

**HAVUPUUBIOHIILEN JÄLKIVAikutuksia MAAPERÄN
VILJAVUUTEEN JA NURMIKASVEIHIN SUOMEN OLOISSA**

Heidi Hovi
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroekologia
2017

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Heidi Larissa Hovi			
Työn nimi — Arbetets titel — Title HAVUPUUBIOHIILEN JÄLKIVAIKUTUKSIA MAAPERÄN VILJAVUUTEEN JA NURMIKASVEIHIN SUOMEN OLOISSA			
Oppiaine — Läroämne — Subject Kasvintuotantotieteet - Agroekologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year maaliskuu 2017	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 85 s.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Hiilineutraalin yhteiskuntamme tavoite on sitoa hiiltä yhtä paljon kuin tuotamme hiilidioksidia. Samaan aikaan maatalouden tulisi tuottaa ruokaa kasvavalle ihmisväestölle maapallon kantokyvyn rajoissa ja siinä on avainasemassa viljavuudeltaan heikentyneiden maiden parantaminen. Nurmet toimivat tärkeänä ekosysteemipalveluna sitoen hiiltä ja tyypeä maaperään sekä parantaen maan kasvukuntoa. Biohiiltä tutkitaan potentiaalisena maanparannusaineena peltoviljelyssä sekä ilmastomuutosta ehkäisevänä maaperän hiilensitojana. Se on kuivatislauksessa eli pyrolyysissä syntyvä orgaaninen, kiinteä lopputuote, joka peltomaahan levitettynä pysyy maassa satoja tai tuhansia vuosia. Ei kuitenkaan vielä tiedetä tarkkaan kuinka biohiili vaikuttaa peltomaassa, sillä pitkäaikaiskokeita biohiilen pitkän ajan jälkivaikutuksista ei ole toistaiseksi julkaistu.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää neljä ja viisi vuotta sitten levitetyn biohiilen sekä biohiilen ja lannoitekäsittelyiden yhdysvaikutusta maaperän kosteus-, hiili- ja ravinnepitoisuuksiin Etelä-Suomen olosuhteissa. Lisäksi tutkittiin niiden vaikutusta puna-apila-timoteinurmen kasvilajisuhteisiin ja sadontuottokykyyn. Biohiilikoepelto sijaitsi Helsingin yliopiston opetus- ja tutkimustilalla Helsingissä, Viikissä. Osaruutukoe oli perustettu keväällä 2010, jolloin kuusi-mäntyhakeesta kuivatislattu biohiili oli levitetty maahan. Pääruudut olivat biohiilitaso 0 t/ha, 5 t/ha ja 10 t/ha. Osaruudut olivat lannoitustaso osuutena suositusten mukaisesta lannoitusmäärästä. Lannoitteena käytettiin puutarhan PK 3-5-20. Kasvukaudella 2014 kalium oli porrastettu tasolle 100 %, 75 % ja 50 %. Keväällä 2015 kaikki ravinteet annettiin kolmena eri tasona 100 %, 65 % ja 30 %.</p> <p>Neljä ja viisi vuotta sitten levitetty biohiili nosti maaperän hiilipitoisuutta ja laski johtolukua. Joinakin mittauskertoina biohiili pidatti kosteutta pintamaassa kuivana aikana ja tasasi maaperän kosteusolosuhteita. Biohiilellä ei ollut vaikutuksia nurmen satoon. Myöskään biohiilellä ja lannoitekäsittelyillä ei ollut yhdysvaikutusta satoon. Suurin lannoitekäsittely nosti nurmen satoa kasvukaudella 2015. Suositeltavaa on edelleen tutkia biohiilen pitkäaikaisvaikutuksia peltomaahan ja sadontuottoon, sillä vanhasta, monia vuosia sitten levitetystä biohiilestä ei ole julkaistuja tutkimuksia. Biohiiltä on oletettavasti turvallista käyttää pohjoisissa olosuhteissa hiilensidontaan torjumaan ilmastomuutosta.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords biohiili, ilmastomuutos, nurmi, puna-apila (<i>Trifolium pratense</i> L.), timotei (<i>Phleum pratense</i> L.), kalium, mineraalilannoite, maanparannusaine			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Ohjaajat: Priit Tammeorg, Juha Helenius, Mervi Seppänen			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Heidi Larissa Hovi			
Työn nimi — Arbetets titel — Title THE EFFECTS OF THE FOUR AND FIVE YEAR OLD BIOCHAR AND FERTILIZER ON FERTILITY OF THE SOIL AND RED-CLOVERGRASS IN FINLAND			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroecology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year March 2017	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 85 p.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>The aim of our society is to sequester carbon as much as we produce carbon dioxide. Agriculture should produce food to the growing population within the limits of Earth's capacity. The improvement of degraded agricultural land is the key. Grasslands are important ecosystems for sequestering carbon and fixing nitrogen to the soil as well as improving soil productivity. Biochar is being studied as a potential soil improver in arable farming and as a tool for carbon sequestration to the soil to slow down the climate change. Biochar is an organic, heterogeneous, solid substance which is generated in a pyrolysis under sustainable and clean technology. If applied to soils, it remains in the soil hundreds if not thousands of years. The effects of biochar in the soil and in plant growth are not well known because long-term studies have not yet been published in Finland nor elsewhere.</p> <p>The aim of the study was to study the effect of the four and five year old biochar amendment and the interaction of the fertilizer and the biochar on the moisture, nutrient and carbon content of the soil in Southern Finland. The productivity and community composition of the red clover grassland were also studied. The biochar experiment field was in Helsinki, Finland. The splitsplot experiment was established in the spring of 2010 when the spruce-pine-woodchip biochar was spread on the soil. In the experimental treatments different amounts of the fertilizer were used in different biochar amounts (0, 5, 10 t/ha). The fertilizer was PK 3-5-20. In the growing season of 2014 the potassium levels were 100, 75 and 50 %. In the growing season of 2015 the application rates were 100, 65 and 30 %.</p> <p>The four and five year old biochar amendment decreased soil electrical conductivity, increased soil carbon content and moisture content of the top soil but only one measuring time was significant. The biochar did not have any effect on the yield of the clover grass. The interaction of the fertilizer and the biochar did not have any effect on the yield either. The biggest amount of fertilizer did have a positive impact on the yield in the growing season of 2015. Long-term studies of biochar on arable soil are still to be recommended because there are not published studies on aging, old, biochar. On the basis of the results, woodchip biochar may be safe solution to be used in Nordic conditions in order to sequester carbon and to prevent climate change.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords biochar, climate change, grass, red clover (<i>Trifolium pratense</i> L.), timothy (<i>Phleum pratense</i> L.), mineral fertilizer, potassium, soil improvement			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors: Priit Tammeorg, Juha Helenius, Mervi Seppänen			

SISÄLLYS

LYHENTEET JA SYMBOLIT	5
1 JOHDANTO	6
2 BIOHIILEN VAIKUTUS NURMIKASVEIHIN.....	8
2.1 Seosnurmet	8
2.1.1 Nurmien tehtävä viljelykierrrossa	10
2.1.2 Ravinteiden vaikutus nurmen kasvuun ja laatuun	11
2.2 Biohiili	14
2.2.1 Biohiilen haitta-aineet ja turvallisuus	16
2.2.2 Eri lähtömateriaaleista valmistettu biohiili	18
2.2.3 Biohiili maanparannusaineena	22
2.2.4 Biohiilen vaikutus kasveille käyttökelpoiseen veteen	24
2.2.5 Biohiilen vaikutuksia kasvien sadontuottoon.....	26
2.2.6 Biohiili ilmastomuutoksen ehkäisyssä	27
2.3 Biohiilen ja lannoituksen vaikutuksia nurmikasvien kasvuun	30
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	33
4 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	34
4.1 Aineisto	34
4.2 Biohiili	35
4.3 Kenttäkoe.....	36
4.4 Mittaukset ja havainnot	38
4.5 Tilastollinen analyysi.....	41
5 TULOKSET.....	42
5.1 Maaperän kosteuspitoisuus	42
5.1.1 Biohiilen vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen	42
5.1.2 Lannoitekäsittelyiden vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen	44
5.2 Viljavuusanalyysi 2015.....	45
5.3 Maaperän kokonaishiili- ja typpipitoisuus	47
5.4 Sadontuotto.....	48
5.5 Biohiilen ja lannoitekäsittelyiden vaikutus kasvilajisuhteisiin	50
6 TULOSTEN TARKASTELU.....	52
6.1 Maaperän kosteuspitoisuus	52
6.1.1 Biohiilen vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen	52
6.1.2 Lannoitekäsittelyiden vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen	54
6.2 Maa-analyysi	55
6.3 Maaperän kokonaishiili- ja typpipitoisuus	57
6.4 Biohiilen vaikutus sadontuottoon	59
6.5 Lannoitekäsittelyiden vaikutus sadontuottoon	61
6.6 Biohiilen ja lannoitekäsittelyiden vaikutus kasvilajisuhteisiin	63
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	65
8 KIITOKSET	67
LÄHTEET	68
LIITE 1 KOEALUEEN KARTTA.....	85

LYHENTEET JA SYMBOLIT

ANOVA	Varianssianalyysi
a	Vuosi
BC	Biohiili
C	Hiili
C _{org} /OC	Orgaaninen hiili
CH ₄	Metaani
C/N	Hiili-typpisuhde
CO ₂	Hiilidioksidi
cv	Lajike
H/C _{org}	Molaarinen vety-hiilisuhde
ha	Hehtaari
Jl	Johtoluku
K	Kalium
ka	Kuiva-aine sekä myös Keskiarvo
L	Lannoite
LAI	Lehtialaindeksi/leaf area index
Nk	Kokonaistyyppi
N ₂ O	Dityppioksidi
O/C _{org}	Molaarinen happi-hiilisuhde
P	Fosfori
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt
PCB	Polyklooratut bifenyylit
SEM	Keskiarvon keskivirhe
SOC	Maaperän orgaaninen hiili
SPAD	Lehtivihreäpitoisuuden mittaust

1 JOHDANTO

Tulevaisuuden maatalouden tulee ottaa huomioon kestävä veden ja maan käyttö, monimuotoisuuden suojeleminen, kasvihuonekaasujen, jätteiden sekä saasteiden vähentäminen samaan aikaan kun tuottavuutta ja ruokavarojen jakaantumista tulee parantaa (Foley ym. 2011). Ihmisväestö tulee oletettavasti kasvamaan nykyisestä 7,5 miljardista (Worldometers 2017) yli 9 miljardiin ihmiseen vuoteen 2050 mennessä (FAO 2015b). Tämä tuo maatalouteen haasteen ruokkia ihmiset maapallon kantokyvyn rajoissa (Tilman ym. 2001). Foley ym. (2011) ehdottavat, että paras tapa lisätä maatalouden tuottavuutta on parantaa satoja alueilla, joilla sadot jäävät alle keskitason. Biohiilen laajamittainen käyttö voi tulevaisuudessa osaltaan lisätä ruokaturvaa parantamalla satoja (Jeffery ym. 2011, Artiola ym. 2012, Zhang ym. 2016) heikentyneillä maatalousmailla (Lehmann & Joseph 2009) ja näin vastata kasvavan väestön ravinnon tarpeeseen. Biohiilen käyttö maataloudessa voi mahdollisesti ehkäistä kasvihuonekaasupäästöjä (Cayuela ym. 2014, Zhang ym. 2016), lisätä maan hedelmällisyyttä (Mao ym. 2012, Lehmann & Joseph 2009), kestävästi veden (Saarnio ym. 2013, Sun & Lu 2014, Ulyett ym. 2014, Obia ym. 2016) ja maan käyttöä sekä parantaa ravinnetehokkuutta (Schmidt ym. 2015).

Suomen tavoite on olla hiilineutraali yhteiskunta vuoteen 2050 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2014). Hiilineutraalin kiertotalousyhteiskunnan tulisi tuottaa vain sen verran kasvihuonekaasuja, mitä hiilinielut voivat sitoa ilmakehästä (Mickwitz ym. 2014). Biohiili voi ehkäistä ilmastonmuutosta sitomalla hiiltä maahan (Schmidt ym. 2015). Biohiilen levitys maahan voisi vuosittain sitoa huomattavan osuuden 10 % (Lehmann & Joseph 2009) - 12 % nykyisistä ihmisen aiheuttamista CO₂ päästöistä (Woolf ym. 2010). Zimmerman ym. (2011) arvioivat hiilensidonnan potentiaalin vielä korkeammaksi, kun otetaan pitkällä aikavälillä huomioon biohiilen vaikutus maan orgaaniseen ainekseen sekä maaperän orgaanisen hiilen varastoituminen maahan. Biohiiltä tutkitaan maanparannusaineena, joka ei mineralisoidu nopeasti hiilidioksidiksi (EBC 2012). Se vähentää vapaan hiilidioksidin määrää ilmakehässä, koska se on vakaa, pitkäaikainen hiilivarasto maassa (International Biochar Initiative 2015). Biohiiltä syntyy hiilletettäessä orgaanista, kestävästi tuotettua ainesta korkeassa vähähappisessa lämpötilassa 350–1000 °C (EBC 2012). Se on heterogeenista ainesta, joka sisältää runsaasti aromaattista hiiltä ja kivennäisaineita.

Tieteellinen, laaja-alainen biohiilen tutkimus on lisääntynyt nopeasti ja julkaisujen määrä on jopa viisinkertaistunut viimeisen viiden vuoden aikana (International Biochar Initiative 2015). Biohiilen laaja-alainen käyttö vaatii tutkimusta biohiilen sopivista levitysmääristä sekä sen vaikutuksista maan hedelmällisyyteen eri ilmasto-olosuhteissa (Mao ym. 2012, Mia ym. 2014). Lisäksi tarvitaan pitkäaikaistutkimusta ikääntyvän biohiilen ilmasto- ja maaperä vaikutuksien ymmärtämiseksi (Jeffery ym. 2011, Lone ym. 2015, Tammeorg 2014). Biohiiltä on tutkittu eniten trooppisissa olosuhteissa, jotka eroavat huomattavasti pohjolan maaperä- ja ilmasto-oloista.

Biohiilen vaikutusta nurmen kasvuun ei ole tiettävästi tutkittu muualla Suomessa. Nurmilla on suuri taloudellinen ja ekologinen merkitys niin globaalisti kuin Suomenkin elintarviketuotannossa (Hyrkäs & Virkajärvi 2012). Suomen maatalousmaasta noin 30 % on nurmia, mikä on tärkeä työllistävä tekijä suomalaisessa elintarviketuotannossa (n. 40 % työpaikoista) (MTT 2014). Palkokasvit vaikuttavat positiivisesti maan rakenteeseen ja hiilivaroihin. Näiden käyttö vähentää synteettisesti valmistetun väkilannoitetyypin käyttöä, fossiilista energian kulutusta, erilaisia typpihävikkejä sekä synteettisesti valmistetun typpilannoitteen valmistuksen kasvihuonekaasupäästöjä (Känkänen ym. 2012). Nurmet myös mahdollistavat Suomelle tärkeän naudanlihan ja maidontuotannon. Tutkimuskasveiksi valittiin Suomessa yleinen monivuotinen nurmiheinäkasvi timotei (Hyrkäs & Virkajärvi 2012) ja yleisin palkokasvi puna-apila (Stoddard ym. 2009).

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää biohiilen mahdollisia vaikutuksia nurmen kasvuun Etelä-Suomen olosuhteissa neljä ja viisi vuotta biohiililevityksen jälkeen. Tutkimus tehtiin Helsingin yliopiston koepellolla Viikissä osana laajempaa vuonna 2010 perustettua biohiilikoetta. Biohiilestä voitiin tutkia 5. ja 6. kasvukauden vaikutuksia pohjoisissa olosuhteissa. Tässä tutkimuksessa tutkittiin biohiilen vaikutuksia 2-vuotisen puna-apila-timoteinurmen kasvuun eri lannoitekäsittelyillä. Kenttäkokeessa tutkittiin, vaikuttavatko biohiilitasot 0 – 10 t/ha maaperän kosteus-, ravinne- ja hiilipitoisuuteen, kasvuston lehtivihreäpitoisuuteen, lehtialaindeksiin, sadontuottokykyyn sekä kasvilajisuhteisiin. Lisäksi tutkittiin biohiilen ja lannoitekäsittelyiden yhdysvaikutusta. Aikaisempien tutkimusten perusteella voitiin olettaa, että biohiilellä ei ole kovin suurta vaikutusta kasvien kasvuun ja maan kasvukuntoon suhteellisen viljavassa, hiiltä sisältävässä sekä hyväravinteisessa maassa. Biohiiltä hiilensidontaan ja ilmastomuutoksen torjuntaan käytettäessä tärkeää on myös tutkia, ettei biohiilellä ole maan kasvukuntoa heikentäviä vaikutuksia.

2 BIOHIILEN VAIKUTUS NURMIKASVEIHIN

2.1 Seosnurmet

Nurmet ovat maailmanlaajuisesti tärkeitä maataloudelle ja ympäristölle (FAO 2010). Ne tuottavat tarpeellisia tuotteita kuten lihaa, maitoa, villaa, nahkoja, mutta myös ekosysteemipalveluita kuten puhdasta vettä, happea, hiilen- ja typensidontaa (Li ym. 2011, FAO 2015a). Nurmet vähentävät ilmastonmuutosta (Li ym. 2011), parantavat maaperän rakennetta ja ekosysteemin terveyttä lisäämällä resilienssiä, biologista monimuotoisuutta (Power & Stout 2011) sekä veden kiertoa. Samaan aikaan ne palvelevat maatalouden tuottavuutta ja taloudellista kasvua (FAO 2010). Foley ym. (2011) toteavat, että noin neljäsosa maapallon pinta-alasta on laitumia. Rehun tuotantoon menee noin kolmasosa maailman peltomaa-alasta (FAO 2015a). Kaikki peltomaa ei sovellu yhtä hyvin ruoantuotantoon. Tällaisilla mailla nurmentuotanto on hyvä vaihtoehto, sillä nurmi parantaa maata ja tuottaa ravintoa laiduneläimille (Foley ym. 2011). Nurmikasvit myös suojelevat maata vesi- ja tuulieroosiolta sekä tukevat maaperän biologista aktiivisuutta kuten orgaanisen aineen hajoamista (FAO 2015a).

Seosnurmissa on usein apilaa heinien kanssa, mikä parantaa nurmen viljelyvarmuutta (Hakala ym. 2007). Apila on tärkeä nurmipalkokasvi, sillä se sitoo tyypeä juurinysträbakteerien avulla (Hakala ym. 2007). Typensidonnassa apila käyttää fotosynteesissä sidottua hiiltä, kun taas typpilannoitteen valmistus tuottaa kasvihuonekaasuja (Ledgard ym. 2009). Apila on viljelyvarma sekä maaperää hoitava kasvi (Hakala ym. 2007). Kukkiva apila on hyödyksi myös pölyttäjille varsinkin mehiläisille (Power & Stout 2011). Apilan osuus nurmikasvustossa on tärkeä, jotta typensidontaa tapahtuu riittävästi seuraavalle kasville (Hakala ym. 2007, Ledgard ym. 2009). Kuiva-ainesadon suositeltava apilapitoisuus on 40 – 50 % (Hakala ym. 2007). Liian korkealla rehun apilapitoisuudella saattaa olla karjan puhaltumisriski (Nykänen ym. 2000) ja riski kasvaa seoksen apilapitoisuuden ylittäessä 30 % (Rajala 2006 s. 408). Rajalan (2006) mukaan säilörehuruokinnassa puhaltuminen on kuitenkin harvinaista.

Suomen kylmät talviolosuhteet rajoittavat käytettäviä nurmikasvilajeja, vaikkakin ilmasto sopii muuten hyvin monivuotisille heinä- ja apilakasveille pitkänpäivän, lämpötilan ja kevään runsaan kosteuden vuoksi (Virkajärvi ym. 2015). Talvenkestävää puna-apilaa on käytetty Suomessa laajalti nurmiseoksissa (Nykänen ym. 2000) ja se on

tärkein nurmipalkokasvi (Virkajärvi ym. 2015). Onnistuessaan se on satoisa (Nykänen ym. 2000) ja sen sulavuus on nurmiheinien luokkaa (Dewhurst ym. 2009). Puna-apilaa käytetään varsinkin luonnonmukaisilla maitokarjatililla typensidonnan vuoksi. Se sitoo n. 40 - 100 kg/ha/N/a (Niskanen & Huhta 2008). Puna-apila viihtyy vettä läpäisevässä ja hyvin tuulettuvassa maassa, sillä silloin sen juuret ja typpibakteerinytyt pystyvät kehittymään parhaiten (Mela 2004). Puna-apila lisää rehun aminohappokoostumusta heinäpitoiseen rehuun verrattuna. Kuitenkin puhtaan puna-apilarehun raakavalkuaispitoisuus saattaa nousta turhan suureksi ja rehuvalkuaisen hyväksikäyttö huonontua (Vanhatalo ym. 2006). Nurmiseoksessa puna-apila lisää monityydyttymättömien rasvahappojen pitoisuutta (Mustonen ym. 2015) ja säilörehun maittavuutta, mikä johtuu puna-apilan nopeasta liikkuvuudesta pötsin läpi (Dewhurst ym. 2009). Puna-apilasäilörehu lisää lypsylehmien kasvua (Dewhurst ym. 2009), maidontuotantoa ja maidon isoflavonoidien eli kasviestrogeenien pitoisuuksia (Mustonen 2015) sekä vähentää metaanin tuotantoa (Dewhurst ym. 2009) verrattuna puhtaaseen nurmiheinärehuun. Toisaalta puna-apila myös lisää typen määrää virtsassa (Dewhurst ym. 2009). Paljon puna-apilaa sisältävällä säilörehuruokinnalla maidon rasvahappokoostumus paranee (Mustonen 2015).

