

Opinnäytetyö AMK

Energia- ja ympäristötekniikan insinööri

2021

Petri Savela

# TOPINPUISTON ALUEEN PENKAN POTENTIAALI BIOHIILEN VALMISTUKSESSA

Petri Savela

## TOPINPUISTON ALUEEN PENKAN POTENTIAALI BIOHIILEN VALMISTUKSESSA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Lounais-Suomen Jätehuollolle tutkimus penkan potentiaalista biohiilen valmistukseen. Penkka sijaitsee Topinpuiston alueen suljetulla kaatopaikalla. Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli Lounais-Suomen Jätehuolto, joka toimii osana Topinpuiston kiertotalouskeskusta.

Opinnäytetyössä tutkittiin peltobiomassaksi sopivia lajikkeita ja niiden soveltuvuutta Lounais-Suomen Jätehuollon tarpeisiin sekä mahdollisia vertailukelpoisia kohteita. Lisäksi opinnäytetyössä tutkittiin biohiilen valmistukseen liittyviä aiheita kuten erilaisia pyrolyysiprosesseja ja biohiilen jatkojalostusta ja käyttökohteita. Tutkimus tehtiin kirjallisuusselvityksenä, jossa koottiin tutkimuskysymyksiin liittyviä tutkimuksia ja teknisiä menetelmiä.

Tutkimuksen tuloksissa selvisi, että Suomen ilmasto ja Topinpuiston penkan rakenne rajoittavat huomattavasti erilaisten kasvien käyttöä biohiilen valmistukseen ja erilaisilla lajikkeilla on hyvin toisistaan poikkeavia soveltuvuuksia biohiileksi. Tutkimuksessa selvisi myös, että erilaisilla viljeltävillä biomassoilla oli vaikutusta biohiilen laatuun, jatkojalostukseen ja arvoihin, kun käytettiin erilaisia pyrolyysiprosesseja.

### ASIASANAT:

Biohiili, Hiilinielu, Pyrolyysi, Biomassa, Aktiivihiili

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy- and environmental engineering

2021 | 22

Petri Savela

# THE POTENTIAL OF BIOCHAR PRODUCTION IN TOPINOJA'S BENCH

Lounais-Suomen Jätehuolto

The aim of this thesis was to do a study for Lounais-Suomen Jätehuolto on the potential of the bench for biochar production. The bench is located at a closed landfill in the Topinpuisto area. The commissioner of this thesis was Lounais-Suomen Jätehuolto, which operates as part of the Topinpuisto Circular Economy Center.

In the thesis, varieties suitable for field biomass and their suitability for Lounais-Suomen Jätehuolto were studied, as well as possible comparable sites. In addition, the thesis researched topics related to biochar production, such as various pyrolysis processes and further processing and applications of biochar. The study was conducted as a literature review in which studies and technical methods related to research questions were compiled.

The results of the study revealed that the Finnish climate and the structure of the Topinpuisto bench significantly limit the use of different plants for the production of biochar, and different varieties have very different applications for biochar. The study also found that different cultivated biomasses had an impact on biochar quality, further processing, and values when different pyrolysis processes were used.

## KEYWORDS:

Biochar, Carbon sink, Pyrolysis, Biomass, Activated carbon

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet	2
<b>2 BIOHIILI</b>	<b>3</b>
<b>3 BIOHIILEN VALMISTUSMENETELMÄT</b>	<b>5</b>
3.1 Hidas ja nopea pyrolyysi	5
3.2 Kuumavesinesteytysprosessi	6
3.3 Märkäpyrolyysi	7
<b>4 BIOMASSATUTKIMUS</b>	<b>8</b>
<b>5 LSJH JA LOPPUSIJOITUSALUE</b>	<b>12</b>
5.1 Loppusijoitusalueen rakenne	14
5.2 Biohiilen käyttö Maanparannukseen	15
5.3 Viher- ja ympäristörakentaminen	15
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>17</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>19</b>

## KUVAT

Kuva 1 Tavoitteet Topinpuiston fyysisen alueen kehittämiseksi (Laikko 2020, 8).	12
Kuva 2 Penkan rakennekerrokset (Yli-tolppa 2017, 17).	14

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Jatkuvasti kasvava hiilidioksidipitoisuuden määrä ilmakehässä on merkittävin ilmastonmuutoksen aiheuttaja. Hiilidioksidipitoisuuden kasvamiseen on pääasiassa vaikuttanut fossiilisten polttoaineiden käyttö. Ilmakehään päätyneet hiilidioksidi jää kiertämään ilmakehän ja merien välillä sadoiksi vuosiksi, päätyen lopulta merien pohjaan, tai se voi sitoutua kasvien kasvukauden aikana biomassaan ja muodostua aikanaan kivihiileksi. (Forestbiofacts 2020).

Ilmaston muutoksen ehkäisemiseksi tai hidastamiseksi Euroopan jäsenmaat ovat sopineet liikenteen uusiutuvan energian käytön kasvusta vuoteen 2030. Tämän lisäksi biohiiltä on vähemmän tarjolla, kuin sillä olisi kysyntää. Biohiileen ja sen valmistuksessa käytettäviin pyrolyysiprosesseihin ja hyötysuhteiden parantamiseen on ollut viime vuosina kasvavaa kiinnostusta. Erilaisten pyrolyysiprosessien avulla voitaisiin edistää edellä mainittuja tavoitteita. (Sipilä ym. 2018, 11; Elo 2020, 3; Nummela 2020, 27).

Turussa Topinojan Orikedolla sijaitsevaa suljettua loppusijoitusaluetta voitaisiin käyttää Topinpuiston teemojen edistämiseen erilaisten biomassojen tuotannolla ja jalostuksella. Topinpuiston tavoitteena on luoda alueelle kiertotalouden mukaisia maankäyttö- ja jätteenkäsittelytapoja ja suljettuja kiertoja, löytää hiilensidontamenetelmiä ja vauhdittaa uusia kiertotalouden mukaisia liiketoimintamalleja ja löytää kumppanuuksia. Orikedon toimipisteen lisäksi myös muita Lounais-Suomen Jätehuollon toimipisteitä voitaisiin käyttää samanlaiseen tai samankaltaiseen toimintaan. Topinpuiston alueella on aikaisemmin ollut jätteen loppusijoituspaikka, joten aluetta ei voida käyttää elintarvikekasvien viljelyyn kuluttajille tai ravinnoksi karjalle. Tästä johtuen alueella voitaisiin biohiilentuotantoa varten kasvattaa eettisesti elintarvikekasveja biomassaksi. Hiilinielujen luonti käyttämättömille maa-alueille sitoisi hiilidioksidipäästöjä ja voi lisäksi tuottaa ympäristöystävällisempää energiaa fossiilisen polttoaineen sijaan.

Biohiilen tuotannon kannattavuuteen vaikuttaa monet asiat, kuten biomassan tuotannon kustannukset, mahdolliset tuet, päästökompensaatiot, materiaalivirrat ja niiden määrät, esikäsittelyn määrä sekä lopputuotteen jalostuksen taso. Biohiilen tuotanto ei ole kannattavaa pienellä pinta-alalla ja suuremmassa mittakaavassa biohiililaitoksen perustamisella on suuret kustannukset (Varpula 2020, 6, 21.) Jos biohiiltä halutaan tuottaa

Topinojan alueella, sen kustannustehokkuutta voitaisiin parantaa käyttämällä muita, biomassaa pohjaisia jätteitä.

Lounais-Suomen Jätehuollon rakennus- ja puujäte sivuvirran käytön avulla voitaisiin päästä kustannustehokkaampaan biohiilen tuotantoon ja erilaisten kasvihuonekaasupäästöjen kompensointi ja tuotantolaitosten määrien kasvu voi kasvattaa biohiilen tuotannon kannattavuutta (Åhlsröm 2020; Varpula 2020).

## 1.2 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön Tavoitteena on Selvittää Lounais-Suomen Jätehuollon Topinojan penkan potentiaalia biohiilen valmistukseen biomassasta. Lisäksi opinnäytetyössä tarkastellaan erilaisia biohiilen valmistus prosesseja. Opinnäytetyön tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mitkä lajit sopivat biohiilen valmistukseen ja jatkojalostukseen
- Mitkä seikat rajoittavat lajien kasvattamista
- Miten biohiiltä valmistetaan
- Onko vertailukohteita Suomessa tai maailmalla
- Onko toimenpidesuosituksia ja jatkotutkimustarpeita

## 2 BIOHIILI

Biohiilen valmistuksesta ja käytöstä on tehty Suomessa paljon tutkimusta. Biohiiltä on perinteisesti käytetty maanparannukseen. Maanparannuskäytön lisäksi biohiiltä käytetään nykypäivänä lukuisissa eri käyttökohteissa, kuten viherrakentamisessa, vesistöjen maaperän, juomaveden ja jäteveden puhdistuksessa, energiantuotannossa, elektroniikassa sekä teollisuudessa.

