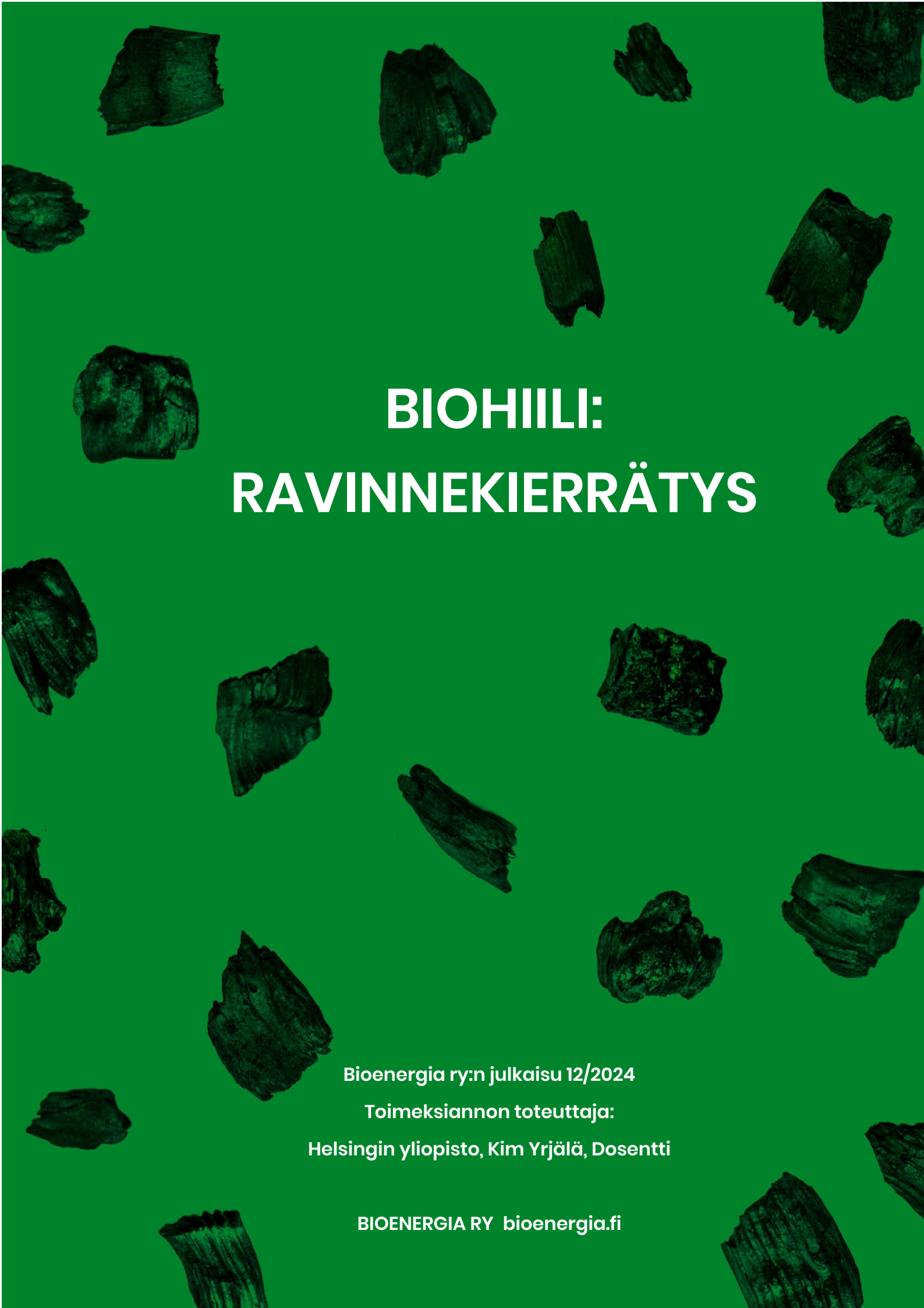




BIOHIILI: RAVINNEKIERRÄTYS

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.....	15
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 Vedyn ja orgaanisen hiilen suhde.....	19
7.2.1 Mineralisoituvat yhdisteet.....	19
7.2.2 Polyaromaattiset hiilivedyt, PAH.....	20
7.3 Biohiilen ravinteet sekä raskasmetallit.....	21
7.3.1 Sertifiointiohjeet biohiilille.....	21
7.4 Biohiilen makroravinteiden saatavuus ja lannoitevaikutus.....	22
7.5 pH ja kalkitusarvo.....	22
7.6 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.

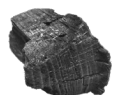


8.1 Biomassojen pyrolyysi.....	25
8.2 Biohiili kasvihuonekaasujen hillinnässä.....	25
8.3. Biohiilipohjaiset lannoitteet.....	26
9. Biohiilen vuorovaikutus mikrobien kanssa.....	28
10. Biohiili kaupunkiympäristössä	29
11. Biohiilen käyttö ympäristön kunnostuksessa	31
11.1 Hulevedet.....	31
11.2 Viherkatot.....	32
12. Kaivannaisjätealueiden peittoratkaisujen uudet mahdollisuudet.....	34
13. Biohiili rakentamisessa	35
14. Biohiilen uudet käyttömahdollisuudet.....	36
Kirjallisuus	37



1. Hankkeen tausta

Suomen biohiiliyhdistys liittyi Bioenergia ry:hyn vuonna 2022 ja sinne perustettiin biohiiliverkosto edelleen 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 biohiiliyrietykset.



2. Johdanto

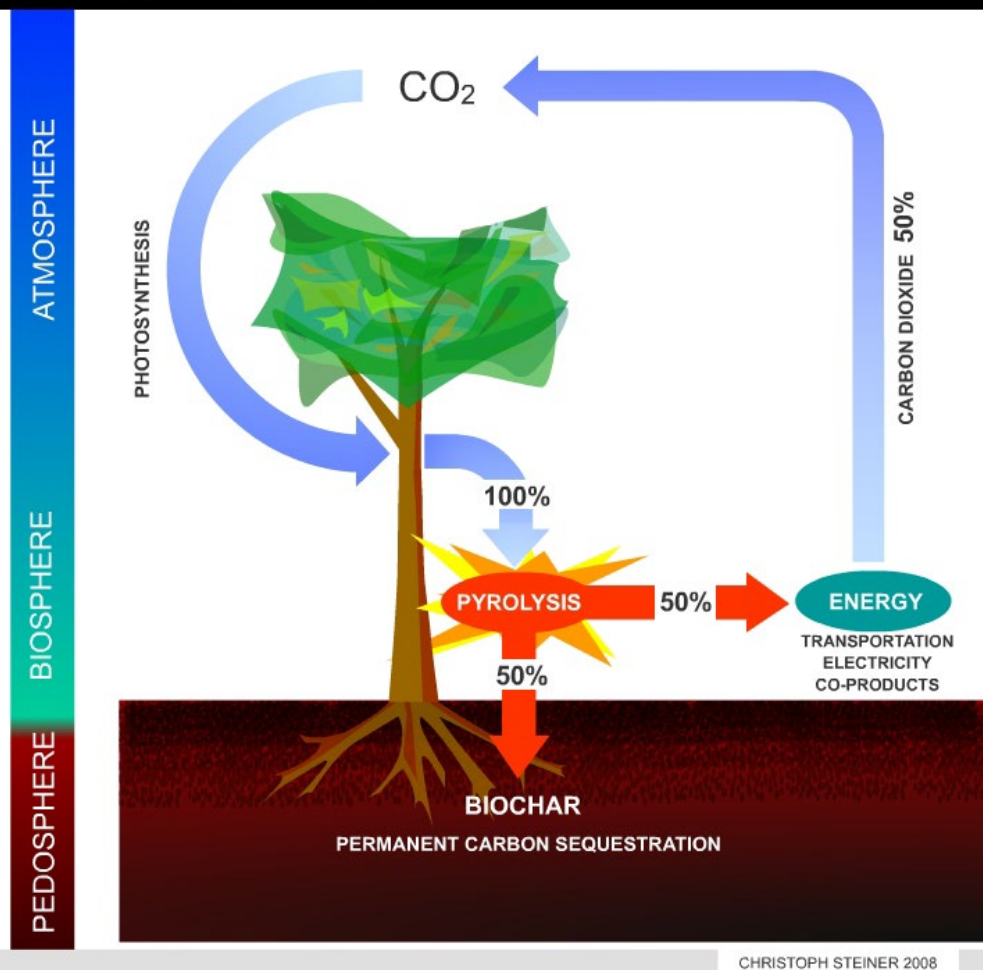
Biohiilellä on mahdollisuus olla merkittävä tekijä osana globaalia systeemistä kestävyysmuutosta lähitulevaisuudessa, koska siihen perustuva teknologia ja sen käyttötarkoitukset ovat hyvin tiedossa ja niiden potentiaali kestävämpinä ratkaisuinä on tunnustettu. Tieteellinen pohja on huomattavasti vahvistunut viime vuosina ja nyt haetaan käytännön biohiilisovelluksia. Uusia pyrolyysilaitoksia perustetaan enenevässä määrin esimerkiksi 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 voi olla, että se edustaa paikallista kestävä kiertotaloutta, joka vaatii monen toimijan ja asiantuntijan yhteistyötä, ja tämän lisäksi sääntelyn kehittämistä, jotta liiketoiminta voidaan aloittaa. Samalla voidaan todeta, että biohiili yhdistää monta keskeistä globaaliin kestävyteen liittyvää näkökohtaa. Ensiksi sen raaka-aine, biomassa, syntyy yhteyttämisen kautta, kun kasvit käyttävät auringonvaloa sekä hiilidioksidia elintoimintojen ylläpitämiseen. Suurin osa fotosynteesissä syntyneestä hiilestä siirtyy biomassaan kasvin eri osiin, ja osan kasvi allokoii juuriinsa ja sieltä maaperään sen mikrobien ja pieneläinten käyttöön.