Suomessa luonnonmukaisessa maataloudessa puna-apila-timoteinurmet ovat yleisin tapa sitoa tyyppiä ravinnekiertoon (Nykänen ym. 2000). Heinät ehkäisevät apilan tauteja ja sitovat talteen vapaana olevat ravinteet. Nurmiheinistä timotei on paras seoksissa puna-apilan kanssa ja se antaa parhaiten tilaa apilalle (Hakala ym. 2007). Lisäksi timotein kasvurytmi sopii apilalle (Sipilä & Nykänen 2006). Pietolan & Tannin (2000) kokeiden mukaan nuoren timotein juuristo kehittyy varhain, huhtikuun lopulla, kun taas nuoren apilan juuristo kasvaa hitaasti voimistuen vasta kesä-heinäkuussa. Timotei on Suomen tärkein, maittavin, hyvin talvea ja happamuutta kestävä nurmiheinälaji (Niskanen & Sihto 2008). Timotei kehittyy kylvövuonna hitaasti, mutta toisena vuotena sen kehitys on nopeaa (Niskanen & Sihto 2008). Puna-apila-timoteinurmen ensimmäisen ja toisen sadon kehitykseen sekä määrään vaikuttaa lämpösumma (Sipiläinen & Ovaska 2012). Toisen sadon määrään ja kasvunopeuteen vaikuttaa mm. lehtiala, hiilihydraattivarastot (Virkajärvi 2003) ja kuivuus niiton jälkeen (Sipiläinen & Ovaska 2012).

2.1.1 Nurmien tehtävä viljelykierrossa

Nurmet ovat tärkeitä viljelykierron ekologisuuden kannalta (Ledgard ym. 2009). Nurmien lisääminen viljelykiertoon voi lisätä maaperän orgaanista ainesta (Cloy ym. 2015, Shrestha ym. 2015) sekä varastoida hiiltä maaperään (Vertés ym. 2007). Viljelykierrossa palkokasvinurmilla ylläpidetään maaperän viljavuutta (Evira 2015), sillä palkokasvit lisäävät humusta ja sitovat hiiltä maaperään (Pikula & Rutkowska 2014). Apilaseosnurmesta voi jäädä juurimassaa maahan n. 7 t ka/ha ja apilan juuret voivat ulottua 1,2 – 1,5 m syvyyteen (Rajala 2012), mikä mm. lisää maan biologista aktiivisuutta (McDaniel & Grandy 2016). Viljelykierrossa nurmet sitovat biologisesti typpeä, parantavat maan rakennetta ja lisäävät multavuutta (Rajala 2012). Hyvin kasvava, tiheäkasvuinen nurmi vähentää ravinteiden ja kiintoaineksen huuhtoutumista ympäristöön (Jokela & Valtonen 2013). Lisäksi kahdesti kasvukaudenaikana niitettävä nurmi ehkäisee joitain juuri- ja siemenrikkakasveja.

Viljelykierron pituus nurmenviljelyssä on usein 3 – 4 vuotta (Puurunen 2002). Roudattomissa maissa nurmet voivat säilyä tuottokykyisinä vuosia, mutta Suomessa vanhoista nurmista saadaan helposti huonoa satoa (Puurunen 2002). Viljelykierrossa viherlannoitusnurmi perustetaan kasvukauden alussa tai edellisenä kasvukautena suojaviljaan tai muuhun suojakasviin (MMM 2014). Viherlannoitusnurmet ovat mukana ympäristökorvausjärjestelmässä, jolloin nurmissa tulee olla vähintään 20 prosenttia typpeä maahan sitovaa kasvia (Kässi & Niskanen 2014). Viherlannoitusnurmen voi lopettaa syksyllä ennen syysviljan tai syysöljykasvin kylvöä. Mikäli tuleva viljelykasvi kylvetään vasta keväällä, voi viherlannoitusnurmen lopettaa aikaisintaan syyskuun alussa ja muokata aikaisintaan lokakuun alussa (MMM 2014). Viherlannoitusnurmea pidetään samalla lohkolla yhdestä kolmeen kasvukautta (MMM 2014). Luonnonmukaisen tuotannon ehdoissa viljelykierron tulee sisältää palkokasveja. Niitä tulee olla minimissään 30 prosenttia viljelykierrosta (Evira 2015). Maa- ja metsätalousministeriön (2014) kehittämissuunnitelman mukaan nurmen käytöllä viljelykierrossa pyritään edistämään mm. maatalouslajien monimuotoisuutta sekä ehkäisemään ravinnehuuhtoumia. Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmassa 2014 – 2020 voi tilan peltokierrossa olla ympäristö-, suojavyöhyke-, luonnonhoitopelto-, viherlannoitus-, laidun- ja rehunurmia sekä pysyviä nurmia. Lannoittamattomia ja kasvinsuojeluaineilla käsittelemättömiä luonnonhoitopeltonurmia on säilytettävä vähintään kaksi vuotta ja niiden osuus tilan peltoalasta saa olla suurimmillaan 25 % (MMM 2014).

Kasvillisuus suojaa maaperän terveyttä laidunmailla ja laidunkierto sekä nurmisoos ylläpitävät maaperän toimintaa (FAO 2015a). Vilja-rehu-kierrossa nurmi lisäsi maaperän eliöyhteisön runsautta (Crotty ym. 2016). Apilanurmen lisääminen karjattoman viljelytilan kiertoon on lisännyt satokasvin typen saatavuutta (Brozyna ym. 2013). Puna-apilan ja viljan lisääminen viljelykiertoon on vähentänyt eroosiota ja typen huuhtoutumista verrattuna yksinkertaisempaan kiertoon (Liebman ym. 2015). Apilanurmilla lannoitus ja laidunnus yhdessä voivat aiheuttaa huuhtoutumista, mutta jättämällä joko lannoituksen tai kokoaikaisen laidunnuksen pois huuhtoutuminen voi vähentyä huomattavasti (Eriksen ym. 2015). Lisäksi viljelykierron nurmialueiden, varsinkin kesantopeltojen, nurmibiomassaa voi hyödyntää bioenergian kuten biokaasun tuottamiseen (Pahkala & Lötjönen 2015). Kesantonurmet voivat myös lisätä lajien kuten perhosten ja kimalaisten monimuotoisuutta (Toivonen ym. 2016).

2.1.2 Ravinteiden vaikutus nurmen kasvuun ja laatuun

Tärkein nurmen kasvuun vaikuttava ravinne on typpi (Barnes ym. 2003). Kuitenkaan tyypilannoituksen ei ole huomattu paljonkaan hyödyttävän palkokasvien satoa tai laatua. Tyypilannoituksesta ollaan oltu kiinnostuneista sen palkokasvien proteiinipitoisuutta lisäävän vaikutuksen takia (Mays 1974 s. 160). Typellä on vaikutusta myös apilan määrään nurmikasvustossa (Hakala ym. 2007), sillä apila ei pidä ammoniumtypestä ja nurmen lannoituksen viivästäminen suosii apilaa (Mustonen 2013). Palkokasvit hyödyntävät epäorgaanista typpeä ja sitovat sitä juurinysträbakteerien avulla maaperään (Barnes ym. 2003). Sopiva typen määrä 25 – 50 % apila-nurmelle on 30 – 60 kg/ha (Niskanen & Huhta 2008). Hyvin kasvava nurmi ei vaadi lisätyppeä (Niskanen & Huhta 2008). Lannoitetypen korvaaminen biologisella typensidonnalla vähentää N₂O päästöjä (Li ym. 2011) sekä nitraatin huuhtoutumista vesistöihin (Barnes ym. 2003).

Kalium on toiseksi tärkein ravinne nurmien tuotannossa typen jälkeen ja sen tarve kasvissa kasvaa typpipitoisuuden kasvaessa (Virkejärvi ym. 2014). Kalium aktivoi entsyymitoimintaa sekä monia fysiologisia reaktioita kasvissa (Snyder & Leep 2007 s. 368). Sillä on tärkeä tehtävä fotosynteesissä ja se aktivoi ATP tuotannon entsyymejä. Lisäksi kaliumia tarvitaan kaikissa nurmikasvien proteiinisynteesin tärkeissä vaiheissa (Snyder & Leep 2007 s. 368). Kaliumilla on tärkeä tehtävä kasvin osmoottisen potentiaalilin säätelyssä, ilmarakojen toiminnassa ja transpiraatioissa (Virkejärvi ym.

2014). Kaliumin puutteesta kärsivä kasvi ei pysty sulkemaan kunnolla ilmarakojaan, joten se kärsii päiväkuivumisesta (Virkajärvi ym. 2014). Kalium vaikuttaa sadontuoton lisäksi nurmien ravitsemukselliseen laatuun (Snyder & Leep 2007 s. 368). Se säätelee eläimen elimistön osmoottista sekä happo-emästasapainoa (Virkajärvi ym. 2014). Lisäksi kalium on tärkeä hermoston toimintaan ja energia-aineenvaihduntaan vaikuttava ravinne. Liika kaliumpitoisuus on haitallista eläimen metabolialle ja kivennäisaineiden imeytymiselle (Virkajärvi ym. 2014).

Nurmisadon korjuun jälkeen kasvi tarvitsee kaliumia vegetatiiviseen kasvuun (Virkajärvi ym. 2014). Nurmet hyödyntävät kaliumia tehokkaasti. Kationienoton tehokkuuteen vaikuttaa yksisirkkaisten kasvien pienempi juurten kationinvaihtokapasiteetti verrattuna kaksisirkkaisiin kasveihin. Pieni juuren kationinvaihtokapasiteetti vaikuttaa kasvin yksiarvoisten kationien kuten kaliumin tehokkaaseen ottoon. Nurmisadon mukana kaliumia poistuu 50 – 400 kg/ha kasvukaudessa. Niittojen lisäksi nurmien kaliumtarvetta lisää palkokasvien korkea valkuaispitoisuus (Virkajärvi ym. 2014). Saarelan ym. (1998) mukaan nurmien kaliumtarve vaihtelee 100 – 200 kg/ha/a. Virkajärvi ym. (2014) suosittavat kaliumlannoitusta, joka perustuisi maan reservikaliummääritykseen. Heikon kaliumtilan mailla tämä tarkoittaa lannoitusmäärän lisäystä ja vastaavasti korkean tilan mailla lannoitusta tulisi vähentää. Ensimmäisenä nurmivuotena kaliumlannoituksen yläraja heikoilla kaliummailla olisi 100 – 120 kg K/ha/a ja korkeilla satotasoilla 220 – 240 kg K/ha/a. Saarela ym. (1998) ovat todenneet kaliumin riittävän savimailla täyteen nurmien kasvuun useiksi vuosiksi ilman lannoitusta, sillä savimailla reservikaliumin pitoisuus on yleensä korkea (Saarela 2001, Saarela & Mäntylähti 2002). Kuitenkin heikentynyttä kasvua ja kaliumin puutetta voi ilmentyä myös savimailla, mikä johtuu hitaasta kaliumin otosta keväällä tai niiton jälkeen (Virkajärvi ym. 2014). Lisäksi kuivuus voi aiheuttaa kaliumin puutetta, koska kuivuus häiritsee juurien kasvua ja kaliumin kulkeutumista juuriin (Saarela ym. 1998 s. 22, 38). Khan ym. (2013) totesivat, että teollisen maatalouden jokavuotinen intensiivinen kaliumlannoittaminen sadon laadun, määrän ja pitkäaikaisen maan tuotantokyvyn ylläpitämiseksi voidaan kyseenalaistaa. Kaliumin kierto satojätteiden kautta, maaperän reservikalium ja suositeltava luonnollisen kaliumin hyödyntäminen tulisi ottaa huomioon (Virkajärvi ym. 2012, Khan ym. 2013). Nurmet voivat syvän juuristonsa ansiosta hyödyntää pintamaan kaliumin lisäksi myös pohjamaan kaliumvaroja (Virkajärvi ym. 2014).

Fosforilla on vaikutusta palkokasvien kasvuun ja typensidontaan (Barnes ym. 2003). Apiloilla on korkeampi fosforin tarve kuin heinillä (Ledgard ym. 2009). Heinillä on laaja juuristo ja ne pystyvät kilpailemaan palkokasveja paremmin alhaisista fosforitasoista maassa (Barnes ym. 2003). Apilanurmia lannoitetaan heinänurmia enemmän, koska niillä on suurempi fosforin tarve. Tällöin apilanurmilla fosforin suurempi konsentraatio maassa lisää sen huuhtoutumisriskiä veteen verrattuna heinänurmiin (Ledgard ym. 2009).

Rikki lisää palkokasvien typpi- ja proteiinipitoisuutta sekä satoa (Mays 1974 s. 161). Molybdeenä palkokasvit tarvitsevat myös typensidonnassa sekä proteiinien muodostuksessa. Sen puutosta esiintyy happamilla mailla (Mays 1974 s. 166). Koboltti, boori, kupari ja sopiva typpimäärä vaikuttavat positiivisesti puna-apilan talvenkestävyyteen (Niskanen & Huhta 2008). Boorin puutokset saattavat olla liitoksissa veden saatavuuden kanssa ja sen saatavuudelle on tärkeää maaperän rakenne, orgaaninen aines sekä happamuus. Lisäksi boorin puutos voi heikentää nurmen satoikää ja aiheuttaa lehtien vähenemistä (Mays 1974 s. 165). Nurmien kautta tuotantoeläimet saavat valtaosan tarvitsemistaan hivenaineista kuten kobolttia, kuparia, rautaa, mangaania, sinkkiä, molybdeenä ja nikkeliä (Suttle 2010 s. 14). Aikaisella rehunurmen korjuulla on positiivisia vaikutuksia rehun energia-, proteiini- ja mikroravinnemääriin. Mikroravinnemääriin vaikuttaa varsinkin timoteinurmien aikainen korjuu (Lindström ym. 2013). Myös puna-apilan ravitsemuksellinen laatu on parempi aikaisemmassa korjuussa (Rinne & Nykänen 2000). Apilalle tärkeä hivenravinne on rauta (Hakala ym. 2007). Lisäksi palkokasvien tiedetään hyödyntävän tehokkaasti magnesiumia (Mays 1974 s. 164). Apilalla on erittäin harvinaista sinkin, mangaanin ja kuparin puutos. Kuparin puutosta saattaa kuitenkin esiintyä turve- ja hiekkamailla (Mays 1974 s. 166).

Yksi tärkeimmistä tekijöistä nurmentuotannossa on maan pH. Se vaikuttaa mm. ravinteiden liukoisuuteen, biologiseen typensidontaan, mururakenteeseen, maaperämikrobeihin ja lieroihin (Barnes ym. 2003). pH:n ollessa 6,4 – 6,8 puna-apilan kasvu on suurinta ja tautien esiintyminen on vähäistä (Mela 2004). Juurinystyräbakteerien typensidonta huononee pH:n laskiessa alle 5,5. Apilalle tärkeät ravinteet ovat liukoisia pH:n ollessa 6 – 7 (Hakala ym. 2007). Typen, fosforin, mangaanin ja molybdeenin otto vähenee alhaisessa pH:ssa (Mela 2004). Raudan saatavuuden kannalta pH:n tulisi olla alle 6. Apilalle suositeltavin pH on 5,7 – 5,9 (Hakala ym. 2007).

2.2 Biohiili

Biohiili on hiilirikas aines, jonka raaka-aineena on käytetty mm. puuta, rehua, (Egamberdieva ym. 2016) lantaa (Cao ym. 2016), jätevesilietettä (Hossain ym. 2010) ja lehtiä (Wang ym. 2014). Biohiiltä valmistetaan pyrolyysillä, hapettomalla kuumennuksella tai vähähappisessa tilassa ≤ 700 °C (Lehmann & Joseph 2009). Raaka-aineeksi sopii mikä tahansa eloperäinen materiaali. Biohiilestä ja pyrolysoinnista etsitään ratkaisuja ilmastonmuutoksen torjumiseen (Mohammadi ym. 2016) CO₂ nieluna (Wang ym. 2016), maan parannusaineeksi (Van Zwieten ym. 2010, Tammeorg 2014, Coumaravel ym. 2015), energiantuotantoon (Roberts ym. 2010, Tiilikkala ym. 2013), jätevedenpuhdistukseen (Inyang & Dickensen 2015), jätehuoltoon (Das ym. 2016) sekä tukemaan ravinteiden kiertoa ja maaperäeliöiden runsautta (Lehmann ym. 2011). Biohiili on kiinteää (Tammeorg 2014), huokoista ainesta (Ulyett ym. 2014), joka ei mineralisoidu nopeasti (EBC 2012). Hiili voi sitoutua biohiileen hyvin pitkäksi ajaksi, sadoiksi jopa tuhansiksi vuosiksi (Kuzyakov ym. 2014). Biohiilen valmistuksen sivutuotteina syntyviä kaasuja voidaan käyttää polttoaineena (Sihvonen 2013) ja nesteitä voitaisiin myös tuotteistaa (Tiilikkala ym. 2013). Biohiiltä on tehty monista erilaisista lähtöaineista erilaisin tuotantoprosessein, mikä tulee ottaa huomioon biohiiliä vertailtaessa.

Euroopan biohiilisertifikaatti 2012 takaa kestävän tuotannon ja positiivisen hiilijalanjäljen. Sertifikaatin ovat kehittäneet tutkijat varmistamaan biohiilen energiatehokkuuden ja laadun. Sertifikaatti edellyttää tarkkojen laatuvaatimusten noudattamista. Sen mukaan biohiilen valmistuksessa lähtömateriaalina saa käyttää vain orgaanista listattua ainesta, materiaalin hiilipitoisuuden tulee olla yli 50 % kuivapainosta, molaarinen vety-hiilisuhde (H/C_{org}) tulee olla vähemmän kuin 0,7 ja molaarinen happi-hiilisuhde (O/C_{org}) suhde vähemmän kuin 0,4. Molaarinen H/C_{org} suhde kuvaa biohiilen karbonisointiastetta ja biohiilen vakautta. Se on yksi tärkeimmistä biohiiltä kuvaavista tekijöistä. Lisäksi molaarinen O/C_{org} suhde osoittaa biohiilen eroja verrattuna muihin karbonisoituihin tuotteisiin. Myös pH, tilavuuspaino, ominaispaino, vesi- sekä tuhkapitoisuus tulee määrittää biohiilestä. Pyrolyysi tulee toteuttaa kestävästi ohjeiden mukaan (EBC 2012).

Nykyinen biohiilen käyttö ottaa mallia hyvin vanhasta puuhiilen, syden, käytöstä (Lehmann & Joseph 2009). Amazonasien hedelmällisellä tumman maan alueella, terra preta -mailla, rikastettiin maata yli 800 vuotta sitten hiilellä. Terra preta -maissa hiili

esiintyy kuuden hiilen muodostamina aromaattisina renkaina, COO^- ryhminä, mikä nostaa maan kationinvaihtokapasiteettia ja lisää kasviraavinteiden pidättymistä maahan. Myös erittäin tuottavat multamaannosmaat Yhdysvalloissa sisältävät rakenteellisesti samankaltaista hiiltä kuin terra preta -maat. Multamaannosmaiden hiili on peräisin tulipaloista (Mao ym. 2012). Myös Suomessa on valmistettu koivusta puuhiiltä eli sysiä (Energia Suomessa 2004). Puuhiilen valmistuksessa hiilijalanjälki on usein suuri, sillä hiili vapautetaan toksisina päästöinä ilmaan (EBC 2012). Pyrolyysikaasut pitää ottaa talteen tai polttaa. Ne eivät saa karata ilmakehään.

Suomessa palavaa materiaalia kydöettiin nurmiturpeiden alla vähähappisessa tilassa (Energia Suomessa 2004). Kytö-menetelmässä pellolla kuivatettua pintamaata kuokittiin hitaasti palavan puun, risukon, turpeen tai muun palavan materiaalin päälle (Ahokas 2012). Esihistoriallinen kydön poltto Suomessa vähensi siemenpankkia maassa ja tuhka lisäsi maan hedelmällisyyttä sekä nosti maan pH:ta.

Biohiilestä ollaan kiinnostuneita nyt, koska se mahdollistaa hiilen varastoimista maaperään ja torjuu ilmastonmuutosta (Wang ym. 2016). Hiilellä on hyviä vaikutuksia tuotantoon ja ympäristöön (Joonas ym. 2012). Kuitenkin biohiilen laaja-alaista käyttöä esti pitkään heikko kaupallinen saatavuus sekä jätelaki (Jones ym. 2012, Tiilikkala ym. 2013). Suomessa on kokeiltu puu- (Karhu ym. 2011, Tammeorg 2014), kuivikelanta-, olki- ja hampupohjaisia (Tiilikkala ym. 2013) biohiiliä. Vuonna 2013 Evira hyväksyi tyyppinimen Kasvipiperäinen kasvualustahiili (3A3) maan rakennetta parantaviin aineisiin, mikä on edistänyt ensimmäisten biohiilituotteiden pääsyä markkinoille (Tiilikkala ym. 2013, Venelampi 2013). Vuonna 2016 Suomessa oli markkinoilla bio- ja puuhiilituotteita mm. Biolanin istutusmulta, EcoKoivu komposti/kate- ja maanparannushiili sekä Biohiili Original puutarhan maanparannustuote (Biolan 2016, Charcoal Finland Oy 2016, RPK Hiili Oy 2016). Biohiilen teollisuuden laajenemista ehkäisevät kuluttajien tietämättömyys sekä teknologian ja rahoituksen rajoitteet (International Biochar Initiative 2015). Ruokajätteestä valmistettu biohiili on tutkimuksissa osoittautunut erittäin pääravinnerikkaaksi materiaaliksi (P 2,0 %, K 2,3 %, Ca 9,2 %, Mg 0,4 %), mistä johtuen se voisi soveltua hyvin lannoitteeksi sekä teolliseksi tuotteeksi (Buss ym. 2016). Sidosryhmien, maanviljelijöistä tarkastajiin, koulutus on tärkeää, jotta teollisuus kasvaisi. Toisaalta biohiilen lisäämää sadontuoton arvoa ei pystytä vielä arvioimaan (International Biochar Initiative 2015). Lisäksi kustannustehokkaiden biohiililähteiden kehittäminen on edelleen tärkeää (Asai ym. 2009).

2.2.1 Biohiilen haitta-aineet ja turvallisuus

Biohiilisertifikaatin (2012) mukaan polykloorattujen bifenyyliden eli PCB-yhdisteiden ja raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot eivät saa ylittyä biohiilessä. Sertifikaatin mukaan haitta-aineiden raja-arvot ovat PAH-pitoisuus < 12 mg/kg, PCB-pitoisuus < 0,2 mg/kg, dioksiini- ja furaanipitoisuus < 20 ng/kg kuiva-aineessa biohiiltä. Biohiilen raja-arvot raskasmetallipitoisuuksissa Saksan standardien mukaan ovat taulukossa 1. Tuhkan lannoitekäyttöä ohjaavassa lainsäädännössä Suomessa tuhka saa sisältää enintään kuiva-aineesta arseenia 25, elohopeaa 1,0, kadmiumia 2,5, kromia 300, kuparia 600, lyijyä 100, nikkeliä 100 ja sinkkiä 1500 mg/kg (Evira 2012).

