

**Kuusihakkeesta tuotetun biohiilen vaikutuksia lierojen  
aktiivisuuteen Etelä-Suomen olosuhteissa**

Tuure Parviainen  
Maisterintutkielma  
Helsingin yliopisto  
Maataloustieteiden laitos  
Agroekologia  
2013

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF  
HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Tuure Parviainen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Kuusihakkeesta tuotetun biohiilen vaikutuksia lierojen aktiivisuuteen Etelä-Suomen olosuhteissa			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroekologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year 2013	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 65
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Biohiili on biomassojen hiiltämisestä syntyvä orgaaninen kiinteä jae. Biohiiltä tutkitaan maanparannusaineena maataloudessa ja potentiaalisena hiilinieluna ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Biohiiltä on tutkittu lähiaikoina paljon, mutta sen vaikutuksista maaperäeliöstöön on vasta niukasti tietoa. Käytännössä kenttäkokeita ei ole julkaistu biohiilen vaikutuksesta lieroihin, jotka ovat yleinen ja tärkeä peltomaan eliöstöryhmä.</p> <p>Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää biohiilen lisäämisen vaikutuksia lierojen käyttäytymiseen laboratorio- ja kenttäkokeella Etelä-Suomen olosuhteissa. Käyttäytymiskokeessa selvitettiin peltolieron <i>Aporrectodea caliginosa</i> preferenssiä käsitellyn ja käsittelemättömän maan välillä, kahden ja 14 päivän kokeessa. Kenttäkokeessa selvitettiin biohiilen ja eri lannoitusosojen vaikutusta lierojen runsauksiin ja biomassaan peltomaan muokkauskerroksessa yhden kasvukauden aikana koealalla, jossa viljeltiin vehnää.</p> <p>Kokeissa käytettiin kuusihakkeesta 550–600 °C lämpötilassa hiillettyä biohiiltä 1,6 % painoprosenttia (vastaa 30 t/ha). Lyhyemmässä, kahden vuorokauden käyttäytymiskokeessa ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja. Pidemmässä kahden viikon kokeessa lieroja havaittiin 44 % vähemmän käsittelyn puolella (<math>P = 0,033</math>). Syynä on mahdollisesti biohiilen kuivattava vaikutus, joka johtuu biohiilen korkeasta vedenpidätyskyvystä.</p> <p>Kenttäkokeessa biohiilen lisäys ei vaikuttanut lierojen runsauteen tai biomassaan tilastollisesti merkitsevästi. Kokeen lyhyden takia kokeen tulokset ovat riittäviä arvioimaan vain välittömiä välttämisyreaktioita, joita ei havaittu yhden kasvukauden aikana kenttäolosuhteissa. Kokonaisvaltaiseen arviointiin tarvitaan pidemmän aikavälin seurantakokeita ja yksityiskohtaisempia käyttäytymiskokeita vaikutusmekanismien selvittämiseksi.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Biohiili, liero, käyttäytymiskoe, kenttäkoe, <i>Aporrectodea caliginosa</i>			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasi(vat) Juha Helenius, Visa Nuutinen ja Priit Tammeorg			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF  
HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Tuure Parviainen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Spruce chip biochar's effect on earthworm activity in Southern Finland			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroecology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year 2013	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 65
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Biochar is currently being intensively studied as a soil conditioner in agriculture and as a potential carbon sink to mitigate climate change. The knowledge of the effects of biochar field application on soil fauna remains very limited. This is underlined by the absence of field experiments on the effects of biochar on earthworms, a globally common and important faunal group in arable soils.</p> <p>The purpose of our study was to determine the effects of biochar on arable soil earthworms under both laboratory and field conditions in a Boreal loamy sand soil. An earthworm avoidance test with <i>Aporrectodea caliginosa</i> was conducted for periods of 2 and 14 days with 1.6% w:w spruce chips biochar application (produced at 550-600 ° C, application rate corresponding to 30 t/ha biochar). The effect of field application of the same biochar on earthworm density and biomass was studied over one growing season in experiment growing wheat.</p> <p>In the avoidance test, application did not affect the habitat choice of earthworms when incubation lasted for two days, but after two weeks, a significant (<math>P = 0.033</math>) avoidance of biochar was observed. We suggest that the avoidance under the two-week incubation occurred due to soil desiccation caused by high water retention of biochar.</p> <p>In the field trial, after BC application there were no statistically significant differences in the total density and biomass of earthworms between biochar or fertilizer treatments. Due to the short duration of the field trial, our results do not allow conclusive evaluation of the treatment effects on earthworms. The time scale of the study can only be considered sufficient for unraveling immediate avoidance reactions caused by biochar application, for which we found no evidence. In order to thoroughly investigate matter further, the follow-up of the experiment should be continued.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Biochar, earthworm, avoidance experiment, field experiment, <i>Aporrectodea caliginosa</i>			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisor(s) Juha Helenius, Visa Nuutinen and Priit Tammeorg			

# SISÄLLYS

LYHENTEET JA SYMBOLIT.....	5
1 JOHDANTO .....	6
2 BIOHIILEN VAIKUTUS LIEROIHIN .....	9
2.1 Peltomaan lierot .....	9
2.2 Lierojen biologia .....	11
2.3 Lierojen merkitys ja ekosysteemipalvelut maatalousmaassa .....	13
2.4 Biohiili .....	18
2.5 Biohiilen vaikutustavat lieroihin.....	22
2.6 Lierotutkimuksissa käytetyt menetelmät .....	29
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET .....	30
4 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	31
4.1 Yleistä.....	31
4.2 Käyttäytymiskoe .....	33
4.3 Kenttäkoe .....	37
4.4 Tulosten käsittely.....	40
4.4.1 Käyttäytymiskokeen tulosten analyysi.....	40
4.4.2 Kenttäkokeen tulosten analyysi .....	41
5 TULOKSET .....	42
5.1 Lierojen reagoiminen biohiileen.....	42
5.2 Lierorunsaudet koekentällä .....	44
6 TULOSTEN TARKASTELO .....	47
6.1 Lierojen reagointi biohiileen kontrolloiduissa olosuhteissa .....	47
6.2 Biohiilen vaikutus runsauksiin koekentällä.....	50
6.3 Biohiilen käytön mahdollisuudet tulevaisuudessa.....	52
7. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	55
8 KIITOKSET .....	56
9 LÄHTEET.....	57

## LYHENTEET JA SYMBOLIT

B <sub>30</sub>	Symboli käytetylle biohiilitalosolle, tarkoittaa 30 tonnia biohiiltä hehtaarille
C	Hiili ( <i>carbon</i> ), alkuaine
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub>	Hydrokinoni, mahdollisesti karsinogeeninen yhdiste
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi, kasvihuonekaasu
CO <sub>2</sub> -C <sub>e</sub>	Hiilidioksidiekvivalentti, kasvihuonekaasut muutettuna yhteismitalliseen yksikköön IPCC:n muuntokertoimien avulla
CH <sub>4</sub>	Metaani, kasvihuonekaasu
Gt	Gigatonni, 10 <sup>9</sup> eli 1 000 000 000 tonnia
H <sub>2</sub> O	Vesi
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
k.a.	Lyhenne, kuiva-aine
KVK	Kationinvaihtokapasiteetti, kuvaa ravinteiden kykyä sitoutua maahiukkasten pinnalle
N <sub>2</sub> O	Dityppioksidi, kasvihuonekaasu
N <sub>100</sub>	Symboli käytetylle typpitasolle, tarkoittaa 100 kiloa typpeä hehtaarille
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt, usein karsinogeenisia yhdisteitä
pH	Happamuus

## 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ja ihmispopulaation jatkuva kasvu tuottavat haasteita tulevaisuuden ruuantuotannolle. Ihmismäärän on ennustettu kasvavan vielä 2–4 miljardilla vuoteen 2050 mennessä (UN 1999, U.S. Census Bureau 2010). Samanaikaisesti ilmastonmuutos saattaa aiheuttaa merkittävien ruuantuotantoalueiden menetyksiä mm. ilmaston lämpenemisen aiheuttaman kuivuuden seurauksena (Pachauri & Reisinger 2007). Nämä seikat asettavat uudenlaisia haasteita ruokajärjestelmän toimintaedellytyksille, sillä myös maatalous aiheuttaa merkittäviä kasvihuonepäästöjä (Robertson ym. 2000).

Yksi mahdollinen ratkaisu edellä mainittuihin ongelmiin voisi olla biohiilen käyttö maanparannusaineena, joka toisaalta lisääisi satoja, mutta myös vähentäisi maatalouden kasvihuonepäästöjä (Woolf ym. 2010). Biohiili on kiinteä lopputuote, jota saadaan kun biomassaa kuumennetaan hapettomassa tilassa korkeahkossa lämpötilassa (250–750 °C) eli hiilletään (kuivatislaus, pyrolyysi). Hiiltämisprosessissa muodostuvat aromaattiset yhdisteet parantavat biohiilen pysyvyyttä mikrobihajotusta vastaan ja niin voidaan pidentää aikaväliä, milloin fotosynteettisesti sidottu C (hiili) palaa ilmakehään (Cheng & Lehmann 2009). Eri menetelmillä ja raaka-aineista valmistettujen biohiilten puoliintumisajoiksi on arvioitu olevan jopa  $10^2$ – $10^7$  vuotta (Zimmerman 2010), joten menetelmä olisi lupaava tapa hillitä ilmastonmuutosta. Esimerkiksi Woolf ym. (2010) tutkimuksen mukaan sijoittamalla hiiltämisessä muodostuva biohiili maaperään voidaan poistaa jopa 1.8 Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>e</sub> ilmakehästä. Tämä vastaa 12 prosenttia nykyisestä vuotuisesta ihmiskunnan tuottamista kasvihuonepäästöistä, mikä on selvästi enemmän kuin vaihtoehtoiset menetelmät, kuten multavuutta lisäävien menetelmien käyttö (noin 0,4 -1,2 Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>e</sub>/vuosi; Lal 2004) tai biomassan poltto bioenergiaksi (1.5 Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>e</sub>/vuosi; Woolf ym. 2010).

Tutkimuksissa on havaittu, että biohiilellä on useita positiivisia vaikutuksia maaperälle. Biohiili voi parantaa maaperän kemiallisia ominaisuuksia, kuten kationinvaihtokapasiteettiä (Yanai ym. 2007; Dominic & Kimberley 2010) vähentää typpiravinteiden huuhtoutumista (Spokas ym. 2009; Roberts ym. 2010) vähentää metaanin CH<sub>4</sub> ja dityppioksidin N<sub>2</sub>O päästöjä (Yanai ym. 2007) ja nopeuttaa kasvinsuojeluaineiden hajoamista (Spokas ym. 2009) ja fysikaalisia ominaisuuksia

(Zimmerman 2010), kuten lisätä vedenpidätyskapasiteettia (Karhu ym. 2011) ja biologisia ominaisuuksia, esimerkiksi lisätä mykorrhizasymbioosia (Spokas ym. 2009).

Biohiilen positiiviset vaikutukset ovat huomattavia, ja tutkimusta aiheesta on nykyään runsaasti. Toistaiseksi biohiilen ympäristövaikutusten tutkiminen on ollut vähäisempää, vaikka viitteitä siitäkin löytyy jo (Verheijen ym. 2009, Lehmann ym. 2011). Erityistä huomiota on herättänyt biohiilen mahdolliset vaikutukset maaperän eliöstöön. Maaperän prosessit, niiden tuottamat ekosysteemipalvelut ja niihin osallistuvat eliöt ovat nimittäin monimutkainen kokonaisuus, jonka toiminnan häiriintyminen voi olla hyvin merkittävää.

Maaperän eliöt tuottavat tai tehostavat maaperän ekosysteemipalveluita. Lierot ovat tunnistettu avainlajiryhmäksi useissa maaperän prosesseissa, sillä ne muokkaavat maata ja voivat vaikuttaa maan tuotantokykyyn (Kibblewhite ym. 2010). Näin ollen biohiilen vaikutus lieroihin on tärkeä selvittää, jotta voidaan arvioida sen käyttökelpoisuutta laajempaan käyttöön.

Biohiili voisi sitoa kasvihuonekaasupäästöjä ja parantaa samalla maan sadontuotantopotentiaalia ja lisäksi tuoda mahdollisia yhdysvaikutuksia lierojen kanssa, kuten maaperän rakenteen parantumista ja tätä kautta tuotantokyvyn kasvua. Toistaiseksi kuitenkin tutkimus biohiilen vaikutuksista maaperäneliöihin on vasta alkamassa. Nykyisten tutkimustulosten mukaan kasvien tuotantokyky kasvaa, niin biohiilen vaikutuksesta, kuin lierojen vaikutuksesta, mutta synergiaa ei havaittu (Noguera ym. 2010).

Biohiilen vaikutuksista lieroihin ja änkyrimatoihin on tehty useita laboratorioskokeita (Liiri ym. 2002 Topolians & Ponge 2003, 2005, Chan ym. 2008, Cui ym. 2009, Liesh 2010), mutta kokeista on saatu ristiriitaisia tuloksia. Käytännön kenttäkokeita on toistaiseksi tehty vain vähän (Weyers & Spokas 2011), ja näistä valtaosa on tehty eri maanosissa ja lierolajeilla, joten ne ovat vain osittain vertailukelpoisia. Tutkiminen eri sääolosuhteissa on tärkeää, sillä aikaisemman tutkimuksen valossa eri olosuhteilla on suuri merkitys tuloksiin (Lehmann ym. 2011). Weyers & Spokas (2011) ehdottivat tulevien lierokokeiden järjestämistä tavalla, jossa laboratorioskoe ja kenttäkoe toteutetaan yhdessä, jotta tuloksia olisi helpompi verrata.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka biohiili vaikuttaa Etelä-Suomen olosuhteissa tehdyssä kenttäkokeessa lierojen määrään ja biomassaan sekä välttämiskokeessa peltomaan tyypillisempään lieroon eli peltolieroon (*Aporrectodea caliginosa*). Tutkimus toteutettiin osana Maa- ja metsätalous ministeriön (MMM) AgriHiili-hanketta, johon Helsingin yliopiston lisäksi osallistui Maatalous- ja elintarviketutkimuskeskus (MTT) sekä Sokerijuurikkaan tutkimuskeskus (SJT).



## 2 Biohiilen vaikutus lieroihin

### 2.1 Peltomaan lierot

Lierot (*Lumbricidae*) ovat mahdollisesti tunnetuin maaperäeliöidemme heimo. Lierot kuuluvat nivelmatoihin, alaluokassa *Oligochaeta*. Suomessa peltomaassa esiintyvistä lieroista yleisimpiä ovat *Aporrectodea* ja *Lumbricus* suvut. Viimeisten 100 vuoden aikana tehtyjen lierokartoitusten mukaan Suomessa on kaikkiaan 16 lierolajia (Terhivuo 1989). Ensimmäinen näistä kartoituksista tehtiin vuonna 1889, ja huomattava osa laajoista kartoituksista tehtiin 60- ja 80-luvuilla. Uusimpia kartoituksista on tehty 2003–06 LUMOliero -hankkeessa, jossa viljelymaissa tavattiin kymmenkunta lierolajia (Nuutinen ym. 2006, Nieminen ym. 2011). Suomen lierolajeista osa on harvinaisempia, esimerkiksi siniliero ja rantaliero, joita ei esiintynyt viimeisimmässä kartoituksessa lainkaan (Nuutinen ym. 2006, Nieminen ym. 2011). Maatalousmaassa muutamia muitakin lajeja esiintyy vain harvoin. Suurin lierolajien runsaus on Etelä-Suomessa, mutta useita lajeja esiintyy aina Etelä-Lapissa asti (Huhta ym. 1986, Nieminen ym. 2011).

Lierot ovat levittäytyneet lähes kaikkialle, mutta kaikki lajit eivät suinkaan elä samoissa ympäristöissä. Lierot ovat luonteeltaan varsin endeemisiä lajeja, niiden rajallisen leviämiskyvyn takia (Lavelle 1988). Näin ollen lierolajit ovat sopeutuneet pitkälle ympäristöihin, joissa ne elävät. Lierot voidaan jakaa usealla eri tavoilla, kuten niiden ravinnon tai ekologisten tai toiminnallisten ryhmien mukaan (Lavelle 1988). Lierolajit jaetaan usein kolmeen ekologiseen lajiryhmään, pintamaan (endogeenisiin), pintakarikkeen (epigeeisiin) ja syvälle kaivautuviin (aneekkisiin) lajeihin (Alakukku ym. 2004, Nuutinen ym. 2006, Nieminen ym. 2011). Pintakarikkeen lajit elävät vain muutamien senttimetrien syvyydessä maan pinnasta. Nämä lierot viihtyvät korjuutähteiden lomassa, eivätkä kaivaudu mineraalimaahan. Näihin lajeihin kuuluvat tummat, pienikokoiset lierot, kuten onkiliero (*Lumbricus rubellus*) ja punaliero (*Dendrodrilus rubidus*).



**Kuva 1.** Peltoliero (vasemmalla, *Aporrectodea caliginosa*), onkiliero (keskellä, *Lumbricus rubellus*) ja kasteliero (oikealla, *Lumbricus terrestris*) © Risto Seppälä, MTT (Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus). Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).

Pintamaan lajit elävät syvemmillä maassa ja ne ovat hieman suurikokoisempia kuin pintakarikkeen lajit. Nämä lajit etsivät usein parempia kosteus- tai lämpöolosuhteita kaivautumalla syvemmälle, mutta aktiivisimmillaan ne ovat maan pintakerroksissa (Alakukku ym. 2004). Yleisimpiä pintamaan lajeja ovat peltoliero (*Aporrectodea caliginosa*) ja multaliero (*Aporrectodea rosea*). Peltoliero (kuva 1) on yleisin peltomaan liero, ja sitä kutsutaan myös useilla muilla nimillä, kuten yleisnimityksellä mato, vaikka nimi ei viittaa erityisesti mihinkään lajiin.

Syväälle kaivautuvat lajit ovat tyypillisesti kookkaimpia. Suomessa on vain yksi yleinen peltomaalla syväälle kaivautuva laji, kasteliero (*Lumbricus terrestris*). Laji elää jopa yli metrin syvyyteen ulottuvassa käytävässä. Liero liikkuu tyypillisesti öisin maan pintaan ja vie käytävänsä ravintoa maan pinnalta, pitäen kuitenkin peräpäätänsä tukevasti kotikäytävässänsä. Kasteliero on myös Suomen suurin lierolaji (Alakukku ym. 2004).

Lierolajeja esiintyy tyypillisesti runsaasti häiriöttömällä ja runsasravinteisilla mailla, kuten lehdoissa (Huhta ym. 1986). Kulttuuriympäristöissä, kuten viljelymaassa voi lieroja esiintyä määrällisesti lähes yhtä runsaasti, mutta lajirunsaus on tyypillisesti pienempi (Edwards ym. 1983, Nieminen ym. 2011). Parhaimpia olosuhteita lieroille ovat monivuotiset kasvustot, joita lannoitetaan orgaanisella aineksella, kuten lannalla tai viherlannoituksella.

## **2.2 Lierojen biologia**

Lieroja on tutkittu paljon, niistä on tehty varsin monta hyvin seikkaperäistä katsausta, kuten esimerkiksi Satchell (1967, 1983), Edwards (1983), Lee (1985), Baker ym. (2006) ja Lavelle ym. (2006). Lierot ovat ulkoasultaan usein vaaleita ja pinnaltaan kosteita. Niiden pituus vaihtelee lajista ja yksilön iästä riippuen muutamasta senttimetreistä jopa kolmeenkymmeneen senttimetriin. Lierojen väritys vaihtelee tyypillisesti vaaleanpunaisesta harmaaseen, mutta on olemassa jopa vihreitä ja sinisiä lieroja.

Lierot ovat rakenteeltaan putkiloita, joiden sisällä on useita pienempiä onteloita eli jaokkeita. Niillä on vain vähän paljaalla silmällä erotettavia rakenteellisia tuntomerkkejä, ja näistä merkittävin ulkoinen osa on niiden satula, jonka reunoilla sijaitsevat niiden parittelukyhmyt. Lieroilla on suuri uusiutumiskyky, ja ne voivat kasvattaa itsestään irronneita osia uudelleen, kuitenkin katkenneesta yksilöstä ei muodostu kahta yksilöä (Jeffery ym. 2010).