Tähän asti biomassaa luonnonmateriaalina on hyödynnetty tuhlaten, josta on syntynyt paljon jätettä, joka on saanut hajota itsestään kaatopaikoilla tai sitten se on poltettu, jolloin syntyy ilmastoon lisää CO₂-kasvihuonekaasua. Kiertotalouden periaatteen mukaan voidaan osa maa- ja metsätalouden ainevirroista muuttaa kutakuinkin hajoamattomaan biohiilen muotoon vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä (KHK). Se antaa mahdollisuuden parantaa maaperän laatua käyttämällä biohiiltä sitomaan haitta-aineita ja samaan aikaan luomalla maaperään hiilivarastoja.



THE BIOCHAR CARBON CYCLE



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

Teknisiä parametreja:

Tässä Bioenergia ry:n uudessa biohiilen taustakartoitus selvityksessä käsitellään myös teknisiä parametreja, joita on hyvä tuntea tai tiedostaa kun esim. suunnitellaan biomassojen pyrolyysiä. Edelleen on hyvä tietää biohiilen ominaisuuksista, jotta löydetään sopivin biohiili määrättyyn käyttötarkoitukseensa.

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

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



3. Mikä biohiili on?

Biohiili (eli biochar) on pysyvä hiiliyhdiste, joka tehdään kutakuinkin hapettomissa olosuhteissa 350–900 °C:n lämpötilassa biomassoista. 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.

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

Jos pyrolyysilämpötilaa nostetaan kohti 1000 °C astetta ja sen yli, syntyy aktiivihiihtä, joka on paljon arvokkaampi tuote, jota on käytetty paljon suodattimena 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 sekä ilmassa, höyryssä, työssä sekä muissa kaasuisissa. 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, ei-kondensoituja ja pysyviä kaasuja (CO, H₂, CO₂, CH₄ etc.) ja vettä vapautuu ja niiden lisäksi vapautuu pyrolyysinestettä, puuetikkaa ja pienempiä hiilivetyjä ja partikkeleita.

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 (mm. 500–650 °C) kun taas nopeassa flash-pyrolyysissä yhdistetään pienet partikkelit, lyhyt viipymäaika korkeaan prosessilämpötilaan (mm. 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).

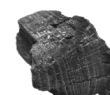
Taulukko 1. Suomessa käytetyt biomassat pyrolyysiä varten.

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.

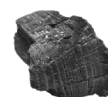


Harvennustähteet	Hake	450 °C	Soinne ym. 2020
Ohra	Olki	460 °C	Heikkinen ym. 2021
Ketun lanta		350 °C, 450 °C	Heikkinen ym. 2021
Minkin lanta		350 °C, 450 °C	Heikkinen ym. 2021

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

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



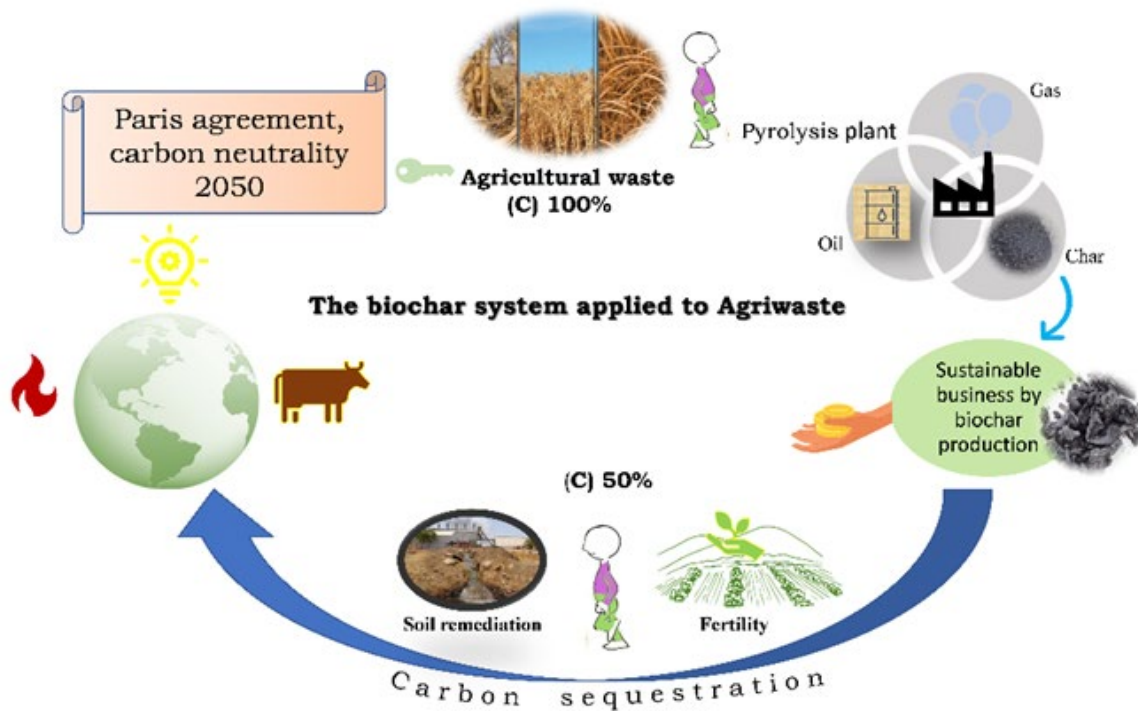
5. Biohiili edesauttaa siirtymistä lineaarisesta taloudesta kiertotalouteen

Biohiilen tuottaminen ja käyttö edellyttää ainevirtojen hyödyntämistä ja yhdistämistä, jotta 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 materiaalia, joka vähentää KHK-päästöjä. Biohiiliä voidaan käyttää ravinnekierron tehostajana vähentämään järvien, vesien ja rannikkovesien rehevöitymistä.

Pyrolyysiprosessi antaa mahdollisuuden lietteiden haitta-aineiden käsittelyyn, kuten raskasmetallien ja farmaseuttisten aineiden poistamiseen. Kaikki muut lääkeaineet pystytään poistamaan pyrolyysillä, mutta parasetamoli näyttäisi jäävän biohiileen pyrolyysin jälkeenkin. 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.

