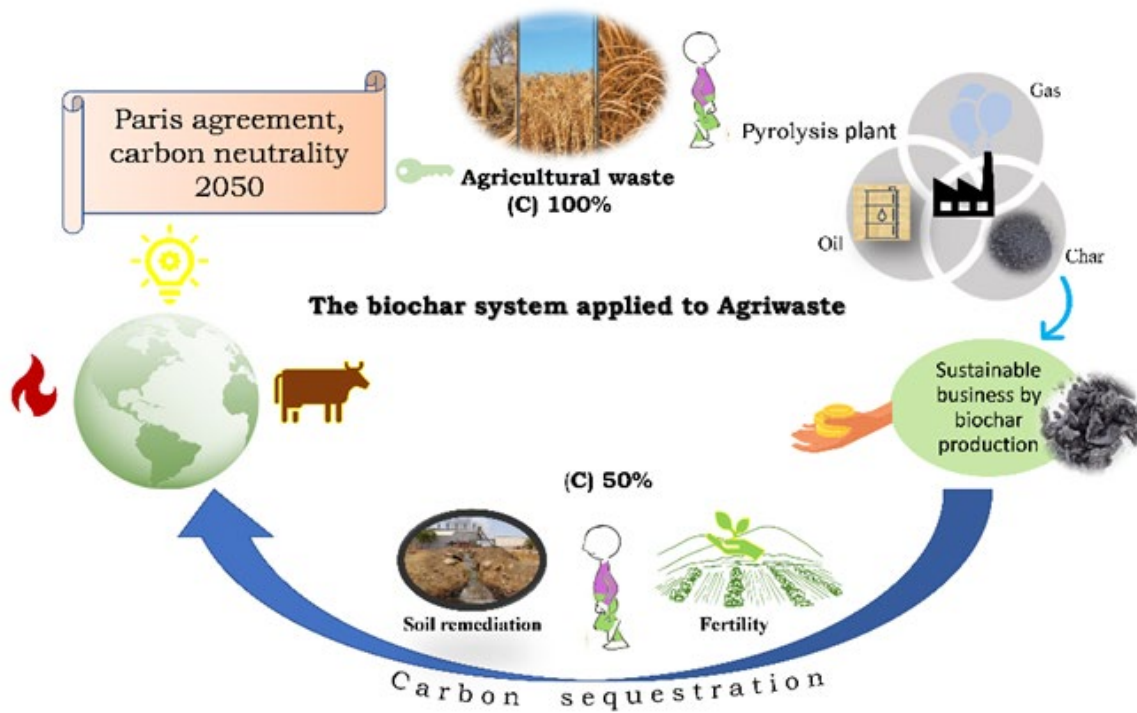
5. Biohiili edesauttaa siirtymistä lineaarisesta taloudesta kiertotalouteen

Biohiilen tuottaminen ja käyttö edellyttää ainevirtojen hyödyntämistä ja yhdistämistä niin, että saadaan uusi arvokas tuote, hiilen pysyvää varastointia ja maaperän laadun parantamista sekä kasvien kasvun lisäämistä. Selkeänä päämääränä on käyttää maa- ja metsätalouden sivuvirtoja hyödyksi kestäväällä tavalla luomalla pysyvää hiilimateriaalia, joka vähentää kasvihuonekaasupäästöjä (Valkama ym. 2024). Biohiiltä voidaan käyttää ravinnekierron tehostajana vähentämään järvien, vesien ja rannikkovesien rehevöitymistä.

Pyrolyysiprosessi antaa mahdollisuuden lietteiden haitta-aineiden käsittelyyn, kuten raskasmetallien ja farmaseuttisten aineiden poistamiseen. Parasetamolia lukuun ottamatta muut lääkeaineet pystytään poistamaan pyrolyysillä, mutta parasetamoli näyttäisi jäävän biohiili-tuotteeseen (Sarvi ym. 2023). Korkeissa lämpötiloissa myös lietteeseen kerääntynyt kadmium voidaan poistaa ja saadaan puhtaampi tuote, jota voidaan levittää pelloille. Mikromuovit voidaan myös poistaa biomassasta pyrolyysin avulla, kun lämpötila on riittävän korkea.

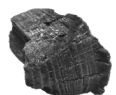
Modernissa pyrolyysilaitoksessa otetaan syntyneet kaasut talteen ja niistä tuotetaan energiaa paikalliseen hyötykäyttöön. Niin kauan kuin orgaanista materiaalia jatkuvasti syötetään pyrolyysiin ja syöte on riittävän kuivaa, syntyy energiaa eikä prosessin ylläpitämiseen tarvita lisäenergiaa (eksotermisen reaktio) aina 400 °C asti. Tämän jälkeen tarvitaan taas energiaa, jos halutaan edelleen nostaa lämpötilaa (Joseph, S & Taylor, P. 2024). Moderneissa pyrolyysilaitoksissa tuotetaan usein ylimääräistä lämpöä, joka tulee osaksi paikallista lämmöntuotantoa.





Kuva 2. Biohiilen tuotanto käyttäen maatalouden ainevirtoja ja sen käyttö lisäämään viljavuutta ja hiilensidontaa. Yrjälä ym. 2022.

Kuvassa 2 havainnollistetaan biohiilen tuottamiseen liittyvää kiertotalouden mukaista ainekiertoa, joka edesauttaa hiilineutraaliuden saavuttamista Pariisin sopimuksen mukaan.



6. Biohiilen kemialliset, fysikaaliset ja biologiset ominaisuudet

Biohiili voidaan tuottaa monesta orgaanisesta raaka-aineesta, joiden ominaisuuksia siirtyy uuden materiaalin ominaisuuksiin ja siksi markkinoilla on monenlaista biohiiltä. Koska biohiilen suurin käyttöalue tällä hetkellä on maanparannusaineena, on syytä katsoa miten biohiili vaikuttaa maaperään ja sen kautta kasvien kasvuun.

Tärkeitä tuoreita pohjoismaisia biohiilijulkaisuja:

Ruotsissa ilmestyi, 2024, yleistajuinen Biokolboken, jonka on kirjoittanut ja kuvittanut Lotta & Mattias Gustafsson.

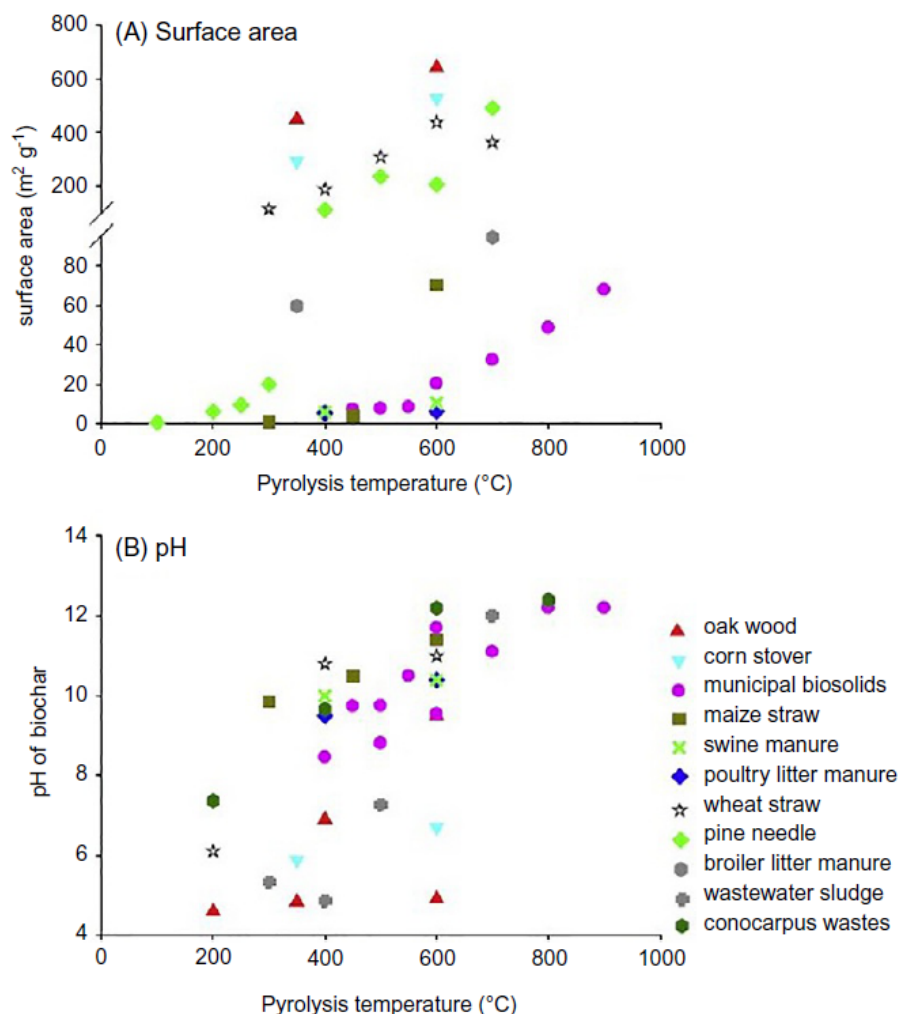
Suomessa ilmestyi 2023 Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, – rakentamiseen ja kunnossapitoon (Anu Riikonen ed., Viherympäristöliitto, 2023).

Fysikaaliset ominaisuudet

Biohiilen tärkeitä fysikaalisia ominaisuuksia ovat:

Irto- ja hiukkastiheys, hiukkaskoko, makro- ja mikrohuokoisuus, huokosrakenteen pinta-ala ja vedenpidätyskyky.





Kuva 3. Pyrolyysilämpötilan vaikutus erilaisten biohiilien ominaispinta-alaan ja pH:on. Yrjälä, K. & Lopez-Echarte, E. 2021.

Fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat biohiilen kulkeutuvuuteen ympäristössä ja sen käyttäytymiseen maaperän, veden, mineraalien ja ravinteiden kanssa. Biohiilen huokoinen rakenne luo valtavan määrän pintoja, mihin mikrobit, kuten bakteerit, arkeonit ja sienet, voivat tarttua ja kasvaa suojassa niitä syövilä mikrooskooppisilta eliöiltä. Irtohiyden, hiukkastiheyden, hiukkaskoon, huokoisuuden ja pinta-alan fysikaaliset ominaisuudet liittyvät toisiinsa ja ne vaikuttavat yhdessä biohiilen eri ominaisuuksiin. Hiukkasten tiheys ja pinta-ala riippuvat huokoisuudesta. Hyvin huokoisella biohiilellä voi olla suuri vedenpidätyskyky, mutta samalla se on kevyempää ja helpommin leviävää.