Buss ym. (2016) tutkivat eri lähtömateriaaleista ja eri lämpötiloissa pyrolysoitujen biohiilien soveltuvuutta maanparannuskäyttöön huomioiden biohiilen ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet. Heidän tutkimuksensa mukaan arseeni-, kupari-, lyijy- ja elohopeapitoisuudet eivät ylittäneet raja-arvoja biohiilissä. Tyypillisissä pyrolyysilämpötiloissa arseeni-, alumiini- ja sinkkipitoisuudet vähenivät biohiilissä lähtömateriaalien pitoisuuksiin verrattuna. Alumiinipitoisuus väheni keskimäärin 35 % kaikissa biohiilissä. Sinkkipitoisuus väheni 37,5 % biohiilissä, jotka tuotettiin yli 700 °C lämpötilassa. Sen sijaan korkeissa lämpötiloissa pyrolysoituilla biohiilillä oli korkein kuparipitoisuus (Buss ym. 2016).

Sinkki ja kadmium voivat tulla ongelmaksi (Evangelou ym. 2014, Buss y. 2016), sillä niiden raja-arvot voivat ylittyä biohiilessä (taulukko 1), jos lähtömateriaali on esimerkiksi kontaminoitunut näillä aineilla. Kadmiumpitoisuudet ylittivät raja-arvot monissa tutkituissa biohiilissä (Buss ym. 2016), vaikka kadmium saattaa haihtua pyrolyysinesteestä kaasuna varsinkin korkeissa lämpötiloissa (700 °C) (Evangelou ym. 2014). Sen sijaan kromi (82,8 %), rauta (207,2 %) ja nikkeli (226,0 %) lisääntyivät pyrolyysissä, mikä kertoo rautakontaminaatiosta pyrolyysiprosessissa (Buss ym. 2016). Tämä voidaan välttää pyrolyysilaitekehittelyllä (Buss ym. 2016).

Taulukko 1. Euroopan biohiilisertifikaatin (2012) asettamat raskasmetallien raja-arvot peruslaatuissa biohiilessä ja keskiarvoja eri lähdemateriaaleista valmistetuissa biohiilissä (mukaillen Buss ym. 2016).

Biohiilen materiaali	As mg/kg	Cd mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Hg mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
Purkupuu	< 0,72	< 0,04	0,27	15,96	10,36	< 0,23	1,69	35,25	40,29
Jättiruoko	< 0,72	0,05	< 0,08	< 0,49	1,58	< 0,23	0,47	< 0,74	11,87
Sokeriruokojäte	< 0,72	< 0,04	0,37	4,28	2,14	< 0,23	3,26	19,37	8,19
Vesihyasintti	1,63	1,24	9,81	173,62	105,57	< 0,23	88,81	100,86	262,06
Vehnän olki	< 0,72	< 0,04	0,35	14,36	2,17	< 0,23	1,41	< 0,74	2,65
Pajun runko	< 0,72	11,46	0,09	< 0,49	6,91	< 0,23	0,36	16,27	513,64
Punapaju	< 0,72	48,86	0,57	0,83	8,14	< 0,23	0,78	20,71	629,87
Ruokajäte	< 0,72	< 0,04	0,49	6,34	14,38	< 0,23	10,21	15,12	56,41
Biohiili-sertifikaatti		< 1,5		90	< 100	< 1	< 50	< 150	400

Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet) ovat hiilyhdisteitä, joita syntyy mm. pyrolyysissä. Biohiili sisältää näitä orgaanisia saasteita. Nämä epäpuhtaudet ovat karsinogeenisiä ja mutageenisiä. Ne aiheuttavat merkittävän ympäristöllisen riskin julkiselle terveydelle (Quilliam ym. 2012). Biohiilen hajoamistuotteet (polyaromaattiset hiilivedyt) saattavat muuttaa maaperän mikrobiyhteisön rakennetta (Liu ym. 2015). Moderni pyrolyysitekniikka tuottaa myös alhaisia PCB-yhdiste-, dioksiini- ja furaanipitoisuuksia. Dioksiinipitoisuus biohiilessä on riippuvainen valmistusmateriaalin klooripitoisuudesta (EBC 2012). PCB-yhdisteet voivat haitata biohajoamista maaperässä ja ovat riski maaperäeläille. Biohiili on kuitenkin myös vähentänyt PCB-yhdisteiden kertymistä lieroihin ja biohiilen molaarinen happi-hiilisuhde (O/C_{org}) korreloi yhdisteiden kertymisen kanssa (Wang ym. 2015).

Pyrolyysin lämpötila ja kesto sekä biohiilen lähtömateriaali vaikuttavat PAH-yhdisteiden määrään (Hale ym. 2012). Mukherjee & Lalin (2014) mukaan korkeassa lämpötilassa hilleetty biohiili saattaa vähentää kaasumaisten ja PAH-yhdisteiden poistumista maaperästä. Hale ym. (2012) totesivat PAH-yhdisteiden pitoisuuden biohiilissä vähenevän pyrolyysin keston ja lämpötilan lisääntyessä. Quilliamin ym. (2012) selvityksen mukaan hiekkasavimaa, johon oli lisätty kolme vuotta aikaisemmin 50 t/ha puubihiiltä sisälsi merkittävästi enemmän PAH-yhdisteitä verrattuna biohiilettömään

kontrollimaahan. Biohiili vähensi kuitenkin PAH mineralisaatiota, mutta ei vähentänyt PAH-yhdisteiden huuhtoutumista (Quilliam ym. 2012). Lisäksi korkea humifikaatio ja hiilipitoisuus biohiilissä vaikuttavat PAH-yhdisteiden pidättymiseen (Tang ym. 2016). Wiedner ym. 2013 totesivat biohiilen PAH yhdistepitoisuuksien pysyvän sekä kansainvälisten raja-arvojen (International Biochar Initiative 2015) että Euroopan biohiilsertifikaatin raja-arvojen sisällä ja ympäristöllisten riskien olevan pieniä. Biohiilien ominaisuudet on tärkeä arvioida elinkaarisesti ja biohiilistandardeja tulee kehittää (Sohi ym. 2010). Biohiilen vesistöihin ja ilmakehään kulkeutumisen riskit sekä sen hajoamistuotteiden mahdolliset haitat tulisi selvittää ennen kuin sitä voidaan käyttää ilmastomuutoksen torjunnassa ja maanparannustarkoituksessa.

2.2.2 Eri lähtömateriaaleista valmistettu biohiili

Lähtömateriaalilla on merkitystä biohiilen sisältämiin ravinteisiin ja muihin ominaisuuksiin (Jeffery ym. 2011, Biederman & Harpole 2013, Buss ym. 2016). Buss ym. 2016 tutkivat 19 erilaista biohiiltä taloudellisesti kannattavista jätelähteistä kuten ruokajätteestä, purkupuusta ja kasveista, jotka olivat kasvaneet saastuneessa maaperässä. Puubiohiilillä oli alhaisimmat pääravinnepitoisuudet, alhaisin pH ja tuhkapitoisuus. Paljon pääravinteita, mutta vähän raskasmetalleja sisältävät biohiilen lähtömateriaalit kuten ruokajätteet voisit sopia lannoitekäyttöön, kunhan raskasmetallipitoisuudet eivät ylitä (Buss ym. 2016). Erittäin saastuneista lähteistä peräisin olevat materiaalit ylittivät Eurooppalaiset ja kansainväliset (EU Council Regulation No 2092/9, German Biowaste Ordinance 1998, Swiss Chemical Risk Reduction Ordinance 2005, International Biochar Initiative 2015) raskasmetallipitoisuuksien raja-arvot biohiilissä (Buss ym. 2016).

Myös valmistusmenetelmällä on vaikutusta lannoitusarvoon (Biederman & Harpole 2013). Pyrolyysin lämpötilan noustessa kasvavat aineksen pH, sähkönjohtokyky ja hiilipitoisuus, sen sijaan haihtuvat aineet sekä biohiilisaanto vähenee (Buss ym. 2016). Bussin ym. (2016) kokeessa keskimäärin kaikista kymmenestä erilaisesta biohiilestä 15 % kalsiumista ja 10 % magnesiumista hävisi pyrolyysissä (350 – 750 °C) ja 700 - 750 °C prosessissa hävisi jopa 22,5 % kalsiumista. Korkeissa lämpötiloissa tuotettu biohiili vähentää maaperän PAH-, metalli- ja kaasupäästöjä (Mukherjee & Lal 2014). Bussin ym. (2016) kokeen mukaan alhaisemmat lämpötilat (< 700 °C) ovat parempia ravinteiden säilymisen kannalta. Mukherjeen & Lalin (2014) mukaan matalassa lämpötilassa hilleetty

biohiili näyttää lisäävän maaperän biologisia ominaisuuksia sekä satoa. Myös toisensuuntaisia tutkimustuloksia on, sillä Biedermanin ja Harpolen (2013) meta-analyysin mukaan korkeammissa lämpötiloissa (350 – 700 °C) hilleetty biohiili lisää satokasvin tuottokykyä. Toisaalta eri tutkimusten välinen jako mataliin ja korkeisiin lämpötiloihin voi vaihdella suuresti. Matalammassa lämpötilassa (250 – 400 °C) tuotettu biohiili on hajonnut nopeammin verrattuna korkeammissa lämpötiloissa (525 – 650 °C) valmistettuun biohiileen (Zimmerman 2011).

Myös lähtömateriaali vaikuttaa hajoamiseen (Egamberdieva ym. 2016). Ruhosta valmistettu biohiili on hajonnut nopeammin kuin kovasta puusta valmistettu (Zimmerman 2011). Lehmann & Joseph (2009) käsitelivät biohiilen kestävyyttä maassa sekä tutkimuksien eroavaisuuksia. Vanha, 130-vuotias, puuhiili hajosi vain 0,05 – 0,4 % viidessäkymmenessä päivässä 30 °C (Cheng ym. 2008, Lehmann & Joseph 2009, s. 186), puubiohiili (250 – 350 °C) hajosi alle muutaman prosentin neljän kuukauden aikana (Baldock & Smernik 2002, Lehmann & Joseph 2009, s. 186), kun taas olkibiohiili (350 °C) hajosi muutamassa vuodessa 16 – 51 % (Lehmann & Joseph 2009, s. 186). Biohiilen lähtömateriaali ja pyrolyysitekniikka vaikuttavat biohiilen hajoamisnopeuteen, mutta myös hiilen hajoamisen tutkimusmenetelmä vaikuttaa hajoamistulokseen (Lehmann & Joseph 2009, s. 187).

Taulukko 2. Eri lähtömateriaaleista valmistettujen biohiilien ominaisuuksia, vaikutuksia satoon ja kasvutekijöihin erilaisissa nurmitutkimuksissa ja kasvuolosuhteissa. Tiedot on koottu eri tutkimuksista. +/- = ei merkitsevää vaikutusta

Tutkimus ja biohiili	Paikka ja maaperä	Biohiilen ravinne-määrä kg/ha	Biohiilen vaikutus	Tutkimus-kasvi	Sato-vaste
Criscuoliym. 2016 Lehtikuusi pH 7,1 C/N 36 390 t/ha 30 vk 450 °C (10 min)	Italia pH 5,1 C 8,1 kg/m ² hieta	N 834 P 123 K 1133 C 29 640	+ itävyys +rehulaatu -N vanha biohiili -P tuore biohiili	Puna-apila Puistonata	+/- +/-
Lehti 2015 Havupuuhake pH 8,1 C/N 251 30 t/ha 4 a aikaisemmin 550–600 °C (10–15 min)	Suomi pH 6,4 C (k) 31,7 g/kg karkea hieta	N 140 P 55 K 136 C 26 439	+/- vedenpidätyskyky +/- SPAD +/- LAI	Puna-apila- timotei- nurmi	+/-
Schimmelpfennig ym. 2014a Isonorsunheinä pH 10,1 C/N 152 9,3 t/ha 2-vuotinen koe 550–600 °C	Saksa pH 5,8 C (k) 35,9 g/kg hiesu	N 37,2 P 0,03 C 5654	+ kukkivat nurmikasvit +ammoniakkipäästöt	Englannin- raiheinä	+
van de Voorde ym. 2014 Nurmen niittoseos pH 8,5 C/N 25 10 t/ha 5 kk 400 (5 min)	Hollanti pH 4,96 C (k) 28 g/kg hiekkä	Nk 167 N 0,008 PO ₄ 0,019 K 16 C 4180	+pH +K +P + N-sidonta (puna-apila) +puna-apilan määrä	Nurmiseos	+/-
Quilliam ym. 2013 Lehtipuuhake pH 8,81 C/N 156 50 + 50 t/ha 2 a välein 450 °C (48 h)	Wales pH 6,2 C (k) 35 g/kg hietasavi	N 0,37 P 1,99 K 10,4 C 57,8	-typpinystyröiden määrä +/- nystyröiden aktiivisuus +pH +C _{org.} +K -Ca +Na	Valkoapila Juuri/verso- suhde	+/- -

Biohiiliä valmistetaan hyvin erilaisista orgaanisista aineista, joita tutkitaan erilaisissa maaperissä ja erilaisissa ilmastoissa ympäri maailmaa. Lisäksi tutkimuskohteet vaihtelevat laajasti maaperän ominaisuuksista kasvien kasvuun ja kasvihuonekaasupäästöihin. Taulukon 2 tutkimukset kuvaavat lähtömateriaalien ja tutkimusten heterogeenisuutta. Taulukon 2 tutkimusten biohiilten sisältämät pääravinteiden määrät hehtaarille levitettynä eroavat huomattavasti toisistaan. Lisäksi lähtömateriaali, valmistusprosessi ja maaperä vaikuttavat biohiilen kykyyn sitoa ja luovuttaa ravinteita. Quilliamin ym. (2013) tutkimuksen biohiili ei lisännyt ravinteita hehtaarille paljoakaan suuresta levitysmäärästä riippumatta. Suuri levitysmäärä 50 t/ha + 50 t/ha kahden vuoden välein vähensi hieman apilan juuri-versosuhdetta kuitenkin vaikuttamatta versojen biomassaan (taulukko 2). Criscuolin ym. (2016) tutkimuksessa biohiili lisäsi maaperän ravinteita suuren levitysmäärän vuoksi, paransi itävyyttä, mutta ei nostanut puna-apilan tai punanadan kokonaissatomäärää. Kokeen kolmesta korjuukerrasta biohiili vähensi kummankin nurmikasvin satoa ensimmäisellä korjuukerralla, nosti puna-apilan sadon määrää toisella korjuukerralla ja nosti punanadan satomäärää kolmannella korjuukerralla verrattuna kontrollimaahan. Lehden (2015) tutkimuksen biohiilellä oli korkea hiili-typpisuhde ja tutkitussa maaperässä oli korkea hiilipitoisuus sekä hyvä maaperän pH (taulukko 2). Kyseisen tutkimuksen biohiili sisälsi suhteellisen paljon ravinteita levitysmäärän ollessa 30 t/ha ja levityksestä oli kulunut neljä vuotta, eikä biohiilellä ollut vaikutusta nurmen kasvuun kasvukunniltaan hyvässä maaperässä. Van de Voorden ym. (2014) tutkimuksessa biohiili nosti maaperän pH:ta happamalla maaperällä. Quilliamin ym. (2013) tutkimuksessa suuri biohiililisäys nosti maaperän pH:ta myös suhteellisen hyvän pH:n omaavalla maaperällä (taulukko 2). Schimmelpfennigin ym. (2014a) kokeessa biohiili lisäsi englanninraiheinän satoa luultavasti typpipitoisuuden lisääntyessä NO_3^- pidättyessä paremmin. Yllä olevat tutkimustulokset taulukosta 2 kertovat biohiilten vaikutusten monimuotoisuudesta, jolloin biohiiliä olisi aina hyvä tarkastella yksittäin käyttötarkoituksen mukaan.

2.2.3 Biohiili maanparannusaineena

Maatalousmaiden heikkeneminen vähentää tuottavuutta ja ajaa lisämaiden raivauksiin (Eykelbosh ym. 2014). Kuitenkin paikallisten maatalousjätteiden (Asai ym. 2009) palauttaminen kestävässä muodossa maaperään voi ylläpitää tai parantaa maaperän laatua (Eykelbosh ym. 2014), sen kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia (Asai ym. 2009). Pyrolysointi voi lisätä raaka-aineen ominaispinta-alaa, huokoisuutta ja kestävyyttä hajotusta vastaan (Eykelbosh ym. 2014). Biohiili on lisännyt rakenteensa vuoksi maaperän huokoisuutta (Abbasi & Anwar 2015) ja vedenpidätyskykyä (Artiola ym. 2012, de Melo Carvalho ym. 2014, Tammeorg ym. 2014a) sekä maaperän tilavuuspaino on vähentynyt (Artiolan ym. 2012, Abbasin & Anwarin 2015). Eripuolilla maailmaa, erilaisilla maalajeilla biohiilestä voi olla hyötyä maanparannusaineena. Riisin kuori (pyrolyysi: 300 - 350 °C, 2 päivää) ja maissin tähkäbiohiilet (pyrolyysi: 350 °C, 1 päivä) paransivat Afrikassa kevyiden maiden murujen kestävyyttä, maaperän huokoisuutta ja kasveille käyttökelpoisen veden saatavuutta sekä vähensivät maan tilavuuspainoa (Obia ym. 2016). Havupuubiohiili (pyrolyysi: 550 – 600 °C, 10 – 15 min) ei vaikuttanut Suomessa raskaan maan huokoisuuteen eikä tilavuuspainoon, mutta se paransi murujen kestävyyttä ja nosti maaperän kosteuspitoisuutta joillakin mittauskerroilla (Soinne ym. 2013, Tammeorg ym. 2014a). Lisäksi biohiili nostaa maaperän orgaanista hiilipitoisuutta lähtömateriaalista riippumatta (Quilliam ym. 2013, Tammeorg 2014a, Abbasi & Anwar 2015, Agegnehu ym. 2015, Han ym. 2016, Liu ym. 2016).

Biohiili kuuluu Suomessa maan rakennetta parantaviin aineisiin. Maa- ja metsätalousministeriön lannoitevalmisteasetuksen (2015) mukaan maanparannusaineen tulee edistää maaperän fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia ominaisuuksia. Niissä saa olla huomattava määrä pää- ja sivuravinteita, joiden määrä on ilmoitettava ravinnemäärän ylittäessä 1000 mg/kg. Vesiliukoisen typen ja fosforin määrät täytyy aina ilmoittaa (MMM 2015).

Biohiilen lisäys maahan on parantanut pääravinteiden saatavuutta, mikä kertoo korkeammasta liukoisten ravinteiden pitoisuudesta maassa (Agegnehu ym. 2015). Biohiili on vaikuttanut maaperän typpidynamiikkaan (Ulyett ym. 2014). Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa biohiili (pyrolyysi: puu 600 °C, 2 h) nosti maaperän nitraattityppimäärää (Han ym. 2016). Abbasin ja Anwarin (2015) tutkimuksessa biohiili (Intia, pyrolyysi: lanta- ja kasvijäte 500 °C, 1 h) lisäsi kasvin typen ottoa sekä nosti

maaperän kokonaistyyppimäärää. Ulyett ym. (2014) toteavat biohiilen lisäävän nitrifikaatiota johtuen luultavasti biohiilen positiivisesta vaikutuksesta maaperän pH:hon. Biohiili voi lisätä kasvin typen käytön tehokkuutta vähentämällä typen huuhtoutumista maaperän vedenpidätyskyvyn kasvaessa sekä lisääntyneen typen immobilisaation kautta (Zheng ym. 2013). Criscuoli ym. (2016) tutkivat vanhaa puuhiiltä sekä tuoretta biohiiltä ja havaitsivat tuoreen biohiilen vähentävän maaperän fosforipitoisuutta. Hanin ym. (2016) tutkimuksessa maaperän fosforipitoisuus laski biohiilimäärän lisääntyessä (4, 8 & 16 g/kg). Biohiili voi lisätä maaperästä uuttuvan fosfaatin määrää (van de Voorde ym. 2014). Kasveille käyttökelpoinen fosfori voi lisääntyä maaperän happamuuden vähentyessä sekä muiden maaperäolosuhteiden parantuessa kuten hapen lisääntyessä maan fysikaalisen rakenteen parantuessa. Tiivistyneissä, märissä maissa fosforia voi huuhtoutua pois pellolta, kun taas happamassa maassa fosfori sitoutuu tehokkaasti haitaten sen saatavuutta (Paasonen-Kivekäs ym. 2016, s. 184 - 185). Soinnen ym. (2013) tutkimuksessa biohiili vaikutti maaperän mururakenteen kestävyYTEEN, mikä saattaa ehkäistä eroosiota ja sitä kautta ehkäistä myös fosforin huuhtoutumista maaperästä. Kaliumin osuus biohiilen painossa saattaa jopa hieman (14,1 %) kasvaa pyrolyysissä orgaanisen aineksen kaasuuntuessa ja nesteytyessä pois hillettävästä materiaalista (Buss ym. 2016). Biohiili on nostanut käyttökelpoisen kaliumin määrää maaperässä (Van Zwieten ym. 2010, Quilliam ym. 2013, Tammeorg 2014a, van de Voorde ym. 2014).

Biohiilen ansiosta ravinteiden pidätyskapasiteetti lisääntyy maaperässä (Coumaravel ym. 2015). Chengin & Lehmannin (2009) mukaan biohiilen vanhetessa, mikä tapahtuu jo vuodessa, kationinvaihtokapasiteetti lisääntyy. Pyrolyysin korkeampi lämpötila ja pidempi kesto näytti lisäävän biohiilen vanhenemista. Maan hedelmällisyyden lisääntyminen on selitetty pH:n nousulla happamilla mailla ja lisääntyneellä ravinteiden (K, Ca, N) liukoisuudella (Van Zwieten ym. 2010) sekä pidättymisellä. Sen sijaan biohiililisäys ei ole vaikuttanut pH:hon mailla, joiden pH on vaihdellut 6 ja 7 välillä (Liu ym. 2012). Happamilla trooppisilla mailla biohiilen lisäys maahan voi lisätä kationeiden pidättymispaikkoja, mikä voi johtaa suurempaan ravinteiden saantiin (Major ym. 2010). Myös hyvän pH:n, mutta alhaisen hiili- ja orgaanisen aineksen pitoisuuden omaavilla mailla troopiksissa biohiilen lisäys maahan on lisännyt ravinteiden saatavuutta (Eykelbosh ym. 2014, Agegnehu ym. 2015). Se on mm. huomattavasti lisännyt typen, fosforin, kaliumin (Biederman & Harpole 2013, Agegnehu ym. 2015), kalsiumin ja magnesiumin liukoisuutta (Major ym. 2010). Humideilla trooppisilla alueilla biohiilen käyttö maataloudessa voi parantaa maan hedelmällisyyttä sekä satotasoja (Major ym. 2010).