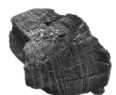
Modernissa pyrolyysilaitoksessa otetaan syntyneet kaasut talteen ja niistä tehdään energiaa paikalliseen hyötykäyttöön. Niin kauan kuin orgaanista materiaalia jatkuvasti syötetään pyrolyysiin ja syöte on riittävän kuivaa, syntyy energiaa eikä prosessin ylläpitämiseen tarvita energiaa (eksotermisen reaktio)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





Kuva 2. Biohiilen tuotanto käyttäen maatalouden ainevirtoja ja sen käyttö lisäämään viljavuutta ja hiilensidontaa. Yrjälä et al. Current Opinion in Environmental Science & Health 2022, 26:100339

Kuvassa 2 havainnollistetaan biohiilen tuottamiseen liittyvä kiertotalouden mukainen ainekierto, joka auttaa hiilineutraaliuden saavuttamisessa 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 monenlaisia biohiiliä. Koska biohiilen suurin käyttöalue tällä hetkellä on maanparannusaineena, on syytä katsoa miten biohiili vaikuttaa maaperään ja sen kautta kasvien kasvuun.

Tärkeitä pohjoismaisia biohiilijulkaisuja:

Ruotsissa ilmestyi tänä vuonna, 2024, Biokolboken, jonka on kirjottanut ja kuvittanut Lotta & Mattias Gustafsson. Esipuheessa he kirjottavat, että puuttui kirja, joka yksinkertaisesti ja yleistajuisesti kertoo, mitä biohiili on.

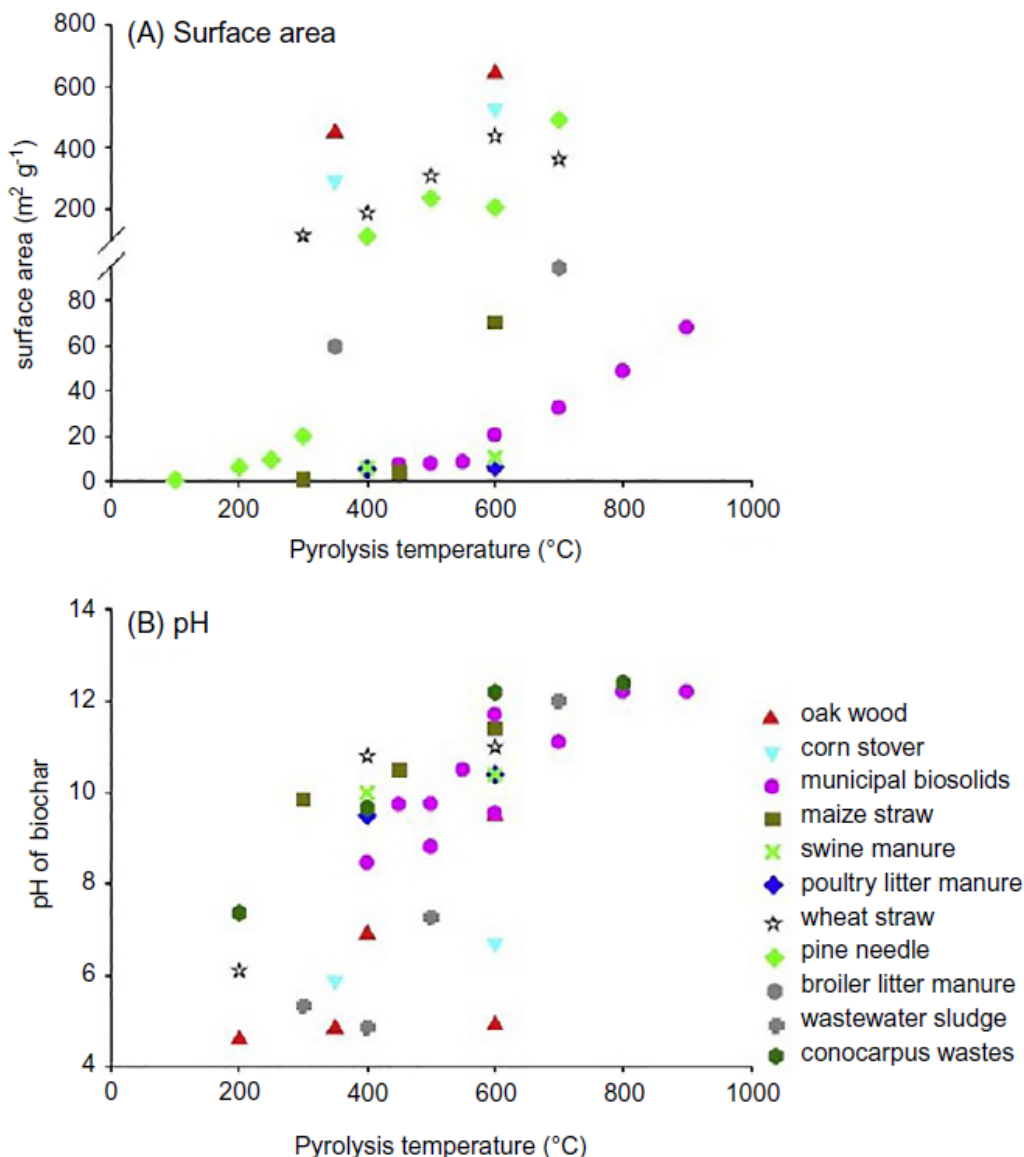
Suomessa ilmestyi 2023 Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, – rakentamiseen ja kunnossapitoon (Anu Riikonen ed., Viherympäristöliitto, 2023).

Fysikaaliset ominaisuudet

Biohiilen tärkeitä fysikaalisia ominaisuuksia ovat:

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





Kuva 3. Pyrolyysilämpötilan vaikutus biohiilen ominaispinta-alaan ja sen pH:on. Kuvaajan uudelleenjulkaisuun saatu lupa. Lähde: Yrjälä, K. and Lopez-Echatea, E. 2021.

Nämä fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat biohiilen liikkuvuuteen ympäristössä ja sen vuorovaikutukseen maaperän veden, mineraalien ja ravinteiden kanssa. Sen huokoinen rakenne luo valtavan määrän pintoja mihin mikrobi, kuten bakteerit, arkeonit ja sienet, voivat tarttua ja kasvaa suojassa niitä syövilta mikroskooppisilta alkueliöiltä. Irtotiheyden, hiukkastiheyden, hiukkaskoon, huokoisuuden ja pinta-alan fysikaaliset ominaisuudet liittyvät toisiinsa, kun niitä mitataan, ja ne vaikuttavat yhdessä biohiilen eri ominaisuuksiin. Hiukkasten tiheys ja pinta-ala riippuvat huokoisuudesta. Hyvin huokoisella,

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

Hanke on saanut rahoitusta

Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta

Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.