Biohiiltä valmistetaan orgaanisista aineista kuumentamalla biomassaa vähähappisessa tai hapettomassa olosuhteissa. Mikroskooppisesti biohiilen rakenne muistuttaa paljon valmistusmateriaalin huokoista rakennetta. Termisen käsittelyn jälkeen lähtömateriaalista on poistunut happea, vettä ja vetyä sekä materiaalin ligniini, selluloosa ja hemiseluloosa on muuttunut hiilen eri kidemuotoihin. (Fuchs ym. 2014).

Prosessin jälkeinen biohiili muodostuu hexagonisista hiilirakenteista, jäljelle jääneistä hapesta ja vedystä sekä tuhkamuodossa olevista mineraaleista. Mineraalit ovat peräisin käytetystä lähtömateriaalista. Käytetyn termisen prosessin nopeudesta, lämpötilasta tai valmistusmenetelmästä riippuen biohiili saa myös erilaisia sähkönjohtavuusominaisuuksia, kuten eristin, puolijohde tai johdin. Tämän ominaisuuden ansiosta biohiilellä on erilaisia positiivisia vaikutuksia maaperässä. Sähköisesti aktiiviset hiilirenkaat tukevatkin maaperän hapetus- ja pelkistysreaktiota, mikro-organismien metaboolisia kemiallisia reaktioita sekä bakteerien keskinäistä elektroni vaihdosta. (Wilson 2014).

### **Biomassan esi- ja jälkikäsittely**

Hakkeen yleislaatua voidaan mitata kolmella eri tavalla. Hakkeen kosteus(arvo), laadun tasaisuus ja hakkeen palakoko. Hyvälaatuisen hakkeen kosteusprosentti on alle 30 %, palakoko on 5–50 millimetrin välillä ja biomassassa on hyvä laatuista lähteestä (Bioenergianeuvoja 2021). Biomassan jauhaminen ja seulominen tekevät lähtöainemateriaalista homogeenisempää, jolloin prosessin reaktiot nopeutuvat (Kosunen 2015, 12). Palakoko saattaa muodostua ongelmaksi joissain pyrolyysimenetelmissä. Laitteisto vaatimukset saattavat rajoittaa palakokoa 1–5 millimetriin ja biomassan jauhamiseen saatetaan tarvita erikoisjärjestelyjä.

Sadonkorjuun jälkeen biomassaa voidaan hakettaa korjuun yhteydessä, varastoida alueelle kuivamaan tai paaliin. Nopean ja hitaan pyrolyysiprosessin hyötysuhdetta parantaa biomassan matala kosteusprosessi. Biomassan tulisikin olla näillä prosesseilla mahdollisimman kuivaa.

Haketettua biomassaa säilöessä pitää ottaa huomioon itsesyttymisen riski, hakkeen mahdollinen jäätyminen tai homehtuminen. Alueella tulisi olla joko varastona tai välivarastona betonipohjainen varasto tai siilo, joka olisi mahdollisimman lähellä käyttökohdetta (Bioenergianeuvoja 2021). Edellä mainittujen kaltaisten sijoituspaikkojen luominen voisi vähentää riskiä syttyä itsestään ja tulipalon leviämistä.

Biohiiltä voidaan aktivoida biologisesti, fysikaalisesti ja kemiallisesti. Fysikaalisen ja kemiallisen aktivoinnin tarkoitus on kasvattaa huokoisuutta ja pinta-alaa. Aktivointimenetelmät ja mahdolliset käytettävät yhdisteet ja lisäaineet riippuvat käytetystä pyrolyysimenetelmästä, lähtömateriaalista tai prosessin vaiheesta (Kosunen 2015, 24–27). Fysikaalinen aktivointi tapahtuu biohiilen hiilestämisen jälkeen ajamalla sen läpi korkealämpöistä vesihöyryä tai hiilidioksidia. Kemiallisessa aktivoinnissa aktivointi tapahtuu kyllästämällä tai happo-emäskäsittelyllä, jonka jälkeen seos kuumennetaan korkeassa lämpötilassa (Siipola ym. 2018, 9).

Fysikaalinen aktivointi on huomattavasti edullisempaan kemialliseen verrattuna. Lähes jokaisessa pyrolyysiprosessissa joudutaan tuottamaan korkeaa lämpötilaa ja höyryä voitaisiin käyttää hyväksi, jottei kemialliselle käsittelylle ole tarvetta.

### 3 BIOHIILEN VALMISTUSMENETELMÄT

Yleisin biohiilen valmistuksessa käytettävä menetelmä on pyrolyysi eli kuivatislaus. Pyrolyysia voidaan toteuttaa nopeana tai hitaana. Kuivatislauksen lisäksi biomassaa voidaan käsitellä hydrotermisesti. Torrefiointi on biomassan paahtamista yleensä 200–300 celsiusasteessa. Biomassassa tapahtuu muutoksia eri lämpötiloissa pyrolyysiprosessissa. 100 celsiusasteessa biomassan vesi höyrystyy. 200–270 celsiusasteen lämpötilassa hemiselluloosa alkaa hajota. 270 celsiusasteessa exoterminen reaktio alkaa ja materiaali alkaa hiiltymään. Materiaalin selluloosa alkaa hajoamaan 200–350 celsiusasteen välillä ja ligniini alkaa hajoamaan 275–500 celsiusasteen välillä. Hemiselluloosan hajotessa muodostuu etikkahappoa, joka toimii katalyyttinä selluloosaketjujen hajottamisessa. Puun 0-asetyyliyhymien määrän kasvaessa, sitä herkemmin se hajoaa. (Kujala 2012,13–15.)

Biomassaa voidaan myös käsitellä kemiallisesti ennen kuivapyrolyysiä eri yhdisteillä. Tutkimuksien mukaan biohiilen muodostumista voidaan vähentää Karboksimeetyyliselluloosaa (CMC), NaOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yhdisteillä. Tällöin muodostuu enemmän kaasuja tai nesteitä pyrolyysi prosessissa. (Lappa ym. 2016, 18.)

#### 3.1 Hidas ja nopea pyrolyysi

Hitaassa pyrolyysissa nimensä mukaan biomassaa käsitellään nostamalla lämpötilaa hitaasti. Hitaalla prosessilla tuotetaan pääasiassa biohiiltä. Käytetyt lämpötilat, lämpötilan korotusnopeudet ja viipymäajat vaihtelevat lähtömateriaalista riippuen. Esimerkiksi puulla voidaan käyttää korkeampia lämpötiloja kuin heinällä, koska puu hiiltyy hitaammin, kuin heinä. Lämpötilat vaihtelevat yleensä 150–700 celsiusasteen välillä ja viipymäaika vaihtelee minuuteista päiviin, mutta yleensä kuitenkin 250–400 celsiusastetta. Kun käytetään korkeita lämpötiloja pystytään tuottamaan huokoisempaa materiaalia ja tämän ansiosta pinta-ala kasvaa. Hitaassa pyrolyysissä muodostuu noin 30–35 % biohiiltä, 30–35 % öljyä ja nesteitä ja kaasua 30–35 %. (Solio ym. 2018; Kujala 2012).

Nopeassa pyrolyysissa lämpötilaa nostetaan nopeasti ja viipymäaika on tyypillisesti lyhyt. Nopeassa pyrolyysissä palakoon tulisi olla noin 2 millimetriä ja kosteus < 10%. Nopean pyrolyysin päätarkoitus on tuottaa öljyä. Tämän takia pyrolyysissä muodostuvat kaasut jäädytetään nopeasti, jottei sekundäärireaktioita muodostuisi kaasuissa.

Prosessissa muodostuu biohiiltä noin 12–15 %, öljyä 60–70% ja kaasua 13–25 %. (Solio ym. 2018; Starck 2011).

### 3.2 Kuumavesinesteytysprosessi

Hydrothermal liquefaction (HTL) eli kuumavesinesteytysprosessissa biomassaa muute-  
taan biohiileksi, kaasuiksi ja nesteiksi. Prosessissa käytetään yleensä 250–400 celsius-  
asteen lämpötilaa, 4–30 MPa painetta ja 0–30 minuutin viipymäaika. Prosessin materi-  
aalina voidaan käyttää kasviperäistä biomassaa tai useita orgaanisen aineen sivuvirtoja,  
kuten jätevesilietteitä ja jätetuuta. (Hiidenheimo 2016.)