Lierot ovat kaksineuvoisia eli niillä on molemmat sukupuolielimet, mutta niiden itsesiitos on silti harvinainen. Niillä ei ole varsinaista parittelu-aikaa, vaan ne tuottavat jälkeläisiä ympäri vuoden sopivien olosuhteiden salliessa. Parhaimmat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet ovat keväisin ja syksyisin, jolloin tehdään suuri osa jälkeläisistä (Edwards & Bohlen, 1996, Jeffery ym. 2010).

Lierojen elinkierto suhteessa eliön kokoon on hyvin pitkä. Lierot aloittavat elämänsä munakoteloista (kokooneista), josta ne työntävät itsensä ulos. Elinkierron pituudessa ja jälkeläistuotannossa on ekologisten ryhmien välillä eroja, mutta esimerkiksi syväälle kaivautuvat lajit kasvavat täysikasvuiseksi yhdeksässä kuukaudessa, ja ne voivat elää useita vuosia (Jeffery ym. 2010). Tyypillinen jakauma eri-ikäisiä lieroja oli

häiriintymättömässä maassa: 1,7 % yli 24 kk, 6,7 % 16–19 kk, 18,3 % 11–12 kk, 48,3 % 6–8 kk ja 25 % 1–2 kk vanhoja lieroja (Edwards & Bohlen 1996).

Lierojen ekologiset ryhmät ovat erikoistuneita syömään erilaisia osia maasta (Jeffery ym. 2010). Pääasiassa lierot syövät maa-ainesta, josta ne hyödyntävät orgaanista materiaalia, kuten kasvinosia ja erilaisia mikrobeja. Pintakarikkeen lajit syövät kasvijätettä, lantaa ja humusta. Syväälle kaivautuvat lajit ovat erikoistuneet hajoavaan kasvimateriaaliin, jota ne kuljettavat mukanaan käytäviinsä, kun taas pintamaan lajit hyödyntävät pääasiassa humifioitunutta orgaanista ainesta.

Lierot liikkuvat niiden kyljissä olevien sukasten avulla, joiden asentoa ne voivat säädellä. Liikkuminen ei ole yleensä kovin nopeaa, mutta sopivissa olosuhteissa lierot voivat liikkua hyvin nopeasti. Lierojen liikkumiseen vaikuttaa erityisesti kosteus ja maanlaatu. Karkeammassa maassa lierot tarvitsevat runsaammin kosteutta ja liikkuminen vie enemmän energiaa. Lierot liikkuvat kerätäkseen ruokaa, välttääkseen petoja ja epäsuotuisia ympäristöolosuhteita sekä pariutuakseen ja tuottaakseen jälkeläisiä. Tärkeimpiä lieroihin vaikuttavia tekijöitä ovat valo, lämpötila ja kosteus, joihin ne reagoivat herkästi (Lavelle 1988).

Lieropopulaatiot pyrkivät levittäytymään uusille alueille, mutta eivät tyypillisesti pysty liikkumaan yli maantieteellisten esteiden, kuten jokien tai vuorien yli (Lavelle 1988). Eri lierojen ekologisilla ryhmillä on havaittu erilaisia migraation nopeuksia, (1 ja 2 m/kk aneekkisilla ja epigeisillä lajeilla, vastaavasti; Bouché 1983). Istutettujen lierojen leviämisen tulokset ovat kuitenkin hyvin erilaisia, esimerkiksi kastelieron (*Lumbricus terrestris*) leviäminen oli raskaassa maassa noin 4,6 metriä vuodessa (Nuutinen ym. 2011). Lierojen leviämismekanismeja ja niiden syitä ei täysin ymmärretä. Riittävä kosteus, kuten 600 mm vuosittainen sadanta, on kuitenkin usealle lierolajille vähimmäisvaatimus selviytymiseen uudessa elinympäristössä (Baker ym. 1992). Tämän lisäksi maalaji, hiili/typpi-suhde (C/N) ja maan rakenne ovat tärkeitä tekijöitä lierojen menestymiselle (Nuutinen ym. 2011). Ihmistoiminta vaikuttaa myös lierolajien leviämiseen, erityisesti maatalous ja maansiirto voivat siirtää yksilöitä kauas niiden alkuperäisestä elinympäristöstään (Baker ym. 2006). Lierot voivat levitä myös munakoteloina, sillä niiden kotelot leviävät maan mukana.

Lierojen suurin uhka on tyypillisesti kuivuus. Lierojen ulkopinta on nimittäin ohut ja hyvin kaasuja läpäisevä, ja niiden hengitys tapahtuu tämän ulkopinnan kautta. Näin ollen lierojen täytyy pitää ulkopintansa aina kosteana, jotta ne pystyvät hengittämään. Lierot erittävät ympärilleen limaa, joka varmistaa niiden hengityksen ja myös helpottaa niiden liikkumista (Edwards ym. 1983). Alhainen liikkuvuus ja alttius kuivuudelle tekevät lieroista hyvin riippuvaisia ulkoisista olosuhteista. Tämä on myös yksi syy, miksi lierot ovat heikkoja leviämään uusille alueille.

Lierot ovat sopeutuneet selviämään olosuhteista, joista ne eivät pysty pakenemaan, horrostamalla tai munakoteloidensa avulla. Horrostilassa liero vaipuu vähäenergiseen tilaan odottamaan otollisempia olosuhteita. Tämä on tyypillistä pitkinä kuivina tai kuumina kausina, sillä nämä ovat lieroille erityisen haasteellisia (Lavelle 1988). Toisinaan erittäin kuivasta kaudesta selviävät vain munakotelot. Teoriassa yhdestä elossa olevasta lieroyksilöstä voi kasvaa uusi populaatio (Bouché 1983), joten lieropopulaatio voi selvitä poikkeuksellisenkin vaikeista olosuhteista, vaikka se taantuisi paljon. Lieroja voi luonnehtia huonoiksi leviämään ja herkiksi kosteuden vaihteluille, mutta poikkeuksellisen sitkeiksi selviämään populaatiolle vaikeiden aikojen ylitse.

### ***2.3 Lierojen merkitys ja ekosysteemipalvelut maatalousmaassa***

Ekosysteemipalvelut ovat: ”Ekosysteemien toiminnasta ihmisille koituva hyöty, joka voi olla aineeton tai aineellinen, hyödyke (tavara) tai prosessi (palvelu).” (Ratamäki ym. 2011). Nämä palvelut jaetaan vielä alaryhmiin tuki-, säätely-, tuotanto- ja kulttuuripalveluihin. Maaperän eliöt tuottavat ekosysteemipalveluita, jotka ovat tuotantoa ylläpitäviä tai parantavia palveluita, jotka mahdollistavat maaperän sadontuotanto-ominaisuudet. Ilman näitä ekosysteemipalveluita sadontuotanto olisi lähes mahdotonta. Maaperän eliöiden tuottamat palvelut vaihtelevat kasvijätteen hajottamisesta maan ominaisuuksien muokkaamiseen (Lavelle 1988).

Lierojen tuottamat maaperän kuntoa parantavat toiminnot ovat myös ekosysteemipalveluita. Lavelle (2006) mukaan ekosysteemipalveluiden jaottelussa ne lukeutuvat tuotanto-, tuki-, ja säätelypalveluihin. Lierot ovat maaperän luontaisia maanmuokkaajia, ja ne tukevat viljelymaiden kasvintuotantopotentiaalia näiden

ekosysteemipalveluiden kautta (Lavelle ym. 2006). Lierojen tuottamia palveluja ovat maanmuodostus, maa-aineksen sekoittaminen, mikrobiyhteisön säätely, ravinteiden kierron tehostaminen ja parantunut perustuotanto (Baker 2006, Lavelle 2006 ja Blouin 2013). Nämä ominaisuudet perustuvat lierojen liikkumisellaan aiheutettuun maan kuohkeuttamiseen ja orgaanisen aineksen käsittelyyn ja siirtoon, jotka parantavat maan ominaisuuksia. Parhaimmillaan Ghilarovin ja Mamajevin (1967) tutkimuksessa lierojen on osoitettu jopa kaksinkertaistavan kasvintuotantokyky tietyissä olosuhteissa (ref. Baker ym. 2006).

Lierojen tuottamien ekosysteemipalveluiden voidaan ajatella olevan pääasiassa lierojen aiheuttamien maan rakenteellisten muutosten tuottamia ominaisuuksia, jotka kasvattavat primäärituotantoa eli kasvien tuotantokykyä. Nämä palvelut kuuluvat tukipalveluihin, koska niitä voidaan pitää osana maan muodostumista. Lierot ovat tunnistettu osaksi maanmuodostusta, koska ne sekoittavat maa-aineista, parantavat maan rakennetta ja vedenjohtokykyä, kaivamalla maahan käytäviä, muodostamalla kestävämpiä maa-aggregaatteja sekä lisäämällä maan huokoisuutta parantaen näin myös maan ilmavaihtoa (Lavelle 1988, 2006, Blouin ym. 2013).

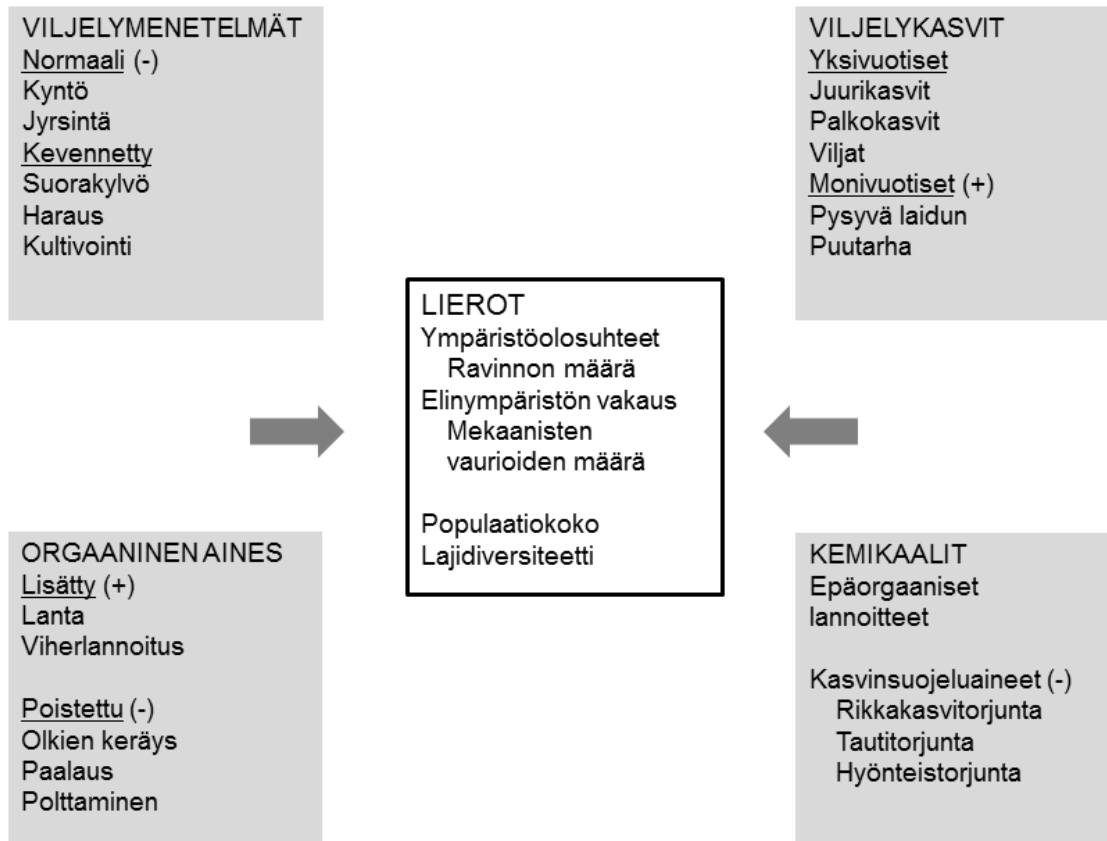
Lierot osallistuvat ravinteiden kiertoon nopeuttamalla kasvien tuottaman orgaanisen aineksen hajottamista, kasvattamalla orgaanisten yhdisteiden pinta-alaa hienontamalla näitä pienemmiksi. Samalla lierot vapauttavat pienempiä orgaanisia yhdisteitä ja ravinteita. Näistä ravinteista erityisesti typpi, mutta myös fosfori on kasvien käytettävissä. Lieroyhteisön on arvioitu tuottavan jopa 30 – 50 kiloa typpeä hehtaarille vuosittain (Blouin ym. 2013). Lierot vapauttavat ravinteita erityisesti omissa jätöksissään, koteloissaan ja erittämässään limassa sekä osallistumalla humuksen muodostumiseen.

Lierot osallistuvat myös säätelypalveluiden tuottamiseen. Lierot parantavat tulvien ja eroosion sietokykyä parantamalla maan rakennetta, kuten maaperän vedenjohtokykyä (Stockdill & Cossens 1966). Muita hyödyllisiä vaikutuksia maan rakenteeseen on tunnistettu, kuten lierojen tuottamia biogeenisiä rakenteita tai orgaanisen aineksen lisääntymistä maaperässä (Jiménez & Lal 2006). Biogeeniset rakenteet pitävät maahiukkaset paremmin kiinni toisissaan, mikä parantaa maa-aggregaattien kestävyyttä rankkasateen tai tulvien aikana. Kohentunut maan rakenne saattaa vaikuttaa

ilmastonmuutokseen, sillä parempi maan rakenne vähentää metaanin tuotantoa (Lavelle ym. 2006). Orgaanisen aineen lisääntyminen humuksena maaperässä parantaa viljavuutta (Baurer & Black 1994), ja näin myös sitoutuu enemmän hiiltä maaperään. Lierot vaikuttavat osin myös maaperäeliöstön runsaussuhteisiin ja toimivat myös näin eräänlaisena tautien ja tuholaisten säätelijöinä (Lavelle ym. 2006). Lierojen tuottamia kulttuuripalveluja on muun muassa niiden merkitys opetuksessa ja kalastuksessa.

Monissa maanpäällisissä ekosysteemeissä lierot ovat biomassaltaan yksiä suurimpia eliöryhmiä, ja näin ollen kasvien ja lierojen välillä on todennäköisesti ollut koevoluutiota. Meta-analyysissä lierojen on osoitettu kasvattavan kasvien tuotantoa ja lisäävän kasvien maan yläpuolista biomassaa: 1. lisäämällä ravinteiden mineralisoitumista orgaanisesta aineesta, 2. muodostamalla maa-aggregaatteja ja kuohkeuttamalla maata, 3. tuholaisten ja parasiittien biokontrollilla, 4. tuottamalla epäsuorasti kasvien kasvusäätteitä mikrobien avulla sekä 5. symbionttien stimuloinnilla (Blouin ym. 2013). Nämä ominaisuudet ovat lieroyhteisön tuottamia hyödyllisiä ominaisuuksia, mutta yksittäisten lierolajien on todettu välillä tuottavan kasvintuotannolle haitallisia ominaisuuksia, kuten maaperän tiivistymistä (Blouin ym. 2013). Monille lierojen tuottamille vaikutuksille maaperään on ominaista niiden lajikohtaisuus. Tämä osoittaa lajien monimuotoisuuden olevan äärimmäisen tärkeää lieroyhteisön positiivisten vaikutuksien saamiseksi (Blouin ym. 2013).

Aikaisempien esimerkkien perusteella, lierot ovat maaperää yksiä merkittävimmin muokkaavia eliöitä, varsinaisia maaekosysteemien insinöörejä. Näin ollen niiden määrä maaperässä on keskeisessä asemassa myös kasveille suotuisan maan muodostumiseen. Lieroja on ehdotettu myös maaperän laadun mittariksi niiden avainlaji merkityksensä vuoksi (Palojärvi & Nuutinen 2002, Kibberwhite ym. 2008). Lierojen runsauteen vaikuttaa moni tekijä (kuva 2). Näistä tärkeimpiä ovat maan häiriöt, kuten viljelymenetelmät ja näistä erityisesti maanmuokkaus (Edwards ym. 1983). Ravinto on myös hyvin tärkeä tekijä lierojen runsaudelle maaperässä. Lierojen saatavissa olevaan ravintoon vaikuttaa orgaanisen aineksen kertyminen maahan.



**Kuva 2. Lierojen runsauteen vaikuttavia tekijöitä. Tekijöiden vaikutusta runsauteen on merkitty symbolein +/- (mukaiillen Edwards ym. 1983, Lavelle 1988 ja Lavelle ym. 2006).**

Ravintoon voidaan vaikuttaa monivuotisilla kasvustoilla, jotka tuovat maaperään lisää orgaanista materiaalia. Viljelykasvien välillä on huomattavan suuria eroja siinä, kuinka paljon hyödyllistä kasvijätettä ne tuottavat lieroille, niin juurien kuin maan päällistenkin osien muodossa. Vastaavasti olkien poistaminen ja muu orgaanisen materiaalin vähentäminen huonontavat olosuhteita lieroille vähentämällä ravinnon määrää maaperässä (Edwards ym. 1983).

Lieroja käytetään verrattain paljon malliorganismeina, ja kasvinsuojeluaineiden turvallisuutta on arvioitu testaamalla vaikutuksia lieroihin (Kula ym. 2006, Fründ ym. 2010). Tyypillisesti lierot välttävät kasvinsuojeluaineita ja vaikutus lisääntyy tehoaineen määrän kasvaessa, kuitenkin eri aineryhmät vaikuttavat eri tavoin. Kokeessa on havaittu osan lieroista kuolevan kasvinsuojeluaineisiin (Slimak 1997). Lieroihin vaikuttavat myös muut maahan lisätyt yhdisteet. Epäorgaanisten ravinteiden lisääminen saattaa vaikuttaa haitallisesti lieropopulaatioihin (Edwards ym. 1983). Tosin ei ole aivan selvää



johtuuko tämä varsinaisesti epäorgaanisesta lannoituksesta vai pienemmästä määrästä orgaanista ainesta pellolla erilaisia viljelymenetelmiä verrattaessa (Riley ym. 2008).

Lierojen runsauteen vaikuttaa huomattavan suuri joukko erilaisia tekijöitä. Tutkimuksissa on havaittu lierojen määrän ja biomassan olevan viljely-ympäristössä alhaisempia, kun satokasvina on yksivuotisia viljoja ja vastaavasti korkeimpia määriä ja lajirunsauksia on mitattu monivuotisilta niityiltä (Edwards ym. 1983, Riley ym. 2008). Erityisen tärkeitä tekijöitä ovat viljelykasvi, maan muokkaus ja pidemmällä aikavälillä maan partikkelikoko, pH ja hiili/typpi-suhde (Edwards ym. 1983, Lavelle 1988, Riley ym. 2008, Nieminen ym. 2011).

Lieropopulaatiot kärsivät erityisesti maan muokkaamisesta. Suurin vaikutus on kyntämisellä, se muuttaa lajikoostumusta huomattavasti. Esimerkiksi syvälle kaivautuviin lajeihin, kuten kastelieron (*Lumbricus terrestris*) kyntö vaikuttaa haitallisesti (Riley ym. 2008). Kyntäminen vaurioittaa lieroja, tuhoaa kotitunneleita, siirtää munakoteloita huonompiin olosuhteisiin ja kasvattaa lämpötila- ja kosteusvaihteluita (Nieminen ym. 2011). Tutkimustuloksissa onkin havaittu, että suorakylvössä lierojen määrä voi olla jopa puolet suurempi kuin kynnettyssä pellossa. Maalaji on myös tunnistettu merkittäväksi tekijäksi, nimittäin karkeilla maalajeilla ero oli selkeämpi kuin hienommilla maalajeilla (Nuutinen 1992, Nieminen ym. 2011). Lisäksi Nuutinen (1992) havaitsi tutkimuksessaan kynnön vaikuttavan lierolajeihin eri tavoin. Pinnalla elävät lajit hyötyvät orgaanisen aineksen sijoittamisesta maahan, kun taas syvällä eläville lajeille kyntö on haitallista; suorakylvö vaikuttaa näin ollen syvällä eläviin lajeihin positiivisesti (Chan 2001).