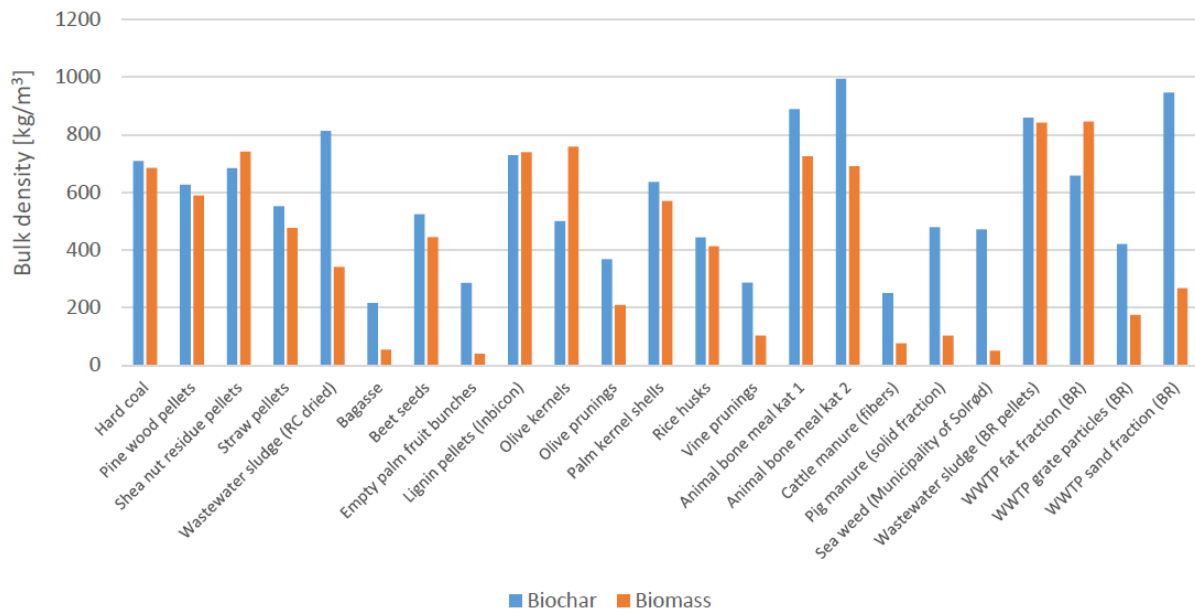


matalatiheyksisellä biohiilellä voi olla suurempi vedenpidätyskyky, mutta samalla se on kevyempi ja helpommin leviävä.

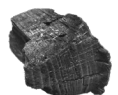
6.1 Tiheys

Tiheystermejä voidaan soveltaa biohiiliin, mutta myös maaperään tai biomassan raaka-aineisiin, kun haetaan biomassoille ja biohiilille sopivia ja tarvittavia ja suotuisia vaikutuksia. Kuvassa näkyy biohiilen tiheyden suuri vaihtelu, joka vaikuttaa esim. biohiili-tuotteen käsittelyyn valmistuksen jälkeen ja 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. Kuvassa näkyy, miten tiheys vaihtelee eri biohiilien välillä ja niiden raaka-aineena käytettyjen biomassojen suhteen. Yksikkönä on kg/m³. Kuvaajan uudelleenjulkaisuun saatu lupa. Lähde: Thomsen, T. 2022.



Bulkkitiheys:

Biohiilet: 0,06–0,7 g/cm³. Hiukkasten tai kappaleiden joukon tilavuusyksikkömäärän massa ja se riippuu hiukkasten koosta, muodosta ja tiivistymisestä. Sillä on tärkeä merkitys materiaalinkäsittelyn, tuotannon ja sovellusten kannalta.

Hiukkastiheys:

Hiukkastiheys: Ruhosta valmistetut biohiilet: 0,25–0,3 g/cm³. Puusta valmistetut biohiilet: 0,47 – 0,6 g/cm³. Hiukkastiheys vaikuttaa liikkuvuuden helppouteen ja biohiilen häviämiseen tuulessa ja vedessä.

6.2 Partikkelikoko

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

6.3 Hiukkaskoko

Hiukkaskoko riippuu raaka-aineesta ja sen esikäsittelystä, hiiltolämpötilasta sekä tuotantotekniikasta eli erityyppisistä pyrolyysilaitteista (ruuvit, pyörivät rummut jne.). Hiukkaskokoa voidaan pienentää jauhamalla biohiiltä, ja seulomalla voidaan varmistaa tasaisempi hiukkaskoko. Hiukkaskokoa voidaan myös suurentaa pelleteimalla tai rakeistamalla.

Biohiilen hiukkaskoko voi pienentyä maaperässä jäätymis-sulamisjaksojen, matojen syötyä biohiiliä ja mekaanisen tiivistymisen vuoksi.

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

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



6.4 Makro- ja mikrohuokoisuus

Huokoisuus on materiaalin tyhjän tilan prosenttiosuus. Huokoiset voidaan jakaa niiden läpimitan mukaan mikrohuokoihin, (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.

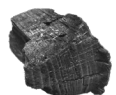
6.5 Ominaispinta-ala sekä hydrofobisuus (hydrophobicity)

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. Matalan lämpötilan biohiilet ovat tyypillisesti hydrofobisia, mutta pidempi pyrolyysiaika tai biohiilituotteen pesu vedellä voivat 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 hiottava. Puusta valmistetussa biohiilessä haihtuvien aineiden pitoisuus on alle 20 %, ja jos se tuotetaan noin 600 °C:n lämpötiloissa saavutetaan HGI 80-120, mikä luokittelee puubihiilen 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. Tämä analyysi tehdään perinteisesti ASTM D1762-84 – “Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal” testillä. Uudempi menetelmä on termogravimetrinen analyysi (TGA).

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

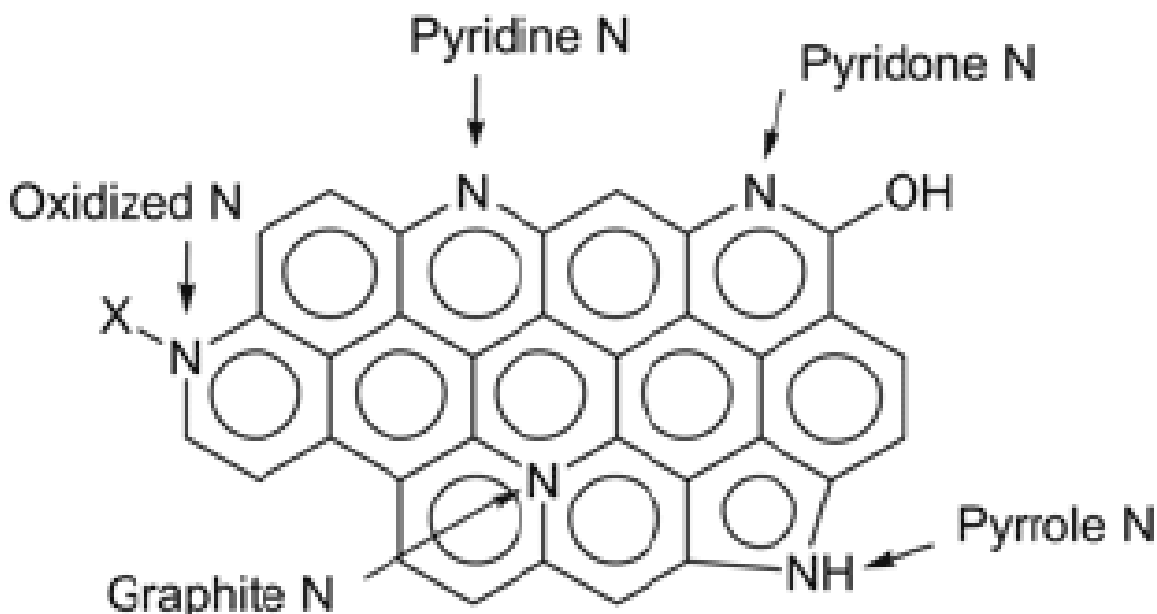
Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



7.1 C-H-O suhde ja pysyvä Hiili

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

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



Kuva 5. Pysyvän 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 suunnilleen osoittaa vedyn ja orgaanisen hiilen suhteella (H/C_{org}). Orgaaninen hiili lasketaan vähentämällä mineraalikarbonaattien hiili (C), hiilen, C:n kokonaispitoisuudesta (C_{kok}). Biohiilen vetypitoisuus vaihtelee 1-5 %:n välillä vetypitoisuuden kasvaessa alemmissa lämpötiloissa.