HTL-menetelmän etuja on sen nopeuden lisäksi erilaisten kasvibiomassojen, puujättei-  
den ja muovien käytön mahdollisuus. Lähes jokainen yritys tuottaa jonkinlaista biomas-  
saa kuten biomassaa pohjaisia jätetuuta. Näitä jätetuuta ei myöskään tarvitse erikseen  
kuivata ennen käyttöä.

Kuumavesinesteytys soveltuu biohiilen valmistukseen, mutta sen öljyn tuotanto on mui-  
hin pyrolyysiprosesseihin verrattuna suuri. (Pulkinen 2019, Biomassan esikäsittelyllä  
voidaan öljyn saantia vielä parantaa (Lappa ym. 2016, 19.)

Koska HTL-menetelmä tuottaa enemmän öljypohjaista lopputuotetta, kuin muut pyrolyy-  
simenetelmät. HTL-menetelmässä tulisi käyttää öljypohjaisia biomassoja, kuten rypsiä,  
rapsia tai öljyhampua. Prosessissa käytettävä vesi toimii prosessissa liuottimena, kataly-  
yttinä tai reaktanttina. (Pulkinen 2019, 22). Hydrotermisessä prosessissa vedellä on-  
kin monenlaisia vaikutuksia prosessissa ja sen kannattavuudessa. Pelkästään prosessi-  
veden kierrätyksellä on monia vaikutuksia prosessiin. Kierrätyksellä voidaan vähentää  
jäteveden määrää, veden lämmitykseen tarvittavaa energiamäärää, prosessissa muo-  
dostuvan etikkahapon johdosta lämpötila- ja painevaatimukset laskevat ja kasvattaa kiin-  
teän tuotteen energiatiheyttä (Kosunen 2015, 19). Kun prosessivedestä tulee lopulta jä-  
tevetä. Voidaan nämä jätevedet suodattaa prosessissa muodostuvalla aktiivihieillä,  
mutta aktiivihieillä tarvitsisi käsitellä fysikaalisesti prosessissa tuotetulla höyryllä. Proses-  
sissa käytettävissä menetelmistä lämpötilalla on huomattavin merkitys lopputuotteeseen  
ja sen ominaisuuksiin. (Kosunen 2015, 20).

### 3.3 Märkäpyrolyysi

Hydrothermal carbonization (HTC) eli märkäpyrolyysin etuna verrattuna kuivapyrolyysiin on korkean kosteuspitoisuuden biomassan mahdollinen käyttäminen. Koska prosessissa käytettävää massaa ei tarvitse kuivata, voidaan säästää energiaa ja vähentää prosessivaiheita. Prosessissa muodostuvan paineen ansiosta vesi pysyy nestemäisenä korkeissakin lämpötiloissa. Prosessissa voidaan käyttää, joko korkeita ja matalia lämpötiloja. Korkeanlämpötilan prosessissa kaasunmuodostuminen on kilpaileva reaktio hiilenmuodostamisen kanssa, joten prosessissa muodostuneet lopputuotteet ovat kaasuja ja hiilifragmenteja. (Kosunen 2015, 15–16).

Prosessissa muodostuvaa hiiltä kutsutaan hydrohiileksi. Jos prosessissa käytettävää lähtömateriaalia ei esikäsitellä sen huokoisuus verrattuna biohiileen on huomattavasti pienempi. Valmistusvaiheessa voidaan esimerkiksi käyttää piidioksidi  $\text{SiO}_2$  sapluunaa parantamaan huokoisuutta. (Kosunen 2015, 21). Hydrohiilen ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä typpipitoista biomassaa. Tämä lisää muun muassa katalyytti- ja adsorptiosovelluksiin soveltuvuutta. Materiaalia käsiteltäessä 180–250 asteen ja 20 baarin paineessa on mahdollista päästä 80 % kiinteän hiilen tuottoon. Jäljelle jäävä osa on pääasiassa 5–20 % nesteitä ja vähäinen määrä kaasua. (Strand 2011, 18.)

Hydrohiili on rakenteeltaan hyvin samankaltainen, kuin luonnossa muodostuva hiili, mutta se sisältää happea sisältäviä ryhmiä enemmän. Hydrohiilen rakenne ei ole kovin vahva, joten se murenee helpommin, kuin biohiili. (Kosunen 2015, 36.)

Nestemäinen tuotos sisältää kiinteitä aineita, joita ei saada poistettua suodattamalla. Hiilipartikkeleiden määrästä nesteessä kertoo TOC-arvo. TOC pitoisuuksia voidaan vähentää erilaisin aerobisin ja anaerobisin menetelmin. Nestetuotosta voidaan käyttää myös uudestaan prosessissa ja vähentää näin jäteveden määrää. (Kosunen 2015, 21.)

Kaasutuotos sisältää pääasiassa hiilidioksidia, mutta myös vähäisiä määriä hiilimonoksidia, metaania ja vetyä. Hiilidioksidia myös liukenee prosessiveteen. Kun reaktiolämpötila kasvaa, hiilimonoksidi määrät vähenevät ja metaani sekä vety pitoisuudet kasvavat. (Kosunen 2015, 21.)

## 4 BIOMASSATUTKIMUS

Biomassatutkimuksen tarkoitus on rajata potentiaalisia kasveja muista peltobiomassoista ja löytää mahdollisia vertailukohteita muualta maailmalta. Erilaisia peltobiomassoja tutkittaessa esiin tuli erilaisia rajoitteita lajien suhteen. Viljelyalueen alla sijaitsevat suojarakenteet ja kasvien juurien pituus, Suomen ilmasto, paikalliset toimijat ja sopivuus biohiileksi asettivat rajoitteita viljelyyn sopiviin lajeihin.

Suomen ilmasto rajaa talven takia mahdollisia kasveja hyvin paljon. Saman ilmaston omaavia alueita ovat naapurimaiden lisäksi esimerkiksi Kanadassa, jossa esimerkiksi viljellään teollisuus hamppua paljon (Lupescu 2019, 2). Etelä-Euroopan ja Pohjois-Euroopan erot poikkeavat huomattavasti toisistaan. Jotkin Etelä-Euroopassa viljellyt kasvit eivät menestyisi Suomen oloissa tai ne tarvitsisivat erityistä huolenpitoa verrattaessa muihin samankaltaisiin lajeihin (Pahkala ym. 2009, 32).

Lajien valinnassa pitää ottaa huomioon myös Topin tarpeet ja vaatimukset. Kasvatettavilta lajeilta vaaditaan ympäristöystävällisyyttä, korkeaa biomassamäärää, sopimusviljelijää ja alhaisia kuluja sekä pohjatutkimusta.

Suomessa pelloilla viljellään pääasiassa elintarviketuotantoon, mutta myös energiakasvien viljelyä tehdään eri lajeilla. Laji tulisi valita mahdollisimman sopivaksi tarkoitettuun prosessiin tai pyrolyysiprosessin. Se, mitä biomassasta pyritään tuottamaan tai jatkojalostamaan, asettaa rajoitteita kasville.

Biohiilen valmistuksessa pyritään tuottamaan mahdollisimman suuri pinta-alaista biohiiltä biomassasta. Biohiiltä muodostuu erilaisissa pyrolyysi- tai torrefiointiprosesseissa. Lignoselluloosabiomassa koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Näiden lisäksi kuivan puun painosta 4–10 % on uuteaineita. (Kosunen 2015, 11–12.)

Puukasvit kuten koivu, erilaiset poppelit, haapa ja leppä sopisivat samankaltaiseen viljelytapaan kuin paju, mutta pajusta on huomattavasti enemmän tutkimusta ja sen kasvunopeus on suurempi, kuin esimerkiksi koivulla. Näiden syiden takia muut puut lajikkeet ovat rajattu ulos, vaikka koivusta valmistettu biohiili olisikin laadukkaampaa kuin pajusta valmistettu (Pahkala ym. 2009, 31, 33).

## **Ruokohelpi**

Ruokohelpi tuottaa suuren määrän biomassaa ja sitä on tutkittu paljon suomessa energiakäyttöön. Ruokohelpi on varmasti tuottava monivuotinen laji. Kasvusto tarvitsee uudistaa noin 10 vuoden välein. Ruokohelvellä on alhainen ravinnetarve. Ruokohelpeä korjataan kuloheinänä (Siivola 2005, 16).