Biohiilen kertalisäyksellä maahan voi olla pitkäkestoisia maanparannusvaikutuksia (Major ym. 2010). Quilliamin ym. (2013) mukaan biohiilellä näyttää olevan vain lyhytaikaisia vaikutuksia maaperän ravinnekiertoon, happamuuteen ja mikrobien toimintaan, kun taas Criscuolin ym. (2016) mukaan vanha puuhiili parantaa edelleen maaperän ominaisuuksia ja ravinteiden pidättymistä. Biohiilen pitkäaikaisesta maanparannusvaikutuksesta kertoo myös sen erittäin hidas hajoaminen (Lehmann & Joseph 2009, s. 186 - 187) sekä historialliset, hedelmälliset puuhiilimaat, joita käsiteltiin tutkimuksen luvussa 2.2 (Mao ym. 2012).

Jones ym. (2012) toteavat, että biohiilellä on väliaikaisia vaikutuksia mikrobiyhteisöjen rakenteeseen ja maan hengitykseen. Biohiili on lisännyt maaperän biologista aktiivisuutta (Masto ym. 2013, Ulyett ym. 2014) ja mikrobien biomassaa (Masto ym. 2013, Jaafar ym. 2015, Lehmann ym. 2011, Liu ym. 2016). Kuitenkaan biohiilen vaikutuksista mikrobien runsauteen ja yhteisöihin ei tiedetä vielä paljoa (Lehmann ym. 2011). Tammeorgin ym. (2014c) Suomessa tehdyssä kenttäkokeessa havaittiin, että havupuu-biohiili (30 t/ha) ei vaikuttanut lierojen runsauteen eikä biomassaan tilastollisesti merkitsevästi, vaikka lukumäärällisesti ensimmäisen kasvukauden jälkeen lieroja olikin kaksi kertaa kontrolliruutuja enemmän. Lierot välttivät biohiiltä, mikä saattoi liittyä vähentyneeseen maaperän kosteuteen (Tammeorg ym. 2014c). Biohiili on pienentänyt mykorrhizasarunsautta kasvin juurissa (Warnock ym. 2010), mikä voi johtua monesta tekijästä. Biohiili voi muun muassa vaikuttaa maaperän fysikaaliskemiallisiin ominaisuuksiin kuten lisätä liukoista fosforia joko suoraan tai vaikuttamalla maaperän pH:hon, kationinvaihtokapasiteettiin tai vedenpidätyskykyyn, mikä taas tekee mykorrhisoiden toiminnan tarpeettomaksi (Warnock ym. 2007). Biohiilen yleistä maanparannusvaikutusta on vaikea arvioida, sillä siihen vaikuttavat biohiilen lisäksi, maan ominaisuudet ja maan moninaiset reaktiot. Monivuotisissa peltokokeissa biohiilen ei ole löydetty vaikuttavan negatiivisesti maan laatuun tai sadontuottokkykyyn (Jones ym. 2012, Tammeorg 2014a).

2.2.4 Biohiilen vaikutus kasveille käyttökelpoiseen veteen

Vesi on kasvinviljelyn perusedellytys ja sen riittävydestä on pulaa maailmassa. Tämän päivän haasteena on löytää vedenpidätyskykyä lisääviä maanparannusaineita (Batoool ym. 2015). Moni maatalousmaa on tiivistynyt intensiivisen viljelyn seurauksena ja

pohjamaata tulisi parantaa (Novak ym. 2015). Suomessa toukokuu on kuivin kuukausi ja kuivat, kuumat jaksot saattavat tulla Suomessa ilmastonmuutoksen myötä tavallisimmiksi. Biohiili saattaa parantaa maaperän kosteusolosuhteita ja samalla edistää orgaanisen aineksen mineralisaatiota sekä sitä kautta kasvien ravinteiden saantia (Saarnio ym. 2013). Maan vedenpidätyskyky vaikuttaa kasvien kasvun lisäksi moniin maaperän reaktioihin kuten se saattaa lisätä ammonifikaatiota ja nitrifikaatiota, sillä hajottajat käyttävät vettä elintoimintoihinsa (Paasonen-Kivekäs ym. 2009, s. 179). Lisäksi biohiili voi lisätä tiivistyneessä maaperässä veden imeytymiskykyä (Novak ym. 2015).

Biohiili (kirjotulikruunupensaas biomassaa, 450 °C) nosti kasville käyttökelpoista vettä vesivaje olosuhteissa parantamalla vähän orgaanista ainesta sisältävän hietamaan vedenpidätyskykyä sekä vedenläpäisevyyttä (Batool ym. 2015). Kasveille käyttökelpoisen veden määrä voi lisääntyä biohiililisan vaikuttaessa maaperän rakenteeseen, huokoisuuteen ja tilavuuspainoon (Ulyett ym. 2014, Obia ym. 2016). Biohiili on nostanut myös hiekkamaalla maan kosteuspitoisuutta ja vedenpidätyskykyä (Ulyett ym. 2014). Biohiili voi nostaa myös savimaalla maan kosteuspitoisuutta ja vedenpidätyskykyä suurina määrinä levitettynä (Sun & Lu 2014). Tammeorgin ym. (2014a) tutkimuksessa puubiohiili (10 t/ha) lisäsi hietasavimaalla (saves 24 %) maaperän vedenpidätyskykyä merkittävästi vain muutamalla mittauskerralla. Biohiilen vaikutuksen vähäisyys vedenpidätyskykyyn saattoi johtua liian alhaisesta biohiilen levitysmäärästä (Tammeorg ym. 2014). Pühringerin (2016) tutkimuksessa biohiili (5t/ha & 10 t/ha) lisäsi maaperän kosteutta savimaalla, mutta ei vaikuttanut vedenpidätyskykyyn. Orgaanista ainesta sisältävällä ja hyvärakenteisella savimaalla on jo valmiiksi hiekkamaata parempi vedenpidätyskyky (Alakukku 2013). Enemmän savesta sisältävällä maalajilla biohiilen suurempi hiukkaskoko oli edullinen vähentäen tilavuuspainoa ja lisäten huokoisuutta, kun taas karkeampi rakenteiset maat tarvitsivat suurempia määriä biohiiltä, jotta mururakenne muuttui kestävämmäksi (Obia ym. 2016). Myös Ulyettin ym. (2014) mukaan huokoisuuden lisääntyminen savimaalla vaikuttaa edullisesti vedenpidätyskykyyn. Biohiilen vanhetessa sen huokoisuus voi myös muuttua huokosten täytyessä tai tyhjentyessä (Lehmann & Joseph 2009, s. 174). Biohiilen lisäys maahan voi varmistaa sadontuoton olosuhteissa, joissa kosteus on rajallista lyhytaikaisesti (de Melo Carvalho ym. 2014).

2.2.5 Biohiilen vaikutuksia kasvien sadontuottoon

Ruoantuotannon on kasvettava samaan aikaan, kun maatalouden negatiiviset ympäristövaikutukset on saatava huomattavasti pieneneväksi (Foley ym. 2011). Kasvien kasvu heikentyy köyhässä maaperässä ja sadontuottoa voidaan lisätä maaperää parantamalla (Agegnehu ym. 2015) mm. biohiiltä voidaan käyttää maanparannusaineena (Niu ym. 2015) kuten edellä ollaan todettu (kts. 2.2.3). Biohiili voi parantaa maaperän mururakennetta, mikä voi lisätä juurien kasvua, käyttökelpoista vettä ja sitä kautta lisätä kasvien satoa (Obia ym. 2016). Biohiilen sadonlisäys on kuitenkin riippuvaista biohiilen ominaisuuksista (Niu ym. 2015, Abbasi & Anwar 2015, Egamberdieva ym. 2016), lannoitevaikutuksista (Asai ym. 2009) sekä lisätyn typpilannoitteen määrästä (Abbasi & Anwar 2015). Näitä on laajemmin käsitelty luvuissa 2.2.2 ja 2.2.4.

Biohiili on joissakin tutkimuksissa lisännyt monien eri kasvien satoa (Agegnehu ym. 2015, Agegnehu ym. 2016, Güereña ym. 2016), mutta toisissa tutkimuksissa biohiilellä ei ole ollut vaikutusta viljelykasvien satoon (Tammeorg ym. 2014a, Teat ym. 2015, Ruyschaert ym. 2016). Jefferyn ym. (2011) 16 tutkimuksen meta-analyysin mukaan biohiilen käyttö on lisännyt kasvin sadontuottoa hieman (ka 10 %). Kuitenkin eri tutkimusten väliset erot biohiilen vaikutuksista kasvin sadontuottoon ovat suuria (-28 - 39 %) (Jeffery ym. 2011). Biohiili lisäsi maapähkinän (Agegnehu ym. 2015), riisin (Asai ym. 2009), kirsikkatomaatin (Hossain ym. 2010), retiisin, soijapavun (Van Zwieten ym. 2010) ja maissin (Agegnehu ym. 2016) satoa mineraalilannoitteen kanssa levitettynä. Pelkkä biohiili on lisännyt maissin (Agegnehu ym. 2016), vehnän (Agegnehu ym. 2015, Agegnehu ym. 2016), kauran (Schulz ym. 2013), kirsikkatomaatin (Hossain ym. 2010) ja salaatin (Artiola ym. 2012) satoa. Satoa lisänneet biohiilet ovat olleet eri lähtömateriaaleista valmistettuja ja tutkimuksissa on ollut erilaiset maaperäominaisuudet. Biedermanin & Harpolen (2013) meta-analyysissä ruoho- ja lantapohjaiset biohiilet näyttivät lisäävän satoa.

Biohiili on lisännyt kasvin korkeutta, lehtien kokoa, varren halkaisijaa vegetatiivisen kasvun aikaan sekä lisännyt kasvin satoa ja laatua (Niu ym. 2015). Biohiilen aikaansaama sadonlisäys saattaa johtua parantuneesta ravinteiden saannista (Abbasi & Anwar 2015, Agegnehu ym. 2015), maaperän vedenpidätyskyvystä (Tammeorg ym. 2014a, Artiola ym. 2012, Agegnehu ym. 2015) sekä lisääntyneestä mikrobien biomassasta (Biederman & Harpole 2013) ja maaperän orgaanisesta hiilestä (Abbasi & Anwar 2015, Agegnehu ym. 2015, Agegnehu ym. 2016). Kasvin sadon kanssa korreloi edellisten lisäksi

biohiililisästä johtuva noussut lehtivihreäpitoisuus ja lehtien ravinnepitoisuus (Agegnehu ym. 2015, Agegnehu ym. 2016). Satomäärään vaikuttavat päätekijät meta-analyysien mukaan ovat kalkitusvaikutus ja vedenpidätyskyvyn lisääntyminen (Jeffery ym. 2011, Liu ym. 2013) sekä parantunut ravinteiden saatavuus (Jeffery ym. 2011) (kts. 2.2.3 s. 24). Pääravinteiden saatavuuden paranemisen lisäksi monet biohiilet sisältävät lannoiteainekiloon verrattavia määriä joitain mikroravinteita kuten mangaania, magnesiumia ja sinkkiä, jotka eivät kuitenkaan välttämättä ole liukoisia (Tammeorg ym. 2014a taulukko S 2).

Biohiilen levitysmäärän vaikutus sadon tuotantoon eroaa tutkimusten välillä. Asain ym. (2009) kokeessa suurin biohiilimäärä 16 t/ha ei lisännyt satoa luultavasti vähentäen käyttökelpoista tyyppiä. Jefferyn ym. (2011) mukaan suurin sadon lisäys saavutettiin suurella biohiilen lisäysmäärällä (100 t/ha), kun taas Biedermanin ja Harpolen (2013) 371 tutkimuksen meta-analyysissä ei löydetty yhteyttä sadon tuotannon ja levitetyn biohiilimäärän kanssa. Sen sijaan Liun ym. (2013) 103 tutkimuksen meta-analyysin mukaan alle 30 t/ha levitysmäärä lisäsi sadontuottoa keskimäärin 11 %. Levitettävä biohiilimäärä tulee kuitenkin päättää huomioiden lähtömateriaali, maaperä ja viljelykasvi (Ruysschaert ym. 2016).

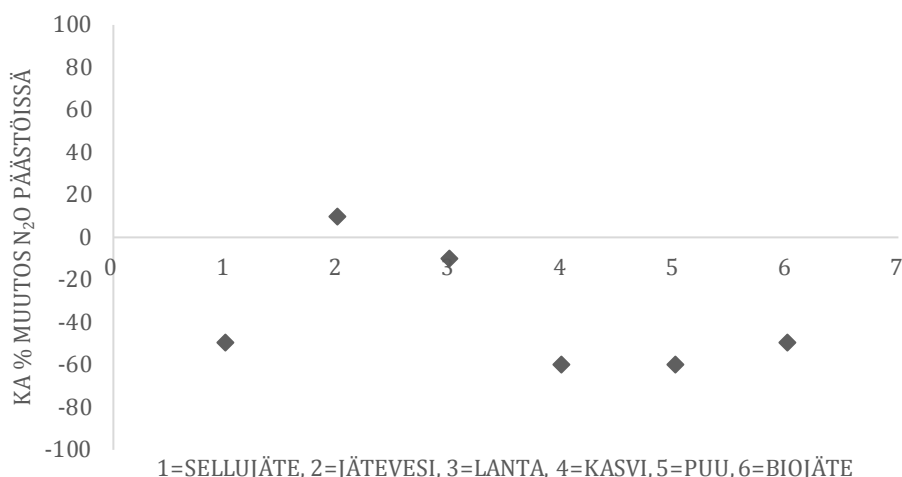
Suurimmat hyödyt sadontuoton kannalta on saavutettu happamissa ja rakenteeltaan karkeissa hiekkamaissa (Jeffery ym. 2011, Liu ym. 2013). Ruysschaert ym. (2016) mukaan biohiilellä on vähemmän potentiaalia vaikuttaa sadon tuotantoon hedelmällisillä mailla Euroopassa kuin vähemmän viljavilla mailla trooppisissa, missä on käytetty vähemmän kalkkia ja lannoitteita. Biohiili voi parantaa maaperän rakennetta edistäen kasvua ja sadon tuottoa (Abbasi & Anwar 2015). Kuitenkin haluttaessa suoraa vaikutusta sadon tuotantoon on suositeltua lisätä biohiilen kanssa suositusten mukainen määrä NPK-lannoitteita ja mieluusti myös orgaanisia maanparannusaineita (Coumaravel ym. 2015).

2.2.6 Biohiili ilmastonmuutoksen ehkäisyssä

Maatalous sekä maankäytön muutokset tuottavat kolmea pääasiallista kasvihuonekaasupäästöä: hiilidioksidia, metaania ja dityppioksidia (Paustian ym. 2016). Maatalouden laajentuminen ja intensiivisyys ovat molemmat vaikuttaneet ilmastonmuutokseen. Maatalous sekä siihen liittyvä metsien ja soiden raivaus aiheuttavat noin kolmasosan kasvihuonekaasupäästöistä (Foley ym. 2011).

Väestön kasvusta johtuva lisääntyvä ruoan ja resurssien tarve johtavat tarpeeseen tuottaa ruokaa intensiivisesti sekä ekologisesti. Ekologisintensiivisessä viljelyssä tärkeää on maan orgaanisen aineksen suojeleminen, ravinteiden kierron ylläpito, veden käytön tehokkuus sekä ilmastonmuutoksen torjunta (Foley ym. 2011). Biohiilellä saattaa olla positiivisia vaikutuksia näihin kaikkiin. Haasteisiin voidaan vastata mm. yhteiskuntajätteen käsittelyllä (Foley ym. 2011) kuten orgaanisen aineksen pyrolyysillä (Eykelbosh ym. 2014), jonka lopputuote biihiili sitoo hiiltä maaperään (Foley ym. 2011). Maaperällä on olennainen tehtävä sekä valtava potentiaali kaikissa maaekosysteemeissä tukea ruoantuotantoa ja samalla toimia hiilinieluna ehkäisten ilmastonmuutosta (Paustian ym. 2016). Lisäämällä biohiiltä maahan on mahdollista sitoa hiiltä maaperään useiksi sadoiksi vuosiksi (Jones ym. 2012) ja samalla parantaa maaperän kasvukuntoa (Lehmann & Joseph 2009). Ikääntyvän biohiilen vaikutuksia maaperän kasvutekijöihin on tärkeä tutkia useita kasvukausia, jotta voidaan varmistua niiden turvallisesta käytöstä ilmastonmuutoksen torjunnassa.

Hiilidioksidi on ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista huomattavin. Hiilidioksidipitoisuus on noussut teollistuneen aikakauden aikana 280 ppm:stä noin 390 ppm:ään ja nousu on keskimäärin 2 ppm vuodessa. Suurin osa ihmiskunnan tuottamasta hiilidioksidista tulee fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Myös trooppisten metsien hävittäminen ja maan käytön muutos ovat huomattavia päästölähteitä (Ilmasto-opas 2017). Maassa on noin neljä kertaa enemmän hiiltä varastoituneena kuin ilmassa on hiilidioksidia (Lehmann & Joseph 2009). Biohiilen lisäys maahan voi sitoa ilmakehän hiilidioksidia (Eykelbosh ym. 2014). Jotta hiilen sitoutumista todellisuudessa tapahtuu, täytyy kahden vaatimuksen täyttyä. Ensinnäkin kasveja täytyy kasvaa sama määrä kuin niitä kasvaisi ilman hiiltämistä, koska ilmakehän hiilidioksidin muuntuminen orgaaniseksi hiileksi tapahtuu kasvien fotosynteesin kautta. Toiseksi biohiilen täytyy olla vakaampaa kuin biomassassa, mistä se on tuotettu. Luonnollisessa kierrossa kasvit hajoavat nopeasti ja hiilidioksidia vapautuu kasveista takaisin ilmakehään. Muuntamalla kasvien biomassassa biohiileksi, joka hajoaa paljon hitaammin, on mahdollista muuntaa osa hiilen nopeasta biologisesta kierrosta paljon hitaammaksi biohiilikierroksi (Lehmann & Joseph 2009).



Kuva 1. Eri lähtömateriaaleista peräisin olevan biohiilen keskiarvovaikutuksia N₂O-päästöjen vähennykseen (mukailten Cayuela ym. 2014 meta-analyysin kuvaa 1).

Cayuelan ym. (2014) meta-analyysi osoittaa biohiilen lisäyksen maahan vähentäneen N₂O-päästöjä maaperästä keskimäärin 54 % (kuva 1). Dityppioksidi on vahva kasvihuonekaasu ja merkittävin otsonikerrosta heikentävä yhdiste. Yli kaksikolmasosa N₂O-päästöistä on peräisin maaperästä synteettisen typpilannoitteen laajan käytön vuoksi (Cayuela ym. 2014). Case ym. (2015) toteavat biohiilen voivan vähentää N₂O-päästöjä vaikuttamalla typen kiertoon. Jätevesibiohiilten vaikutus N₂O-päästöihin on vaihdellut suuresti. Myös biojäte- ja lantabiohiilten vaikutus N₂O-päästöihin on vaihdellut positiivisesta negatiiviseen jonkin verran. Kasvi- ja puujätteestä peräisin olevien biohiilten vähentävä vaikutus N₂O-päästöihin oli vakaa (Cayuela ym. 2014).

Riisiviljelmät ovat huomattava kasvihuonekaasujen, varsinkin metaanin, lähde (Mohammad ym. 2016). Muita tärkeitä metaanin lähteitä maataloudessa ovat karjantuotanto, kosteikot, logistiikka ja jätevedet (Bousquet ym. 2011). Metaani on toiseksi vahvin ihmisen tuottama kasvihuonekaasu. Se on molekyyliä kohti laskettuna hiilidioksidia vahvempi, mutta sitä on vähemmän ja se on lyhytikäinen (Ilmasto-opas 2016). Metaania syntyy, kun orgaanista ainesta hajoaa hapettomissa olosuhteissa. Metaani nousee pintaan, jolloin osa hapettuu ja osa karkaa ilmakehään (Jokimäki 2011). Mohammadin ym. (2016) tutkimuksessa biohiili vähensi CH₄-päästöjä vaikuttaen positiivisesti riisin viljelyn hiilijalanjälkeen. Karhu ym. 2011 totesivat biohiilen vähentävän metaanipäästöjä luultavasti maaperän ilmastuksen kautta. Biohiilen

ominaisuudet, maaperä ja viljelymenetelmä tulee ottaa huomioon, kun arvioidaan biohiilen mahdollista ilmastonmuutosta ehkäisevää vaikutusta (Liu ym. 2016).

2.3 Biohiilen ja lannoituksen vaikutuksia nurmikasvien kasvuun

Lannoitus on tärkeää nurmen kasvulle, esimerkiksi kaliumlannoitus lisäsi merkittävästi puna-apilan biologista typensidontaa Mian ym. (2014) astiakokeissa Hollannissa happamassa nurmimaassa. Myös biohiilen on todettu lisäävän biologista typensidontaa palkokasveilla (Mia ym. 2014, van de Voorde ym. 2014) sekä puna-apilan määrää nurmessa (van de Voorde ym. 2014). Biohiili voi lisätä nurmen kasvulle tärkeän, vaihtuvan kaliumin määrää maassa (Schimmelpfennig ym. 2014b, Tammeorg ym. 2014a, b) sekä lisätä typpinystyröiden määrää lyhytaikaisesti (Quilliam ym. 2013). Quilliam ym. (2013) eivät kuitenkaan löytäneet näyttöä, että biohiilellä olisi vaikutusta typpibakteerien aktiivisuuteen tai pitkäaikaisia vaikutuksia typensidontaan. Mian ym. (2014) tutkimuksen mukaan typpi-, fosfori- ja mikroravinnelannoitukset eivät vaikuttaneet biologiseen typensidontaan biohiilen erilaisilla lisäystasoilla. Myöskään biohiililisäyksestä johtuva pH:n nousu ei vaikuttanut puna-apilan biomassaan tai kilpailukykyyn. pH:n nousu saattaa kuitenkin vaikuttaa typpinystyröiden toimintaan (Mela 2004).