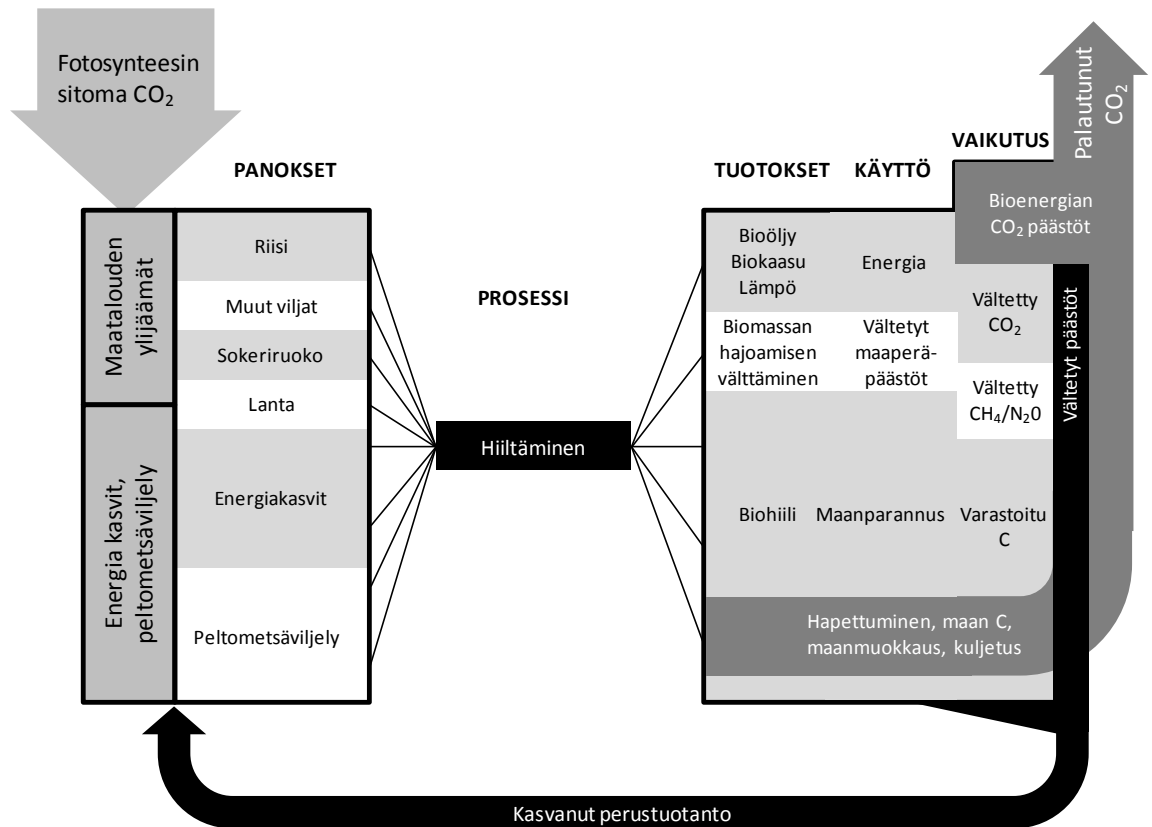
Kokonaisuutena arvioiden lieroihin vaikuttaa lähes kaikki tavalliset maata muokkaavat tuotannon vaiheet: kyntö, äestäminen ja kylväminen. Tiivistyminen voi myös vaikuttaa haitallisesti lieropopulaatioihin, ja muu liikenne pellolla aiheuttaa tiivistymistä, kuten kasvinsuojelu ja sadonkorjuu. Näiden vaikutus ei kuitenkaan ole yhtä suora, toisin kuin maata muokkaavilla toimenpiteillä. Tosin sopivissa märissä olosuhteissa myös tiivistyminen voi suoraan tappaa lieroja. Erilaisilla tuotantopanoksilla, kuten kasvinsuojeluaineilla tai epäorgaanisella lannoituksella voi myös olla haitallisia vaikutuksia. Pidemmällä aikavälillä maalaji, viljeltyt kasvilajit ja orgaanisen aineksen määrän muutokset ovat tärkeitä tekijöitä. Näin ollen myös sadonkorjuu ja erityisesti

sivutuotteiden, kuten olkien kerääminen vaikuttavat lierojen elinolosuhteisiin peltomaassa. Lopulta tuotannon kokonaisuus ratkaisee lierojen elinolosuhteet viljelymaassa, sillä yksittäiset muokkaustoimenpiteet eivät ratkaise pitkän aikavälin muutoksia populaatiossa.

## **2.4 Biohiili**

Biohiiltä tuotetaan hiiltämällä orgaanista ainesta hapettomissa olosuhteissa. Prosessin tuotteena syntyy biohiiltä, biokaasua ja bioöljyä sekä lämpöenergiaa. Hiiltämistä on mahdollista tehdä useissa erilaisissa lämpötilan ja keston yhdistelmissä sekä erilaisin tuotantoprosessein (Brewer ym. 2011). Yleisesti tuotantomenetelmät voidaan jakaa käytetyn lämpötilan ja keston perusteella hitaaseen (350–450 °C, 0,5–72 t) ja nopeaan (450–550 °C, < 15 min) hiiltämiseen (Shackley & Sohi 2010). Tämän lisäksi on kehitetty modernimpia kaasutus- ja leijupetihiiltoprosesseja, jossa raaka-aineen läpikulkunopeus on vielä suurempi ja lämpötila voi olla yli 800 °C (Brewer ym. 2011). Nämä luokkien raja-arvot ovat lähinnä teoreettisia, sillä hiiltämisprosessi on oikeastaan gradientti erilaisia käytettyjä lämpötila ja kestoajoja mitkä ovat jäsenetty luokilla, jotta menetelmien vertailu olisi helpompaa. Tässä tutkielmassa tarkastellaan kuitenkin erityisesti hidasta hiiltämistä.

Biohiilen mahdollisia käyttökohteita ovat esimerkiksi jätteenkäsittely, hiilidioksidin talteenotto, energiantuotanto ja maanparannus (Roberts ym. 2010). Biohiilen tuotanto voidaan suunnitella erilaisista lähtökohdista, mutta biohiilen keskeiset ominaisuudet ovat suurelta osin samanlaisia. Wolf ym. (2010) esitetty biohiilituotannon käyttöketju kuvaa keskeiset biohiilen raaka-aineet, prosessit ja vaikutukset (kuva 3). Kasvit sitovat fotosynteesissä hiiltä, joka saatetaan hiiltämisprosessissa pysyvämpään muotoon, ja biohiilen maanparannusvaikutus lisää kasvien hiilensitomista. Lisäksi prosessissa tuotetaan lämpöä, biokaasua ja bioöljyä, jotka on mahdollista hyödyntää prosessissa itsessään tai käyttää energiaksi muuhun tarkoitukseen.



**Kuva 3. Kestävästi tuotetun biohiilen tuotanto- ja käyttöketju. Kuvassa on esitetty biohiilen panokset, prosessit, tuotokset, käyttötavat sekä vaikutukset ilmastonmuutokseen. Mallissa on käytetty maataloudessa sivutuotteena syntyviä raaka-aineita, jotka ovat hiiltämisessä muutettu tuotteiksi. Biohiili on käytetty maanparannukseen, bioöljy ja biokaasu on hyödynnetty energiaksi. Maanparannusvaikutus on fotosynteesiä tehostava, jonka seurauksena se lisää alkutuotantoa (mukaiillen Woolf ym. 2010).**

Biohiili on tunnistettu yhdeksi mahdollisuudeksi vähentää maatalouden päästöjä ja parantaa maatalousmaan sadontuotantokykyä (Lehmann ym. 2011). Potentiaali on suuri, sillä biohiilen hyödyt ovat merkittäviä, ja sitä on mahdollista tuottaa isossa mittakaavassa. Parhaimmillaan biohiili voisi toisaalta tuoda viljelijöille lisää tuloa päästökaupan myötä ja parantaa toisaalta useita maaperän viljelyominaisuuksia.

Potentiaalın täyttymiseksi tarvitaan käyttökelpoista materiaalia huomattavia määriä. Tämä tuskin tulee olemaan este biohiilen käytölle, nimittäin pelkästään maailman maatalous tuottaa vuosittain 1500 miljoonaa tonnia kuiva-ainetta, jota ei toistaiseksi hyödynnetä (Krausmann ym. 2000). Maatalouden lisäksi voidaan käyttää useita muita

raaka-aineiden lähteitä, kuten metsätalouden tai elintarviketeollisuuden sivutuotteita sekä vesiekosysteemien tuotteita.

Kaikkea orgaanista materiaalia ei kuitenkaan voida hyödyntää, sillä orgaaninen aines on maataloudessa tärkeä satotekijä (Bauer & Black 1994). Teoriassa hiiltämällä satotähteitä poistetaan orgaanista materiaalia maaperästä, jos biohiiltä tuotetaan muualla kuin missä sitä käytetään. Maaperä voi silloin köyhtyä orgaanisesta aineesta, joka on esimerkiksi Suomessa muutenkin ongelma. Orgaaninen aines on vähentynyt Suomen maaperästä vuosien 1987–1998 välillä keskimäärin noin 8 % (Mäkelä-Kurtto & Sippola 2002), ja vuositasolla vähenemän on arvioitu olevan 1974–2009 välillä noin 0,2–0,4 % (Heikkinen ym. 2013).

Biohiiltä voidaan tuottaa suuria määriä. Jos esimerkiksi vuosittaisista satotähteistä hiillettäisiin puolet eli noin 750 miljoonaa tonnia, voitaisiin tällä kattaa 0,65 Gt CO<sub>2</sub>-C<sub>e</sub> päästöt vuosittain. Tämä tarkoittaa IPCC:n vuoteen 2050 asetetuista päästötavoitteista neljää prosenttia (Roberts ym. 2010). Tässä laskelmassa on huomioitu ainoastaan biohiilen sisältämä hiili, sen lisäksi voidaan myös laskea mahdollinen metaanin ja dityppioksidin päästöjen väheneminen, jotka on muunnettu hiilidioksidiekvivalenteiksi IPCC:n hyväksymällä kertoimella (IPCC 2006). Näiden päästövaikutusten huomioiminen lisää biohiilen potentiaalia merkittävästi, nimittäin vuotuinen päästövähennys olisi tämän laskelman mukaan jo 12 % ihmiskunnan tuottamista kasvihuonepäästöistä (Woolf ym. 2010).

Biohiilen tuotantotavan ja raaka-aineen valinta vaikuttaa huomattavasti syntyneisiin lopputuotteisiin (taulukko 1). Tällä voi olla suuri vaikutus biohiilikokeissa. Esimerkiksi ominaispinta-alan vaihtelu biohiilten välillä oli hyvin suurta 3–2200 m<sup>2</sup>/g, johon ilmeisesti raaka-aineella ja tuotantomenetelmällä on suuri vaikutus (Shackley & Sohi 2010, Brewer ym. 2011). Happamuuden vaihtelu eri biohiilten välillä ei ollut suurta, tosin tutkimuksessa ei ollut mukana lannasta valmistettuja biohiiliä, joiden pH voi olla hyvinkin korkea (Li ym. 2011). Biohiilitutkimuksia tulkittaessa biohiilen laadulla on suuri merkitys, joten tuloksia ei ole mielekäästä tulkita ilman tarpeellisia tietoja laadun arvioimiseksi.

**Taulukko 1. Biomassojen ja eri tuotantotapojen vaikutus biohiilen keskeisiin ominaisuuksiin (Brewer ym. 2011).**

Biohiili #	Raaka-aine	Prosessi	Lämpötila	pH	m <sup>2</sup> /g	Hiilen määrä %
1	Maissin tähteet	Leijupeti nopea hiiltäminen	500	6,5	8,5	29,5
2	Maissin tähteet	Vapaapudotus reaktori nopea pyrolyysi	600	6,7	3,3	31,4
3	Maissin tähteet	Vapaapudotus reaktori nopea pyrolyysi	550	6,6	3,7	37,5
4	Maissin tähteet	Vapaapudotus reaktori nopea pyrolyysi	500	6,5	4,5	34,9
5	Maissin tähteet	Ilmapuhallus kaasutusreaktori	732	6,9	14,3	21,8
6	Maissin tähteet	Hidas hiiltäminen	500	6,5	24,8	33,4
7	Maissin tähteet	Leijupeti nopea hiiltäminen	450	6,2	15,6	37,5
8	Lännenhirssi	Leijupeti nopea hiiltäminen	500	6,6	16,8	40,7
9	Lännenhirssi	Leijupeti nopea hiiltäminen	550	6,7	26,2	42,2
10	Lännenhirssi	O <sub>2</sub> /höyrykaasutus	824	6,9	46,1	25,4
11	Lännenhirssi	O <sub>2</sub> /höyrykaasutus	775	7,0	20,2	26,7
12	Lännenhirssi	O <sub>2</sub> /höyrykaasutus	796	7,2	61,6	27,5
13	Lännenhirssi	Hidas hiiltäminen	500	7,0	50,2	39,4
14	Punapuu	Leijupeti nopea hiiltäminen	500	6,3	3,8	62,0
15	Kovapuu	Polttuuni hidas hiiltäminen	~400	6,5	8,1	79,2
16	Puujäte	Ilmapuhallus kaasutusreaktori	~800	6,6	5,8	76,6
17	Kanadanhemlocki	Ruuvisyöttöinen nopea pyrolyysi	550	6,2	5,8	75,7

Biohiiltä on mahdollista tuottaa hyvin monenlaisista orgaanisen aineiden lähteistä (Woolf ym. 2010). Biohiili muodostuu useammasta jakeesta, joilla on erilaisia ominaisuuksia: vaikeasti reagoivasta hiilestä, epävakaasta hiilestä, liukenevasta hiilestä ja tuhkasta (Schmidt & Noack 2000). Biohiilen ominaisuudet ja vaikutukset riippuvat hyvin paljon siitä mistä orgaanisesta materiaalista ja minkälaisissa olosuhteissa se on tehty. Myös eri hiilen jakeiden suhteet muuttuvat huomattavasti käytettyjen olosuhteiden mukaan (Zimmerman 2010). Näin ollen, kun erilaisia tutkimustuloksia verrataan, on tärkeää myös ottaa huomioon käytetyn hiilen raaka-aine ja valmistustapa.

Biohiiltä on verrattu myös orgaaniseen aineeseen ominaisuuksiensa suhteen, vaikka se eroaa merkittävästi hiiltämättömästä orgaanisesta aineesta maaperässä koostumukseltaan ja lisäksi orgaaninen aines muuntuu erilalla kuin biohiili maaperässä (Schmidt & Noack 2000, Cheng & Lehmann 2009). Cheng & Lehmann (2009) huomasivat tutkimuksessaan biohiilen muuttavan muotoaan ikääntyessään. Kationinvaihtokapasiteetti on aluksi suurempi, mutta ajan kuluessa se lopulta vähenee. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että biohiilissä, jotka on tuotettu alle 700 asteen lämpötilassa, niiden hapettumisen seurauksena kationinvaihtokapasiteetti on korkeampi kuin muiden biohiilten. Tämä havainto tukee matalammissa lämpötiloista tuotetun biohiilen tuottamisen mielekkyyttä.

Huomioitavaa biohiilen vanhenemisessä on se, että se tapahtuu -20 – +70 asteen lämpötilavälillä jo noin 12 kuukaudessa. Vanheneminen vaikuttaa muiden ohella biohiilen hiilisisältöön, pintavarauksiin, happamuuteen ja kykyyn sitoa hydrokinonia ( $C_6H_4(OH)_2$ ), jota käytettiin esimerkkinä alleopaattisista myrkyistä. Chengin & Lehmannin (2009) tutkimuksen perusteella, biohiilen iällä voisi olla merkitystä myös biohiilikokeiden lopputuloksiin. Biohiilikokeissa harvoin ilmoitetaan milloin hiili on valmistettu, ja minkälaisissa olosuhteissa biohiili on säilytetty, tai milloin biohiilestä suoritettavat mittaukset ovat tehty. Tosin vaikutus kokeeseen riippuu paljon siitä minkä mekanismin kautta vaikutus muodostuu, sillä vanhenemisen vaikutukset ovat hyvin moninaisia (Cheng & Lehmann 2009).

## ***2.5 Biohiilen vaikutustavat lieroihin***

Biohiili voi vaikuttaa maan kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin usealla tavalla, kuten aikaisemmin on esitetty. Vaikutukset maan fysikaalisiin ominaisuuksiin ovat esimerkiksi alentunut maan vetolujuus (jopa 50 %, kun käytettiin 50 t/ha biohiiltä) ja lisääntynyt maan huokoisuus, biohiilen suuremman mikro- ja makrorakenteiden määrän vuoksi (Pietikäinen ym. 2000, Lehmann ym. 2011). Vetolujuus vaikuttaa esimerkiksi itämiseen, juurien ja kasvien kasvuun (Bengough & Mullins 1990). Vetolujuuden aleneminen saattaisi vaikuttaa myös lierojen kokemaan vastukseen eli biohiili helpottaisi niiden liikkumista maaperässä. Huomioitavaa on kuitenkin, että vetolujuuden aleneminen ei suoraan vaikuta kaikkiin lierolajeihin, sillä biohiili todennäköisesti on

suurimmaksi osaksi maaperän pintakerroksissa. Todennäköisesti biohiilen käyttömäärät eivät tule olemaan näin suuria.

Biologisista vaikutuksista tai näiden yhdysvaikutuksista ei ole kuitenkaan kovin paljoa tietoa. On ehdotettu, parantuneen maan huokoisuuden lisäävän mikrobien aktiivisuutta, määrää ja lisääntymistä (Pietikäinen ym. 2000, Lehmann ym. 2011). Tämä voisi myös vaikuttaa lieroihin, sillä biohiili saattaa muuttaa ravinteiden kiertoa maaperässä, pidättämällä ravinteita paremmin kasvien ja eliöiden käytettäväksi (Steiner ym. 2008). Tällä voisi olla merkitystä erityisesti huonosti ravinteita pidättävässä maaperässä. Toistaiseksi yhteyttä ei ole voitu käytännössä näyttää maaperän prosesseihin.

Biohiilen vaikutuksia on tutkittu lähiaikoina, mutta tutkimus on kohdistunut erityisesti muihin lajeihin kuin peltolieroon. Käyttätymiskokeissa on aiemmin käytetty mm. *Pontoscolex corethrurus*, *Eisenia fetida* ja *Cognettia sphagnetorum* -lajeja. Tutkimuksia on tehty useilla eri maalajeilla ja eri raaka-aineista valmistetuilla biohiilillä (taulukko 2). Täysin samalla koejärjestelyllä kokeita ei ole käytännössä tehty. Varsinaiset välttämiskokeet ovat keskittyneet tunkiolierolle (*Eisenia fetida*), sillä tätä lajia on yleisesti käytetty aineiden turvallisuuden testaamisessa (Fründ ym. 2010).

Biohiilen vaikutuksesta lieroihin ja änkyrimatoihin on tehty käyttätymiskokeita, mutta useimmat niistä on tehty Suomen viljelyoloista poikkeavilla alueilla, lajeilla tai hiilellä (mm. Liiri ym. 2002, Topolians & Ponge 2003, 2005, Liesch ym. 2010, Van Zwieten ym. 2010, Gomez-Elyes ym. 2011). Useiden astiakokeiden tutkimustulokset ovat todennäköisesti verrattavissa suomalaisiin kokeisiin, sillä ne ovat tehty kontrolloiduissa olosuhteissa. Kenttäkokeita ei toistaiseksi ole julkaistu lieroilla, paitsi ilman tilastollista testaamista (taulukko 3; Husk & Major 2010, Weyers & Spokas 2011). Tärkeimpiä vaikutustapoja lieroihin ovat todennäköisesti ravinto, fysikaaliset muutokset maassa ja mahdolliset biologiset vuorovaikutukset (Edwards ym. 1983, Lavelle 1988, Lehmann ym. 2011).