Ruokohelpi soveltuisi hyvin penkalla kasvatettavaksi ja sen biomassan määrä korjuun jälkeen olisi hyvä, mutta sen ominaisuudet biohiileksi ja jatkojalostukseen jäävät muiden kasvien varjoon (Pahkala ym. 2009, 32.)

## **Paju**

Pajua viljellään Suomessa lähinnä energia- ja biohiilituotantoon. Paju on monivuotinen kasvi, jota korjataan 2–3 vuoden välein kannosta kasvavista varsista. Harvemman sadonkorjauksen ansiosta paju vaatii vähemmän huomiota muihin lajeihin verrattuna. Pajun perustamiskustannukset ovat kuitenkin muihin lajeihin verrattuna korkeammat joh-tuen pistokkaiden hinnasta ja istutuksesta. Paju tarvitseekin aloitusvuonna erityistä huomiota rikkaruohojen ja kosteuden suhteen. (Carbons 2020.)

Pistokkaiden hinnassa ja perustamiskustannuksissa on myös hyvät puolensa. Paju ei tarvitse niin paljoa huolenpitoa ja vuosittaista istutusta kuin yksivuotiset lajit.

Pajun kasvatusta kaatopaikoilla tai suljetuilla loppusijoitus paikalla on tutkittu jonkin verran Suomessa. Pajun kastelua ja lannoittamista suotovedellä on tutkittu Tuomo Kauton diplomityössä ja konseptissa on suositeltu käytettävän 100–600 mm/kasvukausi. Paju pystyy sitomaan itseensä suotoveden ravinteita kasvua varten, mutta raskasmetallien sitominen tarvitsee lisätutkimusta. (Kautto 2014, 122).

Pajun suodattavat ominaisuudet on jossain määrin todistettu onnistuvan, mutta määrät ovat pieniä ja monet asiat saattavat vaikuttaa raskasmetallien imeytymiseen, kuten maaperän pH. 100–600 mm suodatus kasvukaudelle on hyvin vähän, jos tämä määrän käyttää hehtaarin alueelle. Lisäksi on kyseenalaista kontaminoida puhdasta maaperää, näin pienien hyötyjen takia. Lisäksi suotovesi saattaa huuhtoutua muiden ravinteiden mukana maaperästä pois (Kautto 2014, 44.)

Pajun juuret ovat yleensä 0,5 metrin syvyydessä, mutta voivat ulottua ravinteiden ja veden saannista riippuen 1 metrin syvyyteen. (Viholainen 2017, 7)

## **Hamppu**

Hamppua viljellään maailmalla monessa eri muodossa moniin eri tarkoituksiin. Hampun nopean kasvun ja monien käyttökohteiden ansiosta sitä on viljelty tuhansia vuosia. Hampun viljely jakaantuu öljyhampun ja kuituhampun viljelyyn. Hamppu on yksivuotinen kasvi. Nopean kasvun ansiosta hamppu alkaa nopeasti varjostaa rikkakasveja, joten rikkakasvikasvustoa varten ei tarvitse torjua. Hamppu ei myöskään tarvitse tuholaistorjunta aineita tai korkeaa lannoitusmäärää. Kuituhamppu saattaa kasvattaa juuret 2 metrin syvyyteen, mutta pääasiassa juuriston on 0,5 metrin syvyydessä. Hampun koneellisessa korjaamisessa saattaa ilmetä ongelmia sen kestävän kuidun johdosta. (Norokytö 2013, 6).

Hamppua pystytään myös kasvattamaan kierrätysravinteilla tai orgaanisilla ravinteilla ja tästä johtuen se onkin ympäristöystävällinen vaihtoehto biohiilen valmistukseen. Luomuravinteita käyttäessä sato jää kuitenkin huomattavan vähäiseksi, noin 500kg/ha. (Norokytö 2013, 16).

Koroisilla Turussa kasvatetaan kuituhamppua ja tähän toimintaan liittyen on myös alettu tekemään biohiilikokeiluja. Topinojan käytössä olevat hehtaarimäärät ovat hyvin pieniä, joten talkootyyppinen korjaus ei tarvitsisi erillisiä koneita, jos työ tehdään käsin.

## **Maissi**

Maissi on yksivuotinen viljelykasvi, jota viljellään maailmalla pääasiassa elintarviketuotantoon, eläimien rehuksi tai energiaksi. Maissi tuottaa vuosittain erittäin tuottoisan sadon ja maissin eri osien soveltuvuutta biohiileksi on tutkittu paljon. Kasvin varsi, jyvät ja tähkä sopivat biohiilen lähtömateriaaliksi (Mullen ym. 2010; Tippayawong ym. 2018). Maissin juurien syvyys voi vaihdella 0,2 metrin ja 1,5 metrin välillä ja kasvaa 2 metrin syvyyteen. (Viljelijän Avena Berner 2020, 12.)

Maissia viljellään Turussa ja sen sopimusviljelijöitä varmasti löytyisi. Suuremmaksi ongelmaksi nousee korjuulaitteiston kuljettaminen pienen alueen takia ja onko sopimusviljelijöillä kiinnostusta tehdä töitä pienellä hehtaarimäärällä.

## Rypsi ja rapsi

Molemmat rypsi ja rapsi ovat öljykasveja, joita on viljelty pitkään Suomessa. Rypsi on sukua nauriille ja rapsi on sukua lantulle. Euroopan unionin hyönteismyrkyn kieltämisen jälkeen molempien kasvien viljely on vähentynyt huomattavasti huippuluvuista. Molempien lajien viljelyssä tarvitsee olla tarkkana tuholaishyönteisten kanssa. Rypsi tosin nostaa hyönteisten monimuotoista esiintymistä lähinnä pölyttäjillä esimerkiksi mehiläisten muodossa. Vertailua monimuotoisuudesta on vaikeaa tehdä, koska monet lajit kuten paju houkuttelee erilaisia eläimiä ja hyönteisiä kuin rypsi ja rapsi. Suomella on tavoite nostaa viljely määriä vuoteen 2025 ja siitä eteenpäin (Schulman 2020).

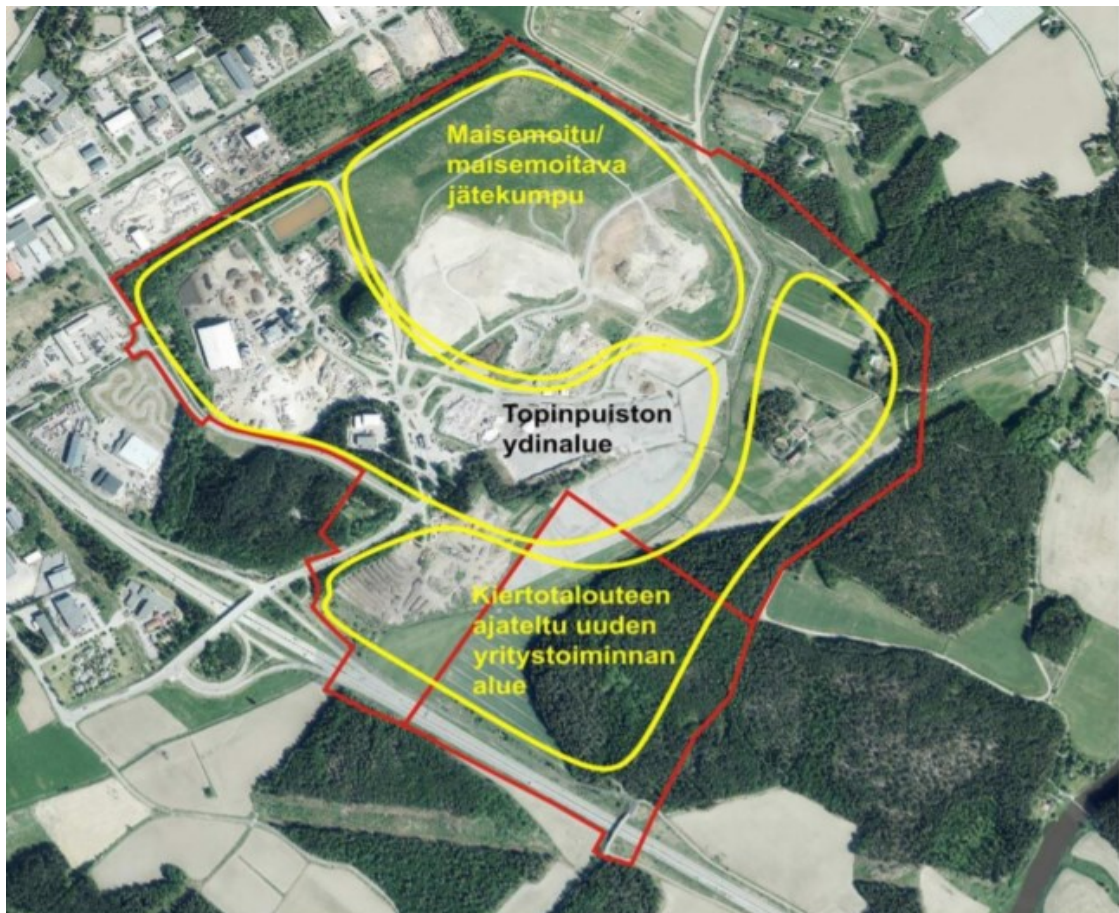
Rypsi ja rapsi öljykasveina soveltuisivat parhaiten tutkimuksen kasveista biodieselin raaka-aineeksi, mutta biohiilen valmistukseen puuvarsimaiset kasvit sopivat paremmin.