Maalaji ja maaperän ravinnepitoisuudet voivat vaikuttaa biohiilen ja lannoituksen yhdysvaikutukseen. Biohiilen ja kaliumlannoituksen on todettu edistävän (Mia ym. 2014, Oram ym. 2014) ja typpilannoituksen vähentävän puna-apilan kilpailukykyä nurmiseoksessa hiekkamaassa (Oram ym. 2014). Savimaassa kaliumvaroja on moneksi vuodeksi (Saarela ym. 1998), mutta kaliumin puutetta saattaa kuitenkin ilmetä varsinkin keväällä (Virkajärvi ym. 2014), jolloin lisääntyneestä kaliumista voisi olla hyötyä myös savimaalla. Oletettavasti kaliumilla ei kuitenkaan ole paljoa vaikutusta puna-apilan kasvuun savespitoisella maalajilla. Birkin ym. (2009) kokeessa happamalla trooppisella savimaalla biohiilen ja mineraalilannoituksen havaittiin yhdessä lisäävän mikrobien kasvua maassa verrattuna pelkkään mineraalilannoitukseen. Biohiilen maanparannusvaikutusten oletetaan vaikuttavan maaperän veteen ja sitä kautta kasvien juurien kasvuun (Obia ym. 2016). Samoin lannoitteilla on tärkeä tehtävä juurien kasvussa. Lannoituksella ja biohiilellä voi siis olla erilaisia yhdysvaikutuksia maaperän toimintaan ja sitä kautta kasvien kasvuun.

Seosnurmessa apilan säilyttäminen on tärkeää (Hakala ym. 2007). Biohiili voi ylläpitää ja tukea rehupalkokasvien säilymistä nurmiksissa maatalouslaitumilla ja luonnonniityillä (Oram ym. 2014) lisäämällä ravinteiden kiertoa (Quilliam ym. 2013, Criscuoli ym. 2016) sekä orgaanisen aineksen määrää maassa (Abbasi & Anwar 2015). Puna-apila saattaa lisäksi hyötyä biohiilen aikaansaamasta maan huokoisuuden (Abbasi & Anwar 2015) ja vedenpidätyskyvyn (Artiola ym. 2012, Tammeorg ym. 2014a) lisääntymisestä, sillä sen viljelyyn sopii parhaiten hyvin ojitettu kivennäismaa (Mela 2004).

Biohiili voi vaikuttaa kasvilajisuhteisiin joko vaikuttamalla siementen itämiseen (Hille & Ouden 2005, Solaiman ym. 2012) tai vaikuttamalla eri tavoin eri kasvilajien kasvuun (van de Voorde ym. 2014). Van de Voorde ym. (2014) eivät löytäneet tutkimuksessaan näyttöä, että biohiili vaikuttaisi itämiseen. Tutkimuksen mukaan palkokasvien runsastumiseen vaikutti pH:n nousu sekä fosforin ja kaliumin lisääntyminen maaperässä. Solaimanin ym. (2012) mukaan biohiilen vaikutus siemenen itämiseen ja taimen kasvuun on riippuvaista maaperän hedelmällisyydestä, biohiilen ominaisuuksista ja kasvilajista. Heidän kokeessaan maassa, jossa biohiilen suurellakaan lisäysmäärällä ei ollut negatiivisia vaikutuksia itämiseen, oli suurempi orgaaninen hiilipitoisuus, kationinvaihtokapasiteetti ja ravinnepitoisuus kuin maassa, jossa biohiili alensi itämistä. Criscuolin ym. (2016) kokeessa ikääntynyt sekä tuore puuhiili paransivat puustonadan sekä puna-apilan itämistä, luultavasti biohiilen sisältämien itämistä edistävien yhdisteiden (KAR₁, KAR₂, KAR₃, KAR₄, KAR₅, KAR₆) kautta. Biohiili lisäsi myös puustonadan ja puna-apilan kasvua luultavasti maan fysikaalisten ominaisuuksien sekä ravinnepitoisuuden parantuessa puuhiilen sitoessa ravinteita ajan kuluessa. Lisäksi rehun laatu parani kasvin ravinnepitoisuuksien paranemisen myötä (Criscuoli ym. 2016).

Biohiili voi vaikuttaa myös nurmiheinien kasvuun mm. Schimmelpfennigin ym. (2014a,b) tutkimuksessa biohiili lisäsi englanninraiheinän biomassaa sekä ruohovartisten kukkivien kasvien määrää nurmessa. Biohiili lisäsi koiranheinän sadontuottoa luultavasti vähentyneen maaperän happamuuden kautta sekä vähensi sinkin ja kadmiumin pitoisuuksia maaperässä (Wagner & Kaupenjohann 2015). Mian ym. (2014) tutkimuksen mukaan biohiili vähensi puna-apilan kilpailukykyä, lisäsi punanadan ja heinäratamon kilpailukykyä pelkkään kaliumlannoituskäsittelyyn verrattuna. Mahdolliset kaliumlannoituksen vaikutustavat kasvilajien kilpailukykyyn saattavat johtua heinäkasvien syvemmistä juurista verrattuna apilan juuriin (Oram ym. 2014).

Kaliumlannoitus saattaa helpottaa puna-apilan kaliumin ottoa, kun taas syvempi- ja tuuheampijuuriset heinät pystyvät kilpailemaan kaliumin otosta puna-apilaa paremmin heikossa maan kaliumpitoisuudessa.

Biohiilen levitysmäärä on tärkeä tekijä, sillä Mian ym. (2014) mukaan biohiilen lisäys 10 t/ha⁻¹ johti korkeimpaan puna-apilan typen sidontamäärään sekä suurimpaan kokonaisbiomassaan. Sen sijaan hyvin korkea biohiilen lisäys maahan 120 t/ha⁻¹ vähensi merkittävästi kokonaisbiomassan tuotantoa luultavasti vähentyneen itämisen tai lisääntyneen suolaantumisen johdosta. Levitysmäärän vaikutukset ovat kuitenkin riippuvaisia maan viljavuudesta ja biohiilen ominaisuuksista kuten edellä on todettu.

Mian ym. (2014) ja Oramin ym. (2014) biohiili-nurmi-tutkimukset olivat kasvihuonekokeita. Criscuoli ym. (2016) tutkivat astiakokeessa puistonadan ja puna-apilan itämistä sekä kasvua vanhassa puuhiilimaassa sekä tuoreessa puuhiilimaassa. Van de Voordenin ym. (2014) biohiili-nurmi-tutkimus oli yhden kasvukauden kenttäkoe pelto-olosuhteissa. Wagnerin & Kaupenjohannin (2015) sekä Schimmelpfennigin ym. (2014a, b) tutkimukset olivat kaksivuotisia peltokokeita Saksassa. Kiimassa on tutkittu kolmevuotisessa peltokokeessa eroosioituneissa ja heikentyneissä nurmimaissa biohiiltä (Han ym. 2016). Viikin tutkimus oli tiettävästi ensimmäinen monivuotinen kenttäkoe, jossa seurattiin biohiilen levityksen jälkivaikutuksia palkokasvinurmeen viljavuudeltaan suhteellisen hyvässä maaperässä. Lisäksi oli tarpeellista tutkia onko pääraavinne- sekä hivenravinnelannoituksella ja biohiilellä yhdysvaikutusta nurmen kasvuun savimaalla sopivien biohiilen käyttötapojen löytämiseksi.

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, vaikuttavatko havupuuhakkeesta valmistetun biohiilen aikaisempi lisäys ja levitysmäärät peltomaahan sekä sitä kautta nurmen kasvuun pohjoisissa olosuhteissa. Tavoitteena oli selvittää lisäksi biohiili sekä biohiili ja lannoitus yhdessä nurmen satoa sekä biomassaa. Tutkimuskysymys oli kolmiosainen.

1. Vaikuttaako 4 ja 5 vuotta sitten levitetty biohiili maaperän kosteuteen, pH:hon, ravinne-määriin sekä hiili- ja typpipitoisuuksiin? Vaikuttaako biohiili edellisten kautta nurmen satomäärään, kasvilajisuhteisiin sekä sadontuottokykyyn?
2. Riippuuko mahdollinen vaikutus biohiilen levitysmäärästä?
3. Onko biohiilellä ja porrastetuilla K- sekä (N)PK-lannoitekäsittelyillä yhdysvaikutusta?

Oletuksena oli, että biohiili saattaa vaikuttaa joihinkin nurmen kasvuun positiivisesti vaikuttaviin tekijöihin kuten maaperän vedenpidätyskykyyn ja hiilipitoisuuteen. Lisäksi puna-apilan oletettiin saattavan hyötyä biohiilestä, kaliumista ja mikroravinteista. Toisaalta aikaisempien tutkimusten perusteella voitiin olettaa biohiilen vaikutusten kasvien kasvuun ja maan kasvukuntoon suhteellisen viljavassa, paljon hiiltä sisältävässä sekä hyväravinteisessa maaperässä olevan vähäisiä. Tavoitteena oli myös tutkia vanhenevan biohiilen jälkivaikutuksia maaperän kasvukuntoon, sillä käytettäessä biohiiltä hiilensidontaan, on tärkeää tutkia vaikutuksia useita kasvukausia. Tarkoituksena oli myöskin varmistaa, ettei biohiilellä ole maaperän kasvukuntoa sekä kasvien kasvua heikentäviä vaikutuksia.

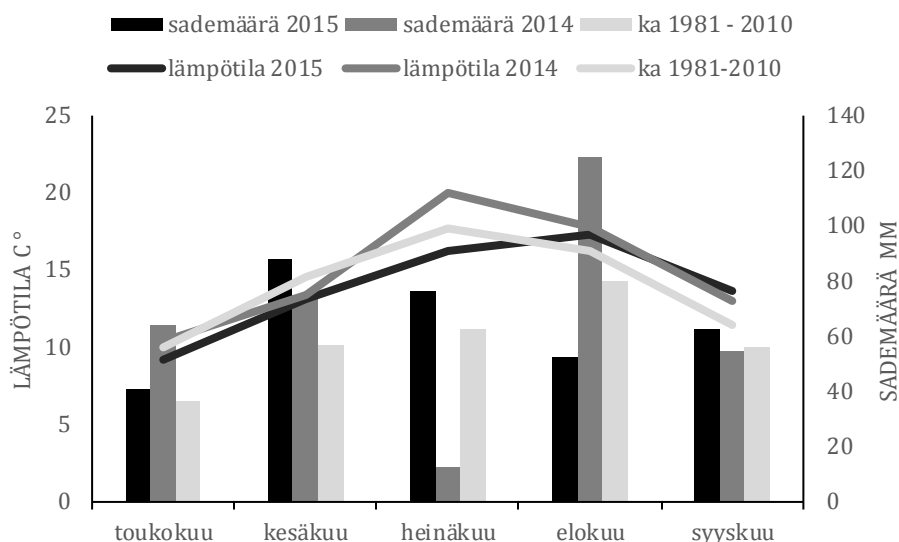
4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Aineisto

Tutkimuksen aineisto saatiin kenttäkokeesta (kts. luku 4.3), joka toteutettiin kasvukausina 2014 ja 2015 Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustilalla Porvoontienvarren peltolohkolla (N 60° 13.43', E 25° 1.67') (Kaupunkisuunnitteluvirasto 2004). Lohkon maalaji oli hiusesavea. Kyntökerroksesta (20 cm syvyys) tehdyn viljavuusanalyysin perusteella maa oli viljavaa ja ravinnetaso oli suhteellisen hyvä (Tammeorg 2014a). Vuonna 2013 tehdyn viljavuusanalyysin mukaan maaperän pH oli 6,4, vaihtuvan kalsiumin viljavuusluokka oli tyydyttävä, fosforin hyvä, kaliumin välttävä, magnesiumin tyydyttävä ja rikin hyvä. Keväällä 2010, ennen biohiilen levitystä, maaperän kokonaishiilipitoisuus oli 34,4 g/kg ja syksyllä 2013, ennen tätä tutkimusta, maaperän kokonaishiilipitoisuus oli biohiilettömässä maassa 34,0 g/kg, biohiiliruuduilla, 5 t/ha, 34,8 g/kg ja biohiiliruuduilla, 10 t/ha, 35,2 g/kg.

Kasvukaudella 2013 koealueella kasvoi ohra ja sen aluskasvina nurmi. Kasvukausina 2010, 2011 ja 2012 koealueen ruuduilla vuorotteli härkäpapu (*Vicia faba*), vehnä (*Triticum aestivum*) ja rypsi (*Brassica rapa* subsp. *oleifera*) (Tammeorg ym. 2014a). Edeltävinä neljänä kasvukautena peltolohkolla viljeltiin kevätvehnää (*Triticum aestivum*) ja rypsiä (*Brassica rapa* subsp. *oleifera*).

Kasvukausi 2014 oli sääoloiltaan vaihteleva: alkukesä oli kylmä ja heinäkuusta eteenpäin kausi oli lämmin (kuva 2). Helsingissä toukokuu oli hyvin sateinen ja lämpötila oli hieman keskiarvoa korkeampi. Kesäkuussa satoi Ilmatieteen laitoksen (2015) sadetilaston vuosien 1981 – 2010 keskiarvoa enemmän ja lämpötila pysyi keskiarvoa matalampana. Heinäkuu oli kuuma ja kuiva. Elokuussa satoi suhteellisen paljon ja kuukauden keskilämpötila oli lämmin. Syyskuussa satoi hieman keskiarvoa vähemmän ja keskilämpötila oli vuosien 1981 – 2010 keskiarvoa lämpimämpi.



Kuva 2. Kasvukausien 2014, 2015 sekä Ilmatieteen laitoksen vuosien 1981 – 2010 keskiarvolämpötilat ja sademäärät Helsingissä toukokuusta syyskuulle. Tiedot on saatu Ilmatieteen laitokselta 2015.

Kasvukausi 2015 oli suhteellisen kostea ja viileä, mutta syksy oli lämmin (kuva 2). Alkukevät 2015 oli Helsingissä hyvin kuiva. Touko- ja kesäkuu olivat suhteellisen kosteita ja viileitä. Toukokuun sademäärä oli hieman Ilmatieteen laitoksen parinkymmenen vuoden keskiarvoa korkeampi ja kesäkuun sademäärä keskiarvoa selvästi korkeampi. Heinäkuu ei ollut erityisen lämmin ja heinäkuussa satoi hieman keskiarvoa enemmän. Elokuussa saatiin hieman lämpöä ja sademäärä jäi keskiarvoa alemmaksi. Syyskuu oli lämmin ja syyskuun sademäärä oli hieman keskiarvoa korkeampi (kuva 2).

4.2 Biohiili

Kokeen biohiili levitettiin vuonna 2010. Se oli valmistettu kuusen (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ja männyn (*Pinus Sylvestris* L.) hakkeesta Lempäälässä Preseco Oy:ssä. Puu hiillettiin 550 – 600 °C lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa 10 – 15 minuutin ajan. Reaktio tuottaa noin 50 % biohiiltä, 30 % kaasumaisia tuotteita ja 20 % bioöljyä. Hiilen jäähtyttyä se hienonnettiin myllyssä. Partikkelikoko vaihteli: 6 % biohiilestä oli läpimitaltaan 5 – 10 mm, 39 % oli 1 – 5 mm ja 55 % jäi läpimitaltaan alle 1 mm. Biohiili kostutettiin ennen levitystä 31 – 33 %:n kosteuteen levityksen helpottamiseksi eli pölymuodostuksen ehkäisemiseksi (Tammeorg ym. 2014a).

Biohiilen $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ oli 10,8, pinnan ominaispinta-ala 34,1 m^2/g , haihtuvat aineet 268,2 g/kg ja tuhkapitoisuus 104,1 g/kg . Raskasmetallipitoisuudet olivat alhaiset ja jäivät alle Euroopan biohiilisertifikaatin (2012) asettamien raskasmetallien raja-arvojen. Tammeorg ym. (2014a), (taulukko S 2.), kuvaavat lisää käytetyn biohiilen fysiokemiallisia ominaisuuksia.

4.3 Kenttäkoe

Kenttäkoe noudatti faktoriaalisen osaruutukokeen mallia. Se toteutettiin vuosina 2014 ja 2015. Kenttäkoe sisälsi kolme neljän täydellisesti satunnaistetun kerranteen osakoetta, joita tässä työssä käsiteltiin yhtenä yhdistettynä 12 kerranteen kokeena (liite 1). Osakokeiden välinen ero oli esikasveissa vuosina 2010–2012 (taulukko 3). Vuonna 2013 tätä eroa ei enää ollut, vaan ensimmäistä koevuotta 2014 edeltänyt esikasvi (2013) oli kaikille sama (taulukko 3).

Ensimmäisenä koevuonna koetekijät (faktorit) olivat vuoden 2010 biohiilen levitysmäärä (BC) kolmella tasolla (molempina koevuosina 0, 5 ja 10 t/ha) sekä kalium-lannoitusmäärä porrastettuna myös kolmelle tasolle (179, 134 ja 89 kg K/ha), ja muita lannoiteravinteita lisättiin jokaiseen ruutuun sama määrä (taulukot 4 & 5). Toisena koevuonna koetekijät olivat biohiilen vuoden 2010 levitysmäärä (BC) kuten ensimmäisenä koevuonna sekä koko väkilannoituksen määrä porrastettuna kolmelle tasolle (NPK 22, 35 ja 140; 15, 23 ja 91; 7, 11 ja 42 kg/ha) (taulukot 4 & 5). Näin myös mikroravinteet tulivat porrastetuiksi (taulukko 5). Lannoitteita levitettiin kolmena eri lannoitetasoprosenttina kasvilajikohtaisesta typpisuosituksesta laskettuna. Rikkakasviruiskutukset tehtiin nurmelle vain vuonna 2013.

Vuoden 2010 biohiilen lisäys oli pääruutujen tekijä ja kuluvan vuoden K- (2014) tai PK-lannoitus (2015) oli osaruutujen tekijä (taulukko 4). Pääruudut oli jaettu kolmeen osaruutuun, joissa oli erilaiset lannoitustasot (liite 1). Pääruudun koko ja muoto oli 6,6 m x 10 m, ja osaruutujen 2,2 m x 10 m. Pääruutujen välissä oli suojaruudut (liite 1). Molempina koevuosina käsitellyt muodostuivat molempien koetekijöiden kaikkien tasojen faktoriaalisista kombinaatioista, eli käsittelyjä oli yhdeksän.

Kokeen apila-timoteinurmi oli perustettu ohran aluskasvina koetta edeltävänä vuonna 2013 (16 – 17.5.2013). Nurmeen kylvettiin 25 % puna-apilaa (*Trifolium pratense* cv.

``Bjursele``) ja 75 % timoteita (*Phleum pratense* cv. ``Tuure``). Nurmen siementä käytettiin 22 kg/ha ja se kylvettiin 1 – 2 cm:n syvyyteen 2 metrin levyisellä kylvökoneella. Kokeen lannoitukset levitettiin 2 metriä leveällä Juko-kylvökoneella yhdellä lannoituskerralla pintalevityksenä vuonna 2014 toukokuun 6. päivänä, ja vuonna 2015 toukokuun 16. päivänä. Biohiili levitettiin alalle toukokuussa 2010 traktorivetoisella hiekkalevittimellä. Levityksen jälkeen biohiili muokattiin 10 cm:n syvyyteen tasoajyrillä (Tammeorg 2014a).

Taulukko 3. Kenttäkokeen historia 2010 – 2013 ja tutkimuksen esikasvit.

Vuosi	Kasvi	Lannoite	Lannoitekäsittely	Biohiililevitys
2010	härkäpapu, vehnä, rypsi	Agro 16-7-13 Agro 28-3-5	Kaikki ravinteet 100 %, 65 %, 30 %	5.2010 0 t, 5 t & 10 t
2011	härkäpapu, vehnä, rypsi	Agro 16-7-13 Agro 28-3-5	Kaikki ravinteet 100 %, 65 %, 30 %	-
2012	härkäpapu, vehnä, rypsi	Agro 16-7-13 Agro 28-3-5	Kaikki ravinteet 100 %, 65 %, 30 %	-
2013	ohra, nurmi suojaviljaan	Agro 16-7-13	Kaikki ravinteet 100 %, 65 %, 30 %	-

Taulukko 4. Kenttäkokeen koejäsenet ja käytetyt lannoitteet.

Vuosi	Kasvi	Lannoite	Lannoitekäsittely	Biohiililevitys
2014	Nurmi: puna-apila, timotei	PK 3-5-20	Kalium porrastettu 100 %, 75 %, 50 %	-
2015	Nurmi: puna-apila, timotei	PK 3-5-20	Kaikki ravinteet 100 %, 65 %, 30 %	-

Taulukko 5. Kasvukausina 2014 & 2015 kenttäkokeeseen levitetty lannoitemäärät ja niiden sisältämät ravinne­määrät.

	Käsittely	kg/	N	P	K	S	Mg	B	Cu	Mn	Mo	Se	Zn
	%	ha											
2014	100	513	8	10	179	34	7	0,026	0,077	0,077	0,026	0,003	0,051
	75	423	8	10	134	34	7	0,026	0,077	0,077	0,026	0,003	0,051
	50	333	8	10	89	34	7	0,026	0,077	0,077	0,026	0,003	0,051
2015	100	700	22	35	140	91	20	0,070	0,210	0,210	0,070	0,007	0,140
	65	455	15	23	91	59	13	0,046	0,137	0,137	0,046	0,005	0,091
	30	210	7	11	42	27	6	0,021	0,063	0,063	0,021	0,002	0,042

4.4 Mittaukset ja havainnot

Kasvukauden ajan seurattiin viikoittain maaperän kosteutta (taulukko 6). Kasvukaudella 2014 maaperän kosteus mitattiin neljänätoista viikkona ja kaudella 2015 kolmenätoista viikkona. Kosteusmittauksessa verrataan maan vesimäärää maaperän tilavuuteen. Kosteus mitattiin TDR-laitteella neljässä eri käsittelyssä ja yhteensä 16 koeruudussa kolmelta eri syvyydeltä: 18 cm, 30 cm ja 58 cm. Yhdessä ensimmäisen kerranteen koeruudussa (BC 10 t/ha & L 100 %) (liite 1) kosteus mitattiin 60 cm:n syvyydeltä. Kosteus mitattiin niistä koeruuduista, joissa biohiilikäsittely oli 0 tai 10 t/ha ja joille oli levitetty lannoitetta täyden suosituksen (100 %) sekä pienimmän suosituksen (2014: 50 %; 2015: 30 %) mukaan. Yhdellä näytteenotokerralla 25.6.2015 kosteus jäi mittaamatta viideltä koeruudulta 58 cm:n syvyydeltä näytteenottoantureiden uudelleen sijoituksessa johtuneen virheellisen syvyyden takia.