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

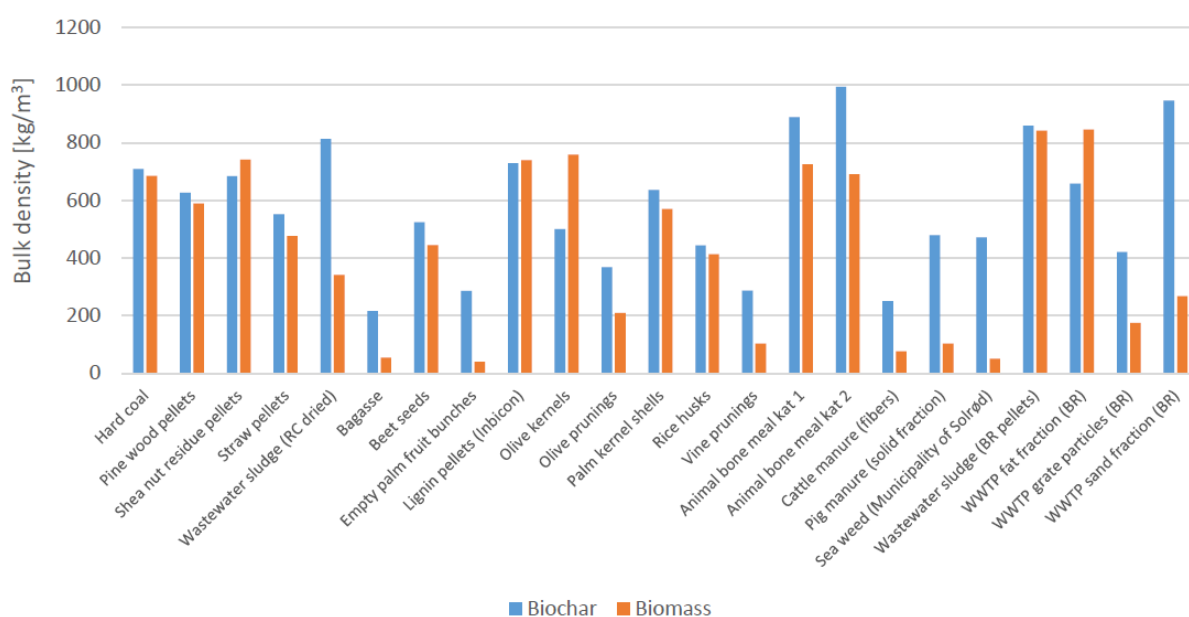
Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



6.1 Tiheys

Tiheystermejä voidaan soveltaa biohiileen, mutta myös pyrolyysin biomassan raaka-aineisiin, kun haetaan biomassoille ja biohiilelle sopivia, tarvittavia ja suotuisia vaikutuksia. Kuvassa näkyy erilaisten biohiilien ja -massojen tiheyden suuri vaihtelu, joka vaikuttaa esim. biohiili-tuotteen käsittelyyn valmistuksen jälkeen ja siihen miten se kannattaa levittää erityyppisiin maaperiin.

3.1.7 Examples of bulk density of biochar and the biomass from which it was produced



Kuva 4. Tiheys vaihtelee eri biohiilityyppien välillä ja niiden raaka-aineena käytettyjen biomassojen suhteen. Yksikkönä on kg/m³. Thomsen, T. 2022.

Bulkkitiheys:

Biohiilet: 0,06–0,7 g/cm³. Hiukkasten tai kappalejoukon tilavuusyksikkömäärän massa, johon vaikuttaa hiukkasten koko, muoto ja tiivistyminen. Bulkkitiheydellä on tärkeä merkitys materiaalinkäsittelyyn, tuotannon ja sovellusten kannalta.



Hiukkastiheys:

Ruhosta valmistettu biohiili: 0,25–0,3 g/cm³. Puusta valmistettu biohiili: 0,47 – 0,6 g/cm³. Hiukkastiheys vaikuttaa kulkeutuvuuteen ja biohiilen leviämiseen tuulella ja vedessä.

6.2 Partikkelikoko

Hiukkasten halkaisija mitataan tyypillisesti fraktiolla, joka kulkee erikokoisten seulojen sarjan läpi. Partikkelikoolla on merkitystä, kun biohiiltä käsitellään esimerkiksi pölyn syntymiseen. Biohiilen suositeltu partikkelikoko tai karkeus on 0-2 mm nurmikoille ja istutuksille, 1-5mm/1-10mm viherrakenteille, 5-10/10-20mm biosuodatukseen sekä 0-20mm kantaviin kasvualustoihin (Elo ym. 2023).

6.3 Hiukkaskoko

Biohiilen hiukkaskoko riippuu raaka-aineesta ja sen esikäsittelystä, hiitolämpötilasta sekä tuotantotekniikasta eli erityyppisistä pyrolyysilaitteista (ruuvit, pyörivät rummut jne.). Hiukkaskokoa voidaan pienentää jauhamalla biohiiltä ja seulomalla voidaan varmistaa tasaisempi hiukkaskoko. Hiukkaskokoa voidaan myös suurentaa pellettoimalla tai rakeistamalla. Biohiilen hiukkaskoko voi pienentyä maaperässä jäätymis-sulamisjaksojen, lierojen syötyä biohiiltä tai mekaanisen tiivistymisen vuoksi.

6.4 Makro- ja mikrohuokoisuus

Huokoisuus on materiaalin tyhjän tilan prosenttiosuus. Huokokset voidaan jakaa niiden läpimitan mukaan (a) mikrohuokokset vähemmän kuin 2 nm, (b) mesohuokokset 2 - 50 nm (c) makrohuokokset 50 nm.

Biohiilelle voidaan määrittää huokoskokojakauma eli prosenttiosuudet mikro-, meso- ja makrohuokoisuuksille. Huokoisuuden määrä vaikuttaa merkittävästi biohiilen



ominaisuuksiin, kun sitä käytetään maanparannusaineena tai hulevesien puhdistamiseen. Pyrolyysiprosessin käyttöparametreja (lämpö ja viipymäaika) voidaan säätää niin, että tuotettu biohiili sopii parhaiten toivottuun käyttötarkoitukseen (Muzyka ym. 2023).

6.5 Ominaispinta-ala sekä hydrofobisuus (hydrophobicity)

Ominaispinta-ala (SSA): materiaalin kokonaispinta-ala massayksikköä kohti.

Hydrofobisuus kertoo rasvaliukoisuudesta ja siitä, miten biohiili reagoi esimerkiksi veden kanssa. Vedenottokyky ja vedenpidätyskyky ovat riippuvaisia hydrofobisuudesta ja niiden vaikutukset ovat merkittäviä mikrobien vuorovaikutuksessa. Matalassa lämpötilassa tuotettu biohiili on tyypillisesti hydrofobista, mutta pidempi pyrolyysiaika tai biohiilituotteen pesu vedellä voi vähentää hydrofobisuutta.

6.6 Jauhettavuusindeksi

Hardgrove-jauhettavuusindeksi (HGI) on riippuvainen haihtuvien aineiden pitoisuudesta. Matala HGI-arvo tarkoittaa huonoa jauhettavuutta, kun taas korkea HGI-arvo tarkoittaa, että materiaali on helposti jauhettava (Weber, K & Quicker, P.). Puusta valmistetussa biohiilessä haihtuvien aineiden pitoisuus on alle 20 %, ja jos se tuotetaan noin 600 °C:n lämpötilassa saavutetaan HGI 80-120, mikä luokittelee puubiohiilen helposti jauhettavaksi.



7. Biohiilen kemialliset ominaisuudet ja rakenne

Biohiilen ravinne- sekä haitta-aineanalyysit:

Pysyvyys: H/C-suhde

Liukenevat orgaaniset yhdisteet

Haitta-aineet, PAH (polyaromaattiset hiilivedyt)

Bentso(e)pyreeni, bentso(e)fluoranteeni,

PCB ja PCDD/F

Raskasmetallit

Makroravinteet (N, P, K, S, Ca, Mg)

Mikroravinteet

Lannoitusvaikutus: ravinteiden saatavuus

pH sekä kalkitusarvo

Sähkönjohtokyky

Kationinvaihtokapasiteetti (CEC)

Anioninvaihtokapasiteetti (AEC)

Biohiilen peruskoostumus voidaan määrittää termisen hajoamisen perusteella happirajoitteisessa ympäristössä, jolloin saadaan määritettyä kosteuspitoisuus, haihtuvat aineet (kaasuja vapautuu, kun polttoainetta kuumennetaan), kiinteät aineet (kiinteä polttoaine, joka jää jäljelle haihtuvien aineiden poistamisen jälkeen tuhkaa lukuun ottamatta). Tuhka (polttoaineen polton jälkeinen jäännös) koostuu piidioksidista, raudasta, alumiinioksidista ja muista palamattomista aineista. Analyysi tehdään perinteisesti ASTM D1762-84 – “Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal” testillä. Uudempi menetelmä on termogravimetrinen analyysi (TGA) (EBC 2024).

Tämän jälkeen voidaan tehdä lopullinen analyysi ja määrittää hiilen, vedyn, hapen, typen ja rikin alkuainemäärät. Näyte poltetaan ja mitataan spektrofotometrillä.

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

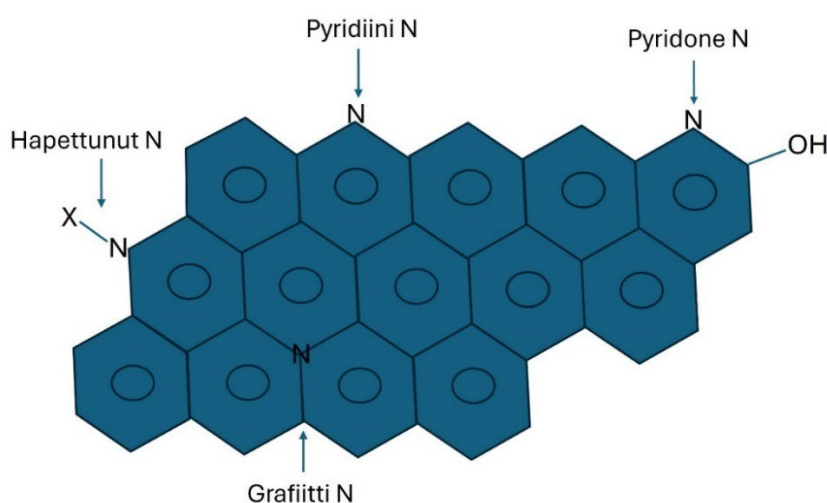
Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



7.1 C-H-O suhde ja pysyvä hiili

H/C- ja O/C-suhteiden välillä on suhteellinen korrelaatio eri lämpötiloissa sekä eri raaka-aineista tuotetuille biohiilelle, lukuun ottamatta lannan biohiiltä.