## Muita lajeja

Tässä osiossa on opinnäytetyön ulkopuolelle jätettyjä kasveja, jotka karsiutuivat jäädessä rajauksen ulkopuolelle. Monet kasvit kuten elefanttiheinä ei menesty suomen oloissa hyvin vaikka Etelä-Euroopassa kuiva-aine massat ovat suuria. Osa kasvien kokeiluista on tehty 90-luvulla (Pahkala ym. 2009, 8.) joten joidenkin lajien sopeutuminen on voinut parantua vuosikymmenten aikana ilmaston muutoksen tai lajijalostuksen myötä.

Jotkin kasvit kuten rehumailanen (Laurila ym. 2014, 5) ja ahdekaunokki (Mattila 2010, 5.) pystyvät tuottamaan suuren biomassan, mutta niiden soveltumisesta biohiileksi on aineistoa vähän ja samansuuruisiin biomassoihin päästään muilla, jo tutkitummilla lajeilla. Myös viljakasveilla on mahdollisuutta päästä korkeaan biomassatuotantoon (Pahkala ym. 2009, 18). Korsista valmistetusta biohiilestä on paljon tutkimusta. Biohiili onkin parantanut riisin kasvamista Kiinassa (Muhammad ym. 2017). Viljojen juuret kasvavat yleensä 0,2 metrin syvyydessä, mutta voivat kasvaa 1 metrin syvyyteen.

## 5 LSJH JA LOPPUSIJOITUSALUE



Kuva 1 Tavoitteet Topinpuiston fyysisen alueen kehittämiseksi (Laikko 2020, 8).

Lounais-Suomen Jätehuollon tavoitteisiin kuuluu kiertotalouden liiketoiminnan edistäminen, ympäristöystävällisyys sekä energia- ja materiaalivirtojen hyödyntäminen ja kehittäminen. Lounais-Suomen Jätehuollolla on loppusijoituspaikkoja Paraisilla Rauhalan jätekeskuksella, Raisiossa Isosuon jätekeskuksella, Salossa Korvenmäen jätekeskuksella ja Turussa Topinojalla (Kuva 1), jossa voitaisiin viljellä jätekummun päällä.

Biohiilen valmistuksen kannattavuuteen vaikuttavat monet eri tekijät. Topinojan tuotantomäärät jäisivät hyvin pieneksi käytettävän pinta-alan puolesta. Kannattavuuteen vaikuttaa myös pyrolyysilaitteiston hankinta ja käyttöhenkilökunta. Pienen alueen, tarvittavan osaamisen, laitteiston hankintojen takia, onkin kannattavampaa hankkia osaamista muualta. Varsinais-Suomen alueella toimiikin useita eri potentiaalisia yhteistyökumppaneita riippuen kasvivalinnoista ja osaamisen tarpeesta.

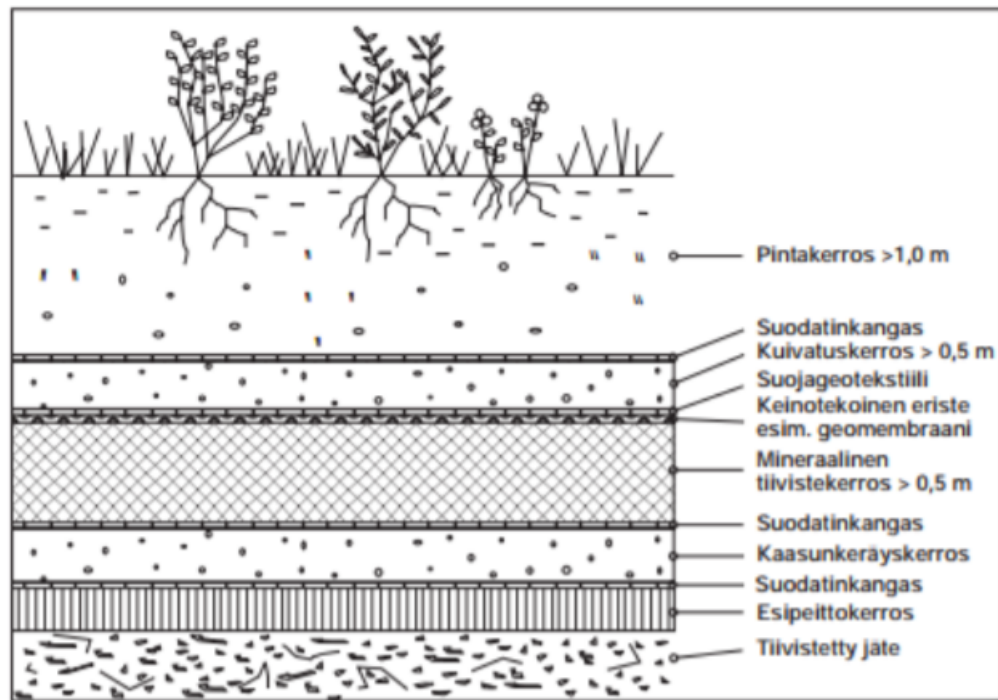
Kannattavuuden kannalta esimerkiksi jätepuun tai muiden jätevirtojen hyödyntäminen olisi järkevää yrityksen ja ilmaston kannalta. Jätepuun uudelleenkäyttömahdollisuudet ovatkin olleet ongelma jätekeskuksille, koska uudelleen käyttöön vaadittaisiin valmistustietoja, jotka voivat hävitä materiaalin elinkaaren aikana. HTL-Prosessissa voitaisiin myös käyttää likaantunutta puuta. Tällöin raskaat metallit puusta siirtyvät kiinteään jätteeseen. (Seehar ym. 2021).

Yksi opinnäytetyön tavoitteista oli etsiä vertailukelpoisia kokeilukohteita, joka osoittautui vaikeaksi. Maailmalla on tutkittu monenlaisien kasvien kasvattamista suljetuilla kaatopaikoilla. Esimerkiksi Yhdysvalloista (Handel ym. 2008.), Etelä-Koreasta (Seoul Metropolitan government 2017.) ja Isosta-Britanniasta (Rawlinson ym. 2004.) on tutkimusta, mutta vertailu Suomen ilmaston tai penkan rakenteen takia on vaikeaa tai mahdotonta. Suomessa on pajun kasvatusta tutkittu ja kokeiltu onnistuneesti Mustankorkea Oy:n jätteenkäsittelykeskuksella. (Kautto 2014.)

Alueella on mahdollista käyttää orgaanisia, epäorgaanisia lannoitteita. Näihin ravinteisiin kuuluu todella suuri määrä erilaisia lannoitteita. Orgaaniset ravinteet, jotka on tehty juokuttamalla vettä esimerkiksi kompostin tai lannan läpi. Nämä ravinteet eivät ole koskaan samanlaisia, joten lopputuloksetkaan eivät ole koskaan optimaaliset. Orgaaniset ravinteet kuitenkin rikastavat maaperää biohiilen tapaan. Ne parantavat mikrobitoimintaa ja liukenevat hitaammin kuin synteettiset lannoitteet, joten ne eivät huuhtoudu hulevesiin, niin helposti. Epäorgaaniset ravinteet eli väkilannoitteet, toimivat juuri niin kuin niiden oletetaan toimivan. Epäorgaanisuuden takia ne ovat orgaanisia lannoitteita helpommin liukenevia, mutta myös helpommin maaperästä hulevesiin huuhtoutuvia. Topinojalta ravinteet eivät pääse rehevöittämään vesistöjä, mutta kuormittavat vedenpuhdistuslaitosta.