Biohiilen pysyvyys on jatkuvan keskustelun alla ja kaksi erittäin merkittävää julkaisua vuodelta 2024 on tuonut lisävalaistusta sen pysyvyyteen maaperässä:

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

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





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

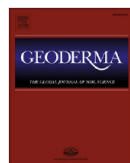
Geoderma 441 (2024) 116761



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) EBI:stä julkaisivat 10.4.2024 yhteenvedon näistä merkittävistä biohiilen pysyvyyteen liittyvistä julkaisuista. Heidän johtopäätöksensä ovat:

- 1) Useimmat biohiilet ovat heterogeenisiä ja koostuvat vaihtelevista eri fraktioista, joilla pysyvyys vaihtelee
- 2) Biohiilifraktiot, jotka ovat olleet alttiina korkeille lämpötiloille riittävän pitkään, ovat kemiallisesti/rakenteellisesti inertiniittä (pysyvää)

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

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



- 3) Inertiniitti on orgaanisen hiilen stabiilein muoto, ja se on pitkään 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 joka tapauksessa yli 1 000 vuoden aikana, realistisesti reilusti yli 10 000 vuoden kuluttua.
- 6) Sanei ym. (2024) tutkimus kaupallisesti tuotetuista biohiilistä osoittaa, että ne koostuvat pääasiassa inertiniittibiohiilestä.
- 7) Yli 95 % tällaisten kaupallisten biohiilien hiilestä ei olennaisesti hajoa maaperässä ilmaston kannalta merkittävänä ajanjaksoina (joka tapauksessa yli 1 000 vuoden aikana, realistisesti reilusti yli 10 000 vuoden kuluttua).

7.2 Vedyn ja orgaanisen hiilen suhde

Pysyvyys ilmaistaan vety/orgaaninen hiili -suhteella

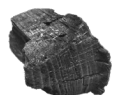
- Hiilen pysyvyys tai pitkäikäisyys voidaan kuvata vedyn suhteella orgaaniseen hiilen (H/Corg).
- Orgaaninen hiili saadaan määritettyä, kun kokonaishiilestä vähennetään mineraaliset karbonaattihiilet.
- Vedyn pitoisuus biohiilessä vaihtelee 1-5 %, ja kasvaa alhaisemmissa lämpötiloissa valmistettaessa.
- 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, 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 on biohiilen hiili.

7.2.1 Mineralisoituvat yhdisteet

Biohiilet sisältävät vesiliukoisia ja mineralisoituvia yhdisteitä, jotka voivat olla ravintoa mikrobeille ja stimuloida siemenien itävyyttä ja kasvien kasvua. Tämä tunnetaan nimellä

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

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



labiili C. Suurin osa näistä yhdisteistä on peräisin haihtuvista yhdisteistä, kun biomassassa hajoaa (depolymerisoituu) kuumennettaessa happiköyhässä ympäristössä.

Mineralisoituvat yhdisteet:

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

7.2.2 Polyaromaattiset hiilivedyt, PAH

Polyaromaattiset hiilivedyt rakentuvat useammasta aromaattisesta renkaasta, joista yksinkertaisin on naftaleeni. PAH yhdisteiden terveysriskit kasvavat, kun aromaatti renkaita on neljä tai useampia. Niitä syntyy ja ovat peräisin kivihiilitervasta, noesta ja teollisista polttoprosesseista, joihin liittyy korkeita lämpötiloja Pitkäaikainen altistuminen näille PAH-yhdisteille, on yhdistetty erilaisiin haitallisiin terveysvaikutuksiin korostaen niiden merkittäviä terveysriskejä.



PAH-yhdisteet:

PAH-yhdisteiden kokonaismäärälle ja biologiselle hyötyosuudelle on olemassa suurimmat sallitut rajat. Kaksirenkainen Naftaleeni on biohiilen runsain ja kooltaan pienin PAH (noin 90 % PAH:ien kokonaismäärästä). PAH-pitoisuuksista biohiilessä on käyty tieteellistä keskustelua ja Boss ym. (2022) tutkimus kertoo, että pyrolyysin jälkeinen kontaminaatio ja PAH-laskeuma oli biohiilessä tärkein PAH-yhdisteiden (poislukien naftaleeni) määrään vaikuttava tekijä.

PAH-kontaminaatiovaaraa voidaan ratkaisevasti pienentää parantamalla jälkiprosessin lämmönhallintaa niin että lämpötila pidetään korkeana loppuun asti edellä mainitun tutkimuksen mukaan. Tämä tutkimus myös haastaa nykyistä käytäntöä 16 PAH-yhdisteen analyysistä. Tutkijat haluaisivat PAH-rajat toksisuuden mukaan ja mahdollisesti myös biosaatavuuden perusteella, eikä kuten nyt yhteismäärän mukaan.

7.3 Biohiilen ravinteet sekä raskasmetallit

Biohiilen tuhkafraktioon allokoituu epäorgaaniset molekyylit, 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).

Jotkut biohiilet sisältävät raskasmetalleja, mutta useimmissa tapauksissa ne eivät ole saatavilla kasveille.

7.3.1 Sertifiointiohjeet biohiilille

Koska kiertotaloudessa ainevirrat voivat sisältää haitallisia aineita ja esimerkiksi lietteet voivat sisältää raskasmetalleja on tärkeää varmistaa, että niitä ei levitetä maaperään.



- Raskasmetalleja sisältävistä raaka-aineista, kuten jätevesilietteestä, valmistetut biohiilet pidättävät nämä metallit itseensä.
- Useimmissa maissa on säännöksiä, jotka rajoittavat maalle levitettävien raskasmetallien määrää.
- Joko IBI- tai EBC-sertifioinnin 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>

7.4 Biohiilen makroravinteiden saatavuus ja lannoitevaikutus

Vaikka useimpien lanta- ja olkibiohiilien typpipitoisuus on korkea, hyvin vähän typestä on helposti saatavilla, jotta kasvit voisivat käyttää sitä, kun biohiilet on lisätty maaperään. N:n lisäksi monien muiden alkuaineiden pitoisuus on korkeampi biohiilessä kuin biomassassa. Fosforin (P) ja kaliumin (K) saatavuus 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 typestä on **immobilisoitunut** eli sitoutunut maaperään tai orgaanisiin yhdisteisiin, eikä ole kasvien saatavilla. Ajan myötä osa vähemmän saatavilla olevasta typestä voi tulla saataville suunnilleen samalla nopeudella, jolla C mineralisoituu eli kun mikrobit hajottavat C:tä hiilidioksidiksi ja vedeksi.

7.5 pH ja kalkitusarvo

Biohiilillä voi olla vaikutusta maan happamuuteen niin niiden oman, yleensä korkean pH-arvon kautta, että niiden puskurointikyvyn kautta. Biohiilen oma pH riippuu pääasiassa tuotantolämpötilasta; nyrkkisääntönä alhaisissa lämpötiloissa tuotettaessa syntyy happamia ja korkeissa emäksisiä biohiiliä. Niiden vaikutus maan pH-arvoon riippuu käyttömäärästä ja maaperän omista ominaisuuksista. Puupohjaisten biohiilien kalkitusvaikutus on yleensä vaatimaton, luokkaa 1 % kalkin vaikutuksesta (Anu Riikonen toim., 2023, VYL:in 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

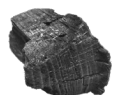
Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