Pysyvä biohiili koostuu pääasiassa hiilen kemiallisista rengasrakenteista, joissa hiiltä on osittain korvattu tyrellä ja hapella. Näiden rengasrakenteiden koko riippuu biohiilen hiiltolämpötilasta. Aromaattisissa hiilirenkaissa voi olla useita funktionaalisia ryhmiä, jotka koostuvat tyrestä (N), hapestä (O) ja rikistä (S).



Kuva 5. Biohiilen aromaattinen rengasrakenne.

Kuvassa 5 näkyy aromaattisia renkaita, jotka yhdessä muodostavat erittäin pysyvän rakenteen. Matalissa lämpötiloissa tuotetuissa biohiilissä ei ole grafiittikiteitä. Korkeammissa lämpötiloissa $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ havaitaan grafiitti/grafeenirakenteita.

Hiilen pysyvyys tai pitkäikäisyys biohiilessä voidaan likimääräisesti osoittaa vedyn ja orgaanisen hiilen suhteella ($\text{H}/\text{C}_{\text{org}}$). Orgaaninen hiili lasketaan vähentämällä mineraalikarbonaattien hiili (C), kokonaishiilipitoisuudesta (C_{kok}). Biohiilen vetypitoisuus vaihtelee 1-5 %:n välillä vetypitoisuuden kasvaessa alemmissa pyrolyysilämpötiloissa.

Biohiilen pysyvyydestä maaperässä on jatkuvasti keskusteltu ja kaksi erittäin merkittävää julkaisua vuodelta 2024 on tuonut lisävalaistusta asiaan.





Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

International Journal of Coal Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/coal



Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark

Hamed Sanei^{a,*}, Arka Rudra^a, Zia Møller Moltesen Przystwitt^a, Sofie Kousted^a, Marco Benkhettab Sindlev^b, Xiaowei Zheng^a, Søren Bom Nielsen^a, Henrik Ingermann Petersen^{c,*}

^a Lithospheric Organic Carbon (LOC), Department of Geoscience, Aarhus University, Høegh-Guldbergs Gade 2, 8000C Aarhus, Denmark

^b Department of Biology, University of Southern Denmark, 5230, Odense, Denmark

^c Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Øster Voldgade 10, 1350 Copenhagen, Denmark

Julkaisu: Sanei ym. 2024. Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark.

Geoderma 441 (2024) 116761



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Geoderma

journal homepage: www.elsevier.com/locate/geoderma



Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data

Elias S. Azzi^{a,*}, Haichao Li^b, Harald Cederlund^c, Erik Karlton^b, Cecilia Sundberg^a

^a Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Uppsala, Sweden

^b Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Uppsala, Sweden

^c Department of Molecular Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Uppsala, Sweden

Julkaisu: Azzi ym. 2024. Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data.

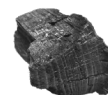
Julkaisu: Bier, H. & Lerchenmüller, H. (2024). Report on Permanence of Biochar. Perspectives from two recent publications and EBI conclusions. Bier and Lerchenmüller (2024) EBI:stä julkaisivat 10.4.2024 yhteenvedon näistä biohiilen pysyvyyteen liittyvistä uusista julkaisuista. Heidän johtopäätöksensä ovat:

- 1) Biohiilet ovat heterogeenisiä ja koostuvat vaihtelevista eri fraktioista, joilla on fundamentaalisesti erilaisia kemikaalisia ominaisuuksia, ja sitä kautta niiden pysyvyys vaihtelee.

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



- 2) Biohiilifraktiot, jotka ovat olleet alttiina korkeille lämpötiloille riittävän pitkään, ovat kemiallisesti/rakenteellisesti inertiniittiä (pysyvää)
- 3) Inertiniitti on orgaanisen hiilen stabiilein muoto, ja se on hyväksytty pysyvyyden mittapuuna geologiassa.
- 4) Inertiniittibiohiilen mikrobiologisesta hajoamisesta ei ole tieteellistä näyttöä. Silti on edelleen olemassa hypoteesi inertiniitin (olennaisesta) mikrobiologisesta hajoamisesta.
- 5) Inertiniittibiohiilifraktiot eivät hajoa merkittävästi maaperässä ilmaston kannalta merkittävänä ajanjaksoina. Inertiniittibiohiili ei hajoa yli 1 000 vuoden aikana, vaan sen hajoamiseen voi kulua yli 10 000 vuotta.
- 6) Sanei ym. (2024) mukaan kaupallisesti tuotettu biohiili koostuu pääasiassa inertiniittibiohiilestä.

Yli 95 % tällaisten kaupallisten biohiilien hiilestä ei olennaisesti hajoa maaperässä ilmaston kannalta merkittävänä ajanjaksoina

7.2 Vedyn ja orgaanisen hiilen suhde

Pysyvyys ilmaistaan vety/orgaaninen hiili -suhteella

- Hiilen pysyvyys tai pitkäikäisyys voidaan kuvata vedyn suhteella orgaaniseen hiilen (H/Corg).
- Orgaaninen hiili saadaan määritettyä, kun kokonaishiilestä vähennetään mineraaliset karbonaattihiilet.
- Vedyn pitoisuus biohiilessä vaihtelee 1-5 %, ja kasvaa alhaisemmissa lämpötiloissa valmistettaessa.
- Kun H/Corg -suhde on 0.7, noin 65 % hiilestä ajatellaan säilyvän biohiilessä 100 vuotta, mutta tämä tieto on muuttumassa uusien tutkimusten myötä.
- Kun H/Corg -suhde on 0.4, katsotaan että 80 % hiilestä säilyy.
- IBI (International Biochar Initiative) ja EBC (European Biochar Certificate) asettavat 0,7:n maksimi H/Corg-suhteeksi, jolloin hiiltynyt tuote voidaan katsoa biohiileksi.
- Mitä pienempi H/Corg -suhdeluku on, sitä pysyvämpää biohiilen hiili on.

(Joseph, S. & Taylor, P.)



7.2.1 Mineralisoituvat yhdisteet

Biohiili sisältää vesiliukoisia ja mineralisoituvia yhdisteitä mukaan lukien pieniä määriä vapautuvaa hiiltä, jotka voivat olla ravintoa mikrobeille ja stimuloida siemenien itävyyttä ja kasvien kasvua (Sarfaraz ym. 2020; Yang ym. 2022). Suurin osa näistä yhdisteistä on peräisin haihtuvista yhdisteistä, kun biomassa hajoaa (depolymerisoituu) kuumennettaessa happiköyhässä ympäristössä.

Mineralisoituvat yhdisteet:

- auttavat kasveja vastustamaan tauteja
- auttavat siemeniä itämään
- käynnistävät hyödyllisten sienten kasvun
- toimivat signaalimolekyyleinä joko helpottamaan tai estämään vuorovaikutusta muiden organismien kanssa
- niillä on kasvien kasvua sääteleviä toimintoja

7.2.2 Polyaromaattiset hiilivedyt, PAH

Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH) rakentuvat useammasta aromaattisesta kemiallisesta renkaasta, joista yksinkertaisin ja haihtuvin PAH-yhdiste on kahdesta renkaasta rakentuva naftaleeni. PAH-yhdisteiden terveysriskit kasvavat, kun aromaattirenkaita on neljä tai useampia. Ihmisten pitkäaikainen altistuminen PAH-yhdisteille aiheuttaa vakaavaa terveysriskiä.

PAH-yhdisteitä syntyy ja muodostuu kivihiilitervasta, noesta ja teollisista polttoprosesseista, joihin liittyy korkeita lämpötiloja kuten pyrolyysissä.



PAH-yhdisteet:

PAH-yhdisteiden kokonaismäärälle on olemassa suurin sallittu raja-arvo. Kaksirenkainen Naftaleeni on biohiilen runsain ja kooltaan pienin PAH (noin 90 % PAH-yhdisteiden kokonaismäärästä). PAH-pitoisuuksista biohiilessä on käyty tieteellistä keskustelua ja Buss ym. (2022) mukaan pyrolyysin jälkeinen kontaminaatio ja PAH-laskeuma oli biohiilessä tärkein PAH-yhdisteiden (poislukien naftaleeni) määrään vaikuttava tekijä.

Tutkimuksen mukaan PAH-kontaminaatiovaaraa voidaan ratkaisevasti pienentää parantamalla jälkiprosessin lämmönhallintaa niin, että lämpötila pidetään korkeana loppuun asti. Tutkimus myös haastaa nykyistä käytäntöä 16 PAH-yhdisteen analyysistä. Tutkijat haluaisivat PAH-raja-arvot toksisuuden mukaan ja mahdollisesti myös biosaatavuuden perusteella eikä kuten nyt yhteismäärän mukaan.

7.3 Biohiilen ravinteet sekä raskasmetallit

Biohiilen tuhkafraktioon siirtyy epäorgaaniset aineet, ravinnemineraalit kuten kalium ja fosfori sekä karbonaatit, jotka alun perin olivat lähtöaineessa. Nämä mineraalit voivat toimia lannoituksessa, mutta niiden saatavuus kasveille riippuu pH:sta, niiden pitoisuuksista ja tuhkaan jääneistä muista aineista (Fransson ym. 2020, The Biochar Handbook).

Biohiili voi sisältää raskasmetalleja, jotka kuitenkin useimmiten eivät ole saatavilla kasveille.

7.3.1 Sertifiointiohjeet biohiilille liittyen raskasmetalleihin

Koska kiertotaloudessa ainevirrat voivat sisältää haitallisia aineita ja esimerkiksi lietteet voivat sisältää raskasmetalleja on tärkeää varmistaa, että niitä ei levitetä maaperään. Biohiilet pitää olla puhtaita eivätkä saa sisältää ympäristölle haitallisia aineita yli sallittujen raja-arvojen.

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



- Raskasmetalleja sisältävistä pyrolyysin raaka-aineista, kuten jätevesilietteestä, valmistettuihin biohiiliin voi jäädä raskasmetalleja, jos ne eivät ole poistuneet pyrolyysin aikana.
- Useimmissa maissa on säännöksiä, jotka rajoittavat maalle levitettävien raskasmetallien määrää.
- Joko IBI- tai EBC-sertifiointin saamiseksi raskasmetallit on mitattava ja niiden on oltava raja-arvojen alapuolella.
 - IBI: www.biochar-international.org/characterizationstandard,

EBC: <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents>

7.3.2 Biohiilen makroravinteiden saatavuus ja lannoitevaikutus

Vaikka useimpien lanta- ja olkibiohiilien typpipitoisuus on korkea, hyvin vähän tyypestä (N) on kuitenkin helposti kasveille saatavilla, kun biohiili on lisätty maaperään. Typen lisäksi monien muiden alkuaineiden pitoisuus on korkeampi biohiilessä kuin biomassassa (Karim ym. 2022). Fosforin (P) ja kaliumin (K) biosaatavuus on korkea (36 % P:n & 54 % K:n kokonaismäärästä), kun taas saatavilla oleva typen määrä on alhainen (< 5 % N:n kokonaismäärästä).