Topinojan alueen hulevesien laatua on kartoitettu hulevesiselvityksessä. (Happonen 2020.) Biohiilen tai hakkeen avulla hulevesiä voitaisiin mahdollisesti kontrolloida paremmin. Alueelle voitaisiin näiden avulla tehdä erilaisia suodattimia suodattamaan ravinteita, vähentämään kiintoainesta tai viherpainanteita viivyttämään hulevesiä.

## 5.1 Loppusijoitusalueen rakenne



Kuva 2 Penkan rakennekerrokset (Yli-tolppa 2017, 17).

Käytöstä poistettu loppusijoitusalue tulee sulkea valtioneuvoston vaatimuksien mukaan kuvan 2 tapaan. Jätteen ja maanpinnan väliin rakennetun rakennekerroksilla on useita tarkoituksia, kuten hajuhaittojen vähentäminen, kaasujen johtaminen tai sadevesien pääsy rakenteisiin. (Yli-tolppa 2017, 20)

Penkan rakenne tulee ottaa huomioon kasvatettavaa biomassaa valittaessa. On erittäin tärkeää, että kasvin juurien muodostuminen otetaan huomioon biomassaa valittaessa. Juurten päästessä suodatinkankaan läpi penkan sisällä olevat kaasut voivat alkaa purkaantumaan tai sadevesi voi päästä rakennekerroksien väliin ja kasvattaa suotovesien määrää tai aiheuttaa muutoksia penkan rakenteissa.

Rakenteiden kestävyys tulee ottaa myös huomioon. Esimerkiksi pajun kasvatuksessa viimeisenä vuonna ennen sadonkorjuuta ja sadonkorjuun aikana rakenteisiin saattaa kohdistua huomattavaa räsitusta. Pajun leikatun biomassan paino on 30–40 tonnia/hehtaari kuivana ja kosteana se on enemmän. Tämän painon lisäksi räsitusta muodostuu juurista, kannoista, maaperän vedestä, lumesta ja hetkellisesti leikkuulaitteistoista.

## 5.2 Biohiilen käyttö Maanparannukseen

Biohiilen ravinteiden ja vedenpidätyskyky tekee siitä hyvän maanparannus aineen. Biohiili lisää mikrobitoimintaa, estää ravinteiden huuhtoutumista ja parantaa maaperän vesitaloutta. (Niemi 2018, 9–10.) Koska biohiili ei ole lannoite vaan maanparannusaine sitä tarvitsee käsitellä biologisesti. Käytännössä käsittely tapahtuu sekoittamalla biohiiltä kompostituotteisiin tai lietteisiin, joissa se imee itseensä erilaisia mineraaleja. Biohiilen sekoittamisesta kompostiin on joitain tutkimuksia. Tutkimuksien mukaan jo 3–5 % olisi riittävä määrä. Yhteiskompostointi parantaa kompostin ja biohiilen laatua. (Carbons; Elo ym. 2020, 4).

Biohiilen käyttöä ravinnelisanä tai maanparannuksessa tulisi harkita huolella ennen sen lisäämistä maaperään. Tutkimuksien mukaan oikeastaan ainoa haitta sen käytöllä on, jos biohiiltä lisätään liikaa. Esimerkiksi sateisina kausina, jos ravinteita huuhtoutuu paljon maaperästä pois, voi hiili sitoa jatkossa paljon ravinteita itseensä pois kasveilta. Biologisesti rikastetun aktiivihieksen käytöstä on hyvin ristiriitaisia tutkimuksia. Jotkut tutkimukset Väli-Amerikasta mainitsevat 200 % sadon kasvua, mutta realistinen tutkimus Saksasta kertoi sadon kaksinkertaistumisen. Ongelma aktiivihieksen käytöstä viljely maassa on kuitenkin sen kyky sitoa uusia ravinteita itseensä ja kerran lisättyä hiiltä on vaikea saada maaperästä pois.

Biohiilen käyttäminen adsorboinnissa olisi suotavaa ennen sen lisäämistä maaperään. Tällöin tuotteesta saadaan enemmän irti. Ravinnerikasta biohiiltä tulisikin käyttää maanparannuksessa ravinneköyhän biomassasta valmistetun biohiilen sijaan, jotta toiminta olisi ympäristöystävällistä ja tehokkaampaa. (Riikonen 2019.)

## 5.3 Viher- ja ympäristörakentaminen

Biohiilen, aktiivihieksen ja hakkeen käytöstä suodatuksessa on myös tehty paljon tutkimusta. Tutkimuksissa on vielä auki monenlaisia kysymyksiä hulevesien suodatuksen hyödyllisyydestä ja mahdollisuuksista. Yleisesti tutkimuksissa on kuitenkin todettu biohiilen poistavan haitta-aineita hulevesistä. (Riikonen 2019, 44–45.) Luonnollisesti aktiivihieksi on suuremman pinta-alansa ansiosta parempi suodattamaan kuin biohiili tai hake.

Aktiivihiihen käytöllä voitaisiin mahdollisesti korvata helposti rikki meneviä tai vikaantuvia kalvosuodattimia”. Aktiivihiihi voitaisiin aina tarvittaessa vaihtaa ja puhdistaa esimerkiksi höyryn avulla ja ottaa uudelleen käyttöön. Jos näillä voitaisiin korvata kalvosuodattimia, niin aktiivihiihelle löytyisi luultavasti paljon suurempaa kysyntää.

Hulevesisuodatuksessa pyritään vähentämään PAH-yhdisteiden, ravinteiden, bakteerien ja haitta-aineita. Suodatuksessa on myös tärkeää, että biohiilestä ei irtoa huleveden mukaan päästöjä. Hulevesissä on paljon hiilipitoisia ainesosia, jotka tukkivat suodatinta ja laskevat suodatus pinta-alaa. Biohiili suodatuksella voidaan vähentää vesilaitokselle tulevaa kuormaa käsittelemällä hulevesiä syntypaikallaan. (Riikonen 2019, 14.)

Monien erilaisten biohiili, aktiivihiihi ja hakesuodattimien käyttöönottoa varten tarvitsisi tehdä lisää tutkimusta. Pitkäaikaisiin tutkimuksiin kuitenkin tulee paljon satunnaisia poikkeuksia, jotka vääristävät tai korjaavat laboratoriossa saatuja tuloksia.

Turun ammattikorkeakoulu toteutti biohiili- ja hakesuodatin pilotin salaojavesien perusteella ja lyhyen tutkimusajan perusteella suodatin suodatti typpeä, fosforia ja kiintoainesta. Tutkimuksessa todetaan, että biohiili ja hake sekoituksella ei ollut suodatuksessa suuria eroja hakkeeseen verrattaessa (Kaiseva ym. 2019.) Lyhyellä seuranta ajalla saat-  
taa kuitenkin olla vaikutusta eroon.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Topinojan penkan potentiaalia biohiilen valmistukseen. Tutkimuksen materiaalina toimi eri toimialojen tutkimukset, julkaisut sekä opinnäytetyöt. Opinnäytetyö sisältää näistä kasattua tietoa ja niiden perusteella tehtyä pohdintaa.

Biohiiltä valmistetaan orgaanisesta materiaalista käsittelemällä sitä lämmöllä vähä happisessa tilassa. Biohiilen lähtömateriaalilla on vaikutusta biohiilen rakenteeseen ja sen ominaisuuksiin. Biohiilen jälkikäsittelyllä sen soveltuvuutta eri käyttökohteisiin voidaan parantaa tai biohiiltä voidaan jatkojalostaa aktiivihieksi, jolloin sen käyttökohteiden määrä kasvaa.

Erlaisia pyrolyysiprosesseja käyttämällä voidaan vaikuttaa biohiilen määrään ja biohiilen laatuun. Pyrolyysiprosessilla on myös vaikutusta prosessin hyötysuhteisiin ja prosessissa muodostuviin sivutuotteisiin sekä niiden laatuun.

Topinpuiston entisellä jätteen loppusijoituspisteen penkalla voitaisiin viljellä hyvin toisistaan poikkeavia biomassoja. Lounais-Suomen Jätehuollon arvoilla, tarpeilla ja loppusijoituspenkan rakenteella sekä Suomen ilmastolla on kuitenkin biomassoja rajoittavia tekijöitä. Muiden jättejakeiden, kuten jätetuun käyttäminen voi kasvattaa biohiilen määrää sekä laskea valmistuskustannuksia. Biohiili sopii hyvin maanparannus, hulevesi ja viherrakennus kohteisiin, mutta näihin kohteisiin soveltuvuutta voidaan kasvattaa biohiilen aktiivinnilla aktiivihieksi.