Syksyllä 2015 otettiin laaja maa-analyysi (taulukko 6), jotta voitiin verrata biohiilikäsittelyiden ravinnepitoisuuksia kontrolliin. Lokakuussa 2015 maanäytteet otettiin osaruuduittain 0 - 20 senttimetrin syvyydeltä 16 kpl/koeruutu ja sekoitettiin edustavaksi näytteeksi, joista roskien poistamisen jälkeen osanäyte lähetettiin viljavuustutkimusrasioissa Suomen Ympäristöpalveluun analysoitavaksi. Suomen Ympäristöpalvelu käyttää ravinne-aineiden analyysimenetelmänä hapanta ammoniumasetaattiuuttoa. Kiinteiden näytteiden alkuaineanalytiikassa käytetään ICP-emissiospektrometrejä (ICP-OES) (Ca, K, Mg, S), pääasiassa ICP-emissiospektrometriä (Thermo-Fisher iCAP 6500 Duo, Thermo Fisher Scientific, Cambridge, UK) yhdessä erilaisten esikäsittelytekniikoiden kanssa. Lisäksi ravinneanalytiikassa käytetään liekkiatomiabsorptiometrejä (FAAS) (Cu, Mn, Zn) ja FIA-autoanalysaattoreita (P). Maanäytteen pH on määritetty SFS-EN 13037 standardin mukaisesti ja sähkönjohtavuus SFS-EN 13038 standardin mukaan elektroditekniikalla (Swing Automatic, Consort C831-mittari, Consort nv, Belgia). Mittaus on tehty maa-vesisuspensiosta. Tarkemmin viljavuustutkimuksen tekniikoihin ja laitteisiin voi tutustua Suomen Ympäristöpalvelun ympäristöanalytiikan sivuilla (Suomen Ympäristöpalvelu 2017). Pieni osa kahden millimetrin seulalla seulotuista maanäytteistä ilmakeivattiin (alle 40 °C) ja jauhettiin hiili- ja typpianalyysejä varten. Jauhetuista maanäytteistä analysoitiin maaperän kokonaishiili- ja typpipitoisuudet (taulukko 6).

Taulukko 6. Tutkimuksen mittaukset vuosina 2014 ja 2015.

	Mittaus	Näytteenoton ajankohta	Metodi/Mittari
Maa	Kosteuspitoisuus	13.6. - 15.10.14 3.6. - 12.8.15	TDR-mittalaite, Time domain reflectometry (MiniTrase 6050X3, Soilmoisture Equipment, Santa Barbara, USA)
	Laaja maa-analyysi	10.2015	Hapan ammoniumasetaattiutto Viljavuustutkimus (Perustutkimus + Vilja 2 paketti (PT + Cu, Mn, Zn, B) Suomen Ympäristöpalvelu, Ahma insinöörit Oy, Suomi, Oulu)
	C ja N pitoisuus	10.2015	Dumasin kuivapolttomenetelmä (VarioMax, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Saksa)
Kasvusto	Lehtialaindeksi	12.6. & 18.8.14 15.6. & 3.8.15	lehtialamittari (SunScan SS1-laite, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK)
	Lehtivihreäpitoisuus	10.6. & 19.8.14 15.6. & 3.8.15	lehtivihreämittari (SPAD 502 DL, Minolta Camera Co. Ltd., Osaka, Japani)
	Sato ka/kg/ha	17.6. & 28.8.14 16/17.6. & 5/6.8.15	Satonäyte & Koeruutupuimuri (Haldrup 1500, J. Haldrup a/s, Tanska)
	Kasvilajisuhde	17.6. & 28.8.14 16/17.6. & 5/6.8.15	Silmämääräinen lajimääritys

Kasvukaudella 2015 ennen kumpaakin niittoa mitattiin lehtialaindeksi, LAI, ja timotein suhteellinen lehtivihreäpitoisuus, SPAD, eri käsittelyissä (taulukko 6). Lehtialaindeksi kuvaa lehtipinta-alan suhdetta maapinta-alaan eli yhteyttävän pinta-alan suuruutta (Hyrkäs & Virkajärvi 2012). Lehtivihreäpitoisuus kuvaa kasvin terveyttä ja sadontuottokykyä sekä kasvuston typpitilannetta (Vuori 2005). SPAD-pitoisuus kuvaa lisäksi pellon kasvukuntoa ja satopotentiaalia.

Kumpanakin kasvukautena 2014 ja 2015 nurmi niitettiin kaksi kertaa (taulukko 6). Päivää ennen niittoa satonäyte korjattiin käsin 12 cm korkeudelta 30 cm x 30 cm kokoiselta alueelta (kuva 3) aina samasta kohtaa koeruutua (1 m ruudun päädyistä). Tästä näytteestä punnittiin sadon tuorepaino. Kuivapaino punnittiin satonäytteistä 60 °C kuivaamisen jälkeen. Hehtaarisato määritettiin koeruutupuimurin tuoreniittosatojen ja satonäytteiden kuiva-ainepitoisuuksien perusteella paitsi ensimmäisenä sadonkorjuukertana

kasvukaudella 2014. Kasvukauden 2014 ensimmäisen niiton hehtaarisato laskettiin kerätyn näytteen (30 cm x 30 cm) perusteella koeruuupuumurin rikkoutumisen takia.



Kuva 3. Nurminäytteiden sadonkorjuuta niittokoneen niittopöydän korkeudelta.

Kuivatusta kasvinäytteistä lajiteltiin myöhemmin syksyllä marras- ja joulukuussa timotei ja puna-apila, jonka jälkeen niiden osuus punnittiin. Alle 0,5 cm mittaiset lehdet tai korren palat jätettiin tunnistamattomiksi virheriskin kasvaessa näytteen koon pienentyessä. Lisäksi kuivatusta näytteistä eroteltiin osaruuduittain tunnetuimpia rikkakasveja sekä tunnistamattomien kasvien osuus. Rikkakasvit ja tunnistamattomat kasvit heitettiin määrityksen jälkeen pois.

4.5 Tilastollinen analyysi

Eri vuosien ja mittauskertojen tulokset testattiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä (ANOVA). Biohiilikokeen käsittelyiden (biohiili- ja lannoitustasot) ja niiden yhdysvaikutuksien merkitsevyyttä verrattiin maaperän kosteus- ja analyysi- sekä nurmen sato- ja laatutuloksissa. Analyysimenetelmän valinnassa otettiin huomioon, että kokeen alkuperä oli alun perin vuonna 2010 samalle lohkolle rinnakkain, mutta erillisinä perustetut kolme biohiilen porraskoetta (käsite ”osakoe” kappaleessa 4.3). Nämä porraskokeet erosivat vain viljelykasvikierron osalta, siten että yhden kokeen vuorotus (2010, 2011 ja 2012) oli härkäpapu, vehnä, rypsi, toisen vehnä, rypsi, härkäpapu, ja kolmannen rypsi, härkäpapu, vehnä (kts. liite 1, luku 4.3 sekä taulukko 3). Koetta edeltävänä vuonna 2013 kaikkien kolmen osakokeen viljelykasvivasvusto oli sama. Biometrikon (Elise Ketoja, LUKE, henkilökohtainen konsultointi) kanssa tehdyn alustavan tarkastelun mukaan vuosien 2010 - 2012 esikasvivuorotuksen eroavuus ei tuo aineistoon sellaista ylimääräistä vaihtelua, että osakokeita olisi tässä työssä tarkasteltava erillisinä. Siksi tässä kokeessa näiden kolmen osakokeen muodostamaa kokonaisuutta tarkasteltiin tilastollisesti yhtenä kokeena, jossa oli 12 kerrannetta. Tilasto-ohjelma, jota käytettiin oli SPSS (version 21, IBM Inc., Chicago, IL, USA). Muuttujien jäännösten normaalijakautuneisuus varmennettiin Shapiro-Wilkin ja Kolmogorov-Smirnovin testien avulla. Varianssien yhdensuuntaisuus testattiin Levenen testin avulla. Mikäli muuttuja ei ollut normaalisti jakautunut tai varianssit eivät olleet yhtä suuria, tehtiin muuttujalle Box-Cox-muunnoksia (Box ja Cox 1964) kunnes parametrinen testien edellytykset täyttyivät. Jos kolme peräkkäistä Box-Cox muunnosta ei saanut niitä vastaamaan parametrinen testien edellytyksiä, kokeiltiin datasta poistaa poikkeava luku. Mikäli tämäkään ei saanut muuttujaa normaalisti jakautuneeksi, niin pitäydettiin alkuperäisissä P-arvoissa (ennen Box-Cox-muunnosta). Jos näin tehtiin, tämä mainitaan erikseen. Ei-parametrisiä testejä ei lähdetty tekemään, sillä ne eivät ole yhtä robusteja kuin parametriset testit, joita käytettiin muissa analyyseissä. Post Hoc-testissä parittaisessa vertailussa käytettiin Tukey:ta yhdysvaikutusten vertailuun. Tilastollisen merkitsevyyden rajana käytettiin $P \leq 0,05$.

5 TULOKSET

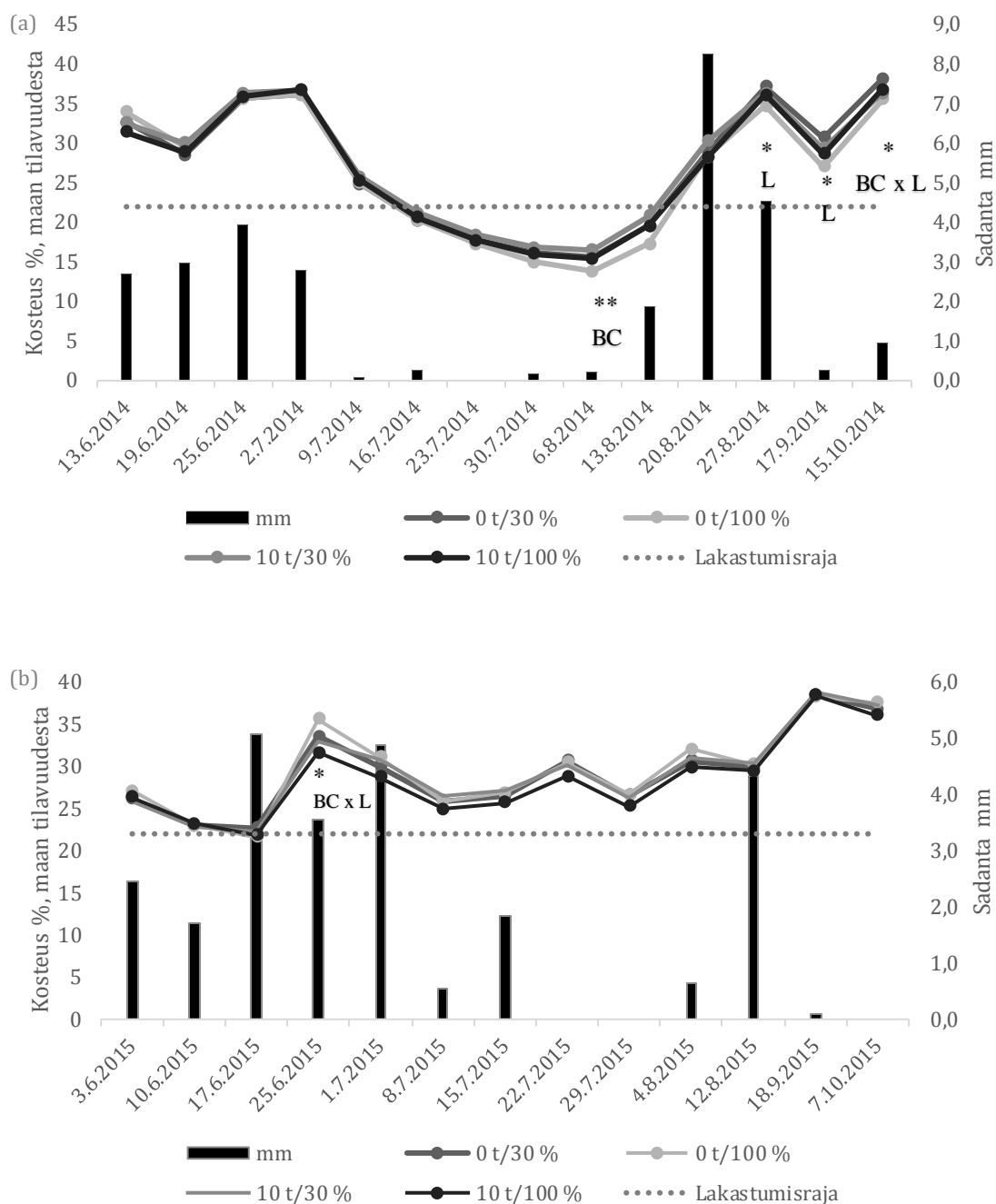
5.1 Maaperän kosteuspitoisuus

Maan kosteuspitoisuudessa havaittiin osassa mittauskerroista eroa eri lannoite- ja eri biohiilikäsittelyiden välillä. Biohiili nosti maaperän kosteuspitoisuutta pintamaassa yhdellä mittauskerralla kaudella 2014 kosteuden ollessa lakastumisrajan alapuolella. Kasvukaudella 2014 suurempi kaliumlannoitustaso vähensi maaperän kosteuspitoisuutta kaikissa maakerroksissa (18 – 58 cm) verrattuna pienempään lannoitustasoon. Kasvukaudella 2015 suurempi lannoitemäärä (kaikki ravinteet porrastettu) nosti maaperän kosteuspitoisuutta joillakin mittauskerroilla.

5.1.1 Biohiilen vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen

Tammeorg ym. (2014a) ovat määrittäneet lakastumisrajan Porvoontienvarren lohkolle pintamaasta viiden senttimetrin syvyydestä. Kasvukautena 2014 biohiili (10 t/ha) nosti maaperän kosteutta noin 8 % ensimmäisellä elokuun mittauskerralla (6.8.) 18 senttimetrin syvyydessä ($P=0,008$) (kuva 4). Biohiilellä ja lannoituksella oli yhdysvaikutusta yhdellä pintamaan mittauskerralla 15.10. ($P=0,023$) kasvukaudella 2014 (kuva 4). Biohiilellisten käsittelyiden kosteus oli suhteellisen tasainen, kun taas kontrollin kosteus oli pienimmällä lannoitustasolla suurin ja suurimmalla lannoitustasolla pienin.

Kasvukaudella 2015 biohiilellä ei yksin ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maaperän kosteuspitoisuuteen missään syvyydessä. Yhdellä mittauskerralla 25.6.2015 biohiilellä ja suurimmalla lannoitustasolla oli yhdysvaikutusta ($P=0,042$) 30 senttimetrin syvyydessä maaperän kosteuspitoisuuteen (kuva 4). Biohiilellisillä ruuduilla oli pienempi kosteuspitoisuus verrattuna biohiilettömiin ruutuihin, joissa oli suurin lannoitustaso. Kasvukaudella 2015 biohiilellä ja lannoituksella ei ollut yhdysvaikutusta maaperän kosteuspitoisuuteen 18 eikä 58 senttimetrin syvyydessä.

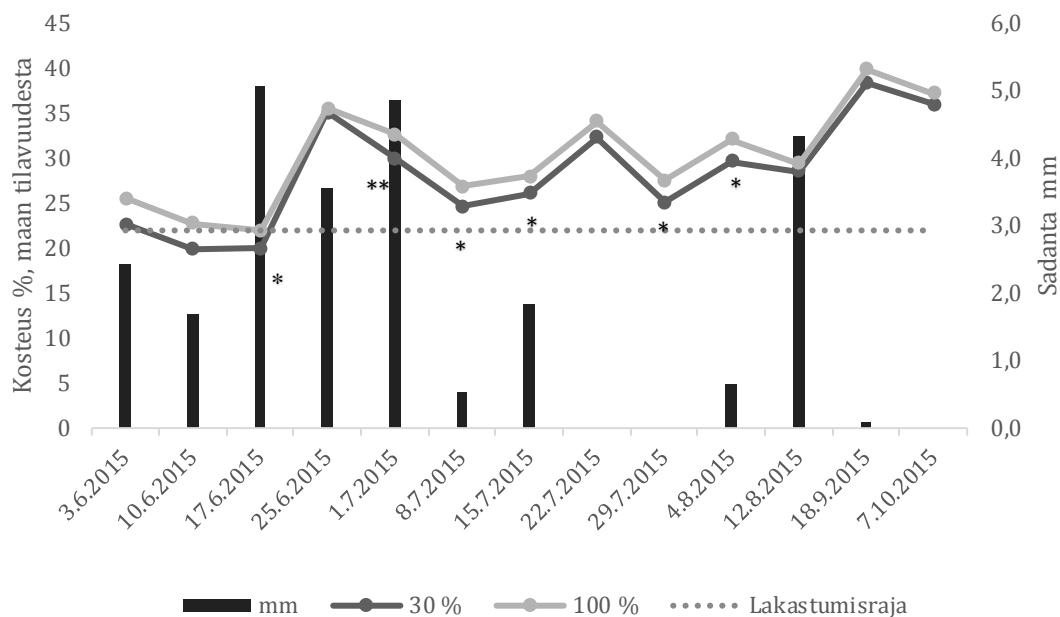


Kuva 4. Peltomaan kosteuden kehitys eri biohiili- ja lannoituskäsittelyissä kasvukausina 2014 (18 cmn syvyys) (a) ja 2015 (30 cmn syvyys) (b) sekä sademäärä Ilmatieteen laitoksen Kumpulan seitsemän vuorokauden sademittauskerran keskiarvoina. Merkinnät * ($P < 0,05$) ja ** ($P < 0,01$) viittaavat tilastollisen vertailun riskitasoon. L=lannoitus, BC=biohiili.

5.1.2 Lannoitekäsittelyiden vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen

Kasvukaudella 2014 suurempi kaliumlannoitus vähensi maaperän kosteuspitoisuutta elokuun lopun (27.8.) ($P=0,036$) ja syyskuun (17.9.2014) ($P=0,042$) mittauksissa 18 senttimetrin syvyydessä (kuva 4). Vain yhdellä mittauksella 30 senttimetrin syvyydessä lannoituksella oli tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maaperän kosteuteen ($P=0,046$). Mittauskerta oli sama kuin 18 senttimetrin mittauksessa 17.9.2014 ja kosteuspitoisuus oli noin 5 % korkeampi pienemmän kaliumlannoitustason käsittelyssä verrattuna suuremman lannoitustason käsittelyyn. Suurempi lannoitustaso pienensi maaperän kosteuspitoisuutta noin 21 % myös 58 senttimetrin syvyydessä kahtena mittauskertana elokuussa 6.8. ($P=0,041$) ja 13.8.2014 ($P=0,034$).

Toisin kuin vuonna 2014, vuonna 2015 lannoitus (kaikki ravinteet porrastettu) nosti pintamaan (mittaussyvyys 18 cm) kosteutta. Tämä todettiin kuudella mittauksella: 17.6. ($P=0,021$), 1.7. ($P=0,003$), 8.7. ($P=0,035$), 15.7. ($P=0,046$), 29.7. ($P=0,021$), 4.8.2015 ($P=0,024$) (kuva 5). Kasvukaudella 2015 syvemmältä mitattaessa tilastollisesti merkitseviä eroja ei ollut.



Kuva 5. Peltomaan kosteuden kehitys eri lannoituskäsittelyissä kasvukaudella 2015 (18 cm:n syvyys) sekä sademäärä Ilmatieteen laitoksen Kumpulan seitsemän vuorokauden sademittauskerran keskiarvoina. Merkinnät * ($P < 0,05$) ja ** ($P < 0,01$) viittavat tilastollisen vertailun riskitasoon.

5.2 Viljavuusanalyysi 2015

Biohiilikäsittelyt laskivat johtolukua tilastollisesti merkitsevästi (taulukko 7). Biohiilikäsittelyn 5 t/ha ($P=0,005$) johtoluku oli noin 9 % pienempi ja biohiilikäsittelyn 10 t/ha ($P=0,000$) noin 11 % pienempi kontrolliin nähden. Johtolukuun vaikutti luonnollisesti myös lannoitustaso ($P=0,000$). Lannoitustason nousu johti johtoluvun kasvuun (taulukko 7). Lannoituksen lisäys laski maan pH:ta kahden desimaalin tarkkuudella (taulukko 7).

Taulukko 7. Syksyn 2015 maa-analyysin pH:n, johtoluvun, liukoisen fosforin ja kaliumin keskiarvoluvut sekä tilastollinen merkitsevyys eri lannoite- ja biohiilikäsittelyissä.

Muuttuja	Jl 10·µS/cm	pH	P mg/l	K mg/l
BC 0 t/ha	1,51a	6,27	15,8	147
BC 5 t/ha	1,39b	6,30	16,3	145
BC 10 t/ha	1,35b	6,28	15,5	144
SEM	0,03	0,02	0,37	3,50
L. 1. taso	1,30a	6,30a	14,8a	131a
L. 2. taso	1,41b	6,29a	15,9b	147b
L. 3. taso	1,55c	6,26b	16,8c	159c
SEM	0,03	0,01	0,14	2,21
	df	P-arvot		
BC	0,006	0,395	0,305	0,722
Lan.	<0,001	0,007	<0,001	<0,001
BC x L.	0,983	0,898	0,785	0,500

SEM = kaikkien biohiilikäsittelyiden ($n = 36$) ja vastaavasti lannoitekäsittelyiden ($n = 36$) keskiarvon keskivirhe. Eri kirjaimet keskiarvolukujen perässä viittaavat tilastollisesti merkitsevään eroon käsittelyiden välillä ($P < 0,05$).

Taulukko 8. Syksyn 2015 maa-analyysin sivu- ja hivenravinteiden keskiarvoluvut ja tilastollinen merkitsevyys eri lannoite- ja biohiilikäsittelyissä.