Suurin osa maaperään lisätyn biohiilen tyypestä on sitoutunut maaperään tai orgaanisiin yhdisteisiin eikä ole kasvien saatavilla. Ajan myötä osa maaperän tyypestä voi tulla kasvien käyttöön samalla nopeudella, jolla hiili mineralisoituu eli mikrobit hajottavat hiilen hiilidioksidiksi ja vedeksi.

7.4 pH ja kalkitusarvo

Biohiilellä voi olla vaikutusta maan happamuuteen yleensä sekä korkean pH-arvon kautta että puskurointikyvyn kautta. Biohiilen pH riippuu pääasiassa tuotantolämpötilasta. Nyrkkisääntö on, että alhaisissa lämpötiloissa tuotettaessa syntyy matalamman pH:n ja korkeissa emäksisiä biohiiliä. Biohiilen vaikutus maan pH-arvoon riippuu käyttömäärästä ja maaperän omista ominaisuuksista. Puupohjaisen biohiilen kalkitusvaikutus on yleensä vaatimaton, luokkaa 1 % kalkin vaikutuksesta (Anu Riikonen toim., 2023, VYL Biohiiliopas).

Siemenissä, kaarnassa ja vihreissä kasveissa on suurempi ravinnesisältö ja vähemmän hiiltä, jolloin niistä valmistetuilla biohiilillä on suurempi kalkituspotentiaali.

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

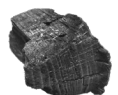
Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



7.5 Kationinvaihtokapasiteetti (Cation exchange capacity, CEC)

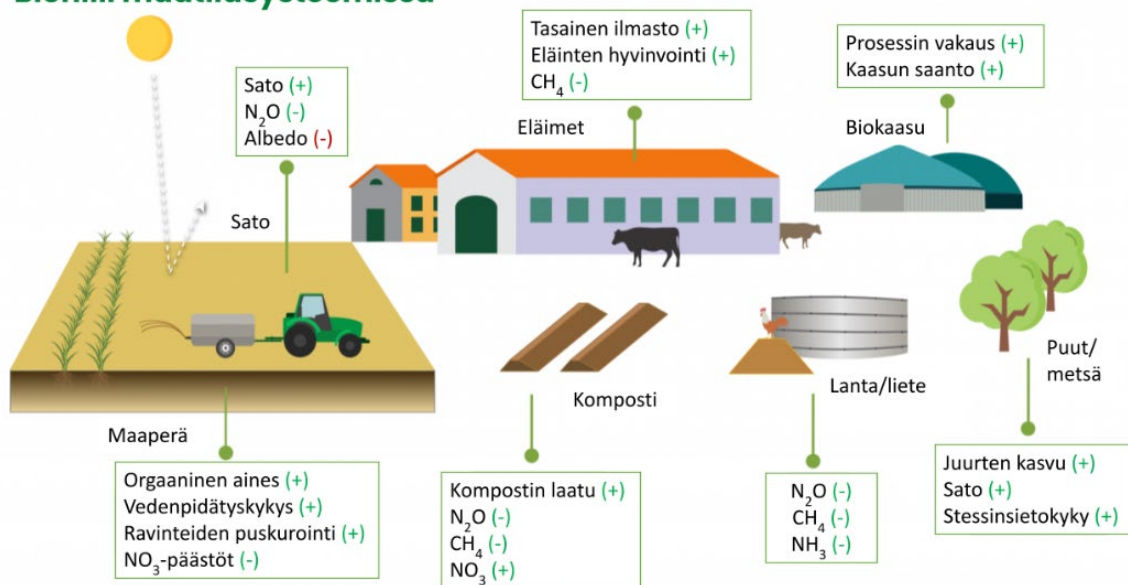
Kationinvaihtokapasiteetti kertoo biohiilen kyvystä pidättää vaihtuvia kationeja, kuten kaliumia (K^+) ja kalsiumia (Ca^{2+}). Biohiilen kationinvaihtokapasiteetti liittyy pääsääntöisesti biohiilen pinnalla oleviin funktionaalisiin ryhmiin (Adhikari ym. 2024).

Matalamman lämpötilan biohiilellä on tavallisesti korkeampi kationinvaihtokapasiteetti, mutta korkeamman lämpötilan biohiili voi sitoa enemmän ravinteita ja orgaanisia aineita. Kationinvaihtokapasiteetti voi nousta biohiilen vanhetessa erityisesti matalamman pH:n biohiilessä.



8. Biohiilen vaikutus ravinteiden kiertoon maataloudessa

Biohiili maatilasysteemissä



Kuva: EBI

Kuva 6. Maatalouden ravinnekierto ja kasvihuonekaasut. Kuva: EBI, 2024.

Maataloudessa biohiili soveltuu maanparannuksen lisäksi biokaasulaitoksissa anaerobisen hajotustoiminnan stabiloimiseen sekä kompostin laadun parantamiseen (Kuva 6). Biohiiltä voidaan käyttää lannan käsittelyn kasvihuonepäästöjen (N₂O, CH₄, NH₃) vähentämisessä. Biohiili on myös eläinruokinnan komponentti, joka esim. vähentää lehmien CH₄ päästöjä sekä haihtuvien yhdisteiden määrää ja hajua.

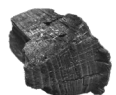
Tanskassa biohiilen käyttöön maataloudessa kiinnitetään paljon huomiota. Lähes kaikki suuremmat biohiilen tuotantoon ja käyttöön liittyvät T&K-hankkeet ovat maatalouteen keskittyviä. Useat maatalousjärjestöt (esim. Tanskan maatalous- ja elintarvikeneuvosto) ovat erittäin aktiivisia biohiilen kehitys-, levitys- että lobbaustoiminnassa. Biohiilen käyttötarkoitus keskittyy Tanskassa kasvihuonekaasujen vähentämiseen maanviljelyssä, maaperän laadun parantamiseen sekä biohiilipohjaisten lannoitteiden vaikutukseen ja arvoon (Thomsen 2022; Thomsen ym. 2015).

Maatalouden oletetaan aiheuttavan lähes puolet Tanskan kasvihuonepäästöistä vuoteen 2030 mennessä, mikä tekee päästövähennyksistä ratkaisevan tärkeitä ilmastoneutraalin

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



tulevaisuuden saavuttamisessa. Pyrolyysihankkeita tukemaan on hiljattain varattu 1,35 miljoonan euron rahasto ja työ esteiden poistamiseksi sekä teknologian laajamittaiseksi käyttöönotoksi on alkanut. Suunnitelman keskeisessä osassa on ympäristövaikutusten arviointien tekeminen, jotta pyrolyysi voidaan ottaa vastuullisesti ja laajamittaisesti käyttöön ja selkeä sääntelykehys saadaan luotua vuoteen 2026 mennessä (State of Green, stateofgreen.com 2024)

8.1 Pyrolyttinen hiilen sitominen ja varastointi (PyCCS)

Biomassojen pyrolyysillä ja sen tuotteen, biohiilen, käytöllä maanparannusaineena toteutetaan asianmukaisesti kestävästä kiertotalouden periaatteista sekä ilmastomuutoksen hillintää että ilmastomuutokseen sopeutumista. PyCCS-ilmiö (Pyrogenic Carbon Capture and Storage) liittyy mahdollisuuteen muodostaa hiilinielu, kun biohiiltä lisätään maaperään, koska pyrolyysin aikana tapahtuu merkittävää hiilen lämpöstabiloitumista biohiilessä (Werner ym. 2022). Pyrolyysin biohiili voi jäädä maaperään sadoiksi tai tuhansiksi vuosiksi riippuen monista tekijöistä.

Suomi on sitoutunut hiilineutraalisuuden saavuttamiseen 2035. Olisi ensiarvoisen tärkeää, että juuri biomassojen pyrolyysiteknologia, joka on tämän päivän toimiva ja kestävä teknologia, pyritään nyt laajasti ottamaan käyttöön, kuten Tanskassa, eikä jäädä odottamaan muita kehittyviä hiilensidontateknologioita, jotka vaativat mittavia infra-investointeja ja joiden käyttöönotto on mahdollinen vasta seuraavalla vuosikymmenellä. Niiden toteuttaminen on myös epävarmaa monimutkaisuutensa vuoksi ja niihin liittyy myös ympäristöllisiä haasteita. Viime aikoina on tullut esiin myös keskitetyn monimutkaisen ja kalliin infran haavoittuvuus kiristyneessä maailman tilanteessa.

Maatalouden ainevirrat ovat sopivia pyrolyysin alkutuotteita. Lannat ja biokaasulaitoksen lietteet voidaan pyrolysoida kuten myös erilaiset kasvijätteet kuten vehnän, rukiin, kauran ja ohran olki (Waheed ym. 2025).

Ravinteiden kierrätyksen kannalta biohiilen sisältämät ravinteet ja sen kyky reagoida ravinteiden kanssa ovat tärkeitä ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää maataloudessa. Jos nämä biohiilien tuottamiseen käytetyt biomassat poltettaisiin, tai biohiilet laitettaisiin kuiviin rakenteisiin, niin että se pysyisi erillään muusta materiaalista, biohiilien sisältämät ravinteet ja kyky reagoida ravinteiden kanssa menisivät hukkaan.

8.2 Biohiili maatalouden kasvihuonekaasujen hillinnässä

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



Biohiilen lisäyksen jälkeen maa-aineksen CH_4 - ja N_2O -päästöt voivat muuttua. Kosteissa olosuhteissa, joissa turvemaat vapauttavat CH_4 :ää ja joissa tapahtuu nopea elektronien siirto, on havaittu jopa 50 %:n vähentymistä CH_4 -päästöissä biohiilen lisäyksen jälkeen (Sun ym., 2021). Tämä johtuu metanotrofien (metaania hapettavat bakteerit) lisääntyneestä aktiivisuudesta hapellisessa juuriston vyöhykkeessä. Suurempi CH_4 väheneminen (metaanin hapetus) korkean lämpötilan puubiohiilen maaperälisäyksen jälkeen on mm. selitetty paremmalla kaasun diffuusiolla (Lehmann ym. 2021).