**Taulukko 2. Mikrokosmoskokeet biohiilestä. Biohiilen vaikutukset: (-) = välttäminen, (±) = ei vaikutusta, (+) biohiilen suosiminen, - = negatiivinen vaikutus, ± = neutraali vaikutus, + = positiivinen vaikutus (mukailien Weyers & Spokas 2011).**

Tutkimus	Lierolaji	Biohiilen kuvaus ja käyttömäärä	Sijainti	Maa/pH	Kokeen pituus	Biohiilen vaikutus
Topolanz & Ponge 2003	<i>Pontoscolex corethrurus</i>	kaskeamisesta 60 % seos	Ranskan Guayana	trooppinen, pH 4,6	14 vrk	-10 % kuoli
Topolanz & Ponge 2005	<i>Pontoscolex corethrurus</i>	kaskeamisesta 60 % seos	Ranskan Guayana	trooppinen, pH 4,2-4,6	20 vrk	± Söi biohiiltä
Chan ym. 2008	<i>Eisenia fetida</i>	kanan lanta hidas hiiltäminen 450°C (pH 9,9) ja 550°C + höyryaktivointi (pH 13) 0, 10, 25 ja 50 t/ha	Australia	lauhkea, pH 4,8-5,0	42 vrk	(±) Suosi alemman pH:n biohiiltä
Cui ym. 2009	<i>Eisenia fetida</i>	riisin satotähteiden tuhka 1, 3, 5 ja 10 w %	Kiina	lauhkea, pH 6,9	48 h	(-) DNA vahingoitui
Van Zwieten ym. 2010	<i>Eisenia fetida</i>	paperintuotannon sivutuotteet 550 °C 10 t/ha	Australia	lauhkea, pH 4,2 ja 7,6	48 h	(+) alemman pH:n maalla (±) ylemmän pH:n malla
Liesch ym. 2010	<i>Eisenia fetida</i>	kananlanta ja mäntylastu 400 °C 30 min 0, 22,5, 45, 67,5 ja 90 t/ha	US	lauhkea, pH 7	28 vrk	- kuolleisuutta kanan lannalla ± mäntylastulla
Li ym. 2011	<i>Eisenia fetida</i>	omenan puulastu erä hiiltäminen hidas pyrolyysi 525°C 90 - 180 t/ha 1, 10, 20 % seos	US	lauhkea, pH 7	28 vrk	(±) hiilen kastelu ehkäisi lierojen välttämisen - lierojen paino väheni
Gomez-Eyles ym. 2011	<i>Eisenia fetida</i>	kovapuu ja lanta Nopea hiiltäminen 600°C 10% seos	UK	lauhkea, pH 7,63 Saastunut maa	28 ja 56 vrk	- lierojen paino väheni + vähemmän haitallisia yhdisteitä lieroissa
Liiri ym. 2002	<i>Cognettia sphagnetorum</i>	puutuhka 5 t/ha	Suomi	mänty metsän humus pH 4,7-5,8	26 ja 51 vk	- biomassa laski vain humuksen kanssa
Liiri ym. 2007	<i>Cognettia sphagnetorum</i>	puutuhka 5 t/ha	Suomi	mänty metsän humus pH 4,5	26 ja 51 vk	- biomassa laski
Nieminen 2008	<i>Cognettia sphagnetorum</i>	puutuhka	Suomi (Norja)	kuusi metsän humus pH 4,6	90 vrk	± neutraali
Nieminen & Haimi 2010	<i>Cognettia sphagnetorum</i>	koivutuhka	Suomi (Norja)	kuusi metsän humus pH 4,6	14 vk	- Alentunut koko - hitaampi lisääntyminen



**Taulukko 3. Kenttäkokeet biohiilen vaikutuksesta lieroihin. Biohiilen vaikutukset: - = negatiivinen vaikutus, ± = neutraali vaikutus, + = positiivinen vaikutus (mukaiillen Weyers & Spokas 2011).**

Tutkimus	Lierolaji	Biohiilen kuvaus ja käyttömäärä	Sijainti	Maa/pH	Kokeen pituus	Biohiilen vaikutus
Husk & Major 2010	Ei ilmoitettu	kovapuu nopea pyrolyysi 5,6 t/ha	Kanada	lauhkea, pH 6,4-7,4	2 vuotta	+ enemmän biohiilessä ei tilastollisesti verrattu
Weyers & Spokas (julkaisematon)	<i>Lumbricus</i> -suku	puu + lanta nopea pyrolyysi Macadamia pähkinä hidas pyrolyysi	US	lauhkea, pH 6,3-6-6.	2 vuotta	± ei vaikutusta
Cox ym. 2001	Ei ilmoitettu	hiilen tuhka 110 t/ha	US	lauhkea	3 vuotta	± ei vaikutusta biomassaan tai määrään
Haimi ym. 2000	<i>Cognettia sphagnetorum</i>	puun tuhka 1 ja 5 t/ha	Suomi	metsämaa	1 vuotta	- alentunut määrä
Lundkvist 1983	<i>Cognettia sphagnetorum</i>	puun tuhka ± NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Ruotsi	metsämaa	2 vuotta	± ei merkitseviä vaikutuksia

Lierojen reagoinnin arvioimiseksi on tärkeä tietää, voivatko nämä syödä maa-aineista jossa on biohiiltä. Topoliantz & Ponge (2003, 2005) tutkimuksissaan esittivät lierojen syövän biohiiltä jopa niin, että kokeessa lierot söivät biohiiltä sisältävää maata ennemmin kuin tavallista maata, joten biohiili on tuskin este lierojen ravinnonsaannille. Tämä on tärkeä tieto, sillä biohiilestä saatavien hyötyjen kannalta on mielenkiintoista, jos lierot kuljettavat biohiiltä myös syvemmälle maa-ainekseen.

Toistaiseksi on epäselvää, mikä merkitys lierolle on sen syömällä biohiilellä. Topoliantz & Ponge (2003) ehdottivat lierojen käyttävän biohiilen sisältämiä ravinteita hyödyksi. Biohiili on kuitenkin osoittautunut hiilen osalta hyvin vakaaksi yhdisteeksi (Zimmerman 2010), joten lierot saattavat myös käyttää biohiiltä muiden syiden takia. Yksi vaihtoehto voisi olla sama kuin hiekalla, nimittäin lierot käyttävät sitä hajottamaan orgaanista ainesta sisällään (Marhan & Scheu 2005). Liero silloin käyttäisi biohiiltä hiertämään ravintoa helpommin hajoavaksi ruuansulatuksessaan. Toisaalta kuivan biohiilen on myös ehdotettu vahingoittavan lierojen sisäelimistöä (Schmidt ym. 1999).

Erilaisten biohiilten vaikutus lieroihin on ollut vasta lähiaikoina tutkimuksen kohteena. Liesch tutkimusryhmineen (2010) vertasi lierojen kasvua ja selviytymistä erilaisista orgaanisesta materiaalista tehdyissä biohiilimaissa. Koejärjestelynä oli 28 päivän astiakoe, jossa oli lähes neutraali (pH 7,2) US-EPA ohjeiden mukainen maa-aines ja kosteus 40–60 % kenttäkapasiteetista. Mukana olivat biohiilet, jotka oli tehty kuusesta ja kananlannasta.

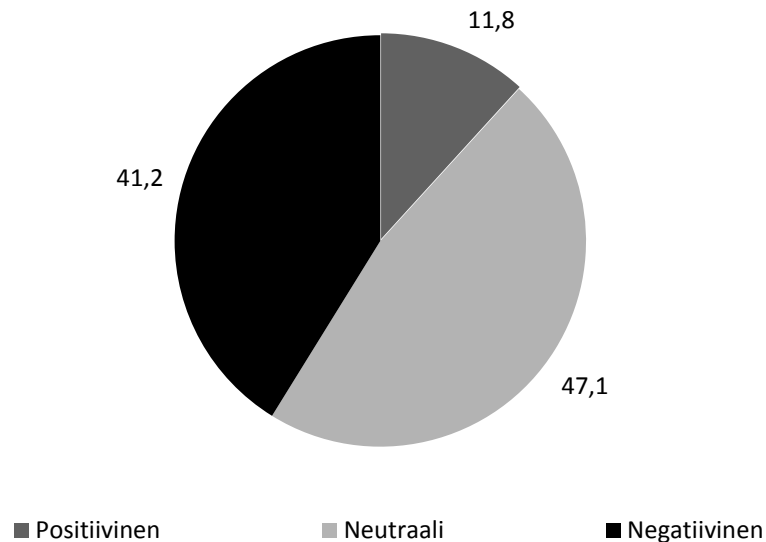
Kokeessa käytetyt korkeat biohiilimäärät (67,5 ja 90 t/ha) aiheuttivat merkittävää stressiä lieroille, sillä esimerkiksi suurimmilla määrillä kananlannasta tehdyllä biohiilellä lieroista kuoli 100 %. Alhaisemmillä (22,5 t/ha 45 t/ha) levitysmäärillä vaikutukset eivät olleet näin dramaattiset, mutta osa lieroista kuoli 28 päivän aikana ja eloonjääneiden yksilöiden paino oli alhaisempi (Liesch ym. 2010). Männystä tehdyllä biohiilellä vaikutukset olivat huomattavasti lupaavammat, nimittäin mäntybiohiilen suurimmallakin määrällä (90 t/ha) lieroista selvisi saman verran kuin kontrollimaassa (Liesch ym. 2010). Tutkimuksessa ehdotettiin lierojen kuoleman aiheuttajaksi ammoniakkimyrkytystä ja pH:n muutosta, sillä nämä selittäisivät kananlannan ja mäntypohjaisen biohiilen välisen eron.

Kokeen tulokset voisivat tosin olla erilaiset, jos maa-ainesta olisi ollut hieman enemmän. Lieroja oli kymmenen noin 300 gramman maapatsaassa, joka vastaisi yli kymmenkertaista määrää verrattuna luonnossa havaittuun määrään. Kokeessa kuitenkin myös maan pH nousi huomattavasti, joka saattoi merkittävästi vaikuttaa lierojen selviytymiseen, pH nimittäin nousi korkeimmillaan 10,3:een ja pH:n on todettu vaikuttavan lieroihin (Lavelle 1988).



**Kuva 4. Biohiilen mahdolliset vaikutustavat lieroihin. Tekijät on jaoteltu kolmeen tarkastelutasoon pienestä suurempiin kokonaisuuksiin ylhäältä alaspäin. Jaotellussa on painotettu lieroille tärkeitä tekijöitä. Vaikutukset on kerätty useasta eri lähteestä (Topoliantz & Ponge 2005, Yanai ym. 2007, Steiner ym. 2008, Cheng & Lehmann 2009 Spokas ym. 2009, Verheijen ym. 2009, Zimmerman 2010, Gomez-Eyles ym. 2010, Lehmann ym. 2011).**

Biohiilitutkimukset vaikuttavat suurelta osin neutraaleilta tai negatiivisilta (kuva 5). Positiivisia vaikutuksia on oikeastaan vain kokeissa, joissa on käytetty maa-ainesta, jolla on alhainen pH. Negatiivissa tuloksissa yleisiä vaikutuksia näyttäisi olevan erityisesti lieroyksilöiden painon aleneminen sekä heikentynyt lisääntymiskyky (Gomez-Eyles ym. 2011, Liesh ym. 2010, Li ym. 2011). Nämä tulokset ovat näkyneet myös muissa kuin käyttäytymiskokeissa (Liiri ym. 2002, Nieminen & Haimi 2010). Biohiilellä on siis ilmeisiä vaikutuksia, joista yllättävin lienee tuhkan genotoksinen vaikutus eli tuhka vaurioitti lierojen DNA:ta (Cui ym. 2009). Cuin tutkimusryhmän kokeessa kuitenkin käytettiin puhdasta tuhkaa, joten se ei ole täysin verrattavissa biohiilikokeiden tuloksiin. Lieroihin siis kohdistuu biohiilen aiheuttamaa stressiä ainakin lyhytaikaisesti, toistaiseksi on kuitenkin epäselvää, mitkä tekijät vaikuttavat lieroihin. Tutkimusten vertaamista haittaavat tutkimusmenetelmien runsaat erot.



**Kuva 5. Biohiilitutkimusten (17 kpl) tulosten jakautuminen prosenttiyksiköissä kategorioihin: positiivinen, neutraali tai negatiivinen lierojen menestymisen suhteen.**

Lieroihin vaikuttavia tekijöitä on useita (kuva 6). ja niistä keskeisimpiä käyttäytymiskokeiden kannalta vaikuttaisivat olevan ravinto, kosteus, pH, haitalliset yhdisteet ja maan vetolujuus. Reaktio voi myös johtua toistaiseksi tunnistamattomasta tekijästä. Happamuus on myös tunnistettu tärkeäksi tekijäksi lierojen menestymiselle elinympäristössään (Lavelle 1988). Lieroille suotuisin pH alue on lähellä neutraalia, mutta lieroilla on lajikohtaisia eroja ja ne ovat erikoistuneet eri pH olosuhteisiin (Graefe & Beylich 2003). Peltolieroa (*A. caliginosa*) on löydetty luonnosta jopa 4,2 pH:n metsämaasta, mutta peltomaassa suurin osa populaatioista on elänyt 6,5–7,5 pH:n alueella (Graefe & Beylich 2003).

Biohiilillä on useita vaikutuksia ja eri orgaanisista materiaaleista valmistetuilla biohiilillä on erilaisia ominaisuuksia. On mahdollista, ettei osalla näistä tekijöistä ole kovin suurta vaikutusta lieroihin tai osaa vaikutuksista voi peittää vastakkaisia vaikutuksia. Näiden lisäksi on myös muita tekijöitä, joita ei ole mahdollista kontrolloida kenttäolosuhteissa kokeiden muiden tavoitteiden takia. Esimerkiksi viljelytekniiset

toimenpiteet ovat merkittävä tekijä lierojen runsauden kannalta (Edwards ym. 1983, Nuutinen 1992, Chan 2001, Riley ym. 2008). Toistaiseksi aihetta pitäisi tutkia tunnistamalla tärkeimmät lieroihin vaikuttavat tekijät, sillä kaikkia vaikutuksia ei ole mahdollista tutkia yhdellä menetelmällä.

## ***2.6 Lierotutkimuksissa käytetyt menetelmät***

Lierotutkimuksissa käytetään usein erilaisia menetelmiä, koska eri menetelmillä tuotetaan erilaista tietoa. Kenttäkokeissa voidaan tyypillisesti arvioida populaatiotason vaihtelua ja lajikoostumusta, kun taas mikrokosmos- tai käyttäytymiskokeissa tutkitaan yksilöitä tai pienempiä populaatioita. Välttämiskokeet ovat mikrokosmoskokeita, joiden tarkoituksena on tutkia maaperäeläinten käyttäytymistä kontrolloiduissa olosuhteissa tai esimerkiksi arvioida aineiden vaikutuksia lieroihin niiden reaktioiden perustella. Maataloudessa paljon tehtyjä kokeita ovat kasvinsuojeluaineiden turvallisuuden testaaminen maaperäeläimillä, jota arvioidaan usein välttämiskokeen ja akuutin toksisuuskokeen avulla (Fründ ym. 2010). Mikrokosmoskokeiden etuna on mahdollisuus kontrolloida useita tekijöitä, mikä kenttäkokeiden olosuhteissa on mahdotonta, kuten migraatiota, kosteutta, lämpötilaa ja ravintoa. Toisaalta mikrokosmoskokeissa on mahdotonta tai äärimmäisen vaikeaa tutkia populaatiotason muutoksia. Näin ollen molemmat koetyypit ovat tarpeellisia vaikutusten arvioimiseksi kattavasti.

### 3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuusilastuista valmistetun biohiilen vaikutuksia peltomaan lieroihin boreaalisella ilmastovyöhykkeellä ja erityisesti Etelä-Suomen olosuhteissa. Käyttätymiskokeessa keskityttiin peltolieron (*Aporrectodea caliginosa*) tutkimiseen, joka on yleisin peltomaan liero Suomessa.

Tavoitteena oli selvittää biohiilen lisäämisen vaikutus peltolieron aktiivisuuteen kontrolloiduissa olosuhteissa. Kenttäolosuhteissa selvitettiin yhden kasvukauden jälkeen biohiilen ja lannoituksen vaikutusta sekä näiden yhdysvaikutusta lierojen määrään ja biomassaan.

Tutkimuksen hypoteesina oli, että biohiiltä sisältävä maa aiheuttaisi lieroissa preferenssin käsiteltyyn tai käsittelemättömään maahan, jonka perusteella voitaisiin arvioida levityksen vaikutusta lieroihin. Jatkokokeessa keskityttiin tarkastelemaan havainnoidun vaikutuksen syitä.

## 4 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 4.1 Yleistä

Aineisto muodostuu kahdesta osiosta, käyttäytymis- ja kenttäkokeesta. Kenttäkoe sijaitsi Etelä-Suomessa, Viikin opetus- ja tutkimustilan Vadelmakallion peltolohkolla (koordinaatit: 62°50,11' 27°35,86'); (kuva 6). Astiakokeiden peltomaa otettiin samalta lohkolta. Myös lierot käyttäytymiskokeeseen kerättiin pääosin samalta lohkolta tai sen viereiseltä lohkolta.

Viljavuusanalyysit tehtiin Viljavuuspalvelu Oy:ssä ja maalajijakauma määritettiin Helsingin Yliopiston elintarvike ja ympäristötieteen laitoksen maaperäkemian laboratoriossa. Hiili-tyyppi analyysit tehtiin Dumasin polttomenetelmällä käyttäen Variomax CN hiili-tyyppi analysaattoria (Elementar Analysensysteme GmbH, Saksa). Maa oli maalajiltaan runsasmultainen karkea hieta (Kht) ja viljavuusluokaltaan suurimmalta osalta välttävä tai hyvä. Tarkemmin hyvään luokkaan kuului fosfori, kun taas magnesium, kalsium ja kalium olivat välttäviä. Rikki oli huononlainen. Yleiseltä luonteeltaan maan viljelyominaisuuksia voisi kuvailla viljaviksi, vaikka osassa ravinteita ilmenee vajausta (taulukko 3).

**Taulukko 3. Vadelmakallion kentän maaperäominaisuuksia.**

Ominaisuus	Lukuarvo	Viljavuusluokka
Johtoluku, 10x mS/cm	0,8	
pH	6,4	hyvä
Ca mg/l	1 127,0	välttävä
P mg/l	20,6	hyvä
K mg/l	62,1	välttävä
Mg mg/l	100,0	välttävä
S mg/l	5,2	huononlainen
Kokonais N, g/kg	2,4	
Kokonais C, g/kg	31,7	
C/N suhde	13,4	
Maalaji	karkea hieta	



Kuva 6. Vadelmakallion koekenttä, 6.7.2011.



Kuva 7. Kokeessa käytetty kuusilastuista valmistettu biohiili.

Taulukko 4. Biohiilen alkuainepitoisuudet verrattuna 17 eri biohiileen (mukaihen Brewer ym. 2011).

Ominaisuus	Lukuarvo	Muissa biohiilissä
Ca mg/g	30,03	7 - 90
Fe mg/g	2,03	0,01 - 0,09
K mg/g	29,99	4 - 71
Mn mg/g	5,09	0,01 - 0,35
Na mg/g	2,53	0,3 - 2,8
Zn mg/g	0,44	ei määritetty
P mg/g	alle määritysrajan	ei määritetty



Kokeessa käytettiin kuusilastuista valmistettua biohiiltä (taulukko 4; kuva 7), joka oli tuotettu vuonna 2011 Preseco Oy koelaitoksella Lempäälässä. Biohiili oli valmistettu 550–600 °C asteen lämpötilassa ja 10–15 minuutin jatkuvasyöttöisessä hiiltimessä. Biohiilen jäähtyttyä se jauhettiin alle 10 millin hiukkasiksi. Hiilen sisältämät alkuaineet mitattiin US EPA 3050 standardin (US EPA 1994) mukaisesti Helsingin yliopiston elintarvike ja ympäristötieteen laitoksen maaperäkemian laboratoriossa. Biohiili oli ominaispinta-alaltaan 264,6 m<sup>2</sup>/g ja sen pH oli 8,1, joka oli mitattu 1:5 H<sub>2</sub>O tilavuussuhteessa. Biohiili oli 88,3 % alkuainehiiltä ja sen alkuainepitoisuudet olivat samankaltaisia verrattuna toisiin biohiiliin (Taulukko 3), mutta rautaa ja mangaania oli monikymmenkertaisesti. Mangaanin määrä on kuitenkin pieni verrattuna koekentältä mitattuihin maaperänäytteisiin.

## **4.2 Käyttäytymiskoe**

Lierojen käyttäytymiskoe järjestettiin Hund-Rinken ja Wiecheringin (2001) kuvaamalla tavalla. Käytännössä kokeessa luodaan tilanne, jossa lieroyksilöt voivat valita hakeutuvatko käsiteltyyn vai käsittelemättömään maahan. Kokeessa seurattiin OECD/OCDE:n ohjeita lierokokeen yleisien menetelmien soveltuvien osin (OECD/OCDE 2004).

Kokeessa oli kaksi koejäsentä, joista toinen oli käsitelty ja toinen käsittelemätön maa. Käsitellyssä maassa oli biohiiltä 30 t/ha vastaava määrä. Koejärjestelyssä lieroyksilöt asetetaan keskelle astiaa, jonka molemmilla puolilla on eri käsittelyt. Lierot saavat vapaasti valita, kumpaan käsittelyyn hakeutuvat. Toistoja oli kahdeksan kappaletta ja kokeesta toteutettiin kahden päivän ja kahden viikon kokeet. Oletuksena oli, etteivät lierojen reaktiot johdu käyttäytymiskokeen järjestelyistä, vaan biohiilen vaikutuksesta suoraan lieroihin tai välillisesti maaperän ominaisuuksien tai olosuhteiden muuttumisen myötä.