Muuttuja	Zn+	Ca	Mg	S	Cu	B	Mn	
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
BC 0 t/ha	5,6	2029	205	19,9	18,6	0,53	4,1	
BC 5 t/ha	5,6	2073	209	19,8	18,7	0,54	4,4	
BC 10 t/ha	6,0	1997	202	19,2	18,9	0,53	4,3	
SEM	0,23	32,76	2,28	0,28	0,38	0,01	0,14	
L. 1. taso	5,4a	2047	206	15,2a	18,5	0,52a	4,0	
L. 2. taso	5,8b	2032	204	20,0b	19,0	0,54b	4,2	
L. 3. taso	6,1b	2019	206	23,7c	18,8	0,55b	4,5	
SEM	0,09	9,32	1,03	0,32	0,21	0,01	0,08	
	df	P-arvot						
BC	2	0,317	0,277	0,103	0,155	0,960	0,880	0,293
Lan.	2	<0,001	0,121	0,290	<0,001	0,272	0,001	0,096
BC x L.	4	0,208	0,755	0,867	0,261	0,229	0,954	0,335

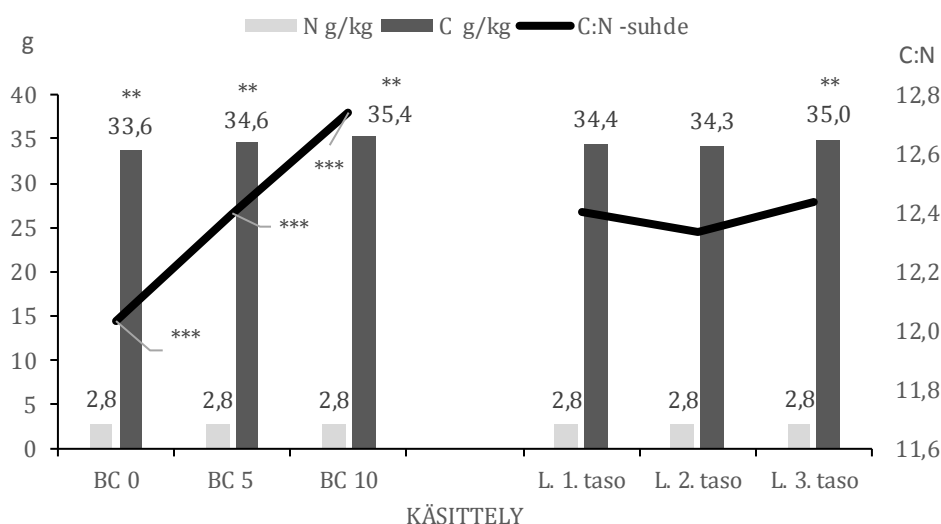
SEM = kts. kuvan 7 selite.

+ = muuttujien jäännökset olivat normaalisti jakautuneita Kolmogorov-Smirnovin mukaan $P = 0,059$, mutta eivät olleet Shapiro-Wilkin mukaan $P < 0,05$. Kolme peräkkäistä Box-Cox muunnosta ei saanut niitä vastamaan parametrisen testin edellytyksiä Shapiro-Wilkin mukaan, vaikka datasta poistettiin poikkeava luku korkeimman biohiilitason ja suurimman lannoitustason ruudusta kerranteesta 4.

Biohiilellä ei ollut vaikutusta maaperän kalium- eikä fosforipitoisuuteen. Lannoitus nosti tilastollisesti merkitsevästi maaperän kalium- ja fosforipitoisuuksia (taulukko 7). Biohiili- eikä lannoituskäsittelyillä ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maaperän kalsium-, magnesium-, kupari- eikä mangaanipitoisuuteen (taulukko 8). Biohiilellä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta sinkki-, rikki- eikä booripitoisuuteen maassa. Sen sijaan lannoitustason noustessa myös maaperän rikki- ja booripitoisuus nousi (taulukko 8). Lannoitustaso vaikutti tilastollisesti merkitsevästi myös maan sinkki- ja booripitoisuuksiin. Suurin lannoitustaso lisäsi sinkkipitoisuutta noin 13 % ja keskimäinen lannoitustaso noin 7 % verrattuna pienimpään lannoitustasoon. Suurin lannoitustaso lisäsi booripitoisuutta noin 5 % ja keskimäinen lannoitustaso noin 4 % verrattuna pienimpään lannoitustasoon.

5.3 Maaperän kokonaishiili- ja typpipitoisuus

Biohiilitason noustessa maaperän kokonaishiilipitoisuus nousi ($P=0,002$) (kuva 6). Myös lannoitustaso vaikutti hiilipitoisuuteen ($P=0,007$). Suurin lannoitustaso erosi tilastollisesti merkitsevästi pienimmästä ($P=0,05$) ja keskimäisestä ($P=0,007$) lannoitustasosta lisäen eniten hiilipitoisuutta. Keskimäisellä lannoitustasolla oli pienin hiilipitoisuus (kuva 6). Biohiilellä ja lannoituksella ei ollut yhdysvaikutusta hiilipitoisuuteen. Biohiilellä eikä lannoituksella ollut vaikutusta maaperän kokonaistyyppipitoisuuteen (kuva 6).



Kuva 6. Biohiilen (BC) ja lannoitustason (L.) vaikutus kokonaistypen ja kokonaishiilen osuuteen maan painosta (g/kg ilmakeivää maata) sekä hiili-typpisuhteeseen. Keskiarvon ($n = 36$) päällä ** tarkoittaa tilastollisesti erittäin merkitsevää tulosta $P < 0,01$, ***= $P < 0,001$.

Suuremmalla biohiilitasolla maaperän hiili-typpisuhde hieman nousi (kuva 6). Erot olivat pieniä, desimaalin eroja, mutta tilastollisesti erittäin merkitseviä ($P=0,000$). Biohiilettömän kontrollin hiili-typpisuhteen keskiarvo oli 12,0, biohiilikäsittelyn (5 t/ha) hiili-typpisuhde oli 12,4 (ka) ja biohiilikäsittelyn (10 t/ha) hiili-typpisuhde oli 12,7 (ka). Lannoituksella tai sen yhdysvaikutuksella biohiilen kanssa ei ollut vaikutusta maaperän hiili-typpisuhteeseen.

5.4 Sadontuotto

Neljä ja viisi vuotta sitten levitetyllä biohiilellä ei ollut merkitsevää vaikutusta timotein lehtivihreäpitoisuuteen (SPAD). Porrastetulla kaliumlannoituksella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta timotein lehtivihreäpitoisuuteen kasvukaudella 2014. Kasvukaudella 2015 lannoitustason nousu nosti tilastollisesti erittäin merkitsevästi lehtivihreäpitoisuutta ensimmäisellä mittauskerralla, juuri ennen sadonkorjuuta (taulukko 9). Toisella mittauskerralla lannoituksella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta timotein lehtivihreäpitoisuuteen. Lehtialaindeksi (LAI) ei eronnut koejäsenten välillä tilastollisesti merkitsevästi (taulukko 9).

Neljä ja viisi vuotta levityksen jälkeen biohiili ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi puna-apila-timoteinurmen satoon verrattuna käsittelemättömiin ruutuihin ($P>0,05$) (taulukko 10). Lannoitus ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi nurmen satoon kasvukaudella 2014. Kasvukaudella 2015 suurin lannoitus lisäsi ensimmäisen niiton satoa noin 4 % verrattuna keskimmäiseen lannoitusmäärään (taulukko 10). Muita merkitseviä lannoitusvaikutuksia nurmisatoon ei ollut.

Taulukko 9. Puna-apila-timoteinurmen lehtivihreäpitoisuuksien ja lehtialaindeksien keskiarvot sekä varianssianalyysin tulokset eri biohiili (BC)- ja lannoitekäsitelyissä (L.) kasvukausina 2014 ja 2015 juuri ennen 1. ja 2. niittokertaa.

Muuttujat	1. SPAD	2. SPAD	1. SPAD	2. SPAD	1. LAI	2. LAI	1. LAI	2. LAI	
	2014	2014	2015	2015	2014	2014	2015	2015	
BC 0 t/ha	32,5	33,8	31,7	28,3	8,0	7,7	6,1	7,7	
BC 5 t/ha	32,3	33,7	31,1	28,3	7,9	7,5	5,7	7,6	
BC 10 t/ha	32,0	33,6	31,5	27,9	8,2	7,5	5,8	7,5	
SEM	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	
L. 1. taso	32,6	33,9	30,7a	28,2	8,3	7,6	5,7	7,4	
L. 2. taso	32,1	33,8	31,3b	28,2	7,9	7,6	5,9	7,6	
L. 3. taso	32,1	33,4	32,2c	28,0	7,9	7,4	6,0	7,7	
SEM	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	
	df	P-arvot							
BC	2	0,273	0,773	0,127	0,418	0,379	0,884	0,263	0,892
L.	2	0,073	0,277	<0,001	0,745	0,117	0,450	0,090	0,266
BC x L.	4	0,514	0,759	0,806	0,872	0,120	0,971	0,428	0,747

SEM = kaikkien biohiilikäsittelyiden ($n = 36$) ja vastaavasti lannoitekäsitelyiden ($n = 36$) keskiarvon keskivirhe. Eri kirjaimet keskiarvolukujen perässä viittaavat tilastollisesti merkitsevään eroon käsittelyiden välillä ($P < 0,05$).

Taulukko 10. Biohiili (BC)- ja lannoitekäsitelyjen (L.) puna-apila-timoteinurmiruutujen satojen keskiarvot (12 kerrannetta) ja varianssianalyysin tulokset kasvukausina 2014 ja 2015.

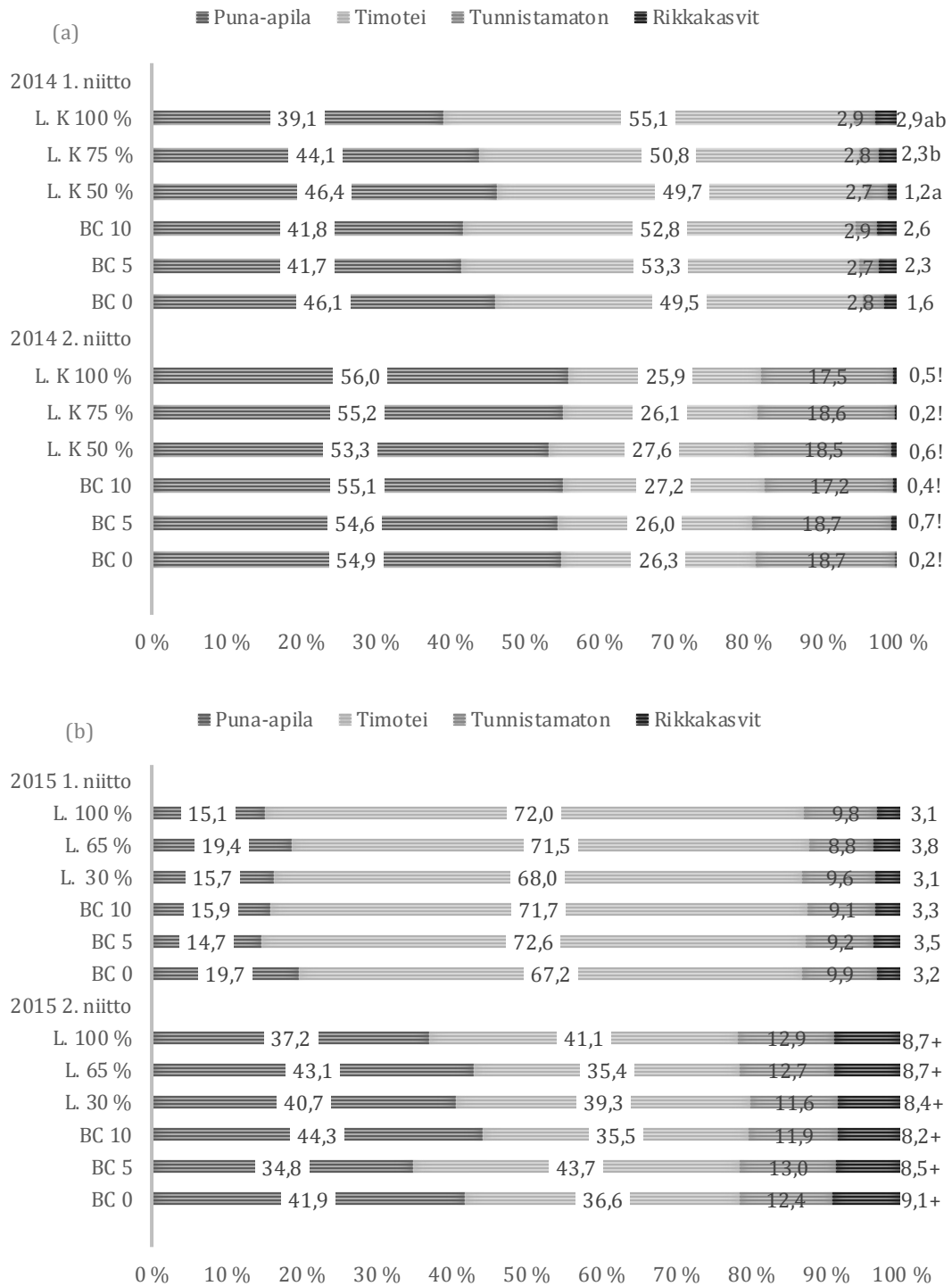
Koejäsenet	1. sato 2014	2. sato 2014	1. sato 2015	2. sato 2015	
	ka/t/ha	ka/t/ha	ka/t/ha	ka/t/ha	
BC 0 t/ha	6,5	3,5	5,3	5,2	
BC 5 t/ha	6,4	3,5	5,4	5,4	
BC 10 t/ha	6,2	3,5	5,4	4,8	
SEM	0,2	0,1	0,1	0,2	
L. 1. taso	6,6	3,6	5,3ab	5,2	
L. 2. taso	6,0	3,6	5,3b	5,0	
L. 3. taso	6,5	3,4	5,5a	5,2	
SEM	0,2	0,1	0,1	0,1	
	df	P-arvot			
BC	2	0,382	0,967	0,895	0,398
L.	2	0,081	0,159	0,021	0,743
BC x L.	4	0,870	0,705	0,76	0,411

SEM = kaikkien biohiilikäsittelyiden ($n = 36$) ja vastaavasti lannoitekäsitelyiden ($n = 36$) keskiarvon keskivirhe. Eri kirjaimet keskiarvolukujen perässä viittaavat tilastollisesti merkitsevään eroon käsittelyiden välillä ($P < 0,05$).

5.5 Biohiilen ja lannoitekäsittelyiden vaikutus kasvilajisuhteisiin

Puna-apila-timoteinurmen kasvilajisuhteissa ei ollut merkitsevää eroa kumpanakaan kasvukautena eri biohiilikäsittelyiden välillä tai biohiili- ja lannoitekäsittelyiden yhdysvaikutuksien välillä. Kasvukaudella 2014 ensimmäisen niiton aikana puna-apilaa oli keskimäärin 43 % ja timoteita 52 % (kuva 7). Rikkakasvien (2 %) ja tunnistamattomien kasvien osuudet (3 %) olivat suhteellisen samat. Toisen niiton aikana puna-apilan määrä oli 55 % ja timotein 27 %. Tunnistamattomien kasvien määrä kasvoi huomattavasti ja rikkakasvien määrä oli enää hyvin pieni. Kasvukaudella 2014 ensimmäisen niiton aikana keskimmäisen lannoitustason ruuduissa rikkakasvien ($P=0,040$) määrä oli korkeampi verrattuna pienimpään lannoitustasoon (kuva 7). Lannoituksella ei ollut vaikutusta toisen niiton kasvilajisuhteisiin vuonna 2014.

Kasvukaudella 2015 lannoituksella ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta kummankaan niiton kasvilajisuhteisiin. Ensimmäisen niiton aikana puna-apilan määrä oli keskimäärin 17 % ja timotein 71 %. Rikkakasvien määrä oli 3 % ja tunnistamattomien kasvien 9 %. Myös vuonna 2015 toisen niiton aikana puna-apilan määrä kasvoi ja timotein määrä suhteessa pieneni. Rikkakasvien määrä oli keskimäärin suurempi ja tunnistamattomien kasvien määrä oli hieman ensimmäistä niittoa suurempi (kuva 7).



Kuva 7. Puna-apila-timoteinurmen kasvilajisuhteita kasvukausien 2014 (a) ja 2015 (b) ensimmäisen ja toisen niiton aikana erilaisissa lannoite- ja biohiilikäsittelyissä. Prosenttisuhteet ovat keskiarvoja, $n = 36$. Eri kirjaimet keskiarvolukujen perässä viittaavat tilastollisesti merkitsevään eroon käsittelyiden välillä ($P < 0,05$). !=muuttujien jäännökset eivät olleet normaalisti jakautuneita Kolmogorov-Smirnovin, eikä Shapiro-Wilkin mukaan $P < 0,05$. 3 peräkkäistä Box-Cox muunnosta ei saanut niitä vastamaan parametrinen testin edellytyksiä, joten pitäydyttiin alkuperäisissä P-arvoissa. +=muuttujien jäännökset olivat normaalisti jakautuneita Kolmogorov-Smirnovin mukaan $P = 0,056$, mutta eivät olleet Shapiro-Wilkin mukaan $P < 0,05$. Kolme peräkkäistä Box-Cox muunnosta ei saanut niitä vastamaan parametrinen testin edellytyksiä Shapiro-Wilkin mukaan.

6 TULOSTENTARKASTELU

6.1 Maaperän kosteuspitoisuus

Kasvukaudella 2014 heinäkuu oli kuiva, jolloin maaperän kosteutta lisäävistä menetelmistä olisi voinut olla hyötyä. Kasvukausi 2015 oli viileä ja kostea, jolloin taas orgaaninen aines olisi voinut tasata kosteutta maaperässä. Biohiili lisäsi savimaan vedenpidätyskykyä kuivana aikana yhdellä elokuun mittauskerralla vuonna 2014. Biohiilienttäkokeen aikaisempien vuosien tuloksissa 2010 – 2012 maan kosteuspitoisuus parani biohiiliruuduissa varsinkin loppukasvukaudesta joinakin vuosina osassa mitatuista syvyyksistä (Tammeorg ym. 2014a). Joissain aikaisemmissa peltokokeissa biohiili on parantanut maaperän kosteusolosuhteita (Liu ym. 2012, de Melo Carvalho ym. 2014), kun taas toisissa peltokokeissa sillä ei ole ollut vaikutusta maan käyttökelpoiseen veteen eikä kosteuspitoisuuteen (Hardie ym. 2014, Lehti 2015). Monissa lyhytaikaisissa tutkimuksissa biohiili on vaikuttanut maaperän kosteuteen nostamalla maaperän vedenpidätyskykyä (Batoool ym. 2015, de Melo Carvalho ym. 2014, Ulyett ym. 2014) ja kosteuspitoisuutta (Karhu ym. 2011, Saarnio ym. 2013, Felber ym. 2014). Sen sijaan ikääntyvän biohiilen vaikutuksista maaperän kosteuspitoisuuteen on kovin vähän tutkittua tietoa saatavilla.

6.1.1 Biohiilen vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen

Biohiili (10 t/ha) pidatti kosteutta pintamaakerroksessa (18 cm) kuivan jakson aikaan elokuun ensimmäisessä mittauksessa vuonna 2014, mikä saattaa johtua biohiilen maan rakennetta parantavista ominaisuuksista. Ennen kosteusmittausta oli suhteellisen pitkä kuivajakso ja kosteuspitoisuus oli lakastumisrajan alapuolella. Tutkimuksen tulosta tukee myös Saarnion ym. (2013) havainto biohiilen kosteutta pidättävästä vaikutuksesta kuivan jakson aikana. Biohiili pystyy pidättämään huomattavan määrän vettä jopa 1,2 – 1,7 kertaa oman painonsa verran (Artiola ym. 2012), mikä ei pienillä peltolevitysmäärillä kuitenkaan ole hirveän paljon esim. levitettäessä biohiiltä 10 t/ha on vedenpidätysvaikutus maksimissaan n. 1,7 l/m². Oletettavasti biohiilen vaikutus kasveille käyttökelpoiseen veteen liittyy suuressa määrin sen maata parantaviin vaikutuksiin. Biohiili vaikuttaa maaperän rakenteeseen ja tekee maasta huokoisemman, mikä vaikuttaa positiivisesti maaperän vesitalouteen (de Melo Carvalho ym. 2014, Obia ym. 2016).

Kenttäkokeen maaperä oli kuitenkin jo ennen biohiilen lisäystä multava ja se sisälsi suhteellisen paljon orgaanista hiiltä (SOC 34,4 g/kg) sekä savesta (24 %). Oletettavasti hyvärakenteisella savimaalla on suhteellisen hyvä vedenpidätyskyky (Alakukku 2013), jolloin vedenpidätyskyvyn paraneminen näkyy heikommin hyvärakenteisella maalla verrattuna huonompaan maaperään. Kasvukaudella 2014 viitenä mittauskertana maaperän kosteuspitoisuus oli alle lakastumisrajan ja biohiili lisäsi maaperän kosteuspitoisuutta merkitsevästi vain kuivimmalla mittauskerralla. Kasvukausi 2015 oli kostea, jolloin vaikutusta oli vaikeampi arvioida. Kaudella 2014 biohiilen vaikutuksen vähäisyys vedenpidätyskykyyn saattoi johtua suhteellisen hyvärakenteisesta maaperästä sekä alhaisesta biohiilen levitysmäärästä, minkä totesivat myös Tammeorg ym. (2014a) aikaisemmassa saman biohiilienttäkokeen tutkimuksessa.