N_2O -päästöt ovat vähentyneet keskimäärin 38 % ensimmäisenä vuotena lisäyksen jälkeen ja sen jälkeen N_2O -päästöjen nettovähennys on ollut >10 % monen vuoden aikana Meta-tutkimuksen (julkaistujen tietojen) mukaan. Alhaisemmat N_2O -päästöt johtuvat monesta mekanismista, mutta mikrobien N_2O :n pelkistäminen N_2 :ksi on todennäköisin selitys asialle (Borchard ym. 2019).

Maatalouden kasvihuonekaasujen määrittäminen on haasteellista. Biojätteistä valmistettujen lannoitteiden käytössä tutkittiin kasvihuonekaasupäästöjä. Inkubaation aikana biohiili vähensi N_2O -päästöjä säätämällä denitrifikaatiota. Lietepohjainen biohiili vähensi N_2O -päästöjä tanskalaisesta maaperästä 96 % ja 700 °C asteessa valmistettu biohiili 98 % verrattuna lietteen levitykseen. Irlantilaisessa maaperäkokeessa vastaavat N_2O -vähennykset olivat 94 % ja 32 %. Molemmilla maaperillä biohiili vähensi CO_2 -päästöjä 50 % verrattuna lietteeseen. Biohiili ei kuitenkaan vaikuttanut CH_4 -päästöihin (Hu ym. 2023). Pyrolyysiolosuhteet ja maaperän ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi biohiilen N_2O -päästöjen vähentämiseen.

8.3. Biohiilipohjaiset lannoitteet

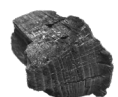
Maaperään lisätyn biohiilen mahdollinen lannoitearvo liittyy ensisijaisesti 1) biohiilen sisältämiin ravinteisiin, 2) biohiilessä olevien ravinteiden saatavuuteen kasveille ja 3) biohiilen vaikutuksiin yleisesti maaperässä, jotka vaikuttavat kasvien ravinteidenottoon (Thomsen 2022).

Biohiili voi siis toimia lannoitteena. Monissa tapauksissa kuitenkin biohiili ei itsessään sisällä tai tarjoa kasville juuri tiettyjä tarvittavia ravinteita. Tästä syystä on usein järkevää tarkastella biohiilen vaikutuksia kasvien lannoitukseen järjestelmässä, jossa **biohiili toimitetaan muiden lannoitteiden rinnalla ja/tai jossa biohiiltä käytetään parempien biohiilipohjaisten lannoitteiden tuottamisessa.**

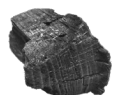
Biohiili kenttäkokeiden meta-analyysissä (Ye ym. 2019) pääteltiin yleisesti, että 1) pelkkä biohiilen lisäys ei johtanut merkittävään sadon lisäykseen, 2) epäorgaaniset lannoitteet

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
 Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
 Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



lisäsivät tyypillisesti satoa 15 % - 40 % verrattuna kontrolliin ja 3) biohiilen ja epäorgaanisten lannoitteiden yhdistelmä antoi 30 %-70 %:n paremman sadontuottovasteen verrattuna kontrolliin. Biohiilen käyttöön kasvien lannoituksessa on monia erilaisia lähestymistapoja.



9. Biohiilen vuorovaikutus mikrobien kanssa

Tieteellisessä kirjallisuudessa on yllättävän vähän raportoitu mikrobien esiintymisestä biohiilen huokosissa tai niiden pinnoilla. Huokoisen rakenteensa ansiosta on ajateltu, että biohiili voisi toimia mikrobien kantajamateriaalina, jonka kautta voitaisiin lisätä maahan hyödyllisiä mikrobeja parantamaan maaperän laatua ja vahvistaa sen toimintaa (Yrjälä ym. 2021, Bolan ym. 2023).

9.1 Biohiilen vaikutus pilaantuneen maaperän kunnostuksessa

Biohiiltä on käytetty maaperän kunnostamiseen haitta-aineista; raskasmetalleista ja orgaanisista aineista. Prosessit ovat erilaisia sisältäen uuttamisen/immobilisoinnin ja hajotuksen. Torjunta-aineilla pilaantuneen ympäristön kunnostamisessa on käytetty hajottajamikrobikantojen ja biohiilen yhdistelmää (Biohiili toimii mikrobin kantajamateriaalina), jolloin on tehokkaasti pystytty parantamaan biologista aineiden hajoamista maaperässä (Wu ym. 2022).

Haitta-aineen luonteesta ja laadusta riippuen tarvitaan erityyppistä biohiiltä maaperän kunnostamisessa. Biohiilen kemiallisfysikaalisia ominaisuuksia on myös erilaisten muokkaustekniikoiden avulla pystytty muokkaamaan niin, että biohiilen tehokkuus ympäristön ja maaperän kunnostuksessa on parantunut (Murtaza ym. 2024).



10. Biohiili kaupunkiympäristössä

Biohiilen eri ominaisuuksia voidaan hyödyntää viherrakentamisessa. Biohiilen huokoisuuteen perustuvaa ravinteiden ja veden sitomiskykyä käytetään ympäristösuunnittelussa (Senadheera ym. 2024). Biohiili voi olla osana kasvualustoissa ja samalla lisätä maaperän tarjoamia ekosysteemipalveluita (Anu Riikonen, 2019, Helsingin kaupunki). Biohiili soveltuu hyvin perennaistutukseen, sadepuistoihin, puiden istutukseen, nurmikoihin, viherkattoihin sekä viherseiniin.

Ruotsissa

Ensimmäinen laajamittainen biohiilikoe kaupunkiympäristössä oli kirsikkaviljelmä Tukholmassa 2009. Kun sitä seurattiin muutama vuosi myöhemmin, havaittiin, että biohiilellä oli positiivinen vaikutus puiden kasvuun. Puut, jotka oli istutettu biohiiltä sisältävään maahan, olivat rungon ympärysmitaltaan jopa 35 % leveämpiä kuin biohiilettömään maahan istutetut (Fransson ym. 2020).

Vuonna 2018 istutettiin Tukholman keskustaan suuri määrä puita lisäämään vihreyttä alueelle ja luomaan esteettisesti miellyttävä kaupunkiympäristö samalla parantaen paikallista sadeveden hallintaa. Maaperään lisättiin biohiili-kivimursketta (makadam) helpottamaan kasvien juurtumista ja kasvua vaikeassa ympäristössä, joka koostuu suurelta osin tiivistetyistä pinnoista. Ensimmäisinä kasvukausina puut kasvoivat hyvin; tiheillä latvoilla, hyvin kehittyneillä lehdillä ja vahvalla vuotuisella versokasvulla.

Malmöön perustettiin vuonna 2014 metsäbiotooppi osana BiodiverCity-projektia. Osalle metsäbiotooppia lisättiin biohiiltä puustovaikutuksen tutkimiseksi. Tänäpäin ero biohiilen ja ilman biohiiltä olevien alueiden välillä näkyy paljaalla silmällä. Alueet, joissa on käytetty biohiiltä ovat paljon vihreämpiä muuhun ympäristöön verrattuna.

Vuonna 2017 Vellingessä Etelä-Skånessa perustettiin kuusi erikokoista ja -muotoista sadevesipuutarhaa viivästyttämään sadeveden valumista. Kasvien veden saannin varmistamiseksi biohiiltä lisättiin sadevesipuutarhoihin. Tulokset olivat niin hyviä, että samantyyppisiä sadevesipuutarhoja on perustettu lisää. Kunnassa on tällä hetkellä noin parikymmentä sadevesipuutarhaa, joissa on käytetty biohiiltä.

Suomessa

Helsingin Jätkäsaaren Hyväntoivonpuistoon perustettiin biohiiltä sisältävien viherrakentamisen kasvualustojen pilotti- ja koealue Aalto-yliopiston Carbon Lane -hankkeessa. Tarkoituksena oli selvittää biohiilien vaikutusta puiston hiilensidontaan, puiden kasvuun ja biohiilien vaikutusta maan vesitalouteen (Tammeorg ym. 2021).

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.

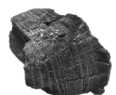


Käytetyt biohiilet olivat puupohjaisia biohiiliä ja kaikkien pyrolyysilämpötila oli yli 600 °C. Eri kasvualustaseoksissa käytettiin eri valmistajien tuotteita: Carbofex Oy, Noireco Oy, Novarbo Oy (Biolan group).

Sekä perinteisissä että kantavissa kasvualustoissa puut ovat kasvaneet biohiilikasvualustoilla hyvin, vähintään yhtä hyvin kuin biohiilettömissä verranteissa, mutta seuranta-aika on vielä lyhyt. Tuloksia esitellään Hiilipuisto-hankkeen loppuraportissa.

Helsingin biohiilihanke (linkki) toteutti useita erityyppisiä biohiilen viherrakennus- ja ylläpitokohteita pääasiassa vuoden 2023 aikana. Kaupunki tulee tekemään seurantaa useiden biohiiliratkaisuiden mahdollisten vaikutusten arvioimiseksi.

Helsingin Viikin campusalueelle perustettiin 2024 Helsingin ensimmäinen [metsäpuutarha](#) Helsingin yliopiston Sparkle rahoituksella (TaiMet 2024), missä puiden ja pensaiden istutukseen käytettiin PUHI Oy:n biohiiltä. Metsäpuutarhan maan päällistä (kasvit ja hyönteiset) sekä maaperän monimuotoisuutta seurataan.



11. Biohiilen käyttö ympäristön kunnostuksessa

Hyöty biohiilen käytöstä eri ympäristöissä on usein joko:

- 1) Tuotteen korvaaminen (fossiilisten tai mineraalituotteiden korvaaminen biopohjaisilla tuotteilla)
- 2) Uudet tuotteet ja/tai arvoketjut ja palvelut
- 3) Parannetut tuotteet ja/tai arvoketjut ja palvelut

Ympäristön kunnostussovellukset ovat:

- Epäorgaanisten epäpuhtauksien poisto jätevedestä, esim. raskasmetallien poisto tai liuenneiden ravinteiden poistaminen (Biswal ym. 2023).
- Orgaanisten epäpuhtauksien poistaminen jätevedestä esim. väriaineet, ftalaatit jne. (Jiang ym. 2023).
- Epäpuhtauksien poistaminen kaasuista esim. rikkiyhdisteistä (Sadegh ym. 2024).
- Biohiiltä voidaan käyttää raskasmetallien poistamisessa ja niiden biosaatavuuden pienentämisessä fytoremediaatiossa, joka toimii kasvin sekä sen yhteydessä elävien mikrobien avulla (Palansooriya ym. 2022).