Maa käsiteltiin ennen kokeen aloitusta seulomalla ja kuumentamalla. Ensin maa seulottiin 5 mm seulan läpi, jotta maa-aineesta eroteltaisiin kivet ja muut suuremmat kappaleet, sitten maa kuumentettiin 60 °C lämpötilaan neljän päivän ajaksi. Kuumentamiskäsittelyn tarkoituksena oli kuivata maa-aines ja poistaa maasta lierojen

munakotelot, jotta nämä eivät kuoriutuisi kokeen aikana (Butt ym. 2005). Tämän jälkeen maan annettiin jäähtyä. Kuumentamisen jälkeen maa seulottiin vielä 2 mm seulan läpi, jotta maa-aineksesta saataisiin mahdollisimman tasalaatuista.

Tämän jälkeen maa homogenisoitiin eli sekoitettiin mahdollisimman hyvin ja kosteutettiin 300 g/kg k.a. kosteuteen. Maan kosteustasoa ylläpidettiin kokeen aikana. Kosteustaso valinnalla haluttiin välttää hapettomia olosuhteita maassa kokeen aikana, ja samalla tavoitella kosteutta, joka vastaa aikaisemmin julkaistuissa vastaavissa kokeissa käytettyjä kosteuksia. Lierokokeissa kosteustasot kuiva-aineena vaihtelevat karkean maalajin kosteudesta 200 g/kg H<sub>2</sub>O hienomman maalajin 500 g/kg kosteuteen (Becker-van Slooten ym. 2003). Lierokokeissa on käytetty kosteuksia, jotka on ilmoitettu kenttäkapasiteetissa sekä osuutena maa-aineksesta. Kenttäkapasiteetissa ilmoitetut kosteudet ovat riippuvaisia käytetystä maalajista, eli niitä ei suoraan voi muuntaa samaan muotoon. Kenttäkokeissa on käytetty useita eri kosteuksia: 40–60 % kenttäkapasiteetista (OECD 2004), 60–70 % kenttäkapasiteetista (Butt ym. 2005), 85 % kenttäkapasiteetista (Li ym. 2011) sekä kuiva-aineena, 250 g/kg (Fründ ym. 2010) ja 350 g/kg (Liesh ym. 2010).

Aiempien tutkimusten perusteella kokeiltiin 350 g/kg k.a. kosteutta. Maa oli kuitenkin esikokeemme perusteella liian märkää. Kokeilujen perusteella maan kosteustaso 300 g/kg k.a. vaikutti hyvältä karkealla maalajillamme. Lieroastioiden kosteuttaminen tehtiin jokaisen astian täytön yhteydessä, jotta haihtuminen ennen kokeen alkua olisi mahdollisimman vähäistä. Astiat punnittiin kokeen alkaessa, keskellä ja sen päättyessä.

Kokeessa käytettiin halkaisijaltaan 15 cm leveää ja korkeudeltaan 22 cm pitkää lieriötä, jonka tilavuus oli noin 3888 cm<sup>3</sup> (kuva 8). Lieriössä käytettiin välilevyä (3 mm Polykarbonaattilevy, Makroclear<sup>®</sup>, Etra, Suomi), joka jakoi astian kahteen osaan. Kyseessä oli käytännössä pala putkea, joka jaettiin levyllä kahteen osaan, ja levy poistettiin kokeen alkaessa ja laitettiin takaisin kokeen loppuessa. Levy oli puoli millia kapeampi kuin astian halkaisija, jotta levy on mahdollista asettaa takaisin. Osa A täytettiin biohiiltä sisältävällä maalla, 30 t/ha tasolle ja osa B toimi kontrollina, jossa oli samaa maata ilman biohiiltä.



**Kuva 8. Käyttäytymiskokeen koeastia. Astiasta on poistettu maa-aineksia erottava välilevy, ja se on valmiina siirrettäväksi kasvatushuoneeseen. Yhdessä astiassa oli kahdeksan lieroja ja astioita oli yhteensä 16, kahdeksan molemmissa (kahden ja 14 päivän) kokeissa.**

Biohiilen levitysmääräksi tavoiteltiin 30 t/ha, joka laskettiin oletuksella, jossa maanmuokkaussyvyys oli 10 cm. Tämä valittiin koska se vastasi syvyyttä, jota käytettiin maanmuokkauksessa kentäkokeessa. Näin ollen 30 t/ha biohiilen määrä tarkoitti kokeessa 1,6 g/kg hiilimäärää, koska silloin muokkauskerroksessa on määrä maata, joka vastaa 30 t/ha biohiilimäärän levittämistä hehtaarille. Näiden oletusten avulla astiakokeen olosuhteilla pyrittiin vastaamaan kentäkokeen olosuhteita.

Maa lisättiin molemmille puolille kolmessa osassa, jotka tiivistettiin  $1,27 \text{ kg/dm}^3$  tiheyteen. Chanin ym. 2008 lierokokeessa oli käytetty tiheyttä  $1,2 \text{ kg/dm}^3$ , jota lähellä tiheytemme oli. Tiheys omassa kokeessamme oli mitattu koekentältä, ja tiivistäminen tehtiin laskemalla tarvittava määrä maata, ja sen tässä tiheydessä tarvitsema tila, ja jakamalla tämä viiden sentin osiin. Maapatsas painettiin tarkoitusta varten tehdyllä sapluunalla laskettuun tilavuuteen. Näin varmistettiin astiaan muodostuvan kaksi maapatsasta joiden tiheys oli sama ja mahdollisimman tasainen maapatsaan sisällä. Näin ollen maapatsaiden tiheyserojen ei tulisi vaikuttaa lierojen käyttöön.

Maa-aineksen valmistelujen jälkeen maapatsaat erottava välilevy poistettiin ja jokaiseen astiaan lisättiin kahdeksan peltolieroa (*Aporrectodea caliginosa*). Lierot laskettiin keskelle astiaa, jonka jälkeen astian päälle laitettiin muovikelmu, johon tehtiin 20 reikää, joiden koko oli noin 3 milliiä. Astiat sijoitettiin kertalavalle ja astioiden asento satunnaistettiin. Astioita pidettiin pimeässä  $15\pm 1$  °C lämpötilassa kokeen ajan. Kokeesta tehtiin kahdeksan kerrannetta eli yhteensä kokeessa oli 16 astiaa mukana. Kokeiden kestot olivat kaksi ja 14 päivää. Puolet astioista tutkittiin kahden päivän (48 tuntia) jälkeen ja toinen puoli kokeen lopussa 14 päivää kokeen aloittamisesta. Seitsemäntenä päivänä astioihin lisättiin vettä, jotta niistä ei haihtuisi liikaa kosteutta. Lisääminen tehtiin punnitsemalla paino uudestaan ja lisäämällä haihtunut vesimäärä tasaisesti pipetillä astian molemmille puolille. Kokeiden jälkeen tulokset katsottiin jakamalla astiat uudestaan samasta kohtaa välilevyllä ja laskemalla lierojen lukumäärä molemmilla puolilla astiaa. Levyn väliin jääneet hylättiin.

Käyttäytymiskokeen jälkeen tehtiin myös mittaus, jonka tarkoituksena oli täsmentää mahdollisia selittäviä tekijöitä kokeen tulosten suhteen, ja tekijöiden muutoksia kokeen aikana. Mittauksissa keskityttiin kosteuden ja pH:n muutoksiin yllä kuvattua koetta vastaavassa järjestelyssä, mutta ilman lieroja. Näiden tekijöiden epäiltiin selittävän kokeen tuloksia, koska kosteus ja pH ovat yksiä lieroille tärkeitä abioottisia tekijöitä (Lavelle 1988, Alakukku ym. 2004, Li ym. 2011).

Kokeessa käytettiin aikaisemman kokeen maa-ainesta. Mittauksen järjestely oli muuten samanlainen kuin käyttäytymiskoe, mutta astioita oli mukana vain kaksi, sillä tensiometripareja oli käytettävissä tämä määrä. Mittauksiin käytettiin (Standard 31 cm SMS Tensiometer, Soil Measurement Systems, USA) tensiometrejä. Nämä mittaavat painepotentiaalia (matriisipotentiaalia) eli voimaa, joka tarvitaan saamaan vesi liikkeelle maasta, ja kuvaa sitä kuinka helposti vesi on kasvien käytettävissä. Mittaukset suoritettiin kolme kertaa viikossa. Kokeen aikana pH mitattiin (H-Series H160 Portable pH Meter, IQ Scientific Instruments, USA) kolme kertaa alussa, keskellä ja lopussa. Tarkoituksena oli tuoda kosteus ja pH selittävinä muuttujina astiakokeen aineiston analyysiin.

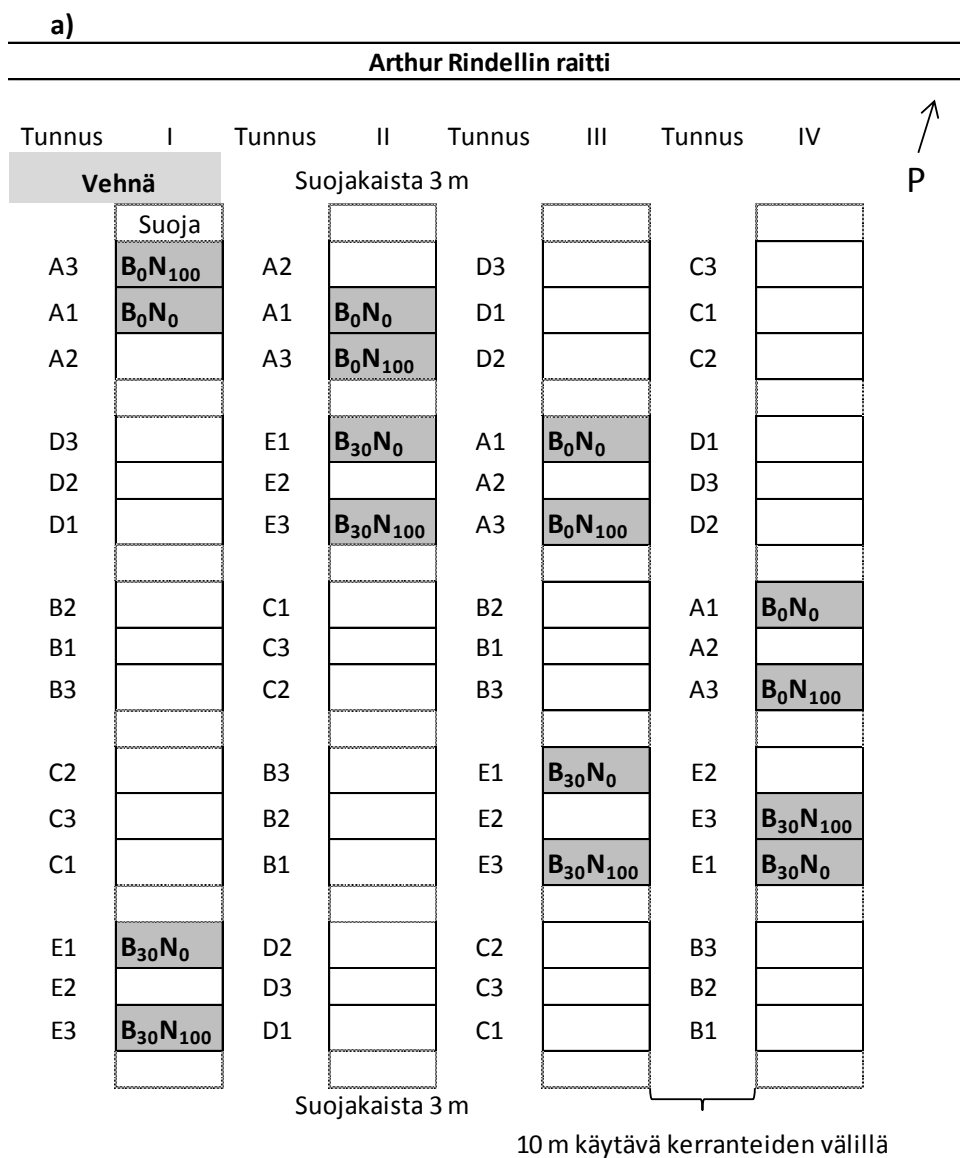
### 4.3 Kenttäkoe

Kenttäkoe järjestettiin kahden tekijän osaruutukokeena. Biohiilikäsittely oli pääruutujen tekijänä kahdella tasolla: ei lisäystä ( $B_0$ ) ja 30 tn/ha ( $B_{30}$ ). Lannoituskäsittely oli osaruutujen tekijänä (kahdella tasolla 0 kg N/ha  $N_0$  ja 100 kg N/ha  $N_{100}$ ). Lannoitteena käytettiin mineraalilannoite Agro 28-3-5 (Cemagro Oy, Suomi) ja lannoitus määräytyi typpimäärän perusteella. Käsittelyt muodostettiin näiden koetekijöiden kaikkien tasojen kombinaatioina ( $2 * 2 = 4$  käsittelyä). Jatkossa koeruutuihin tullaan viittaamaan  $B_0N_0$  tai  $B_{30}N_{100}$  symbolein, jossa alaindeksi vastaa käytettyä ainemääriä.

Pääruudun koko oli  $7 * 10$  m joiden välillä olivat  $2,2 * 10$  metrin suojaruudut, jotka olivat samankokoisia kuin kokeen osaruudut. Koekenttä kylvettiin vehnälle (*Triticum aestivum*, f. Amaretto), joka on tyypillinen suomalainen lajike. Tämä lierokoe järjestettiin laajemman faktoriaalisen biohiilikokeen sisälle (kuva 9), jossa oli mukana muita koejäseniä (muuta biohiilitasoja sekä lannoitelajina mineraalilannoitteen lisäksi lihaluujauho).

Pääruutuihin levitettiin kosteutettu (220 g/kg) biohiili vuoden 2011 keväällä, traktorin perässä vedettävällä hiekoittimella. Tämän jälkeen maa muokattiin puutarhajyrsimellä kahteen kertaan, jotta biohiili saataisiin sekoitettua tasaisesti muokkauskerrokseen. Koekentän kylvön yhteydessä jouduttiin ajamaan yli kaksi kertaa, sillä muuten kentälle ei olisi saatu oikeita lannoitetasoja laajemmassa biohiilikokeessa. Kaikki ruudut saivat näin lopulta samat kylvö- ja muokkauskäsittelyt.

Sadonkorjuun jälkeen syyskuussa 2011 osaruuduista otettiin kolme  $25*25*28$  cm näytettä, jotka jaettiin syvyyssunnassa kahteen osaan: 0–18 cm ja 18–28 cm. Näin ollen kokeessa oli 16 ruutua ja yhdestä ruudusta muodostui kuusi näytettä, joten lieronäytteitä muodostui  $4 * 4 * 3 * 2$  eli 96 kappaletta. Näytteet otettiin ruudun alkupäästä, keskeltä ja loppupäästä. Tällä tavoiteltiin edustavaa otosta, josta voitaisiin arvioida lierojen määrä ja biomassa koeruutua kohti.



b)

	Tunnus	Taso	Kokeessa
<b>Biohiili</b>	A	0 t/ha	X
	B	5 t/ha	-
	C	10 t/ha	-
	D	20 t/ha	-
	E	30 t/ha	X
<b>Lannoite</b>	1	Kontrolli	X
	2	AV 100 kg N/ha	-
	3	CAG 100 kg N/ha	X

Kuva 9. Vadelmakallion koekenttä. a) Koejärjestely ja ruutujen sijainti. Lihavoidut ruudut kuuluivat lierokokeeseen. b) Koeruutujen eri tekijät ja niiden tasot, joiden kombinaatioina saadaan kokeen käsitellyt. AV tarkoittaa Aito Viljo lihaluujauholannoitetta ja CAG mineraalilannoitetta. X merkityt tekijät ja tasot olivat mukana lierotutkimuksessa.

Lierot ovat suhteellisen herkkiä valolle ja reagoivat tärinään, joten näytteitä ottaessa täytyy toimia varovasti. Maa-aines nostettiin valkoisen muovin päälle lapiolla, jossa se käytiin käsin läpi ja eroteltiin lierot maasta ja kerättiin talteen. Löydetyt lierot puhdistettiin vedessä ennen 3,7 % formaliiniliuokseen (laimennettu 37 % formaliini, FF Chemicals Oy, Suomi) säilömistä.

Lierokenttäkokeessa käytettiin standardia ISO 11268-3 (Kula ym. 2006) ohjeena lieroihin perustuvan tietojen keräämisessä, tosin poikkeuksia jouduttiin tekemään: toisin kuin standardissa, lierot käytiin läpi käsin, koska koekentällä ei haluttu käyttää formaliini- tai sinappiuuttamismenetelmää. Syynä oli maan pieneliöstön toiminnan säilyttäminen kentän kokeessa, joka tulee vielä jatkumaan useamman vuoden. Lisäksi viljelyhistorian (säännöllinen syyskyntö usean vuoden ajan) perusteella kastelierojen runsaus oli oletettavasti alhainen, joten erityisesti näihin lajeihin kohdistuva menetelmä ei ollut perusteltu.

Näytteet otettiin koekentältä kymmenen päivän aikana (31.8 – 9.9). Näytteiden oton yhteydessä jokaisesta ruudusta mitattiin maan lämpötila ja kosteus (kuva 10). Lierokokeen näytteenoton aikana maan lämpötilojen keskiarvo oli 15,0 °C ja keskihajonta 1,3 °C (mitattu Pt 100 Platinum Digital Thermometer) ja maan kosteuden keskiarvo oli 28,1 tilavuusprosenttia ja keskihajonta 4,5 % (mitattu TRIME-FM TDR laitteella, IMKO, Etingen, Germany). Olosuhteiden voidaan todeta olleen suotuisat lieronäytteiden ottamiselle.

Ennen lierolajien tunnistamista lierot siirrettiin 85 % etanoliin (Etax<sup>®</sup> A, Altia Oy, Suomi). Lierot olivat sitä ennen formaliiniliuoksessa noin 1,5 kk säilymisen parantamiseksi. Näytteistä selvitettiin lierojen lukumäärä, biomassa ja laji. Lieronäytteiden jatkokäsittelyssä lierot punnittiin yksilöittäin analyysivaa'assa 0,01 gramman tarkkuutta käyttäen, ja lierot lajintunnistettiin käyttäen apuna käyttäen apuna mikroskooppia ja lajintunnistusopasta (Timm 1999).





Kuva 10. Kenttäkokeen näytekehikko ja TDR sekä lämpötilamittaus.

## 4.4 Tulosten käsittely

### 4.4.1 Käyttäytymiskokeen tulosten analyysi

Käyttäytymiskokeen tulokset muodostivat 128 lieroyksilön joukon, ja näiden tilastolliseen laskentaan käytettiin binomitestiä (Binomial test, PASW Statistics 18.0.2, IBM, USA). Hypoteesina oli, että biohiilen vaikutuksesta lierot sijaitsisivat enemmän hiilikäsitellyssä tai käsittelemättömässä maassa.

Käyttäytymiskokeen tuloksia tarkasteltiin vertailemalla lierojen käytöstä niin kutsuttuun Bernoulli jakaumaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kokeessa toteutunutta jakautumista verrataan tilanteeseen, jossa lierot jakautuisivat satunnaisesti astian molemmin puolin. Näin ollen kokeen aineisto muutettiin binomimuotoon (Tämä tarkoittaa aineiston muuttamista vaihtoehtoihin 1 tai 0). Näin voidaan verrata kaikkien lierojen käyttäytymistä suhteessa siihen, että lierot olisivat jakautuneet täysin satunnaisesti eli suhteessa 0,5 per puoli (OECD 2004). Tensiometri ja pH mittausten aineisto ei ole riittävän suuri tilastolliseen testiin.