Lajeista pitäisi tehdä puolueeton ja riippumaton tutkimus. Eri ilmastojen, talven, sateiden ja muiden lajikkeiden menestymiseen tai epäonnistumiseen tarvittavia tietoja voidaan tulkita eritavoin. Pelkästään mannerten välisten kasvupaikkojen välillä voi olla hyvin samanlainen ilmasto, mutta moni muu asia voi saada viljelyn epäonnistumaan.

Biomassan lähtömateriaaliksi soveltuvia lajeja on useita, mutta parhaiten soveltuvia ja tutkituimpia lajeja ovat paju, kuitu- ja öljyhamppu sekä maissi. Nämä lajit tuottavat pinta-alan suhteutettuna suuren määrän hyvää laatuista materiaalia biomassaksi. Biomassat sopivat myös erinomaisesti jatkojalostukseen.

Opinnäytetyön tutkimuksien perusteella voidaan biomassaa viljellä eritavoin ja eri kasvilajeilla. Tämän lisäksi biohiiltä voidaan valmistaa useilla eri prosesseilla ja jatkojalostaa eri keinoin. Opinnäytetyössä löytyi myös erilaisia käyttökohteita biohiillelle, jatkojalosteille sekä sivutuotteille.

Jatkotutkimusta tarvitsisi kuitenkin tehdä mekaanisten suodattimien korvaamiseksi tai tukemiseksi. Viljelyssä voitaisiin myös mahdollisesti käyttää vaihtoehtoisia lannoitteita, joiden käyttämistä tarvitsisi tutkia lisää. Myös biohiilen kannattavuutta kustannuksien ja tuoton osalta tarvitsisi tutkia lisää.

## LÄHTEET

Forestbiofacts 2020. Hiilen kiertokulku ja kiertotalous. Viitattu 9.6.2021. <https://forestbiofacts.com/johdanto-metsabiototalouteen/hiilen-kiertokulku-ja-kiertotalous/>

Bioneuvoja.fi. Hakkeen varastointi. Viitattu 9.6.2021 <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/polttoaineen-varastointi/>

Carbons 2020 Pajujen kasvatusohjeet. Viitattu 9.6.2021 <https://carbons.fi/wp-content/uploads/2020/11/Tuotekortti-Pajun-kasvatus-0720.pdf>

Carbons.fi. Carbons grow pro ja harrastajien kasvualustoihin. Viitattu 9.6.2021. <https://carbons.fi/tuotteet/grow>

Elo A., Lahti I., Kymäläinen M. 2020. Biohiili kompostointiprosessin tukiaineena. Viitattu 9.6.2021 <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2020/09/TP4-osaraportti-komposti.pdf>

Elo Annakaisa 2019. Biohiili. Kestävämpää puutarhataloutta biohiilen avulla. Hämeen ammattikorkeakoulu. Viitattu 9.6.2021. <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/03/7-Kest%C3%A4v%C3%A4mp%C3%A4%C3%A4-puutarhataloutta-biohiilen-avulla-Elo-HAMK.pdf>

Fuchs M., Garcia-Perez M., Small P., Flora G. 2014. Campfire Lessons – breaking down the combustion process to understand biochar production. Viitattu 9.6.2021 <https://www.biochar-journal.org/en/ct/47>

Handel, Steven N., Robinson, George R., Parsons, William F.J. & Matteri., Jennifer H.2008. Restoration of woody plants to capped landfills: root dynamics in an engineered soil. Restoration Ecology 5(2): 178–186. Viitattu 9.6.2021. [https://www.researchgate.net/publication/230288022\\_Restoration\\_of\\_Woody\\_Plants\\_to\\_Capped\\_Landfills\\_Root\\_Dynamics\\_in\\_an\\_Engineered\\_Soil](https://www.researchgate.net/publication/230288022_Restoration_of_Woody_Plants_to_Capped_Landfills_Root_Dynamics_in_an_Engineered_Soil)

Happonen Maiju 2020. Topinpuiston Hulevesiselvitys. Viitattu 9.6.2021 <https://kaupunkisuunnittelu.turku.fi/kaavoitus/11383-2017Topinojankiertotalouspuistohulevesiselvitys2-vaiheID5658-Valmisteluehdotus.pdf>

Hiidenheimo Sakari 2016. Hydrothermal liquefaction of biomass for liquid biofuel production. Aalto-yliopisto. Maisterivaiheen opinnäytetyö. Kemian tekniikan koulutusohjelma. Viitattu 9.6.2021. <https://aalto.aalto.fi/handle/123456789/22134>

Kaseva A., Laine K., Ajosenpää T. Niemi J., Mononen M. 2020. Biohiili- ja hakesuodattamo sala-  
ojavesien käsittelyssä: pilotoinnin tulokset 2019. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 264. Viitattu 9.6.2021 [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/346286/Kaseva\\_etal\\_Biohiili\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/346286/Kaseva_etal_Biohiili_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Kautto Tuomo 2020. Energiapuun kastelu jätetäytön suotovedellä tuhka- ja kompostista valmistetussa kasvualustassa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Kandidaatintyö. Viitattu 9.6.2021 [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102198/0340442\\_Kautto\\_Tuomo\\_Diplomity%C3%B6\\_2.12.2014.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/102198/0340442_Kautto_Tuomo_Diplomity%C3%B6_2.12.2014.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Kosunen Milla 2015. Biomassapohjaisen aktiivihien valmistus hydrotermisellä ja termokemiallisella käsittelyllä. Oulun yliopisto. Pro-Gradu -tutkielma. Kemian tutkinto-ohjelma. Viitattu 9.6.2021 <https://docplayer.fi/47500538-Biomassapohjaisen-aktiivihien- valmistus-hydrotermisella-ja-termokemiallisella-kasittelylla-milla-kosunen.html>

Kujala Mia 2012. Biosampo koulutus- ja tutkimuskeskuksen hitaan pyrolyysireaktorin koeajo. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Teknologiaosaamisen johtaminen. Viitattu 9.6.2021. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48984/Kujala%20Mia.pdf?sequence=1>

Laikko, Outi 2020. Palvelukokonaisuuden kehittäminen kiertotalousverkoston toiminnan vauhdittamiseksi. Viitattu 9.6.2021. <https://www.lsjh.fi/wp-content/uploads/laikko-outi-ont.pdf>

Lappa E., Christensen P., Klemmer M., Becker J., Iversen B. 2016. Hydrothermal liquefaction of Miscanthus x Giganteus: Preparation of the ideal feedstock. Aarhus university, Danish technological institute. Viitattu 9.6.2021 [https://www.researchgate.net/publication/295840847\\_Hydrothermal\\_liquefaction\\_of\\_Miscanthus\\_Giganteus\\_Preparation\\_of\\_the\\_ideal\\_feedstock](https://www.researchgate.net/publication/295840847_Hydrothermal_liquefaction_of_Miscanthus_Giganteus_Preparation_of_the_ideal_feedstock)

Laurila M., Huuskonen A., Luoma S. 2014. Maa- ja elintarvike talouden tutkimuskeskus, Kotieläintuotannon tutkimus. Viitattu 9.6.2021 [http://www.smts.fi/MTP\\_julkaisu\\_2014/Posterit/071Laurila\\_ym\\_Nurmipalkokasveja\\_viljelyyn\\_ja\\_laidunnukseen\\_Pohjois-Pohjanmaalle.pdf](http://www.smts.fi/MTP_julkaisu_2014/Posterit/071Laurila_ym_Nurmipalkokasveja_viljelyyn_ja_laidunnukseen_Pohjois-Pohjanmaalle.pdf)

Min Song Jae 2017 Landfill Recovery Project : Transformation of Landfill to Ecological Park. Viitattu 9.6.2021 <https://seoulsolution.kr/en/content/landfill-recovery-project-transformation-landfill-ecological-park>

Muhammad N., Aziz R., Brooks P., Xu J. 2017. Impact of wheat straw biochar on yield of rice and some properties of Psammaquent and Plinthudult. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Zhejiang University, Department of Microbiology Kohat University of Science and Technology, Department of Environmental Sciences, International Islamic University. Viitattu 9.6.2021. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-95162017000300019](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162017000300019)

Mullen C., Boateng A., Lima A. 2010. Bio-oil and Bio-char Production from Corn cobs and Stover by Fast pyrolysis. United States of Department of Agriculture. Viitattu 9.6.2021. [https://www.researchgate.net/publication/222691261\\_Bio-oil\\_and\\_Bio-char\\_Production\\_from\\_Corn\\_Cobs\\_and\\_Stover\\_by\\_Fast\\_Pyrolysis](https://www.researchgate.net/publication/222691261_Bio-oil_and_Bio-char_Production_from_Corn_Cobs_and_Stover_by_Fast_Pyrolysis)