11.1 Hulevedet

Biohiiltä käytetään yhä enemmän substraattimateriaalina (eli pohjana tai alustana) hulevesien käsittelyssä.

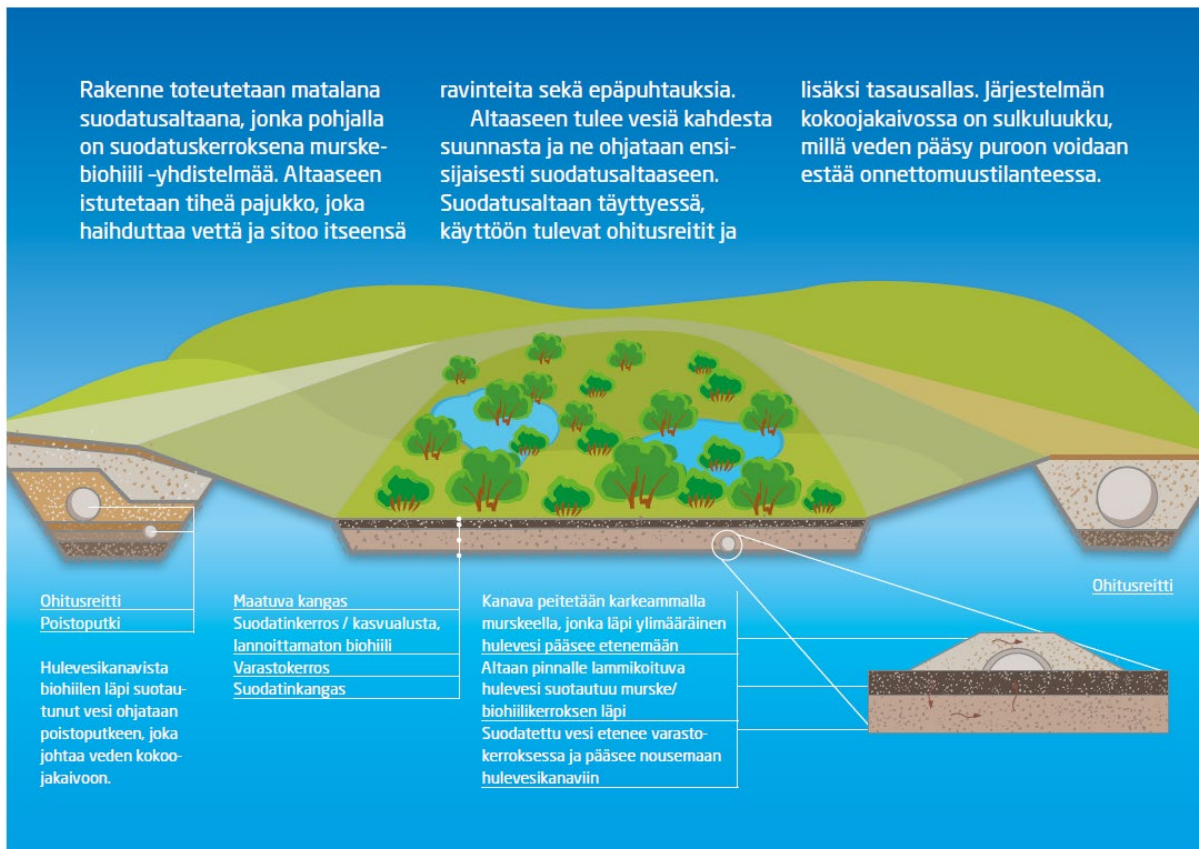
Kaupunkien hulevedet kuljettavat mukanaan haitta-aineita, jotka voivat heikentää lähialueiden pintavesien laatua. Liikenne on pääasiallinen saasteiden lähde kaupungeissa, ja liikenteen määrä korreloi voimakkaasti epäpuhtauskuormituksen kanssa tienvarsiympäristöissä. Tienpenkka-lysimetrikokeessa biohiili vähensi kokonaistyyppihiuhtoutumista (TN), mikä todennäköisesti johtuu (i) typen sitoutumisesta biohiileen tai (ii) biohiilen aiheuttamista vaikutuksista maan abioottisiin ja bioottisiin ominaisuuksiin (Kuoppamäki ym. 2019).

Helsingin Metsälän biohiili-suodatusalueen valuma-alue on noin 20 hehtaaria, ja siihen kuuluu liikennealueita, pienteollisuutta ja asuinalueita (Kuva 7). Suodatusalueen tavoitteena on hulevesien laadullinen hallinta ennen niiden johtamista sivu-uoman kautta eliöstöltään arvokkaaseen Haaganpuroon.

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
 Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
 Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.





Metsäläntien biohiilisuoatusalueen rakenne- ja toimintaperiaate.

Kuva 7. Metsälän biohiili-suodatusalue. Helsingin kaupunki/ Kaupunkivesistöt kuntoon -hanke.

Metsälän suodatusalueen toimivuuden selvittämiseksi kerättiin vesinäytteitä alueen tulo- ja poistoputkista vuosina 2019 ja 2020. Suodatusalue poisti tehokkaasti erityisesti fosforia ja kiintoainesta. Metallien, kuten kadmium, koboltti ja kupari, pitoisuus laski suodatuksessa. Öljyt ja PAH-yhdisteet pidätyivät varsin hyvin. Myös typen pitoisuus aleni jonkin verran. Suodatustehon todettiin riippuvan paljolti veden viipymäajasta suodatusalueella, ja kovien virtaamien aikana teho jäi heikommaksi (Elo ym. 2023).

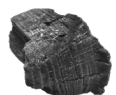
11.2 Viherkatot

Biohiililisäyksen vaikutuksia viherkattojen toimivuuteen ja vaikutuksia valumaveden laatuun ja määrään sekä maaperäeliöihin tutkittiin seitsemän vuoden ajan Etelä-Suomessa (Kuoppamäki ym. 2021). Biohiili vähensi fosforin (P) huuhtoutumista viherkaton

Biohiilialan edistämishanke

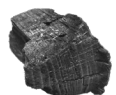
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



niittykasvisiemenistutuksissa, joissa kasvualusta oli 100 mm paksu murskatun tiilen seos. Samantyyppinen tulos saatiin matoissa, jotka koostuivat 40 mm paksusta esikasvatetusta kasvillisuudesta 60 mm paksun murskatun tiilen seoksessa.

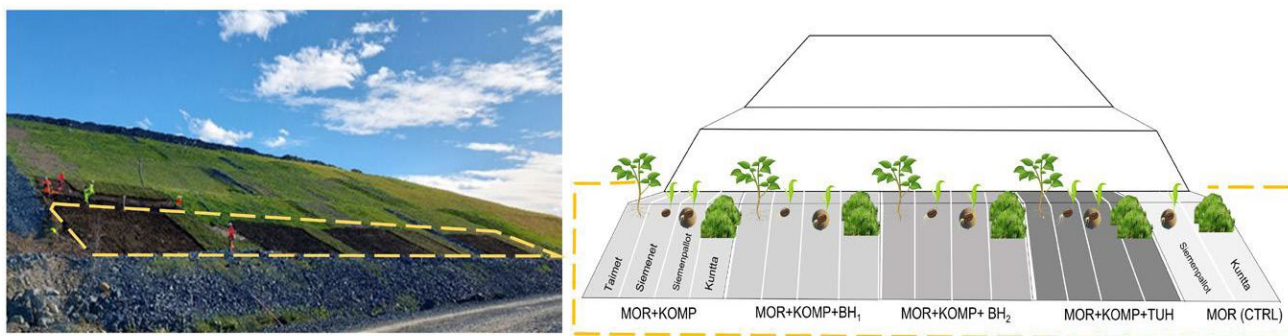
Biohiili vähensi edellä mainitussa tutkimuksessa typen (N) huuhtoutumista vain istutuksissa, missä se vaikutti positiivisesti kasvipeitteeseen. Ravinnepitoisuudet laskivat kattojen vanhetessa, mutta kohonneita fosforipitoisuuksia mitattiin kuusi vuotta istutuksen perustamisesta lannoituksen jälkeen eikä biohiilellä ollut lieventävää vaikutusta fosforin huuhtoutumiseen.



12. Kaivannaisjätealueiden peittoratkaisujen uudet mahdollisuudet

Vuonna 2017 EU:n tuella alkaneessa Biopeitto 1 -hankkeessa saatiin lupaavia tuloksia puupohjaisen biohiilen käytöstä kaivosten rikastushiekka-alueiden sulkemisessa. Hanke oli Suomessa ja Pohjois-Euroopassa ensimmäisiä, joissa tutkittiin biohiilen hyödyntämistä kaivannaisjätteiden peittoratkaisuissa. Biopeitto 2 -hankkeessa tutkimusta jatkettiin Luonnonvarakeskuksen (Luke) ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) yhteistyönä EU:n tuella (Pietilä ym. 2023, Materia 4).

Jo yksistään Lapin alueella syntyy vuosittain lähes 100 000 tonnia biopeittoon soveltuvia orgaanisia sivuvirtoja, osa aivan kaivosalueiden läheisyydessä. Testattaviksi materiaaleiksi valikoituivat (kompostoitu) jätevesiliete, siitä syntyvä biohiili ja lietetuhka sekä purkupuusta ja metsän harvennuspuusta (kuusi) valmistettu biohiili ja energiatuotannon jäämänä syntyvä lentotuhka. Biohiilet valmistettiin hidas-pyrolyysillä (450-600 °C). Pilotin avulla verrattiin kolmen uudentyyppisen kasvualustan valmistus- ja perustamiskustannuksia ja hiilijalanjälkeä (elinkaariarviointi, LCA) sekä verrattiin niitä nykyratkaisuun eli turpeen ja moreenin sekoitukseen. Lopputuloksena saatiin, että biohiiltä sisältävä kasvualusta voi muuttua jopa hiilinieluksi kaivosalueiden ennallistamisessa (Kuva 8).



Kuva 8. Biohiilen käyttö kaivosalueen ennallistamisessa. Sodankylään Boliden Kevitsa Mining Oy:n sivukiven läjitysalueelle perustettiin koe, jossa testataan erilaisia kasvualustaseoksia ja kasvillisuutta (Pietilä ym. 2023, Materia 4).

Hankkeen tuottama luonnon- ja taloustieteellinen tieto rohkaisee hakemaan ratkaisuja kaivosalueiden maisemointiin kiertotaloudesta. Toimijaverkoston kokoaminen on edellytys uudentyyppisen peittoratkaisun toteutukselle. Vain tiiviillä yritysysteistyöllä voidaan hallita uuden tuotteen kustannuksia ja ympäristövaikutuksia.