7.6 Kationinvaihtokapasiteetti (Cation exchange capacity, CEC)

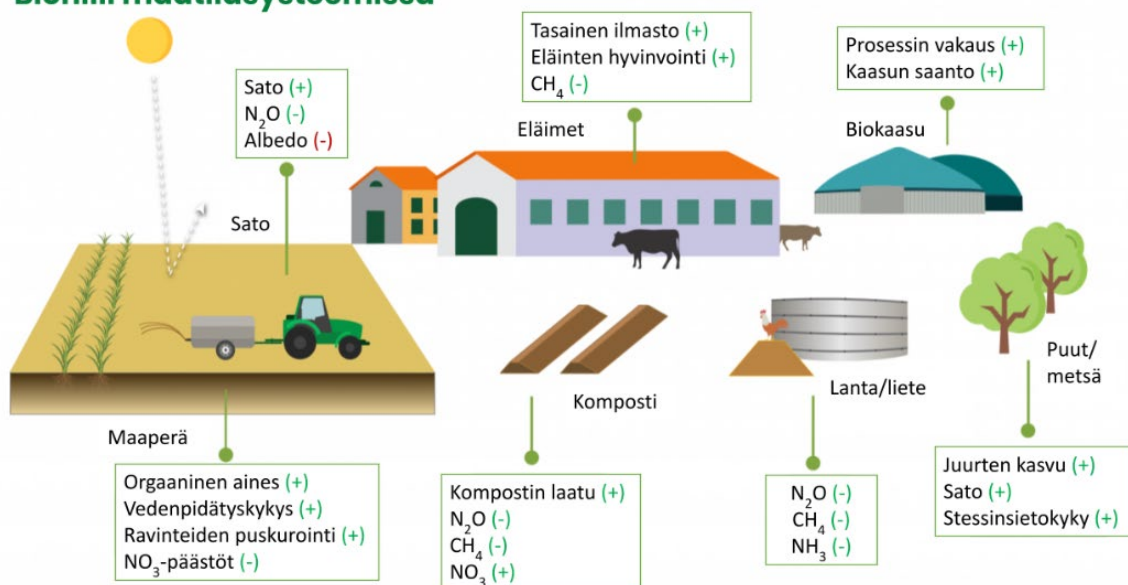
Kationinvaihtokapasiteetti (CEC) kertoo biohiilen kyvystä pidättää vaihtuvia kationeja, kuten K^+ ja kalsium Ca^{2+} . Biohiilen CEC liittyy pääsääntöisesti biohiilen pinnalla oleviin funktionaalisiin ryhmiin.

Matalamman lämpötilan biohiilillä on tavallisesti korkeampi CEC, mutta korkeamman lämpötilan biohiilet voivat sitoa enemmän ravinteita ja orgaanisia aineita. CEC voi nousta biohiilen ikääntyessä erityisesti matalamman pH:n biohiilissä.



8. Biohiilen vaikutus ravinteiden kiertoon maataloudessa

Biohiili maatilasysteemissä



Kuva: EBI

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

Maataloudessa biohiilet soveltuvat maanparannuksen lisäksi biokaasulaitoksissa anaerobisen hajotustoiminnan stabiloimiseen sekä kompostin laadun parantamiseen (Kuva 6). Biohiiliä voidaan käyttää lannan käsittelyn kasvihuonepäästöjen (N₂O, CH₄, NH₃) vähentämiseen. Biohiili on myös eläinruokinnan komponentti, joka esim. vähentää lehmien CH₄ päästöjä.

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

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

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



8.1 Biomassojen pyrolyysi

Biomassojen pyrolyysillä ja sen tuotteen, biohiilen, käytöllä maanparannusaineena toteutetaan asianmukaisesti kestävän kiertotalouden periaatteita sekä ilmaston muutoksen hillintää sekä ilmastonmuutokseen sopeutumista. PyCCS-ilmiö (Pyrogenic Carbon Capture and Storage) liittyy mahdollisuuteen muodostaa hiilinielu, kun biohiiltä lisätään maaperään, koska pyrolyysin aikana tapahtuu merkittävää hiilen lämpöstabiloitumista biohiilessä. Pyrolyysin jälkeen biohiilen hiili on sitoutunut pääosin aromaattisiin rakenteisiin, jotka eivät ole helposti biologisesti hajoavia, ja tämä hiili voi jäädä maaperään sadoiksi tai tuhansiksi vuosiksi riippuen monista tekijöistä. Pieni osa biohiilen hiilestä ei täysin stabiloitu, vaan se voi muuttua ja vapautua muutamassa kuukaudessa.

Suomi on sitoutunut hiilineutraalisuuden saavuttamiseen 2035. Olisi ensiarvoisen tärkeää, että juuri biomassojen pyrolyysiteknologia, joka on tämän päivän toimiva ja kestävä teknologia, otetaan laajasti käyttöön eikä jäädä odottamaan muita hiilensidontateknologioita, joiden laajempi toteutuminen vaatii valtavia investointeja ja uusi teknologia voi olla toimiva vasta n. 10 vuoden päästä.

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.

Maatalouden ainevirrat ovat sopivia pyrolyysin alkutuotteita. Lannat ja biokaasulaitoksen lietteet voidaan pyrolysoida kuin myös erilaiset kasvijätteet kuten vehnän, rukiin, kauran ja ohran olki.

8.2 Biohiili kasvihuonekaasujen hillinnässä

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 vähenemisiä CH_4 -päästöissä biohiilen lisäyksen jälkeen (Sun ym., 2021), mikä johtuu metanotrofien (eli metaania energiansa ja hiilen lähteenään käyttävien mikro-organismien) lisääntyneestä aktiivisuudesta hapellisessa juuriston vyöhykkeessä. Suurempi netto CH_4 kulutus korkean lämpötilan puubiohiilen maaperälisäyksen jälkeen on selitetty paremmalla kaasun diffuusiolla, sekä parantuneella

Biohiilialan edistämishanke

www.bioenergia.fi/biohiili

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



elektronien kuljetuksella biohiilen aromaattisen rengasrakenteen myötä hapettomissa oloissa (Lehmann ym. 2021).

N₂O-päästöt ovat vähentyneet keskimäärin 38 %, ensimmäisenä vuotena lisäyksen jälkeen ja sen jälkeen N₂O-päästöjen nettovähenneminen on ollut >10 % monen vuoden aikana Meta-tutkimuksen (julkaistujen tietojen) mukaan. Alhaisemmat N₂O-päästöt johtuvat monesta mekanismista, mutta mikrobien N₂O:n pelkistäminen N₂:ksi on todennäköisin pidemmän aikavälin vuotuinen mekanismi (Borchard ym. 2019).

Koska maatalouden kasvihuonekaasujen määrittäminen on haasteellista, on esitelty esiseulontatyökalu, jolla tarkastellaan kasvihuonekaasupäästöjä biojätteistä valmistettujen lannoitteiden osalta. Inkubaation aikana biohiili vähensi N₂O-päästöjä säätämällä denitrifikaatiota. Lietepohjainen biohiili vähensi N₂O-päästöjä tanskalaisesta maaperästä 96 % ja 700 °C asteessa valmistettu biohiili 98 % verrattuna lietteen levitykseen, ja irlantilaisessa maaperässä vastaavat N₂O-vähennykset olivat 94 % ja 32 %. Molemmilla maaperillä biohiili vähensi CO₂-päästöjä 50 % verrattuna lietteeseen. Biohiili ei vaikuttanut CH₄-päästöihin. Pyrolyysiolosuhteet ja maaperän ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi biohiilen N₂O-päästöjen vähentämiseen. (Hu ym. 2023)

8.3. Biohiilipohjaiset lannoitteet

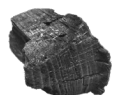
Mahdollinen suoraan maaperään lisätyn biohiilen lannoitearvo liittyy ensisijaisesti 1) biohiilen ravinteiden sisältöön, 2) biohiilessä olevien ravinteiden saatavuuteen kasveille ja 3) biohiilen vaikutuksiin maaperässä, jotka vaikuttavat kasvien ravinteidenottoon (Thomsen 2022). Yhdessä useiden maahan, kasveihin ja koko systeemiin liittyvien ulkoisten tekijöiden kanssa nämä ominaisuudet ohjaavat ravinteiden saatavuuden kasveille ja lannoitearvon nopeuksia ja tasoja.