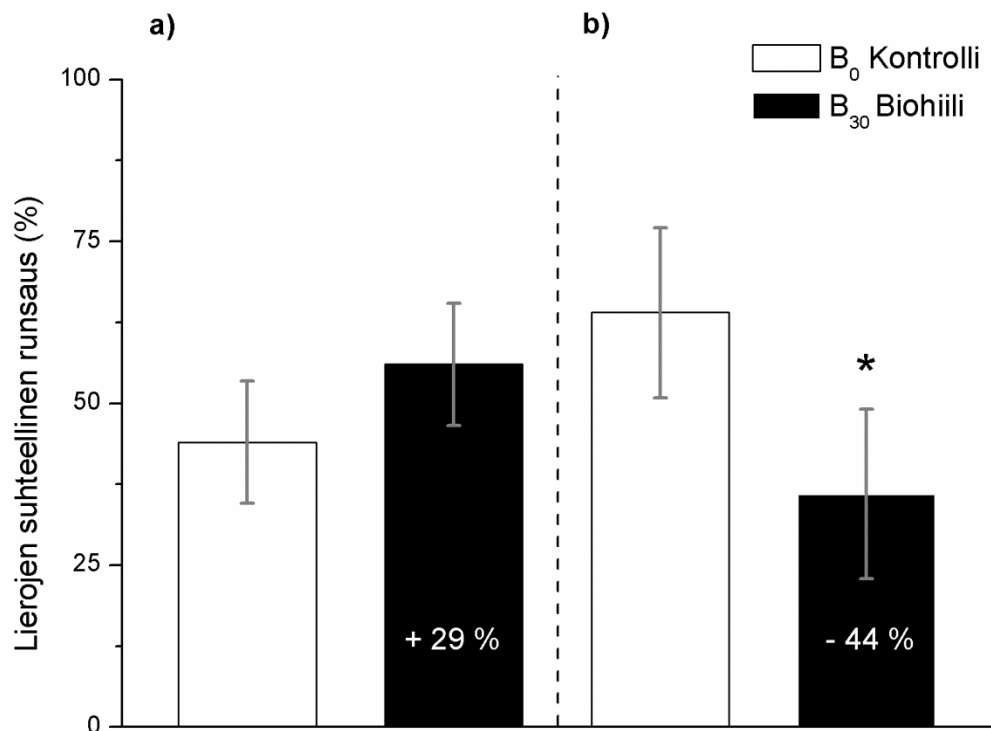
#### 4.4.2 Kenttäkokeen tulosten analyysi

Kenttäkokeen käsittelyiden (biohiili ja lannoitus) ja niiden yhdysvaikutuksia verrattiin varianssianalyysillä (UNIANOVA, PASW Statistics 18.0.2, IBM, USA) lierojen määrään ja biomassaan. Kenttäkokeesta saatu aineisto sisälsi muita muuttujia. Lierolajikoostumus oli kuitenkin liian yksipuolinen, jotta siitä olisi voinut tehdä tilastollisia testejä käsittelyiden vaikutuksesta lajikoostumukseen. Lierojen biomassaa ja määrää verrattiin kaksiulotteisella korrelaatiolla (Pearson's correlation, Excel 2010, Microsoft, USA).

## 5 TULOKSET

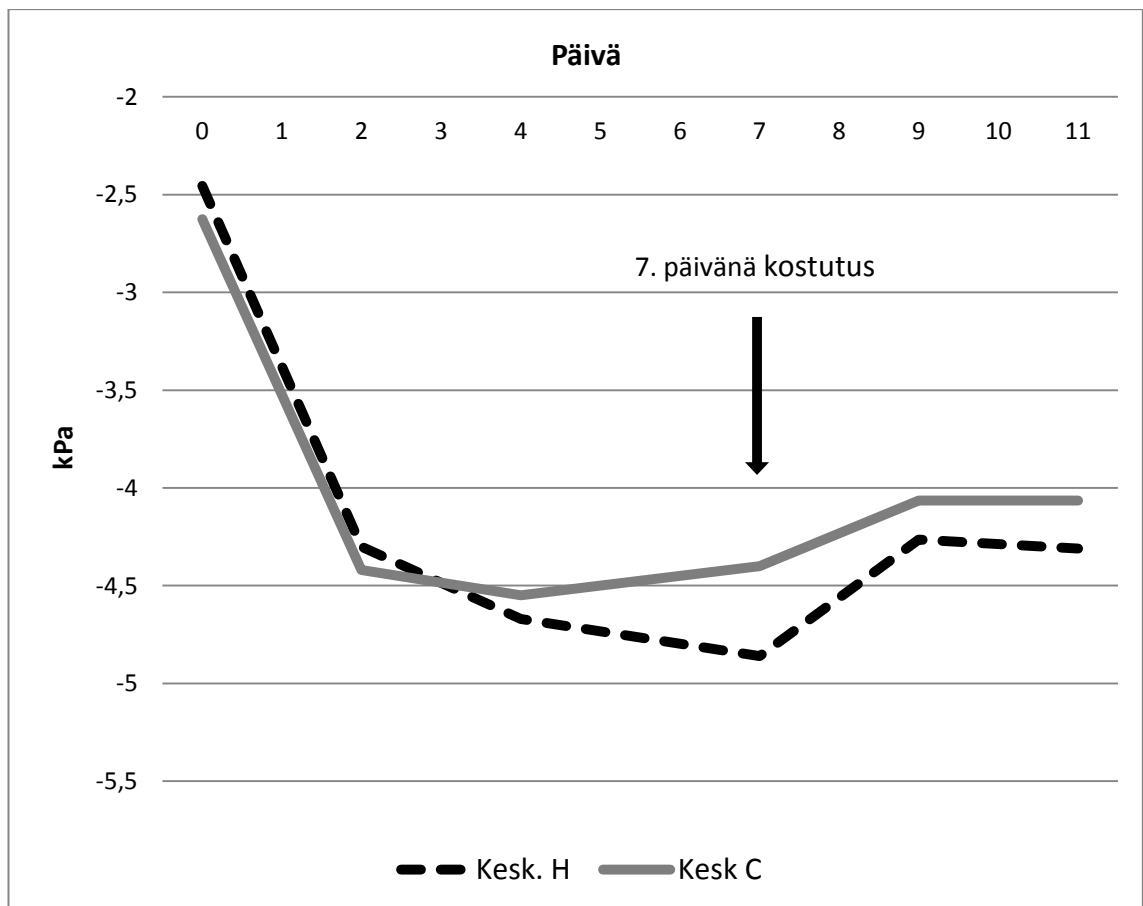
### 5.1 Lierojen reagoiminen biohiileen

Lyhyemmässä kahden vuorokauden kokeessa biohiilen lisäyksellä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja lierojen suhteelliseen runsauteen (preferenssiin) 5 % riskitasolla ( $P = 0,381$ ; kuva 11). Lieroja oli kuitenkin laskennallisesti 29 % enemmän hiilikäsittelyssä maassa. Pidemmässä kahden viikon kokeessa (14 vrk), suhteellisen runsauden mukaan lieroja oli huomattavasti (44 %) enemmän käsittelemättömässä maassa ( $P = 0,033$ ).



Kuva 11. Lierojen suhteellinen runsaus hiilikäsittelyssä verrattuna käsittelemättömiin astian puolikkaisiin a) 2 ja b) 14 päivän jälkeen. \* tarkoittaa tilastollisesti merkitsevää tulosta ( $P < 0,05$ ). Janat kuvaavat keskivirhettä ( $n = 8$ ).

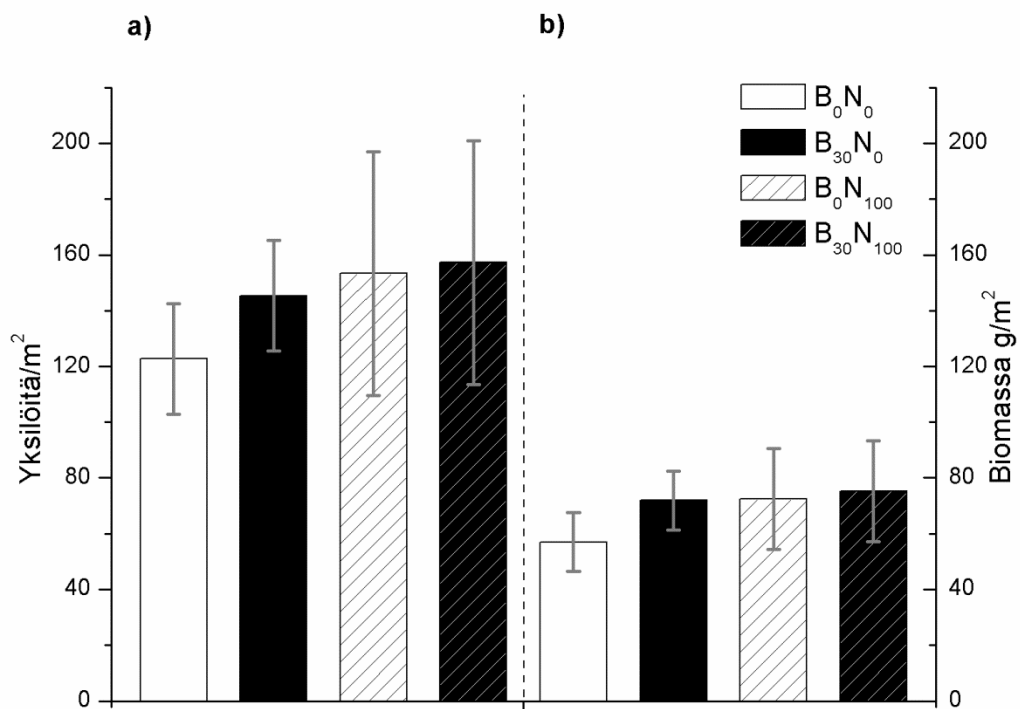
Biohiilen lisäyksen vaikutusta maan pH-arvoon ja kosteuteen mitattiin, sillä näiden epäiltiin selittävän lierojen käyttäytymistä. Kokeen alussa kosteus vaikutti astioissa hyvin tasaiselta, 3. päivän kohdalla biohiilelliset maat alkoivat olla kuivempia. Ero oli suurimmillaan 0,46 kPa (9,5 %) kokeen 7. päivänä, ennen kuin astioihin lisättiin niiden painon mukaan haihtunut vesi (kuva 12). Myös kastelun jälkeen painepotentiaali oli alhaisempi hiilellisillä puolikkailla. Käytännössä kuivuus kokeessa tarkoittaa sitä, että mittaustuloksen mukaan vesi on vaikeammin saatavissa hiilellisellä puolikkaalla kuin hiilettömällä puolella, vaikka veden määrä olisi sama. Viimeiseltä mittauskerralta, ei kokeessa sattuneen virheen vuoksi saatu tietoa. Hiilellinen puoli oli kontrollia kuivempi. Kokeen aikana mitattu pH oli keskimäärin 4,5, eikä koejäsenten ( $n = 2$ ) välillä ollut eroa, tulosten välinen vaihtelu huomioon ottaen.



**Kuva 12.** Tensiometri mittaukset käyttäytymiskokeen kosteuserojen mittaamiseksi. Tulokset esittävät matriisipotentialia kilopascalina (kPa). Lukuarvo kuvaa sitä kuinka vaikea kasvin on ottaa vettä maasta.

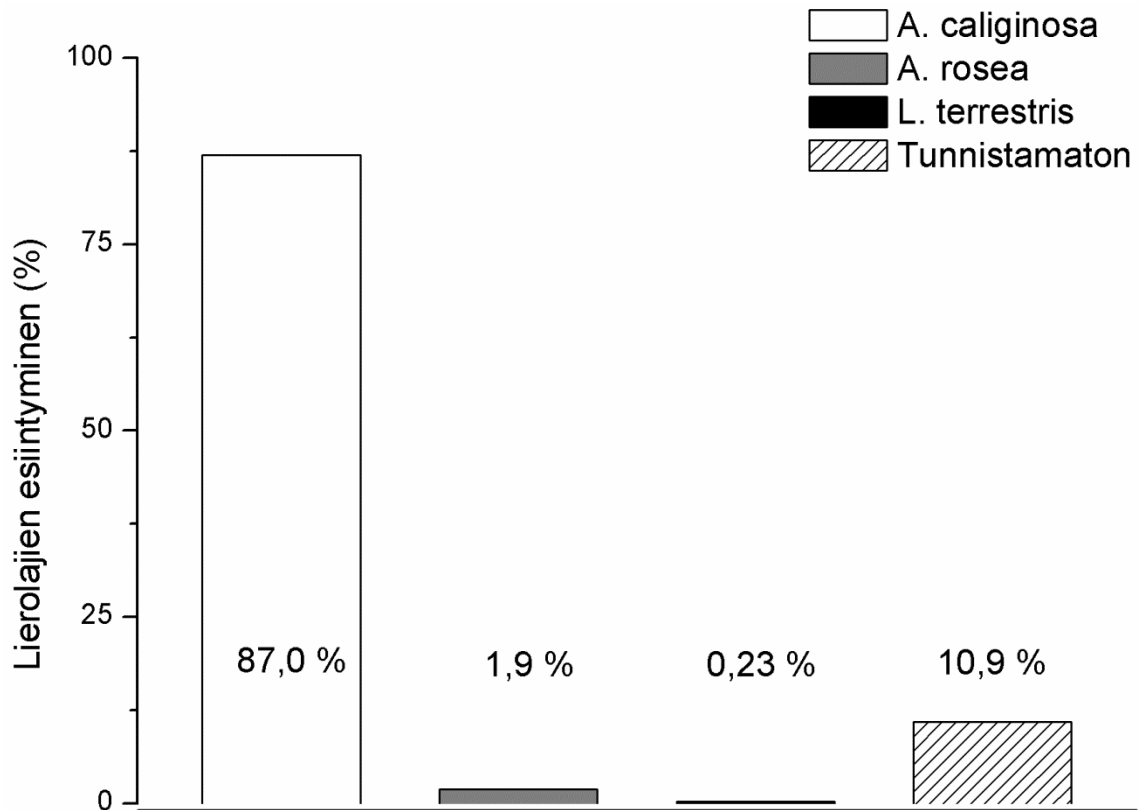
## 5.2 Lierorunsaudet koekentällä

Kenttäkokeessa eivät biohiilen lisäys tai lannoitus vaikuttaneet lierojen yksilömääriin tai biomassoihin (kuva 13). Myöskään yhdysvaikutusta ei näiden tekijöiden välillä ollut. Kerranne oli tilastollisesti selittävä tekijä ( $P = 0,037$ ), lierojen runsaus painottui koekentän kahdelle viimeiselle kerranteelle, joka näkyy myös lierojen runsautta kuvaavassa kenttäkartassa (kuva 15).



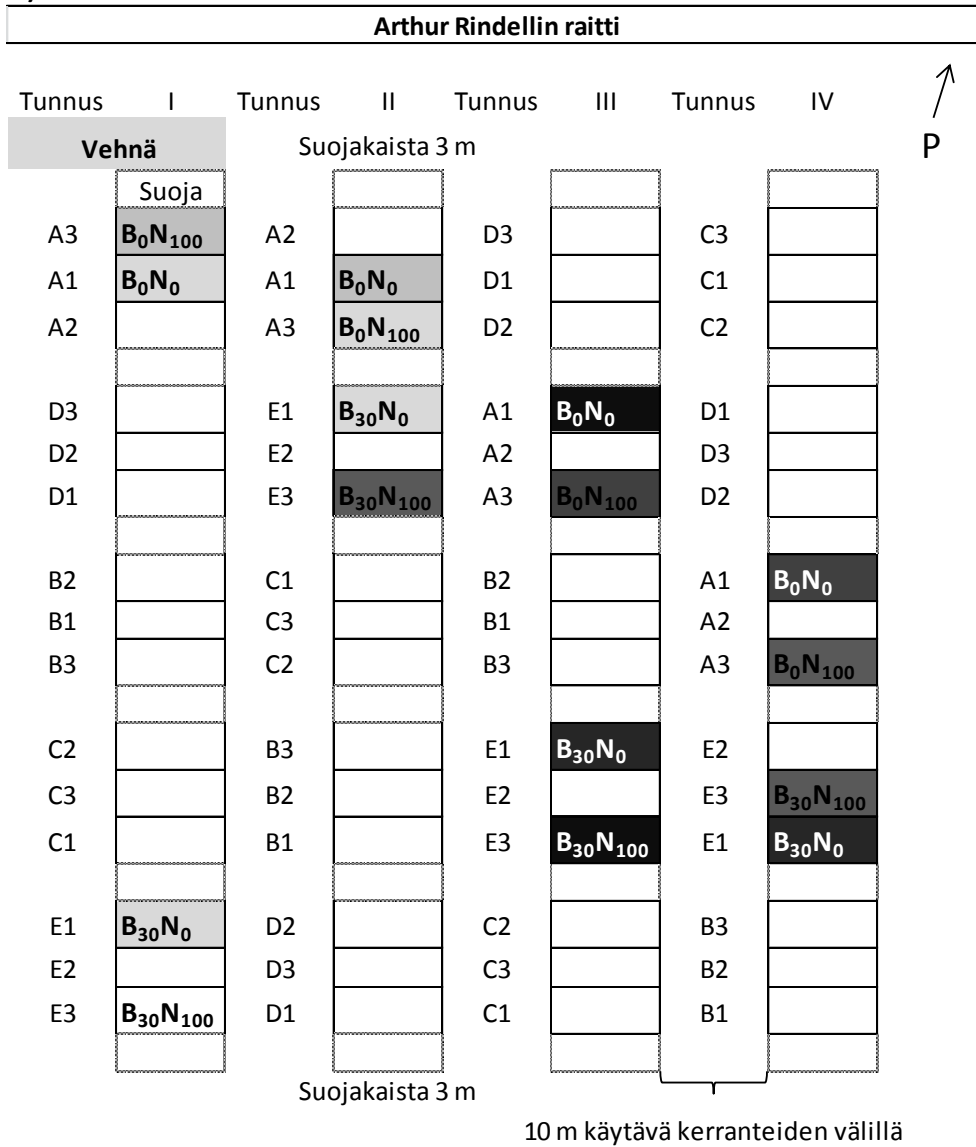
Kuva 13. Kenttäkokeen käsittelyiden vaikutukset lierojen a) yksilömäärään ja b) biomassaan 0-28 cm syvyydestä. Käsittelyinä oli 0 ja 30 tonnia biohiiltä sekä 0 ja 100 kiloa typpeä hehtaarille. Janat kuvaavat keskivirhettä ( $n = 4$ ) Tulokset eivät olleet tilastollisesti merkittäviä  $P > 0,05$ .

Lierojen lajikoostumus kentällä oli hyvin yksipuolinen (kuva 14). Lieroista suurin osa oli nuoria *Aporrectodea* -sukuun kuuluvia yksilöitä (87 % näytteiden 431 yksilöstä). Lieroyksilöistä yksi neljännes oli nuoria aikuisia (26 %), joilla satula alkoi olla näkyvissä. Punaliero (*Aporrectodea rosea*) oli koekentällä harvinainen (2 %). *Lumbricus* -sukuun kuuluvia yksilöitä löytyi vain yksi kasteliero (*Lumbricus terrestris*), joka tosin oli aikuinen. Noin 11 % lieroista jäi tunnistamatta. Nämä olivat kaikki hyvin pieniä yksilöitä, niiden paino oli tyypillisesti alle 0,3 grammaa ja ne olivat nuoria yksilöitä. Luultavimmin näistä suurin osa oli myös peltolieroja, aikuisten runsausjakauman perusteella.



Kuva 14. Lierolajien esiintyminen koekentällä prosenteissa.

a)



b)

	Tunnus	Taso	Runsausluokat (kpl/m <sup>2</sup> )	Väri	Frekvenssi
Biohiili	B <sub>0</sub>	0 t/ha	0 - 59		1
	B <sub>30</sub>	30 t/ha	60 - 99		4
Lannoite	N <sub>0</sub>	0 kg/ha	100 - 129		3
			130 - 159		3
	N <sub>100</sub>	100 kg/ha	160 - 199		1
			200 - 229		2
			230 - 300		2

Kuva 15. a) Lierojen runsaudet ruuduittain. Jokaisesta ruudusta on otettu kolme näytettä ja lierojen määrä on esitetty kpl/m<sup>2</sup>. Tummempi väri tarkoittaa suurempaa määrää lieroja. B<sub>0</sub> tarkoittaa biohiilen määrää t/ha. N<sub>0</sub> tarkoittaa typpilannoituksen määrää kg/ha. b) Käsittelyt koko koekentällä ja lieronäytteiden jakautuminen runsausluokkiin.