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
 Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
 Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



13. Biohiili rakentamisessa

Biohiilellä on potentiaalia lisäaineena tietyissä rakennusmateriaaleissa (Kuittinen ym. 2021). Useita raportteja on saatavilla biohiilen käytöstä asfaltissa, savilaastissa, sementtilevyissä ja laastissa (Gupta, S. & Kua, H-W. 2017; Wang ym. 2019). Raportoidut biohiilen pitoisuudet vaihtelevat paljon, 0,025 prosentista 50 prosenttiin, riippuen tuotekokeesta. Tässä määrässä biohiilen hiilipitoisuus vaihtelee alkuperäisestä biomassan hiilimäärästä 46 prosentista jopa 98 prosenttiin (Gupta, S. & Kua, H-W. 2017). Näin ollen vaikka selvää numerotietoa lopputuotteiden hiilipitoisuuden arvioimiseksi ei raportoidakaan, arvioidaan, että kokonaisuudessaan hiilipitoisuus ja hiilen (hiilidioksidin) varastointipotentiaali lisäaineena rakennustuotteissa on alhainen.



14. Biohiilen uudet käyttömahdollisuudet

Biohiilen hyödyntäminen liittyy sen räätälöimiseen eri käyttötarkoituksiin. Biohiilen muokkaaminen ja parantaminen soveltuvaksi eri käyttötarkoituksiin on vilkkaan tutkimuksen alla. Biohiilen adsorptiokyky on keskeinen ominaisuus maanparannus sovelluksiin. Kun halutaan maksimoida biohiilen sisältämien ravinteiden hyödyntäminen, on esim. hidasliukoisten lannoitteiden kehittämisessä alhaisemman lämpötilan biohiilet suositeltavia. Jos tavoitteena on maksimoida biohiilen vedensitomiskykyä, on syytä käyttää korkeampia pyrolyysilämpötiloja huokoisuuden lisäämiseksi.

14.1. Biohiilen ”funktionalisoiminen”

Biohiileen voidaan lisätä toiminnallisuutta. Esimerkiksi adsorptiokapasiteetin parantamiseksi biohiiliä voidaan modifioida/funktionalisoida useilla modifiointiaineilla, kuten emäksillä, hapoilla, metallioksidoilla ja hapettavilla aineilla, mikä parantaa biohiilen pintakemiallisia ominaisuuksia ja rakennetta (Murtaza ym. 2024).

14.2. Mikromuovien poistaminen maaperästä

Kiertotaloudessa uusiokäytetään materiaaleja ja myös maaperää, joka voi sisältää mikromuoveja. Pyrolyysin korkea lämpötila poistaa mikromuoveja. Pyrolyysin tuotetta, biohiiltä, voidaan myös käyttää maaperän kunnostamiseen.

Mikromuovien tehokas uutto ja poistaminen maaperästä on kiireellinen haaste kiertotaloudessa, koska vasta viime vuosina on ymmärretty kuinka suuri ympäristöongelma mikromuovit ovat.

Biohiili, lähtöaineena lehmän lanta, sitoi tehokkaasti mikromuoveja huokoskanaviinsa ja biohiilen pinnalla olevat happipitoiset funktionaaliset ryhmät (CO_3^{2-} ja COO^-) edistivät mikromuovien adsorptiota (Chai ym. 2024). Mikro- ja nanomuovien adsorboimiseen on käytetty useita biohiilen modifiointi/funktionalisointi menetelmiä kuten höyry, kuulamurskaus, tensidi, Fe-metalli, Fe-Mg metalli, Fe-Zn metalli, sekä Al-Mg-metalli modifioitua biohiiltä (Ji ym. 2024).



15. Biohiilen tulevaisuuden näkymät

15.1. Eco-innovation

Biohiilen ja sen sivutuotteiden tuotanto sopii hyvin kestävän kiertotalouden kehittämiseen, ilmastonmuutoksen hillintään ja hiilen poistoon (Salo ym. 2023; Lefebvre ym. 2023; Woolf ym. 2021). Biohiilituotannon ja -toiminnan kasvu luo mahdollisuuksia uusiin innovatiivisiin liiketoimintamalleihin. Yksi niistä on "eco-innovation", joka on osuva ja sopivin kuvaamaan biohiilen ja siihen liittyvien liiketoimintojen ominaisuuksia ja kehitystä. Biohiilen tuotanto ja käyttö voivat tarjota monialaisia ympäristöhyötyjä arvoketjun eri osissa (Salo ym. 2024). UNEP (2014a, 2014b) määritteli ekoinnovaation seuraavasti: "Liiketoimintamallin kehittäminen ja soveltaminen, jota ohjaa uusi liiketoimintastrategia ja joka sisällyttää kestävyiden kaikkiin liiketoiminnan osa-alueisiin elinkaariajattelun pohjalta ja yhteistyössä arvoketjun kumppaneiden kanssa" (Kemp ym. 2019).

15.1.2 Liiketoimintamalli

Ekoinnovaatio liiketoimintamalli on uusi liiketoimintamalli, joka muokkaa tapaa, jolla käyttäjät saavat arvoa tuotteiden (tavaroiden ja palveluiden) vähäisemmän ympäristövaikutuksen perusteella. Ekoinnovaatio liiketoimintamalli on usein organisatorinen innovaatio, jossa yhdistyy prosessiteknologia ja markkinointi. Ekoinnovaatio liiketoimintamalli asettaa yleensä tuotteen ylivoimaisen ympäristösuorituskyvyn asiakasarvolupauksen keskiöön (Kemp ym. 2019).

15.2. Biohiilen Euroopan markkinakatsaus

Vuoden 2024 Euroopan biohiiliteollisuuden (EBI) markkinaraportissa kerrotaan, että Euroopassa oli vuonna 2023 jo yli 170 biohiilen tuotantolaitosta. Niiden yhteinen vuosittainen tuotanto oli 75 000 tonnia biohiiltä. Tuotantolaitosten määrän arvioitiin kasvavan 220 laitokseen vuoden 2024 aikana. Tunnusomaista biohiililaitoksille oli, että 2023 yli puolet biohiilestä tuotettiin laitoksissa, joiden vuosituotantokapasiteetti oli alle 2000 tonnia. Pohjoismaiden osuus biohiilituotannosta oli noin 28 %, mikä vastaa 21 000 tonnia biohiiltä vuodessa. Vertailuksi voi todeta, että kasvu 2022-2023 oli 41% ja että vuonna 2024 arvioitiin tuotannon kasvavan 115 000 tonniin.



Kirjallisuus

Adhikari, S., Moon, E. & Timms, W. 2024. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils. *Journal of Cleaner Production* 446, 141454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141454>

ASTM International 2011. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. D 1762-84 (Reapproved 2007).

Azzi, E.S., Li, H., Cederlund, H., Karlton, E. & Sundberg, C. 2024. Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data. *Geoderma* 441, 116761. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116761>

Bier, H. & Lerchenmüller, H. 2024. Unlocking the Potential of Biochar: A Closer Look at its Permanence. Report on Permanence of Biochar. Perspectives from two recent publications and EBI conclusions. EBI. <https://www.biochar-industry.com/2024/>

Biswal, B.K. & Balasubramanian, R. 2023. Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11, 110986. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>

Bolan, S., Hou, D., Wang, L., Hale, L., Egamberdieva, D., Tammeorg, P., Li, R., Wang, B., Xu, J., Wang, T., Sun, H., Padhye, L.P., Wang, H., Siddique, K.H.M., Rinklebe, J., Kirkham, M.B. & Bolan, N. 2024. The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Science of the Total Environment* 886, 163968. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968>

Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M.L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J.M., Fuertes-Mendizabal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J.A. & Novak, J. 2019. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: a meta-analysis. *Science of the Total Environment* 651, 2354–2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>

Buss, W., Hilber, I., Graham, M.C. & Mašek, O. 2022. Composition of PAHs in Biochar and Implications for Biochar Production. *ACS Sustainable Chemical Engineering*. 10, 6755–6765. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00952>

Chai, B., Xiao, T., Xiao, E., Du, S., Yang, S., Yin, H., Dang, Z. & Pan, K. 2024. Enhancing microplastics removal from soils using wheat straw and cowdung-derived biochars. *Journal of Cleaner Production* 470, 143288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143288>

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



EBC. The European Biochar Certificate. <https://www.european-biochar.org/en/home>

EBC 2024. EBC guidelines version 10.4 from 20th December 2024. <https://www.european-biochar.org/en/ct/8-Analytical-Methods>

European Biochar Industry, 2024. European biochar market report 2023/2024. <https://www.biochar-industry.com/market-overview>

Elo, A., Hagner, M., Kainulainen, A., Kuoppamäki, K., Laulumaa, P., Männistö, A., Nuotio, A-K, Riikonen, A., Salo, E., Tammeorg, P. & Tiilikkala, K. 2023. Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, -rakentamiseen ja kunnossapitoon. Toimittaja, Anu Riikonen Viherympäristöliitto ry. ISBN (elektroninen) 978-952-5225-86-0.

Fransson, A.M, Gustafsson, M., Malmberg, J. & Paulsson, M. 2020. The Biochar Handbook – for users. This handbook is a translation of the Swedish handbook “Biokolhandboken – för användare” 2020 with some minor revisions.

Gupta, S., & Kua, H-W. 2017. Factors Determining the Potential of Biochar as a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review. Journal of Materials in Civil Engineering 29, 9. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001924

Hagner, M., Kuoppala, E., Fagernäs, L., Tiilikkala, K. & Setälä, H. 2015. Using the copse snail *Arianta arbustorum* (Linnaeus) to detect repellent compounds and the quality of wood vinegar. International Journal of Environmental Research 9:53-60. <http://doi.org/10.22059/ijer.2015.873>

Heikkinen, J., Keskinen, R., Soinne, H., Hyväluoma, J., Nikama, J., Wikberg, H., Källi, A., Siipola, V., Melkieor, T., Dupont, C., Campargue, M., Larsson, S.H., Hannula, M. & Rasa, K. 2019. Possibilities to improve soil aggregate stability using biochars derived from various biomasses through slow pyrolysis, hydrothermal carbonization, or torrefaction. Geoderma 344, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.028>

Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K. Velmala, S., Hanajik, P. & Regina, K. 2021. Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils. Carbon Management, 4, 359-376. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1947386>

Helsingin Kaupunki. Kaupunkivesistöt kuntoon -hanke. <https://www.hel.fi/fi>

Hu, Y., Thomsen, T.P., Fenton, O., Sommer, S.G., Shi, W. & Cui, W. 2023. Effects of dairy processing sludge and derived biochar on greenhouse gas emissions from Danish and



Irish soils. Environmental Research 216, 114543.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114543>

Jiang, T., Wang, B., Gao, B., Cheng, N., Feng, Q., Chen, M. & Wang, S. 2023. Degradation of organic pollutants from water by biochar-assisted advanced oxidation processes: Mechanisms and applications. Journal of Hazardous Materials 442, 130075.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130075>

Joseph, S. & Taylor, P. 2024. A farmer's guide to the production, use and application of biochar. © 2024 by ANZ Biochar Industry Group (ANZBIG). ISBN: 978-0-6453908-0-3.