Johtuen suuresta vaihtelusta biohiilen ravinteiden sisällössä, on tapauksia, joissa biohiili voi toimia lannoitteena, ja tapauksia, joissa se ei voi. Tämä yksinkertainen ero näiden kahden kategorian välillä ei täysin kuvaa biohiilen käyttövaihtoehtoja lannoituksessa. Monissa tapauksissa biohiili ei itsessään sisällä tai tarjoa tiettyyn kasviin tarvittavia ravinteita. Tästä syystä on usein järkevää tarkastella biohiilen vaikutuksia kasvien lannoitukseen järjestelmässä, jossa **biohiili toimitetaan muiden lannoitteiden rinnalla ja/tai jossa biohiiltä käytetään täydellisempien biohiilipohjaisten lannoitteiden tuottamisessa.**

Meta-analyysissä (Ye ym. 2019) pääteltiin, että hyvin yleisellä tasolla 1) pelkkä biohiili johti tyypillisesti merkittävän tuottoefektin puuttumiseen, 2) epäorgaaniset lannoitteet lisäsivät



tyypillisesti satoa 15 %-40 % verrattuna kontrolliin, ja 3) biohiilen ja epäorgaanisten lannoitteiden yhdistelmä antoi 30 %-70 %:n paremman sadontuottovasteen verrattuna kontrolliin. Kuitenkin tämä kysymys on monimutkaisempi kuin yksinkertaiset numerot antavat ymmärtää, ja biohiilen käyttöön kasvien lannoituksessa on monia erilaisia lähestymistapoja.



9. Biohiilen vuorovaikutus mikrobien kanssa

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

9.1 Biohiilen vaikutus pilaantuneen maaperän kunnostuksessa

Biohiiltä on käytetty eri haitta-aineiden kunnostamiseen maaperässä, sekä raskasmetallien että orgaanisten aineiden kunnostamiseen. Prosessit ovat erilaisia sisältäen uuttamisen/immobilisoinnin ja hajotuksen. Molemmissa tapauksissa biohiilellä on kaksoisrooli adsorboida ja desorboida kontaminantti. Vaihtoehtona vapaiden hajoavien kantojen ja biohiilen käytölle torjunta-aineilla pilaantuneen ympäristön kunnostamiseen on mahdollista käyttää torjunta-aineita hajottavien kantojen ja biohiilen yhdistelmää (Biohiili toimii mikrobien kantajamateriaalina), joka on tehokas bioaugmentaatiomenetelmä millä parannetaan biohajoaista maaperässä (Wu ym. 2022).

Haitta-aineen luonteesta ja laadusta riippuen tarvitaan erityyppisiä biohiiliä. Tähän on otettu käyttöön erilaisia biohiilen muokkaustekniikoita fysikaalis-kemiallisten ja molekyylisten ominaisuuksien muuttamiseksi lisäämään niiden tehokkuutta ympäristön kunnostamisessa (Murtaza ym. 2024).



10. Biohiili kaupunkiympäristössä

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

Ruotsissa

Ensimmäinen laajamittainen biohiilikoe kaupunkiympäristössä Ruotsissa 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 % suurempia kuin biohiilettömään maahan istutettujen (Fransson ym. 2020).

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

Malmössä perustettiin vuonna 2014 aurinkoon altistuva metsäbiotooppi osana BiodiverCity-projektia. Osalle metsäbiotooppia lisättiin biotilaa biohiilen vaikutuksen tutkimiseksi puustoon. Tänään ero biohiilen ja ilman biohiiltä olevien alueiden välillä näkyy paljaalla silmällä; ne, joissa on biohiiltä, ovat paljon vihreämpiä.

Vuonna 2017 Etelä-Skånen Vellingessä perustettiin kuusi erikokoista ja -muotoista sadevesipuutarhaa viivästyttämään sadeveden valumista. Kasvien veden saannin varmistamiseksi veden niukempina aikoina 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 biohiiliä sisältävien viherrakentamisen kasvualustojen pilotti- ja koealue Aalto-yliopiston Carbon Lane -

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

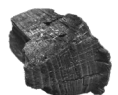
Hanke on saanut rahoitusta
Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta
Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta.



hankkeessa. Tarkoituksena oli selvittää biohiilien vaikutusta puiston hiilensidontaan, puiden kasvuun, ja biohiilien vaikutusta maan vesitalouteen. Käytetyt biohiilet olivat puupohjaisia biohiiliä, ja kaikkien pyrolyysilämpötila yli 600 °C. Eri kasvualustaseoksissa eri valmistajien tuotteita oli: 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 viherrakennus- ja ylläpitokohteita biohiilten kokeilupaikaksi pääasiassa vuoden 2023 aikana. Kaupunki tulee tekemään seurantaa useiden biohiiliratkaisuiden mahdollisten vaikutusten arvioimiseksi.



11. Biohiilen käyttö ympäristön kunnostuksessa

Hyöty biohiilen käytöstä eri ympäristöissä on usein joko:

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

Ympäristön kunnostussovellukset ovat:

- Epäorgaanisten epäpuhtauksien poisto jätevedestä, esim. raskasmetallien poisto tai liuenneiden ravinteiden poistaminen.
- Orgaanisten epäpuhtauksien poistaminen jätevedestä esim. väriaineet, ftalaatit jne.
- Epäpuhtauksien poistaminen kaasuista esim. rikkiyhdisteistä.
- Biohiili on Kiinassa käytetty raskasmetallien fytoremediaatiossa, joka toimii kasvin sekä sen yhteydessä elävien mikrobien avulla.

11.1 Hulevedet

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

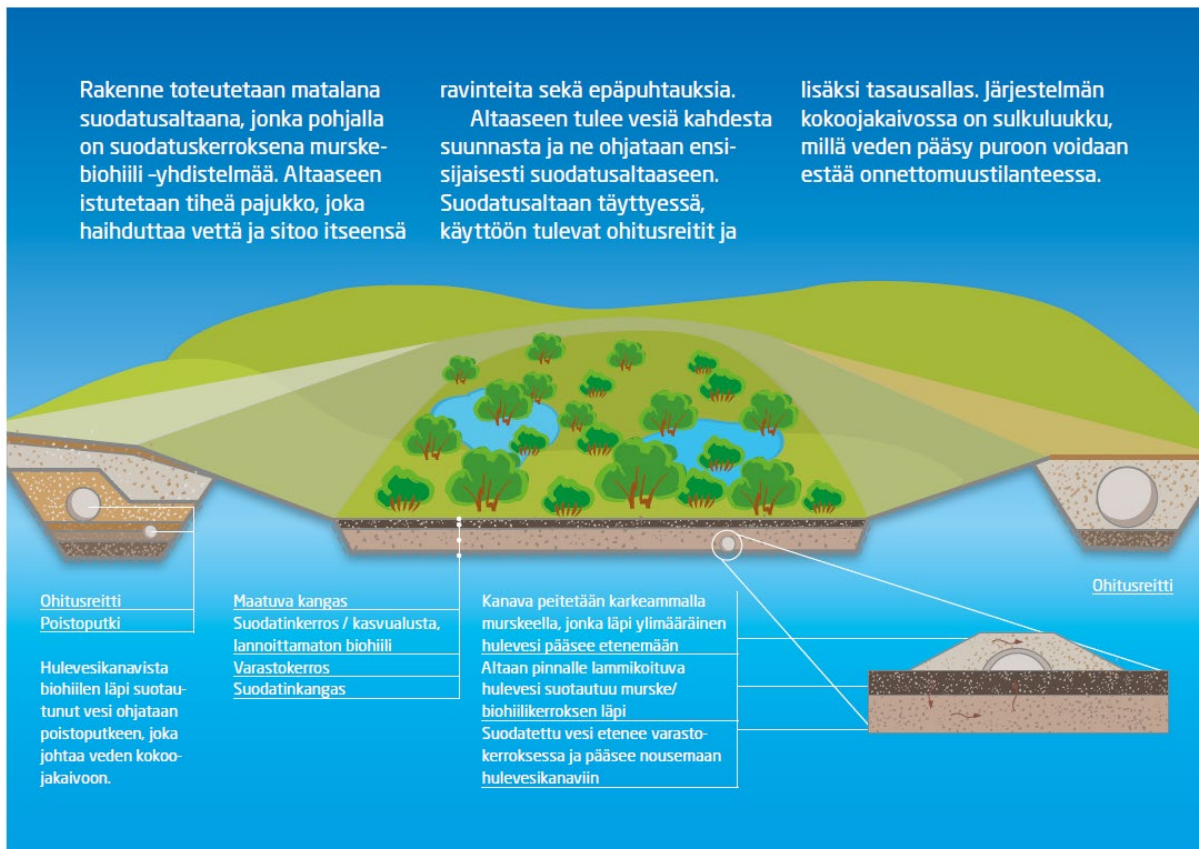
Kaupunkien hulevedet kuljettavat mukanaan haitta-aineita, jotka voivat heikentää lähialueiden pintavesien laatua. Liikenne on pääasiallinen saasteiden lähde kaupungeissa, ja liikenteen määrä korreloi voimakkaasti epäpuhtauskuormituksen kanssa tienvarsiympäristöissä. Tienpenkka-lysimetrikokeessa biohiili vähensi kokonaistyyppihuuhtoutumista (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 12). 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 biohiilisuodatusalueen rakenne- ja toimintaperiaate.