Niemi Jasmin 2018. Biohiilen käyttö suodattimissa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tekniikan kandidaatintyö. Kemianteeniikan koulutusohjelma Viitattu 9.6.2021 [https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158474/kandidaatinty%c3%b6\\_Niemi\\_Jasmin.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158474/kandidaatinty%c3%b6_Niemi_Jasmin.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nissinen O., Kukkonen A., Kalliainen P. 2010. Vuoroviljely torjuu kasvitauteja. Maaseudun tulevaisuus. Viitattu 9.6.2021. <http://www.mtt.fi/maaseuduntiede/pdf/mtt-mt-v67n01.pdf>

Norokytö Noora 2013. Öljyhamppu – Opas viljelyyn ja käsittelyyn. Turun Ammattikorkeakoulu. Viitattu 9.6.2021. <http://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522164148.pdf>

Pahkala K., Hakala K., Kontturi M., Niemeläinen O., 2009. Peltobiomassat globaalina energianlähteenä. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Viitattu 9.6.2021. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met137.pdf>

Pulkkinen Lotta 2019. Jätemuovien konversio liikenteen polttoaineen raaka-aineeksi. Oulun yliopisto. Kandidaatintyö. Prosessitekniiikan Koulutusohjelma. Viitattu 9.6.2021 <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202001081005.pdf>

Rawlinson H., Dickinson N., Nolan P., Putwain P. 2004. Woodland establishment on closed old-style landfill sites in N.W. England. Viitattu 9.6.2021 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112704005523>

Riikonen Anu 2019. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. Helsingin kaupunki. Kaupunkiympäristön toimiala. Viitattu 9.6.2021 <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisu-19-19.pdf>

Schulman Max 2020, Nostetta öljykasvien viljelyyn. Viitattu 9.6.2021. [https://www.mtk.fi/-/rypsirapsi\\_hanke](https://www.mtk.fi/-/rypsirapsi_hanke)

Sheehar T., Toor S., Shah A., Nielsen A., Pedersen T., Rosendahl L. 2021. Catalytic hydrothermal liquefaction of contaminated construction wood waste for biocrude production and investigation of fate of heavy metals. Department of Energy Technology, Aalborg University. Department of Energy and Environment Engineering, Dawood University of Engineering and Technology, Department of the Built Environment, Aalborg University Department of Energy Technology, Aalborg University. Department of Energy and Environment Engineering, Dawood University of Engineering and Technology, Department of the Built Environment, Aalborg University Viitattu 9.6.2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382020309127>

Siipola V., Källi A., Wendling L., Karlson M., Björnström M., Koukari P. 2019. Biohiilen valmistus ja käyttö vedenpuhdistukseen. Maa- ja metsätalousministeriö. Viitattu 9.6.2021. [https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/Siipola+VTT\\_R\\_05608\\_18\\_CoCarbon.pdf/d91543c8-1c96-c0b4-0b0c-9b8579800c1f/Siipola+VTT\\_R\\_05608\\_18\\_CoCarbon.pdf](https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/Siipola+VTT_R_05608_18_CoCarbon.pdf/d91543c8-1c96-c0b4-0b0c-9b8579800c1f/Siipola+VTT_R_05608_18_CoCarbon.pdf)

Siivola Johanna 2005. Pohjoiseen Keski-Suomeen soveltuvat energia kasvilajit. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma. Viitattu 9.6.2021. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20530/energiakasvit\\_BDC\\_julkaisu\\_11.pdf?sequence=3](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20530/energiakasvit_BDC_julkaisu_11.pdf?sequence=3)

Sipilä e., Kiuru H., Jokinen J., Saarela J., Tamminen S., Laukkanen M., Palonen P., Nylund N., Sipilä K. 2018. Biopolttoaineiden kustannustehokkaat toteutuspolut vuoteen 2030. Valtioneuvoston kanslia. Viitattu 9.6.2021. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161074/63-2018-Biopolttoaineiden\\_kustannustehokkaat\\_toteutuspolut\\_vuoteen\\_2030.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161074/63-2018-Biopolttoaineiden_kustannustehokkaat_toteutuspolut_vuoteen_2030.pdf)

Solio J., Kuopanportti H., Kuosa M. 2018. Hienojakoisen puujakeen jalostaminen termokemiallisesti biohiileksi. Viitattu 9.6.2021. <https://www.pikes.fi/documents/89838/353163/Hienojakeisen+puujakeen+jalostaminen+termokemiallisesti+biohiileksi%2C+osa+1%2C+Xamk+2018.pdf/8bed5b0b-411b-ce0b-abb7-6c78ea17e607>

Starck Jerkko 2011. Nopeaan pyrolyysiin perustuvan bioöljyn tuotantolaitoksen liiketoiminnallinen malli ja kannattavuuslaskenta Savonlinnan seudulla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö. Energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 9.6.2021 <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/72113/nbnfi-fe201109275594.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Strand Tuomas 2011. Biohiilen tekeminen jätemateriaalista maanparannuskäyttöön. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö. Ympäristötekniikan koulutusohjelma Viitattu 9.6.2021 [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76753/Kandidaatintyo%C3%B6\\_Strand.pdf?sequence=1](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76753/Kandidaatintyo%C3%B6_Strand.pdf?sequence=1)

Tippayawong N., Rerkkriangkrai P., Aggarangsi., Pattiya A., 2018. Characterization of Biochar from pyrolysis of corn residues in a Semi-continuous carbonizer. Chiang Mai University, Department of mechanical engineering; Mahasarakham university, Department of mechanical engineering. <https://www.aidic.it/cet/18/70/232.pdf>

Varpula, Ville 2020. Biohiilen mahdollisuudet kasvihuonepäästöjen kompensoinnissa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Kandidaatintyö. Viitattu 9.6.2021. [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161723/Kandidaatintyo%cc%88\\_Varpula\\_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161723/Kandidaatintyo%cc%88_Varpula_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Viholainen lida 2017. Pajun viljely ja salaojitus. Viitattu 9.6.2021 <https://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2017/03/Pajun-viljely-ja-salaojitus.pdf>

Vilja-alan yhteistyöryhmä. Kevätrypsin ja -rapsin lajikevalikoima. Viitattu 9.6.2021. <https://www.vyr.fi/rypsin-ja-rapsin-viljelyopas/miten-viljelen-kevatrypsia-ja-rapsia/kevatrypsin-ja-rapsin-lajikevalikoima/>

Viljelijän Avena Berner 2020. Rehumaissin viljely, lannoitus ja kasvinsuojelu. Viitattu 9.6.2021. [https://www.kpedu.fi/docs/default-source/projektisivustot/ajantasa\\_materiaali/ajankohtaista\\_rehumaissista\\_2020-02-25/rehumaissin\\_viljely\\_2020-02-25\\_viljelij%C3%A4navenaberner.pdf?sfvrsn=291b1b4d\\_2](https://www.kpedu.fi/docs/default-source/projektisivustot/ajantasa_materiaali/ajankohtaista_rehumaissista_2020-02-25/rehumaissin_viljely_2020-02-25_viljelij%C3%A4navenaberner.pdf?sfvrsn=291b1b4d_2)

Virtanen Satu 2014. Typenpoiston nitrifikaatio- ja denitrifikaationopeudet jätevedenpuhdistusprosessissa. Lahden ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 9.6.2021. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70138/Virtanen\\_Satu.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70138/Virtanen_Satu.pdf?sequence=1)

Wilson Kelpie 2014. How biochar works in soil. Viitattu 9.6.2021 <https://www.biochar-journal.org/en/ct/32>

Yli-tolppa Joonas 2017. Kaatopaikan sulkemusrakenteet Topinojan jätekeskuksessa. Turun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö Viitattu 9.6.2021 [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139760/Yli-Tolppa\\_Joonas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139760/Yli-Tolppa_Joonas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Åhlström, Satu 2020. Biohiilen valmistaminen rakennusjätepuun käsittelyratkaisuna. Hämeen ammattikorkeakoulu. Kestävä kehitys. Opinnäytetyö. Viitattu 9.6.2021. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/345766/Opinn%C3%A4ytety%C3%B6\\_Satu%20%C3%85hlstr%C3%B6m.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/345766/Opinn%C3%A4ytety%C3%B6_Satu%20%C3%85hlstr%C3%B6m.pdf?sequence=2&isAllowed=y)