Ji, G., Xing, Y. & You, T. 2024. Biochar as adsorbents for environmental microplastics and nanoplastics removal. Journal of Environmental Chemical Engineering 12: 113377.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113377>

Karim, A.A., Kumar, M., Singh, E., Kumar, A., Kumar, S., Ray, A. & Dhal, N.K. 2022. Enrichment of primary macronutrients in biochar for sustainable agriculture: A review. CRITICAL REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY 52, 1449–1490. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1859271>

Kemp, R., Arundel, A., Miedzinski, M., Rammer, C., Tapia, C., Barbieri, N., Turkeli, S., Bassi, A.M., Mazzanti, M., Chapman, D.A., Lopez, F.J.D. & McDowall, W., 2019. Maastricht manual on measuring eco-innovation for a green economy. Inno4sd.

<https://www.inno4sd.net/uploads/originals/1/inno4sd-pub-mgd-02-2019-fnl-maastrich-manual-ecoinnovation.pdf>.

Kalu, S., Kulmala, L., Zrim, J., Peltokangas, K., Tammeorg, P., Rasa, K., Kitzler, B., Pihlatie, M., & Karhu, K. 2022. Potential of biochar to reduce greenhouse gas emissions and increase nitrogen use efficiency in boreal arable soils. Frontiers in Environmental Science. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.914766>

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, 1631. <https://doi.org/10.3390/w15081631>

Kuittinen, M., Zernicke, C., Slabik, S. & Hafner, A. 2023. How can carbon be stored in the built environment? A review of potential options. Architectural Science Review 66, 91–107. <https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1896471>

Kuoppamäki, K., Hagner, M., Valtanen, M. & Setälä, H. 2019. Using biochar to purify runoff in road verges of urbanised watersheds: a large-scale field lysimeter study. Watershed Ecology and the Environment 1, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2019.05.001>

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



Kuoppamäki, K., Setälä, H. & Hagner, M. 2021. Nutrient dynamics and development of soil fauna in vegetated roofs with the focus on biochar amendment. *Nature-Based Solutions* 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100001>

Lefebvre, D., Fawzy, S., Aquije, C.A., Osman, A.I., Draper, K.T. & Trabold, T.A. 2023. Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. *Biochar* 5, 65. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00258-2>

[Metsäpuutarha](#) 2024. Philipp Weiss, Annevi Sjöberg, Skogsträdgården. Käännös suomeksi Miina Ant-Wuorinen, Henna Jämsä, Satoisa Metsäpuutarha. Maatarhuri ISBN: 9789529489671

Murtaza, G., Ahmed, Z., Valipour, M., Ali, I., Usman, M., Iqbal, R., Zulfqar, U., Rizwan, M., Mahmood, S., Ullah, A., Arslan, M., Rehman, M.H., Ditta, A. & Tariq, A. 2024. Recent trends and economic significance of modified/functionalized biochars for remediation of environmental pollutants. *Scientific Reports* 14, 217. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50623-1>

Muzyka, R., Misztal, E., Hrabak, J., Banks, S.W. & Sajdak, M. 2023. Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. *Energy* 263, 126128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126128>

Palansooriya, K.N., Li, J., Dissanayake, P.D., Suvarna, M., Li, L., Yuan, X., Sarkar, B., Tsang, D.C.W., Rinklebe, J., Wang, X. & Ok, Y.S. 2022. Prediction of soil heavy metal immobilization by biochar using machine learning. *Environmental Science Technology* 56, 4187–4198. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08302>

Pietilä, R., Tornivaara, A., Hagner, M., Uusitalo, M., Heiskanen, J., Uotila, K. & Viikki, K. 2023. Kaivannaisjätealueiden peittoratkaisujen uudet mahdollisuudet – hiilinielu ja kukkapatari. Materia 4. Julkaisija/Publisher Vuorimiesyhdistys – Bergsmannaföreningen r.y. 81. vuosikerta ISSN 1459-9694. www.vuorimiesyhdistys.fi

Riikonen, A. 2019. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherkentämissä. Kaupunkiympäristön julkaisu 2019:19, Helsingin Kaupunki. ISBN 978-952-331-652-2.

Sadegh, F., Sadegh, N., Wongniramaikul, W., Apiratikul, R. & Choodum, A. 2024. Adsorption of volatile organic compounds on biochar: A review. *Process Safety and Environmental Protection* 182, 559–578. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.11.071>

Salo, E., Weber, K., Hagner, M. & Näyhä, A. 2024. Nordic perspectives on the emerging biochar business. *Journal of Cleaner Production* 475, 143660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143660>

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



Sanei, H., Rudra, A., Przyswitt, Z.M.M., Kousted, S., Sindlev, M.B., Zheng, X., Nielsen, S.B. & Petersen, H.I. 2024. Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology* 281, 104409.

<https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>

Sarfaraz, Q., da Silva, L.S., Drescher, G.L., Zafar, M., Severo, F.F., Kokkonen, A., Molin, G.D., Shaf, M.I., Shafque, Q. & Solaiman, Z.M. 2020. Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. *Scientific Reports* 10, 955. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57987-8>

Senadheera, S.S., Withana, P.A., Lim, J.Y., You, S., Chang, S.X., Wang, F., Rhee, J.H. & Ok, Y.S. 2024. Carbon negative biochar systems contribute to sustainable urban green infrastructure: a critical review. *Green Chemistry* 26, 10634. DOI: 10.1039/d4gc03071k

Sarvi, M., Hagner, M., Velmala, S., Soinne, H., Uusitalo, R., Keskinen, R., Ylivainio, K. & Rasa, K. 2021. Bioavailability of phosphorus in granulated and pyrolyzed broiler manure. *Environmental Technology & Innovation* 23, 101584.

Sarvi, M., Kainulainen, A., Malk, V., Kaseva, J. & Rasa, K. 2023. Industrial pilot scale slow pyrolysis reduces the content of organic contaminants in sewage sludge. *Waste Management* 171, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.018>

Soinne, H., Keskinen, R., Heikkinen, J., Hyväluoma, J., Uusitalo, R., Peltoniemi, K., Velmala, S., Pennanen, T., Fritze, H., Kaseva, J., Hannula, M. & Rasa, K. 2020. Are there environmental or agricultural benefits in using forest residue biochar in boreal agricultural clay soil? *Science of the Total Environment* 731, 138955.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138955>

State of Green 2024. Pyrolysis: Denmark presents next step for a greener agriculture. News; Environment and agriculture; Carbon capture, storage and utilization; Policy frameworks <https://stateofgreen.com/en/news/pyrolysis-denmark-presents-next-step-for-a-greener-agriculture/>

Steiner, C. 2008. <https://www.soilfixer.co.uk/biochar-for-carbon-sequestration>

Sun, T., Guzman, J.J.L., Seward, J.D., Enders, A., Yavitt, J.B., Lehmann, J. & Angenent, L.T. 2021. Suppressing peatland methane production by electron snorkeling through pyrogenic carbon in controlled laboratory incubations. *Nature Communication* 12, 4119. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24350-y>

TaiMet. TaikaMetsä ry.

<https://www.linkedin.com/company/101515011/admin/dashboard/>

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



Tammeorg, P., Soronen, P., Riikonen, A., Salo, E., Tikka, S., Koivunen, M., Salonen, A-R., Kopakkala, T. & Jalas, M. 2021. Co-Designing Urban Carbon Sink Parks: Case Carbon Lane in Helsinki. *Frontiers in Environmental science* 9, 672468. doi:10.3389/fenvs.2021.672468

Thomsen, T.P., Ravenni, G., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Hauggaard-Nielsen, H. & Henriksen, U.B. 2015. Screening of various low-grade biomass materials for low temperature gasification: Method development and application. *Biomass and bioenergy* 79: 128-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.019>.

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

UNEP (2014a), Measuring Progress towards a Green Economy. UNEP.

UNEP (2014b). A Guidance Manual for Green Economy Policy Assessment. UNEP.

Valkama, E., Tzemi, D., Esparza-Robles, U.R., Syp, A., O'Toole, A. & Maenhout, P. 2024. Effectiveness of soil management strategies for mitigation of N₂O emissions in European arable land: A meta-analysis. *European Journal of Soil Science* 75, 13488. <https://doi.org/10.1111/ejss.13488>

Waheed, A., Xu, H., Qiao, X., Aili, A., Yiremaikeybayi, Y., Haitao, D. & Muhamma, M. 2025. Biochar in sustainable agriculture and Climate Mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. *Biomass and Bioenergy* 193, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107531>

Wang, L., Chen, L., Tsang, D., Kua, H-W., Yang, J., Ok, Y., Ding, S., Hou, D. & Poon, C. 2019. The Roles of Biochar as Green Admixture for Sediment-Based Construction Products. *Cement and Concrete Composites* 104, 103348. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103348>

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

Werner, C., Lucht, W., Gerten, D. & Kammann, C. 2022. Potential of land-neutral negative emissions through biochar sequestration. *Earth'sFuture*, 10, e2021EF002583. <https://doi.org/10.1029/2021EF002583>

Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A.W., McConkey, B. & Baldock, J. 2021. Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. *Environmental Science and Technology* 55, 14795–14805. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425>



Wu, C., Zhi, D. & Yao, B. 2022. Immobilization of microbes on biochar for water and soil remediation: a review. *Environmental Research* 212, 113226.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113226>

Yang, Y., Sun, K., Han, L., Chen, Y., Liu, J. & Xing, B. 2022. Biochar stability and impact on soil organic carbon mineralization depend on biochar processing, aging and soil clay content. *Soil Biology and Biochemistry* 169, 108657.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108657>

Ye, L., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Lehmann, J., Singh, B. & Sabir, M. 2019. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management* 36, 2–18.

<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/sum.12546>

Yrjälä, K. & Lopez-Echarte, E. 2021. Structure and function of biochar in remediation and as carrier of microbes. In *Biochar: Fundamentals and Applications in Environmental Science and Remediation Technologies* eds. Ajit K. Sarmah. Elsevier, eBook ISBN: 9780128201794.

Yrjälä, K., Salo, E. & Ramakrishnan, M. 2022. Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 26, 100339.

<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100339>

Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B. & Liu, L. 2019. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy* 171, 581-598.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.035>