## 6 TULOSTEN TARKASTELU

### ***6.1 Lierojen reagointi biohiileen kontrolloiduissa olosuhteissa***

Lierojen merkitsevä biohiilen välttäminen 14 vuorokauden käyttäytymiskokeessa on samanlainen kuin Li:n tutkimusryhmällä (2011). Heidän tulosten mukaan välttäminen oli voimakkaampaa 180 tn/ha omenapuusta 525 °C lämpötilassa valmistetulla biohiilellä. Li ym. (2011) ehdottaa välttämisen pääasialliseksi syyksi biohiilen kuivattavaa vaikutusta. Tämä vahvistaa oman kokeeni havaintoja (9,5 % painepotentiaaliero 7. päivään mennessä).

Kosteus on elinehto lierojen elinympäristön vaatimuksista (Lavelle 1988), ja se voi näin ollen olla tärkein selittävä tekijä myös tässä kokeessa. Li (2011) tutkimusryhmineen on myös esittänyt kosteuden olevan merkittävä tekijä biohiilivälttämiskokeissa, sillä välttämistä ei tapahtunut biohiilellä jopa 180 t/ha määrällä, kun biohiili sai lisäkastelua 0,47 mg vettä biohiiligrammaa kohti korvaamaan biohiilen aiheuttama matriisipotentialin laskun. Näin ilmeisesti pystyttiin välttämään biohiilen kuivaava vaikutus, vaikka kosteusmittauksia maa-ainekselle tutkimuksessa ei tehty.

Omassa kosteusmittauksessa ei mukana ollut lieroja, jotka olisivat saattaneet sekoittaa maa-ainesta koejäsenten välillä. Mikäli kuitenkin oletetaan kosteuden kehittyneen käyttäytymiskokeessa ja kosteusmittauksessa samanlaisesti, voisi maa-ainesten matriisipotentialieroilla selittää kahden päivän kokeen neutraalin vaikutuksen ja 14 vuorokauden biohiilen välttämisen. Kahden vuorokauden koe kuvaa vain lierojen akuuttia välttämistä, eikä sitä tässä kokeessa havaittu. OECD:n ohjeiden mukaan tulosten tulkintaan tulee ottaa mukaan myös pidempi tarkasteluväli, kuten tässä kokeessa tehtiin, jossa välttämistä havaittiin (Environment Canada, 2004).

On myös muita tekijöitä, jotka saattaisivat selittää välttämisreaktion. Kuivan biohiilen on ehdotettu fyysisesti vahingoittavan lieroja (Schmidt ym. 1999). Tämä on riski lähinnä, jos lierot kohtaavat kuivaa biohiiltä. Kokeessa biohiili oli ainakin osittain kastunut, nimittäin biohiili, maa ja vesi, sekoitettiin huolellisesti ennen astiaan laittamista. Sekoittamista jatkettiin niin kauan kunnes maa-aineseos näytti tasaisesti kostealta. Kosteusmittauksen perusteella biohiilen vaikutus matriisipotentialin on

hitaanlainen, sillä matriisipotentiali aleni aina seitsemänten päivään kokeen keskellä tehtyyn kosteuden lisäykseen asti ja painepotentiali oli lisäyksen jälkeenkin alhaisempi (-0,2 kPa) hiilen puolella astiaa.

Toisaalta Van Zwieten ym. (2010) havaitsivat biohiilen aiheuttavan välttämistä myös kahden päivän kokeessa, ja heidän tulokset olivat tilastollisesti merkitseviä toisin kuin omani. Koejärjestelyt poikkesivat omistani, sillä Van Zwieten tutkimuksessa käytettiin paperintuotannon sivutuotteista valmistettua biohiiltä, eri lierolajia, eri maalajia, eri lämpötilaa, ja mukana oli myös lannoituskäsittely. Tutkimuksessa todettiin lierojen suosivan biohiiltä kun käytetyn maan pH oli 4,2, ja ero oli selkeämpi lannoituskäsittelyn kanssa (Van Zwieten 2010).

Biohiili voi vaikuttaa maaperän pH tasoon, sillä biohiilet ovat usein lievästi emäksisiä. Omassa kokeessa kuusihielestä hitaalla pyrolyysillä valmistetun biohiilen pH oli 8,1, eikä happamuusmittauksessa havaittu eroa hiilikäsittelyllä ja käsittelemättömällä maalla. Tulos ei ole yllättävä, sillä biohiiltä oli vain 1,6 g/kg maa-aineksessa. Maa-aineksen pH oli kuitenkin alhainen  $5,4 \pm 0,2$ .

Biohiililisäyksen vaikutus maan pH:hon riippuu biohiilen käyttömäärästä ja raaka-aineesta. Hitaan pyrolyysin biohiilten pH on yleensä välillä 6-8 (Brewer ym. 2011) Biohiili voi kuitenkin olla hyvin emäksistä, kuten kananlannasta valmistetuissa biohiileissä, jonka happamuudeksi on mitattu jopa 13 (Li ym. 2011). Näin suuri pH:n nousu vaikuttaa jo aineiden liukoisuuksiin ja voi vaikuttaa muiden mekanismien kautta lieroihin. Happamuudella ei ole havaittu vaikutusta lieroihin, jos se on välillä 4,5-7.0 (Nieminen ym. 2011), näin ollen tässä raportoitavassa kokeessa happamuus ei selittänyt välttämistä.

Biohiilen on epäilty sisältävän PAH -yhdisteitä, sillä kun orgaanista ainesta kuumennetaan yli 350 °C lämpötilaan, saattaa PAH -yhdisteitä muodostua (Verheijen ym. 2009). Tämä voisi selittää lieroyksilöiden välttämisreaktion, sillä PAH yhdisteet ovat hyvin haitallisia eliöille (ATSDR 1995). Biohiilestä on analysoitu muutamia PAH yhdisteitä, kuten fluoriinia 25,9 µg/kg, naftaliinia 3290 µg/kg ja fenantreenia 102 µg/kg (Li ym. 2011). Välttäminen PAH yhdisteiden seurauksena on kuitenkin epätodennäköistä, sillä toimenpideraja-arvot näille yhdisteille ovat yli satakertaisia



(TRRP 2011). Analyysit oli otettu puhtaasta biohiilestä, joten ei ole mahdollista edes suurimmilla taloudellisesti mahdollisilla biohiilen levitysmäärillä ylittää raja-arvoja. Lisäksi yhdisteiden vaikutuksia tarkkailtiin, eikä lieroissa havaittu oksidatiivista stressiä, joka olisi viitannut lieroille haitallisiin vaikutuksiin (Li ym. 2011). Tosin eri biohiilissä voi mahdollisesti esiintyä eri määriä näitä yhdisteitä. Tämä huomioiden on kuitenkin epätodennäköistä, välttämisen seuranneen näistä yhdisteistä, vaikka kuusihielestä muodostuvia PAH yhdisteitä ei määritetty. Biohiilelle ollaan myös määrittämässä PAH yhdisteiden raja-arvoja. Euroopan Unioni on ehdottanut biohiilille kuudentoista PAH yhdisteen maksimimääriä 6–20 mg/kg ja European Biochar Certificate tiukempaa 4–12 mg/kg raja-arvoa (Hilber ym. 2012), jotka perustuvat erityisesti biohiilelle sopiviin testausmenetelmiin.

Yksi tärkeä tekijä lierojen selviytymiselle on ravinto. Biohiili sitoo itseensä mineraaliravinteita, joten olisi mahdollista, että se estäisi lieroja hyödyntämästä joitakin niiden tarvitsemista ravintoaineista. Ei ole selvää, miten biohiili estäisi lieroja hyödyntämästä ravintoa. Lierojen käyttäytymiskokeissa on usein kuitenkin havaittu lierojen painon alenemista (Li ym. 2011, Weyers & Spokas 2011). Biohiili alensi lierojen painoa 180 t/ha käsittelytasolla noin 3 % (Li ym. 2011), mutta hiili-maa suhteena oli 0,2, joten kovin suuresta painon alenemisestä ei ollut kyse verrattuna käytettyyn biohiilimäärään. Biohiilen on todettu myös alentavan maaperän vetolujuutta (Bengough & Mullins 1990). Tämä voi helpottaa lierojen liikkumista maa-aineessa, sillä alhaisempi vetolujuus ja hienompi maanrakenne vähentävät lierojen energiantarvetta liikkumiseen (Lavelle 1988). Tämä ei selitä lierojen biohiilen välttämistä.

Käyttämiskokeen tulosten selittäjänä biohiilen aiheuttama matriisipotentialin aleneminen näyttää todennäköisimmältä syytä. Kokeessa käytetty kosteustaso vaikuttaa myös oikealta, kun verrataan useisiin muihin käyttäytymiskokeisiin. Biohiili saattaa kuitenkin vaikuttaa myös mainittujen muiden vaikutustapojen kautta, mutta niiden merkitys vaikuttaa pienemmältä kuin kosteus käyttäytymiskokeessa käytettäessä tämän kokeen biohiiltä ja lierolajia.

## **6.2 Biohiilen vaikutus runsauksiin koekentällä**

Biohiili ei vaikuttanut merkitsevästi lierojen määriin tai biomassoihin koekentällä. Lierojen määrässä koekentällä oli havaittavissa paikallisia runsauseroja, mikä lisää hajontaa käsittelyjen välille. Biohiilen levityksestä lieronäytteiden ottoon oli kuitenkin vain yksi kasvukausi, joten on mahdollista, etteivät vaikutukset näy vielä näin lyhyessä ajassa, sillä lierojen elinkierto on suhteellisen pitkä.

Lieroja oli runsaammin kahdessa viimeisessä kerranteessa tilastollisen vertailun perusteella. Koekenttä ei ollut täysin tasainen vaan topografialtaan vietti itään päin, missä havaittiin suurempia lierorunsauksia. Todennäköisesti alempana olevat kerranteet olivat hieman kosteampia, kuin korkeammalla olevat ja runsauserot voisivat johtua tästä. Koekentällä oli myös havaittavissa silmämääräisesti arvioiden kohtia, jossa oli karkeampia maalajeja. Tämä on saattanut vaikuttaa lierojen paikallisiin runsauksiin, sillä koekenttää karkeammat maalajit ovat lieroille heikompia elinympäristöjä (Nieminen ym. 2013).

Koekentällä suuri osa lieroista oli nuoria yksilöitä, joista suurin osa oli pienikokoisia. Täysin aikuisia yksilöitä löytyi koekentältä vain pieni osa lieroista, ja lierojen kokojakauma ei vaihdellut paljon. Tähän tulokseen voi olla useita syitä, kuten viljelyalan yksipuolinen viljapainotteinen viljelyhistoria, maan muokkausmenetelmä, sääolosuhteet ja käytetty näytteenottomenetelmä. Lierojen määrään vaikuttavat huomattavasti käytetyt viljelytekniiset menetelmät (Edwards ym. 1983, Chan 2001, Riley ym. 2008). Kymmenen vuoden viljelyhistoriassa ensimmäiset vuodet olivat nurmella, mutta edelliset kuusi vuotta koekentällä oli viljelty kevätiljoja, ohraa ja vehnää, mikä on saattanut alentaa lieromäärien runsauksia, sillä kevätiljoja viljeltäessä lieroja on tyypillisesti vähemmän kuin monivuotisilla kasvustoilla (Edwards ym. 1983). Lisäksi vuosi 2011 oli keskimääräistä vuotta kuivempi ja kuumempi, mikä karkealla maalajilla on saattanut pienentää lieropopulaatiota.

Perinteisen maanmuokkauksen on esitetty vähentävän erityisesti syvempien maakerroksien lajeja (Chan 2001). Kenttäkokeen maa-ala kynnettiin edellisenä syksynä ja äestettiin joustopiikkiäkeellä keväällä ennen biohiilen levitystä. Tämän jälkeen koekenttä muokattiin puutarhajyrsimellä kahteen kertaan. Näin suuri määrä

maanmuokkaustoimenpiteitä voi olla myös yksi selittävä tekijä lieroyksilöiden runsauksissa. Mekaaniset vauriot ovat todennäköisempiä suuremmilla yksilöillä, joka saattaa selittää kentällä havaitun suuren nuorien yksilöiden määrän. Tämä vastaisi myös havaintoa siitä, että saman lohkon kokeen ulkopuolisesta päästä löytyi huomattavasti enemmän suurempia yksilöitä ja enemmän lajeja. Tässä päässä lohkoa oli myös muokkaamatonta osaa.

Toisaalta käsin kerätyistä näytteistä on havaittu puuttuvan suuria kasteliero (*L. terrestris*) yksilöitä (Terhivuo 1989), joten tulokset eivät välttämättä kuvaa täysin koekentän todellisia populaatiotiheyksiä, mutta ero ei todennäköisesti ole suuri. Näytteet käytiin käsin läpi, eikä ISO 11268-3 standardissa suositeltua sinappi- tai formaliiniuuttoa käytetty, sillä uuttomenetelmät olisivat saattaneet vaikuttaa muihin koealan kokeisiin (Kula ym. 2006). Tämä voi vaikuttaa myös tuloksiin, sillä näytteiden käsin läpikäyminen ei kuvaa täysin syvällä elävien lajien määrää (Terhivuo 1989).

Biohiilen vaikutuksista lieroihin ei ole vielä tehty julkaisuja vastaavanlaisesta kenttätutkimuksesta, josta olisi tehty tilastollinen analyysi (taulukko 4). Näin ollen ei ole täysin vastaavaa koetta, johon tuloksia voisi verrata. Lähinnä vastaavassa kokeessa käytettiin samankaltaista kokeen perustusmenetelmää, jossa koe muokattiin puutarhajyrsimellä. Kahden vuoden kokeessa biohiilellä ei ollut vaikutusta lieroihin (Weyers & Spokas 2011).

Vanhemmat tutkimukset ovat keskittyneet enemmän tuhkan vaikutuksen tutkimiseen metsämaassa, eikä näitä voi täysin verrata peltomaan kokeisiin. Metsämaassa tehdyt tutkimukset ovat kuitenkin samansuuntaisia kuin peltomaassa tehtyjen kokeiden tulokset. Näissäkään ei havaittu vaikutuksia lieroihin tai änkyrämatoihin (Lundkvist 1983 & Cox ym. 2001). Toisaalta Suomessa tehdyssä kokeessa *Cognettia sphagnetorum* -lajin yksilömäärä väheni (Haimi ym. 2000). Vaikutusta ei ole kuitenkaan havaittu muissa kokeissa.

Tuloksista ei siis voi vielä vetää lopullista johtopäätöstä, mutta näyttää, että kohtuullisilla biohiilen levitysmäärillä ole havaittavaa vaikutusta, ainakaan muutaman vuoden tarkastelu ajanjaksolla. Tutkimusten vertailua vaikeuttavat huomattavasti hyvin erilaiset lähtökohdat, joista kokeet on suunniteltu. Weyers ja Spokas (2011) ehdottivat

biohiilen lierokokeille jatkossa yhteistä standardia, jolla saataisiin kokeet paremmin vertailukelpoisiksi. Itse näen myös standardille tarvetta, sillä kokeista ilmoitetut tiedot ja niiden menetelmät eroavat liian paljon toisistaan, mikä vaikeuttaa tuloksien vertailua.

Käyttäytymiskokeiden tuloksista voi päätellä biohiilen aiheuttavan lieroille stressiä, joka ei mahdollisesti ilmene, kun biohiili kastellaan. Syynä tähän on ilmeisesti hiilen matriisipotentialiaa pienentävä vaikutus, joka johtuu sen vedenpidätyskyvystä. Kenttäkokeen biohiili oli kasteltu muutamaa viikkoa ennen kentälle levittämistä, biohiilen pölyämisen vähentämiseksi, joka on muuten levityksessä tekninen ongelma. Näin ollen on mahdollista, ettei välttämiskokeissa havaittu negatiivinen vaikutus näkyisi koekentällä, jos muutama viikko on riittävä aika biohiilen kastelemiseksi. Joka tapauksessa aiheen jatkotutkimuksessa menetelmien yhtenäistäminen olisi tärkeää, jotta saataisiin tutkimukset paremmin vertailukelpoisiksi.

### ***6.3 Biohiilen käytön mahdollisuudet tulevaisuudessa***

Biohiili on potentiaalinen maanparannusaine, jonka positiiviset ominaisuudet ovat osin jääneet todistamattomaksi kenttäolosuhteissa. Uusimmat tutkimukset eivät ole pystyneet toistamaan kaikkia väitteitä, ainakaan kaikilla maaperillä. Sadonlisä on esitetty johtuvan pääasiassa happamilla mailla pH:n noususta (Van Zwieten ym. 2010), joka voitaisiin saavuttaa myös muiden menetelmien avulla. Toistaiseksi syyt ja seuraukset eivät ole kovin selviä, joten asiaa tulee tutkia lisää.

Biohiilellä voi olla käyttötarkoituksia maataloudessa (Lehmann ym. 2011), vaikka se ei kaikissa olosuhteissa lisäisikään satoja. Nimittäin maailman kaikesta maatalousmaasta vain 16,2 % on ilman tunnistettuja maaperän rajoitteita, jotka alentavat alueiden tuotantopotentialia (World Research Institute 2005). Biohiili voisi vaikuttaa näihin maan ongelmakohtiin, kuten happamuuteen 24,6 %, huonoon vedenpidätyskykyyn 11,3 % ja alhaiseen kationinvaihtokapasiteettiin 4,2 % (World Research Institute 2005). Näin ollen biohiili voisi toimia maanparannusaineena erityisesti näillä ongelmallisilla maaperillä, sillä maan tuotantokykyä tarvitsee kasvattaa erityisesti alhaisen tuottavuuden alueilla maailman väestön kasvaessa (Foley ym. 2011). Tarvitaan

kuitenkin selkeämpää tietoa biohiilten vaikutuksista ongelmien ratkaisemiseksi, sillä eri biohiilityypeillä on huomattavia eroja maaperävaikutuksiensa suhteen.

Biohiiltä voitaisiin edelleen käyttää hiilen talteenottomenetelmänä pelloilla. Tarvitaan kuitenkin lisää tutkimusta, jotta voidaan osoittaa biohiilen olevan haitaton peltomaan eliöille. Haitattomuuden todistaminen on tosin haastavaa, sillä miten voidaan todistaa kokeen näyttävän kaikki mahdolliset vaikutukset eliöihin luotettavasti? Pitäisi pystyä osoittamaan, ettei haittoja ole, mikä on teoriassa mahdotonta tieteellisessä tutkimuksessa, koska tulokset osoittavat vain kyseisten tutkittujen koejäsenten vaikutukset rajatusti.

Biohiilen lierokokeille tulisi muodostaa standardi, joilla erilaisista lähteistä tuotettuja biohiiliä voisi verrata toisiinsa. Näin voitaisiin helpommin testata biohiilityyppien vaikutuksia ja johtaa helpommin vahvempia johtopäätöksiä, joiden perusteella voitaisiin antaa suosituksia biohiilen käytölle erilaisissa ympäristöissä. Mielekästä voisi olla myös verrata eri lähteistä valmistettuja biohiiliä, joissa on käytetty samaa tuotantomenetelmää. Tämä on mielestäni nykyisissä tutkimuksissa ongelma, kun on eri raaka-aine ja tuotantomenetelmä, on vaikeaa tulkita kummasta lopputuloksen erot johtuvat. Biohiilelle saattaa olla lisäksi tarpeellista määrittää myös erilaisia käyttörajoituksia tai sisällön suosituksia, sillä erityisesti kananlannasta valmistettu biohiili näyttäisi olevan suurempina pitoisuuksina selkeästi toksista maaperäeliöille huomattavasti korkeamman pH:n vuoksi (Liesh ym. 2010.). Biohiilen PAH -yhdisteille ja raskasmetalleille määritetyt raja-arvot ovat myös tärkeitä biohiilen turvalliselle käytölle.

Lierojen kohdalla biohiili ei näyttänyt kokeissa tilastollisesti havaittavaa hyötyä. Havaintoa vahvistaa useat muut käyttäytymiskokeet, sillä niiden mukaan vaikutukset lieroihin eivät olleet suuria, ne olivat usein neutraaleja tai negatiivisia. Toistaiseksi biohiilen levityksestä ei näyttäisi olevan merkittävää haittaa. Vielä ei kuitenkaan voida tehdä lopullista päätelmää, ennen kuin on saatu riittävän laajaa tutkimusnäyttöä aiheesta myös muista kenttäkokeista ja pidemmältä aikaväliltä. Biohiilen pitkän aikavälin tutkimus on erittäin tärkeää, johtuen biohiilen pitkästä pysyvyydestä peltomaan olosuhteissa, ja koska se on käytännössä mahdotonta poistaa maa-aineksesta.