Kuva 7. Metsälän biohiili-suodatusalue. (Elo ym. 2023)

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)

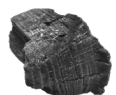
11.2 Viherkatot

Biohiilen lisäyksen vaikutukset viherkattojen toimivuuteen tarkasteltiin seitsemän vuoden ajan Etelä-Suomessa ja miten se vaikutti valumaveden laatuun ja määrään sekä maaperän eliöihin (Kuoppamäki ym. 2021). Biohiili vähensi fosforin (P) huuhtoutumista viherkaton

Biohiilialan edistämishanke

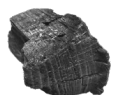
www.bioenergia.fi/biohiili

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



niittykasvien siemen istutuksissa, 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.

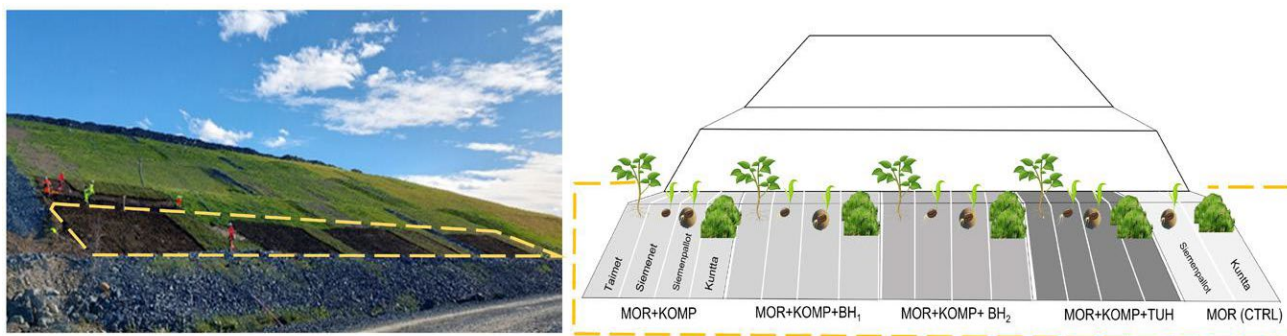
Biohiili vähensi edellä mainitussa tutkimuksessa typen (N) huuhtoutumista vain istutuksissa, missä se vaikutti positiivisesti kasvipeitteeseen. Ravinnepitoisuudet laskivat kattojen vanhetessa, mutta kohonneita P-kuormia mitattiin kuusi vuotta istutuksen perustamisesta lannoituksen jälkeen, eikä biohiilillä ollut lieventävää vaikutusta P:n 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.

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 (elinkaariarvointi, 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 yritysytteistyöllä voidaan hallita uuden tuotteen kustannuksia ja ympäristövaikutuksia (Pietilä ym. 2023, Materia 4)

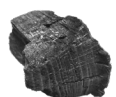
Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

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 (Zhao ym. 2014; Schmidt 2013; Gupta ja Kua 2017; Wang ym. 2019). Raportoidut biohiilen pitoisuudet vaihtelevat voimakkaasti, 0,025 prosentista 50 prosenttiin, riippuen tuotekokeesta. Tässä määrässä biohiilen hiilipitoisuus vaihtelee alkuperäisestä biomassan hiilimäärästä 46 prosentista jopa 98 prosenttiin (Gupta ja Kua 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 parempi hyödyntäminen liittyy sen räätälöimiseen eri käyttötarkoituksiin. Biohiilen parantaminen eri käyttötarkoituksiin on vilkkaan tutkimuksen alla. Biohiilen adsorptiokyky on keskeinen ominaisuus maanparannus sovelluksiin. Kun halutaan maksimoida biohiilen sisältämien ravinteiden hyödyntämistä esim. hidasliukoisten lannoitteiden kehittämisessä ovat alhaisemman lämpötilan biohiilet suositeltavia. Jos tavoitteena on maksimoida sen vedensitomiskykyä, on syytä käyttää korkeampia pyrolyysilämpötiloja huokoisuuden lisäämiseksi.

14.1. Biohiilen funktionalisoiminen

Pyrolyysi prosessiin voidaan liittää sen funktionalistamista. Adsorptiokapasiteetin parantamiseksi biohiiliä modifioidaan/funktionalisoidaan useilla modifiointiaineilla, kuten emäksillä, hapoilla, metallioksidoilla ja hapettavilla aineilla, mikä johtaa parantuneisiin pintakemiallisiin ominaisuuksiin ja uusiin rakenteisiin käsittelyn jälkeen (Murtaza et al. 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 tulevaisuudessa käyttää maaperän kunnostamiseen.

Mikromuovien tehokas uutto ja poistaminen maaperäympäristöstä on kiireellinen haaste, koska vasta viime vuosina on tajuttu kuinka suuri ympäristöongelma mikromuovit ovat.

Biohiili, lähtöaineena lehmän lanta, sitoi tehokkaasti mikromuoveja huokoskanaviinsa, ja biohiilien pinnalla olevat happipitoiset funktionaaliset ryhmät (CO_3^{2-} ja COO^-) edistivät mikromuovien adsorptiota (Chai et al 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 et al. 2024).



Kirjallisuus

ASTM D 1762-84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM Int. 84, 1–2 (2011).

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*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.11676> 1

Bier, H. & Lerchenmüller, H. 2024) Report on Permanence of Biochar. Perspectives from two recent publications and EBI conclusions. 14. March 2024.

Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M.L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J.M., Fuertes-Mendizábal, 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. *Sci. Total Environ.* 651, 2354–2364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060> .

Boss, W., Hilber, I., Graham, M.C. & Mašek, O. 2022. Composition of PAHs in Biochar and Implications for Biochar Production. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 10, 20, 6755–6765. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00952>

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

Elo, A., Hagner, M., Kainulainen, A., Kuoppamäki, K., Laulumaa, P., Männistö, A., Nuotio, A-K, Riikonen, A., Salo, E., Tammeorg, P. & Kari Tiilikkala, K. 2023. Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, -rakentamiseen ja kunnossapitoon. Eds 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.

Helsingin biohiilihanke. <https://ilmasto.hel.fi/hillinta/helsingin-kaupunki-selvitti-biohiilen-kayttomahdollisuuksia/>

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.

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

Biohiilialan edistämishanke
www.bioenergia.fi/biohiili

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



12: 113377. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113377>.

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* 2023, 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* Volume 66, Issue 2. <https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1896471>.

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>.

Murtaza, G. ym 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>.

Pietilä, R. (GTK), Tornivaara, A. (GTK), Hagner, M. (LUKE), Uusitalo, M. (LUKE), Heiskanen, J. (LUKE), Uotil, K. a (LUKE), Viikki, K. (LUKE). 2023. Kaivannaisjätealueiden peittoratkaisujen uudet mahdollisuudet – hiilinielu ja kukkaparatiisi. Julkaisija/Publisher Vuorimiesyhdistys – Bergsmannaföreningen r.y. 81. vuosikerta ISSN 1459-9694. www.vuorimiesyhdistys.fi

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>

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. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101584>

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

Wu, C., Zhi, D. & Yao, B. 2022. Immobilization of microbes on biochar for water and soil remediation: a review. *Environ Res* 212:113226. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113226>



Ye ym. 2019. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls, found at

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

Yrjälä, K. & Lopez-Echartea, 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>."