Tutkimuskohteena voisi olla laajempi ja pidempiaikainen seuranta lieroista ja mahdollisesti myös muista maaperäeliöistä.

Biohiilen hiilensidontavaikutuksen arvioimiseksi kokonaisvaltaisemmin tarvittaisiin myös laajempaa tutkimusta varsinaisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista koko tuotantoketjusta. Erityisesti biohiilen vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin maaperästä erilaisissa olosuhteissa olisi tärkeää selvittää kokonaispäästövaikutuksen tarkentamiseksi. Biohiilellä ja lieroilla voi olla myös mahdollisia yhdysvaikutuksia maaperän ilmastopäästöihin. Taloudellinen kannattavuus olisi tärkeää arvioida, esimerkiksi kustannus-hyötyarviointi suomalaisilla biohiilen raaka-aineilla ja käytön hyödyillä voisi tuottaa mielenkiintoista tietoa biohiilen käytännön mahdollisuuksista maanparannukseen ja hiilensitomiseen käytännössä. Tällä hetkellä biohiilestä on paljon tutkimusta meneillään, myös näillä mainituilla tutkimuskentillä, joten arviointiin tarvittavaa tietoa on tulossa lähiaikoina huomattavasti lisää.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka kuusilastuista valmistettu biohiili vaikuttaa peltomaan lieroihin. Lierot välttivät biohiiltä pidemmässä käyttäytymiskokeessa. Tämä johtuu todennäköisesti biohiilen korkeasta vedenpidätyskyvystä, mikä alentaa maan matriisipotentialia ja jonka lierot kokevat kuivuutena. Ilmiö pystyttiin havainnollistamaan matriisipotentialin alentumisena mittauksessa. Vaikutus ei näy, jos biohiilikäsittelyn sitouttama vesi korvataan kastelulla. Biohiilikäsittelyn vaikutuksen syiksi on ehdotettu myös muita syitä, kuten happamuutta, PAH-yhdisteitä ja ravintoa. Biohiilen valmistustapa ja raaka-aine vaikuttavat sen ominaisuuksiin ja näin ollen vaikutukset saattavat erota eri biohiilillä. Muun tyyppisillä biohiilillä nämä syyt ovat mahdollisia, mutta kuusilastuista tehdyllä biohiilellä kosteus on todennäköisin syy.

Kenttäkokeessa ei havaittu biohiilen tai lannoitteen vaikutusta tai niiden yhdysvaikutusta lierojen määrään tai biomassaan. Kokeen lyhyiden takia tulokset ovat kuitenkin riittäviä arvioimaan vain välittömiä välttämisreaktioita, joita ei havaittu yhden kasvukauden aikana kenttäolosuhteissa. Biohiilen kastelu saattoi ehkäistä käyttäytymiskokeessa havaitun välttämisreaktion.

Biohiilen käytölle lyhytaikainen lierojen taantuminen tai välttäminen ei ole kokonaisuuden näkökulmasta merkittävä asia, sillä biohiiltä ei ole tarkoitus levittää joka vuosi vaan ennemminkin vain kerran. Valtaosa lyhytaikaisista käyttäytymiskokeista ja kenttäkokeista on ollut neutraaleja vaikutuksiltaan lierojen elinolosuhteisiin. Tärkeää on kuitenkin selvittää biohiilen pitkäaikainen vaikutus levityksen jälkeen, sillä käytännössä biohiiltä on mahdotonta ottaa maaperästä pois. Tämän lisäksi pitäisi selvittää biohiilityypikohtaisesti vaikutukset, koska erot niiden välillä ovat merkittäviä. Toistaiseksi tulokset puupohjaisen biohiilen maanparannuskäytön ja kasvihuonekaasupäästöjen sitomisen kannalta ovat lupaavia, sillä mittavia negatiivisia vaikutuksia ei havaittu lieroilla, joita pidetään yhtenä peltomaan laadun mittareina.

## 8 KIITOKSET

Haluaisin kiittää kaikkia tämän tutkielman tekemiseen vaikuttaneita ihmisiä. Erityisesti haluan mainita ohjaajani professori Juha Heleniuksen (Helsingin yliopisto), tutkija Visa Nuutisen (Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus) ja tohtorikoulutettavan Priit Tammeorgin (Helsingin yliopisto) heidän neuvoistaan, tuestaan ja avusta työtä tehdessäni. Lieronäytteiden otto oli erityisen työläs vaihe aineistonkeräämisessä, ja avusta tässä työssä haluaisin myös kiittää Johannes Mäkistä. Näiden henkilöiden lisäksi minua auttoi myös useita muita ihmisiä, joiden apu oli tärkeää työn eri vaiheissa.



## 9 LÄHTEET

- Alakukku L., Mikkola H., Teräväinen H. 2004. Suorakylvöopas. Proagria Maaseutukeskusten Liiton julkaisuja nro 1003, Tieto tuottamaan 107, ISBN 951-808-21-2. s. 16-23.
- ATSDR (Agency for toxic substances and disease registry). Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) 1995. <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/TP.asp?id=122&tid=25> Viitattu: 7.3.2012.
- Baker, G., Buckerfield, J., Grey-Gardner, R., Merry, R., Doube, B. 1992. The abundance and diversity of earthworms in pasture soils in the Fleurieu Peninsula, South Australia. *Soil Biol Biochem* 24: 1389-1395.
- Baker, G., Brown, G., Butt, K. Curry, J., Scullion J. 2006. Introduced earthworms in agricultural and reclaimed land: their ecology and influences on soil properties, plant production and other soil biota. *Biol Invasions* 8: 1301-1316.
- Bauer, A. & Black, A. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. 1994. *Soil Science Society of America journal*. 58: 185-193.
- Becker-van Slooten, K., Campiche, Tarradellas, J. 2003. Research in support of environment Canada collombolan toxicity test method with *Folsomia candida* for assessment of contaminated soils. Laboratory of environmental chemistry and ecotoxicology (CECOTOX), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Environment Canada, Ottawa. Viittaus: Environmental Canada, 2004.
- Bengough, A. & Mullins, C. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science* 41: 341-358.
- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J.E., Cluzeau, D., Brun, J. 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*. 64: 161-182,
- Bouche, M. 1983. The establishment of earthworm communities. Teoksessa: Satchel, J. 1983. *Earthworm ecology*. Chapman and Hall. ISBN 0412-24310-5 s. 431-448.
- Brewer, C., Unger, R., Schmidt-Rohr, K., Brown, R. 2011. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. *Bioenerg. Res.* 4: 312-323.

- Butt, K., Nieminen, M., Sirén, T., Ketoja, E., Nuutinen, V. 2005. Population and behavioural level responses of arable soil earthworms to boardmill sludge application. *Biol Fertil Soils*. 42: 163-167.
- Castaldi, S., Riondino, M., Baronti, S., Esposito, F.R., Marzaioli, R., Rutigliano, F.A., Vaccari, F.P., Miglietta, F. 2011. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes. *Chemosphere* 85:1464-1471.
- Chan, K.Y. 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity – implications for functioning soils. *Soil & Tillage Research* 57: 179-191.
- Chan, K., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. 45: 629-634.
- Chan, K., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*. 46: 437-444.
- Cheng, C. & Lehmann, J. 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere* 75: 1021-1027.
- Cox, D., Bezdicek, D., Fauci, M. 2001. Effects of compost, coal ash, and straw amendments on restoring the quality of eroded Palouse soil. *Biol Fertil Soils*. 33: 365-372.
- Dominic, M. & Kimberley, P. 2010. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential. *Biomass and bioenergy* 34: 1149-1158.
- Douglas, J., Goss, M., Hill, D. 1980. Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of a radioactive tracer ( $^{144}\text{Ce}$ ) technique. *Soil and Tillage Research* 1:11-18, ISSN 0167-1987.
- Cui, X., Wang, H., Lou, L., Chen, Y., Yu, Y., Jiyan, S., Xu, L., Khan, M. 2009. Sorption and genotoxicity of sediment-associated pentachlorophenol and pyrene influenced by crop residue ash. *J Soils Sediments* 9: 604-612.
- Edwards, C. 1983. Earthworm ecology in cultivated soils. Teoksessa: Satchel, J. 1983. Earthworm ecology. Chapman and Hall. ISBN 0412-24310-5 s. 123-151.
- Edwards, C. & Bohlen, P. 1996. The biology and ecology of earthworms (3<sup>rd</sup> Edition). Chapman & Hall, London. s. 46-60.

- Environment Canada, 2004. Biological test method: Tests for toxicity of contaminated soil to earthworms (*Eisenia andrei*, *Eisenia foetida*, or *Lumbricus terrestris*). Environment Canada, Ottawa, Ontario.  
<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=43EEC3EB-8752-4881-B56B-C35E31A3CFEF> Viitattu 4.9.2012.
- Foley, J., Ramankutty, N., Brauman, K., Cassidy, E., Gerber, J., Johnston, M., Mueller, N., O'Connell, C., Ray, D., West, P., Balzer, C., Bennett, E., Carpenter, S., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478: 337–342.
- Fründ, H., Butt, K., Capowiez, Y., Eisenhauer, C., Emmerling, C., Ernst, G., Potthoff, M., Schädler, M., Schrader, S. 2010. Using earthworms as model organisms in the laboratory: Recommendations for experimental implementations. *Pedobiologia*: 53: 119-125.
- Gaunt, J. & Lehmann, J. 2008. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environmental Science and Technology* 42: 4152-4158.
- Gomez-Eyles, J., Sizmur, T., Collins, C., Hodson, M. 2011. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental pollution* 159: 616-622.
- Greafe, H. & Beylich, A. 2003. Critical values of soil acidification for annelid species and decomposer community. *Enchytraeidae* 8:51-55.
- Haimi, J., Fritze, H., Moilanen, P. 2000. Responses of soil decomposer animals to wood-ash fertilization and burning in a coniferous forest stand. *Forest Ecology and Management*. 129: 53-61.
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V., Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974-2009. *Global change biology*. 19: 1456-1469.
- Hilber, I., Blum, F., Leifeld, J., Schmidt, H.P., Bucheli, T. 2012. Quantitative determination of PAHs in biochar: A prerequisite to ensure its quality and safe application. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 60: 3042-3050. DOI: 10.1021/jf205278v
- Huhta V. ja toimituskunta 1986. Suomen eläimet, osa 5. Weilin + Göös ISBN 951-35-2734-4 s. 175-182.

- Hund-Rinke, K. & Wiechering H. 2001. Earthworm avoidance test for soil assessments. An alternative for acute and reproduction tests. *J. Soils & Sediments*, 1: 15-20.
- Husk, B. & Major, J. 2010. Commercial scale agricultural biochar field in Québec. Canada over two years: effects of biochar on soil fertility, biology and crop productivity and quality. BlueLeaf biochar field trial. <http://www.blue-leaf.ca/main-en/files/BlueLeaf%20Biochar%20Field%20Trial%2008-09%20Report-1.pdf>. Viitattu 25.9.2012.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. IGES, Japan.
- Jeffery, S., Gardi, C., Jones, A., Montanarella, L., Marmo, L., Miko, L., Ritz, K., Peres, G., Römbke, J., van der Putten, H. (eds). 2010. European atlas of soil biodiversity. European Commission, Publications of the European Union, Luxemburg.
- Jiménez, J. & Lal, R. 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. *Critical reviews in Plant Sciences*, 25: 337-365.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström I., Regina K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, ecosystems and environment* 140: 309-313.
- Kibblewhite, M.G., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Baritz, R., Huber, S., Arrouays, D., Micheli, E. and Stephens, M. (eds) (2008). Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume VI: Soil Monitoring System for Europe. EUR 23490 EN/6, Office for the Official Publications of the European Communities Luxembourg, 72pp.
- Krausmann F., Erb K., Gingricha S., Lauka C., Haberla H. 2000. Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints. *Ecological economics* 65: 471 – 487.
- Kula, C., Heimbach, F., Riepert, F. Römbke, J. 2006. Technical recommendations for the update of the ISO earthworm test guideline (ISO 11268-3). *J Soils Sediments* 6: 182-186.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304 DOI: 10.1126/science.1097396
- Lavelle, P. 1988. Earthworm activities and the soil system. *Biology and Fertility of Soils*. 6: 237-251.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi J.-P. 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*. 42: 3-15.

- Lee, K.E. 1985. Earthworms – Their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press, Sydney, 411 pp.
- Lehmann, J., Rillig, M., Thies, J., Masinello, C., Hockaday, W., Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 1812-1936.
- Li, D., Hockaday W., Masiello, C., Alvarez P. 2011 Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 1732-1737.
- Liiri, M., Ilmarinen, K., Setälä, H. 2002. The significance of *Cognettia sphagnetorum* (Enchytraeidae) on nitrogen availability and plant growth in wood ash-treated humus soil. *Plant and Soil* 246: 31-39.
- Liiri, M., Ilmarinen, K., Setälä, H. 2007. Variable impacts of enchytraeid worms and ectomycorrhizal fungi on plant growth in raw humus soil treated with wood ash. *Applied Soil Ecology* 35: 174-183.
- Liesch, A., Weyers, S., Gaskin, J. Das, K. 2010. Impact of two different biochars on earthworm growth and survival. *Annals of Environmental Science*. 4:1-9.
- Lundkvist, H. 1983. Effects of Clear-cutting on the Enchytraeids in a scots pine forest soil in central Sweden. *Journal of Applied Ecology*. 20: 873-885.
- Nieminen, J. 2008. Labile carbon alleviates wood ash effects on soil fauna. *Soil Biology & Biochemistry*. 40: 2908-2910.
- Nieminen, J. & Haimi, J. 2010. Body size and population dynamics of enchytraeids with different disturbance histories and nutrient dynamics. *Basic and Applied Ecology* 11: 638-644.
- Nieminen, M., Ketoja, E., Mikkola, J., Terhivuo, J., Sirén, T., Nuutinen, V. 2011. Local land use effects and regional environmental limits on earthworm communities in Finnish arable landscapes. *Ecological applications* 21: 3162-3177.
- Noguera D., Rondón M., Laossi K., Hoyos, V., Lavelle, P., Carvalho, M., Barot, S. 2010. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology & Biochemistry* 42: 1017-1027.
- Nuutinen, V. 1992. Earthworm community response to tillage and residue management on different soil types in southern Finland. *Soil and tillage research*.23: 221-239 DOI:10.1016/0167-1987(92)90102-H
- Nuutinen, V., Terhivuo, T., Nieminen, M., Ketoja, E., Sirén, T. 2006. LUMOliero – Suomen peltojen lieroyhteisöjen peruskartoitus (2004–2006). Maataloustieteidenpäivät.

- Nuutinen, V., Butt, K., Jauhiainen, L. 2011. Field margins and management affect settlement and spread of an introduced dew-worm (*Lumbricus terrestris* L.) population. *Pedobiologia* 54: 167-172.
- Marhan, S., Scheu, S., 2005. Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L. *Geoderma* 128: 155-166.
- Mäkelä-Kurtto R. & Sippola J. 2002. Monitoring of Finnish arable land: changes in soil quality between 1987 and 1998. *Agriculture and Food Science in Finland* 11: 273-284.
- OECD/OCDE 222, 2004. OECD Guideline for testing of chemicals. Earthworm reproduction test (*Eisenia fetida/Eisenia andrei*).
- Pachauri, R. K. & Reisinger, A. 2007. Climate change 2007: Synthesis report; Contribution of groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC: Geneva, Switzerland.
- Pietikäinen, J., Kiikkilä, O., Fritze, H. 2000. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *OIKOS* 89: 231–242.
- Ratamáki, O., Vihervaara, P., Furman, E., Tuomisaari, J. 2011. SYKEra7/2011 Ekosysteemipalveluiden tutkimus osaksi ympäristö- ja luonnonvarojen hallintaa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2011, 66 s. URN:ISBN 978-952-11-3858-4. ISBN 978-952-11-3858-4 (PDF). Julkaisu on saatavana ainoastaan verkkojulkaisuna.
- Riley, H., Pommeresche, R., Eltun, R., Hansen, S., Korsæth, A. 2008. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 124: 275-284.
- Roberts, K., Gloy, B.A., Joseph, S. Scot, N.R., Lehmann, J. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic and climate change potential. *Environmental Science and Technology* 44: 827-833.
- Robertson, G.P, Philip E.A., Harwood, R.R. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289: 1922-1925.
- Satchell, J. 1967. Lumbricidae. Burges, A. and Raw, F. (toimittanut) *Soil Biology*. Academic press, London. 495 sivua.

- Satchell J. (toimittanut) 1983. Earthworm ecology. From Darwin to vermiculture. Chapman and Hall, London. 495 sivua.
- Schmidt, O., Scrimgeour, C., Curry, J. 1999. Carbon and nitrogen stable isotope ratios in body tissue and mucus of feeding and fasting earthworms (*Lumbricus festivus*) *Oecologia* 118: 9-15.
- Schmidt, M. & Noack, A. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical cycles* 14 3: 777-793.
- Shackley, S. & Sohi, S. (editors). 2010. An Assessment of the Benefits and Issues Associated with the Application of Biochar to Soil. UK Biochar Research Centre.
- Slimak, K. 1997. Avoidance response as a sublethal effect of pesticides on *Lumbricus Terrestris* (Oligochaeta). *Soil Biol. Biochem.* 29: 713-715.
- Spokas, K.A., Koskinen W.C., Baker J.M., Reiscosky D.C. 2009. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere* 77: 574-581.
- Steiner, C., Glasser, B., Teixeira, W., Lehmann, J., Blum, E., Zech, W. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 000: 1-7 DOI: 10.1002/jpln.200625199.
- Stephenson, J. 1930. The Oligochaeta. Clarendon Press, Oxford. 978 sivua.
- Stockdill, S. & Cossens, G. 1966. The role of earthworms in pasture production and moisture conservation. *Proceedings New Zealand Grassland Assosociation* 168-183.
- Sven, M. & Scheu, S. 2004. Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L. *Geoderma* 128: 155-166.
- Terhivuo, J. 1989. The Lumbricidae (Oligochaeta) in eastern Fennoscandia: species assemblages, ecology and zoogeography with particular reference to genetic and morphological variation in *Dendrobaena octaedra* (Sav.) Department of Zoology, University of Helsinki.
- Timm, T. 1999. A guide to Estonian Annelida. Estonian Academy Publishers.
- Topoliantz, S. & Ponge, J. 2003 Burrowing activity of the geophagous earthworm *Pontoscolex corethrurus* (Oligochaeta: Glossoscolecidae) in the presence of charcoal. *Applied Soil Ecology* 23:267-271.

- Topoliantz, S. & Ponge, J. 2005. Charcoal consumption and casting activity by *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae). *Applied Soil Ecology* 28: 217-224.
- TRRP, 2011. TRRP protective concentration levels.  
<http://www.tceq.texas.gov/remediation/trrp/trrppcls.html> Viitattu 7.3.2012.
- United Nations Population division. 1999. Charting the progress of populations.  
<http://www.un.org/esa/population/publications/charting/3.pdf> United Nations.  
Viitattu: 29.9.2011
- United States Census Bureau. 2010. International Population growth estimate.  
<http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpop.php> Viitattu: 29.9.2011.
- US EPA 3050. US EPA. 1994. Water quality standards handbook: Second Edition. EPA-823-B-94-005; August 1994 with some additional new information (June 2007) <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/handbook/index.cfm> Viitattu 1.5.2012.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust J., Joseph, S. Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327: 235-246.
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., and Diafas, I. 2009. Biochar application to soils - A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. EUR 24099 EN, Office for the official publications of the European Communities, Luxembourg, 149pp.
- Weyers, S., & Spokas, K. A. 2011. Impact of biochar on earthworm populations: A review. *Applied and Environmental Soil Science*. Article ID 541592, 12 pages DOI:10.1155/2011/541592
- Woolf, D., Amonette, J., Street-Perrott, F., Lehmann, J., Joseph, S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* DOI:10.1038/ncomms1053
- World resources institute and the international food policy research institute (WRI & IPF). Pilot analysis of global ecosystems (PAGE): Agroecosystems, 2000. 2005. Washington, DC. <http://www.ifpri.org/dataset/pilot-analysis-global-ecosystems-page> Viitattu 22.3.2012.
- Yanai, Y., Toyota, K., Okazaki M. 2007. Effects of charcoal addition on N<sub>2</sub>O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil science and plant nutrition* 53: 181-188.



Zimmerman, A.R. 2010. Abiotic and microbial oxidization of laboratory-produced black carbon (Biochar). *Environmental Science and Technology* 44: 1295-1301.