Näyttää siltä, että biohiilen ja lannoitteen yhdysvaikutus saattaa vähentää maaperän kosteuspitoisuutta, mikä viittaa suurempaan vedenkulutukseen maassa. Suurempi vedenkulutus voi johtua esimerkiksi mineraalilannoitteen ja biohiilen lisäämästä nurmen juurien kasvusta, mikä saattoi lisätä juurien vedenkulutusta. Biohiilen on aikaisemmin todettu lisäävän juurien kasvua (Kammann ym. 2011). Myös maaperän kosteus sekä lannoitteet lisäävät juurien kasvua, mikä taas lisää kosteuden ja lannoitteiden hyödyntämistä (Mays 1974 s. 151). Vuonna 2015 biohiilen ja korkeimman lannoitustason yhdysvaikutus vähensi kosteuspitoisuutta verrattuna saman lannoitustason biohiilettömään käsittelyyn ja kyseinen aika kasvukaudesta oli 30 vuoden keskiarvoa 54 % kosteampi ja 11 % viileämpi (kuva 2). Kosteutta vähentävä biohiilen ja lannoitteen yhdysvaikutus saattoi olla positiivinen nurmen kasvulle kesäkuun lopulla 2015. Toisella merkitsevällä mittauskerralla biohiili ja kaliumlannoitekäsittely yhdessä näyttivät tasaavan maaperän kosteuspitoisuutta, mikä viittaa biohiilen vähentävän kosteuseroja lannoitekäsittelyiden välillä. Tämä voi viitata biohiilen maan rakennetta parantavaan vaikutukseen, mikä liittyy maaperän ravinne- ja vesitalouden säätelyyn (Ulyett ym. 2014, Obia ym. 2016). Kuitenkin biohiilen ja lannoitteiden yhdysvaikutukset olivat vähäisiä. Näistä tarvittaisiin lisätutkimusta.

6.1.2 Lannoitekäsittelyiden vaikutus maaperän kosteuspitoisuuteen

Näyttää siltä, että sadannasta riippumatta suuremman kaliumlannoitustason maaperä pysyy kuivempana verrattuna pienempään lannoitustasoon. Merkitsevän tuloksen mittauskerrat olivat ennen toista niittoa sekä heti niiton jälkeen. Nurmen kaliumravinnetarve saattaa niiton jälkeen nousta (Virkajärvi ym. 2014). Kuivempi maaperä saattaa johtua kaliumin juuriin kulkeutumisen edellyttämästä maaperän kosteudesta sekä juurien kasvusta (Saarela ym. 1998 s. 22, 38). Kaliumia kasvit ottavat niin sanotusti luksusottona eli kasvit hyödyntävät kaliumia rajoittamatta sen ottoa (Kykkänen & Virkajärvi 2014). Timotein ja apilan juuristolla on erilainen kasvurytmi. Timotein juuristo on alkukaudesta vahva, kun taas apilan juuristo vahvistuu syksyä kohden (Pietola & Tanni 2000). Kasvukaudella 2014 suurempi kaliumlannoitus vähensi maaperän kosteutta myöhemmin elo-syyskuussa, jolloin voisi olettaa apilan juuriston kasvun vahvistuvan. Puna-apila käyttää valtavasti vettä kasvuunsa (Mays 1974 s. 151). Kalium saattaa myös lisätä puna-apilan biologista typensidontaa (Mia ym. 2014). Lisäksi nystyjen aktiivinen toiminta saattaa lisätä veden kulutusta maaperässä, sillä nystyt tarvitsevat vettä sidontatuotteiden kuljetukseen (Sprent 1972). Kaliumilla on tärkeä rooli myös veden ja ravinteiden kuljetuksessa ksyleemissä (Snyder & Leep 2007 s. 368), jolloin suurempi määrä kaliumia saattaisi lisätä veden kuljetusta johtosolukossa ja vähentää näin maaperän kosteutta. Lisäksi kalium auttaa kasveja hyödyntämään kosteutta tehokkaammin sekä vähentää mahdollista kuivuuden aiheuttamaa sadon menetystä (Snyder & Leep 2007 s. 368).

Kaikkien ravinteiden osalta porrastetun lannoitteen vaikutus maaperän kosteuteen näyttää olevan käänteinen verrattuna porrastettuun kaliumlannoitteeseen. Tulosten perusteella näyttää siltä, että suurempi kaliumlannoitusmäärä vähentää maaperän kosteuspitoisuutta 18 – 58 senttimetrin syvyydessä, kun taas suurempi PK-lannoitusmäärä lisää kosteuspitoisuutta 18 – 30 senttimetrin syvyydessä. Toisaalta kasvukaudet olivat kosteusolosuhteiltaan hyvin erilaiset (kuvat 2, 4 & 5). Vuonna 2015 ravinteet vaikuttivat maaperän kosteuteen heinäkuussa ensimmäisen ja toisen niiton välissä. Tällöin kasvien olettaisi käyttävän paljon ravinteita ja vettä niiton jälkeiseen kasvuunsa, sillä nurmien niitolla on vaikutusta mm. kasvien juuriston kasvuun. Niitto lisää kesällä apilan juurten kasvua 25 senttimetrin syvyydessä (Pietola & Tanni 2000). Kasvukaudella 2015 ei ollut pulaa vedestä. Heinäkuussa 2015 maaperän olisi pitänyt olla kostea. Vain ensimmäisellä

merkitsevällä mittauskerralla (17.6.) maaperän kosteus oli lähellä lakastumisrajaa. Olisi siis mielenkiintoista nähdä olisiko tulos sama kuivempänä kasvukautena.

Kasvukaudet 2014 ja 2015 olivat sääolosuhteiltaan hyvin erilaiset (kuvat 2, 4 & 5), jolloin näiden kahden kasvukauden tuloksia ei voi verrata keskenään. Mikäli lannoituksen vaikutusta maaperän kosteuteen haluttaisiin tutkia, pitäisi eri lannoiteporraskokeet suorittaa saman kasvukauden aikana ja mieluiten useampana sääolosuhteiltaan erilaisena kasvukautena. Tässä kokeessa ei tutkittu lannoituksen vaikutusmekanismia maaperän kosteuteen. Eri lannoitteiden vaikutus maaperän kosteuteen tarvitsisi lisätutkimusta, jotta siitä voitaisiin tehdä luotettavaa tarkastelua ja johtopäätös.

6.2 Maa-analyysi

Biohiili pienensi johtolukua yhden desimaalin tarkkuudella, mikä viittaa aivan vähäiseen maaperän vesiliukoisten suolojen määrän vähenemiseen sekä luoksen sähkönjohtokyvyn pienenemiseen. Biohiiliruutujen keskimääräinen johtoluku oli 1,4 ja kontrollin 1,5 eli tutkimuksen johtoluku oli tavallisen peltomaan luokkaa <2,5 (Ympäristöanalyysit 2016). Korkea johtoluku (>10) vaikeuttaa kasvin ravinteiden ja veden ottoa (Hyytiäinen & Hiltunen 1999). Teolliset ravinnesuolat, lannoitus vaikuttavat johtolukuun ja johtoluvun noustessa maaperän suolapitoisuus kasvaa (Hyytiäinen & Hiltunen 1999). Tässä tutkimuksessa lannoitustason nousu nosti maaperän johtolukua yhden desimaalin tarkkuudella. Biohiili on toisissa tutkimuksissa nostanut maan johtolukua (Asai ym. 2009, Atkinson ym. 2010, Mia ym. 2014). Brewer ym. (2011) tutkivat eri lähteistä olevien biohiilien vaikutusta sähkönjohtokykyyn. He havaitsivat, että puupohjaiset biohiilet pienensivät sähkönjohtokykyä, kun taas ruohopohjaiset kaasutuksella valmistetut biohiilet nostivat eniten johtokykyä. Myös Soinnen ym. (2013) tutkimuksessa puubiohiili pienensi maaperän johtolukua viitaten biohiilen toimivan enemmänkin kationeja pidättävänä pintana kuin kationien lähteenä. Samaa voidaan todeta tämän tutkimuksen perusteella edelleen neljä- ja viisi vuotta vanhasta puubiohiilestä.

Biohiilellä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maaperän pää- eikä mikroravinteisiin, mikä johtui luultavasti biohiilen ja maaperän ominaisuuksista. Biohiili on aikaisemmissa tutkimuksissa nostanut fosforin, kaliumin (Rondon ym. 2007, van de Voorde ym. 2014), kalsiumin, sinkin, kuparin (Lehmann 2003, Rondon ym. 2007), magnesiumin (Liu ym. 2012) sekä molybdeenin ja boorin käyttökelpoisuutta (Rondon

ym. 2007). Tutkimukset, joissa biohiili on vaikuttanut maaperän ravinteiden liukoisuuteen, on toteutettu tropiikissa heikentyneellä maaperällä tai luontaisesti alhaisen hedelmällisyyden maaperässä. Vaihtoehtoisesti edellisissä tutkimuksissa biohiili ei ole ollut puupohjaista tai mikäli biohiilen valmistusmateriaali on ollut puuta, se on pyrolysoitu matalassa lämpötilassa toisin kuin tässä tutkimuksessa.

Lannoitustason noustessa fosfori-, kalium-, rikki- ja booripitoisuudet maassa luonnollisesti kasvoivat. Kuitenkaan biohiilellä ja lannoitteilla ei ollut yhdysvaikutusta maan ravinnepitoisuuksiin, mikä sekin saattaa selittyä käytetyn biohiilen ominaisuuksilla. Maon ym. (2012) tulokset viittaavat siihen, että biohiilillä parantaa huomattavasti maaperän hedelmällisyyttä kasvattamalla kationinvaihtokapasiteettia ja ravinteiden pidättymistä. Hapettuneet, hyvin vanhat hiilen jäänteet ovat hedelmällisyyttä lisäävää maan orgaanista ainesta. Neljä ja viisi vuotta sitten levitetty biohiili ei ole vielä vanhaa tai sen vaikutukset eivät ole verrattavissa satoja vuosia vanhaan hapettuneeseen hiileen. Biohiili saattaa lisätä kasvien veden ja ravinteiden saantia suoraan, mutta myös lisäämällä kationinvaihtokapasiteettia ja maan orgaanista ainesta sekä parantamalla ravinteiden käyttökelpoisuutta (Liu ym. 2012). Laskennallisen kationinvaihtokapasiteetin määrittäminen olisi tuonut lisäarvoa neljä ja viisi vuotta vanhan biohiilen ominaisuuksista maaperässä mm. Eurofins Viljavuuspalvelu on lisännyt perustutkimukseensa laskennallisen kationinvaihtokapasiteetin vuonna 2016.

Biohiili saattaa nostaa maaperän pH:ta (Atkinson ym. 2010, Felber ym. 2014, van de Voorde ym. 2014). Happamille maille lisättynä biohiilellä on ollut positiivisia vaikutuksia (Jeffery ym. 2011), mutta hyvällä, lähellä neutraalia pH-tasoa olevalla maalla sillä ei välttämättä ole vaikutuksia (Liu ym. 2012). Myöskään tässä tutkimuksessa biohiili ei vaikuttanut maaperän pH:hon tilastollisesti merkitsevästi. Muutokset käsittelyiden välillä olivat kahden desimaalin eroja. Sen sijaan lannoitus laskee maan pH:ta kahden desimaalin tarkkuudella merkitsevästi. Kahden desimaalin ero maan pH:ssa ei kuitenkaan ole käytännön kannalta merkittävä. Lehmannin ym. (2003) tutkimuksessa sekä lannoitus että biohiili nostivat maaperän pH:ta. Felberin ym. (2014) kokeessa biohiili nosti hyvän maaperän pH:ta 0,3 yksikköä ja levitetyn biohiilen oma pH oli korkea (10,1). Myös tässä kokeessa käytetyn biohiilen pH oli korkea (10,8), mutta myös kasvulohkon pH oli keskimäärin 6,3 eli lähellä hyvää pH-tasoa (6,0 – 6,7 multavuudesta riippuen). Maaperän neutraalia alkuperäistä pH:ta on aikaisemmissa tutkimuksissa nostanut lannasta ja

kasvijätteestä korkeissa lämpötiloissa pyrolysoidut biohiilet (Felber 2014, Abbasi & Anwar 2015).

Biohiilikäsittelyiden hieman matalampi johtoluku viittaa hienoiseen maanesteen suolapitoisuuden laskuun ja ravinteiden pidättymiseen. Samoin mahdollinen hieman korkeampi pH voi viitata nitrifikaation vähenemiseen hiilityypisuhteen kasvaessa biohiilikäsittelyissä. Ammoniumtyppi on suoraan kasveille käyttökelpoista ja se on sitoutuneena maa-ainekseen (Paasonen-Kivekäs ym. 2009, s. 179). Hyväkuntoisessa viljelymaassa ammoniumtyppi hapettuu herkästi nitriitiksi, mutta biohiili saattaa hieman ehkäistä nitrifikaatiota. Kuitenkin tässä tutkimuksessa biohiilen vaikutukset maaperän reaktioihin ovat niin pieniä, etteivät ne vaikuta maaperän ravinnepitoisuuksiin kyseisessä maaperässä.

6.3 Maaperän kokonaishiili- ja tyypipitoisuus

Biohiili lisää maaperän orgaanista hiiltä (Tammeorg ym. 2014a, b, Agegnehu ym. 2015, Coumaravel ym. 2015). Coumaravelin ym. (2015) tutkimuksessa biohiili (5 t/ha) nosti maaperän hiilipitoisuutta keskimäärin 1,60 g/kg ja biohiili (10 t/ha) nosti maaperän hiilipitoisuutta keskimäärin 1,67 g/kg. Kontrollimaaperän hiilipitoisuus oli 3,22 g/kg. Tässä tutkimuksessa kontrollimaaperän hiilipitoisuus oli lähes kymmenkertainen (33,6 g/kg) ja hiilipitoisuuden nousu oli samaa luokkaa edeltävään tutkimukseen verrattuna. Viisi vuotta vanha biohiili (5 t/ha) nosti maaperän orgaanista hiilipitoisuutta keskimäärin 1,0 g/kg ja biohiili (10 t/ha) keskimäärin 1,8 g/kg. Tulos viittaa kestävään hiilensidontaan ja siihen, että biohiilen hiili on kestävää hajotusta vastaan. Mikro-organismit suosivat mieluummin vähemmän energiaa vaativia ainesosia (Lehmann ym. 2015) ja hiiltäminen vähentää orgaanisen aineen mineralisaatiota. Biohiili on kemiallisesti epätavallinen sekä sen energia on vähemmän hyödyllistä mineralisoida kuin monet muut orgaaniset hiilen muodot maaperässä (Lehmann ym. 2015). Tulokset viittaavat siihen, että biohiilen hiili on kestävää ilmastonmuutoksen torjuntaa ajatellen edelleen 4 ja 5 vuotta biohiilen levityksestä.

Myös lannoitustason nousu lisäsi maaperän hiilipitoisuutta, mikä saattoi johtua mikrobitoiminnan ja hiilen mineralisaation heikkenemisestä mineraalitypen lisääntyessä maaperässä. Samansuuntaisia tuloksia on saanut mm. Palojärvi ym. (2002) tutkiessaan luomuviljeltyjen peltojen mikrobiologisen toiminnan aktiivisuutta verrattuna

tavanomaisesti viljeltyyn peltoon. Hiilidioksidin tuotto kuvaa maan mikrobitoiminnan aktiivisuutta ja maaperän kokonaistypen määrä seuraa orgaanisen hiilen määrää (Palojärvi ym. 2002), jolloin hiilidioksidituotannon heikentyessä hiiltä jää enemmän maahan. Kuitenkin erot hiilipitoisuudessa olivat yhden desimaalin eroja eli hyvin pieniä ja käytännön kannalta tuskin merkittäviä. Myös Pikula & Rutkowska (2014) ovat todenneet mineraalilannoituksen nostavan maaperän hiilipitoisuutta.

Biohiili nosti hiili-typpisuhdetta, mutta käytännön kannalta nousu on sen verran pieni, että se ei näytä vaikuttavan typen käyttökelpoisuuteen tai nurmen satoon. Lehmannin ym. (2003) tutkimuksessa biohiili myös nosti maaperän hiili-typpisuhdetta ja vähensi näin typen käyttökelpoisuutta, mutta ei kuitenkaan vähentänyt satoa. Lisäksi biohiili voi vähentää typen huuhtoutumista. Tammeorgin ym. (2012) tutkimuksessa biohiili vähensi maaperän mineraalista typpipitoisuutta luultavasti mikrobien immobilisaation seurauksena. Hiili-typpisuhde kasvoi myös tässä tutkimuksessa, mutta maaperän kokonaistyppipitoisuudessa ei ollut eroja. Pelkkä hiilipitoisuuden nousu biohiilikäsittelyissä viittaa siihen, että mikrobit eivät hajota biohiiltä. Hiili-typpisuhde säätelee mineralisaatiota ja suhde pysyi alle 20 myös biohiilikäsittelyissä, jolloin nettomineralisaatiota pitäisi tapahtua (Paasonen-Kivekäs ym. 2009, s. 179). Kuitenkaan biohiili ei mineralisoidu edelleenkään neljä ja viisi vuotta levityksestä. Tutkimuksen kaikissa käsittelyissä hiili-typpisuhde pysyi normaalin Suomen peltomaan rajoissa 10 – 16 (Palojärvi ym. 2002).

Chengin & Lehmannin (2009) mukaan biohiili vanhenee jo vuodessa -22 – 70 °C lämpötilassa. Vanhentuneessa biohiilessä on korkeampi happipitoisuus ja kationinvaihtokapasiteetti, mutta alhaisempi hiilipitoisuus sekä pH kuin tuoreessa materiaalissa. Biohiilen vanhenemisprosessin hiilipitoisuuden alenemista ei täysin tue Tammeorgin ym. (2014a) tutkimus, jossa vuosi biohiilen levityksestä (2011) maaperän hiilipitoisuus oli korkeampi kuin levitysvuonna (2010). Sen jälkeisinä vuosina 2012 ja 2015 maan hiilipitoisuus laski hieman ensimmäisen vuoden tasosta (2011) biohiilikäsittelyissä, mutta säilyi kuitenkin alkuperäistä kontrollimaaperän hiilipitoisuutta selvästi korkeampana. Biohiilen levityksen jälkivaikutukset liittyvät hiilen laatuun sekä hiilen lisäämiseen maaperässä (Güereña ym. 2016), mikä tukee korkeissa pyrolyysin lämpötiloissa tuotetun biohiilen käyttöä. Korkeammassa pyrolyysin lämpötiloissa biohiilen hiilipitoisuuden pitäisi kasvaa eikä biohiilen pitäisi hajota niin nopeasti kuin matalissa lämpötiloissa tuotetun biohiilen. Oletettavasti biohiili pysyy maassa pitkiä

aikoja levityksestä (Asia ym. 2009), mikä tukee sen käyttöä hiilinieluna, ilmastonmuutosta torjuvana keinona.

6.4 Biohiilen vaikutus sadontuottoon

Biohiilikäsittelyiden vaikuttamattomuus nurmen kasvuun hiesavimaalla neljä- ja viisi vuotta levityksen jälkeen saattoi johtua biohiilen alhaisista levitysmääristä, kasvulohkon hyvästä pH:sta, maan suhteellisen korkeasta hiilipitoisuudesta, hyvästä ravinnetasosta, havupuuhakkeesta valmistetun biohiilen ominaisuuksista mm. pyrolyysin lämpötilasta ja lähtömateriaalista. Tämän kokeen kuusimäntyhakkeen pyrolyysin lämpötila (550 – 600 °C) oli suhteellisen korkea, kun taas Mukherjeen & Lalin (2014) kirjallisuuskatsauksen mukaan matalissa lämpötiloissa valmistetut biohiilet näyttävät nostavan sadontuottokykyä. Jefferyn ym. (2011) meta-analyysin mukaan kaksi biohiilikäsittelyn päätekijää lisääntyneen sadontuoton kannalta ovat kalkitusvaikutus ja parantunut vedenpidätyskyky, mistä johtuu myös parantunut ravinteiden saatavuus. Neljä ja viisi vuotta sitten levitetty biohiili ei nostanut merkittävästi maaperän pH:ta eikä ravinnepitoisuuksia eikä myöskään vaikuttanut niiden kautta nurmen sadontuottoon. Tämän saattaa selittää maaperän suhteellisen hyvä pH ja ravinnepitoisuus jo ennen kokeen perustamista. Ravinteiden saatavuus ei näyttänyt olevan puna-apilaimoteinurmen sadonmuodostuksen kannalta kriittinen tekijä koekentän maaperällä.

Tämän kokeen biohiilen aikaansaamat vähäiset parannukset maaperän kosteudessa eivät ilmeisesti olleet riittäviä vaikuttamaan nurmen sadontuottoon. Toisaalta erittäin kuivana kasvukautena biohiili olisi saattanut vaikuttaa kasveille käyttökelpoiseen veteen niin, että se olisi näkynyt myös sadon määrässä. Myöskin voi olla, että biohiilen levitysmäärän (10 t/ha) vedenpidätyskyky sekä vaikutus maaperän rakenteeseen ei ollut riittävä suomalaisella pitkään viljellyllä ja hyvin hoidetulla savespitoisella maaperällä, jossa oli luultavasti korkea vedenpidätyskyky jo ennestään (Alakukku 2013). Usein suurilla biohiililisäysmäärillä 100 t/ha on ollut positiivisia vaikutuksia (Jeffery ym. 2011). Tämän kokeen biohiilen levitysmäärät 5 t/ha ja 10 t/ha olivat suhteellisen alhaisia. Vesi ei ollut kriittinen tekijä sadontuoton kannalta tutkittuina kasvukausina kyseisellä maaperällä, mistä johtui vedenpidätyskyvyn vaikuttamattomuus sadontuottoon.

Biohiilen vaikuttamattomuus nurmen lehtialaindeksiin ja timotein suhteelliseen lehtivihreäpitoisuuteen johtui luultavasti kokeessa käytetyn biohiilen ominaisuuksista. Toisissa tutkimuksissa biohiilellä on ollut vaikutusta lehtivihreäpitoisuuteen mm. Agegnehun ym. 2015 tutkimuksessa jätepajupuubiohiili vaikutti positiivisesti lehtivihreäpitoisuuteen. Käsittely nosti lehtivihreäpitoisuutta sitä enemmän, mitä suurempi oli lisätyn maanparannusaineen typpipitoisuus ja vastaavasti mitä pienempi oli hiilipitoisuus. Asain ym. (2009) mukaan biohiili taas laski satokasvin lehtivihreäpitoisuutta käyttökelpoisen typen vähenemisen seurauksena. Tämän tutkimuksen havupuuhakkeesta tuotettu biohiili ei vaikuttanut maan typpipitoisuuteen eikä luonnollisesti myöskään lehtivihreäpitoisuusmittauksissa löydetty eroa kasvin typpitilassa. Myös biohiilen hiili-typpisuhde oli iso (142) niin kuin puubiohiilille on ominaista, sillä valmistusmateriaalilla on vaikutusta biohiilen hiili-typpisuhteeseen (Mukome ym. 2013). Abbasin & Anwarin (2015) tutkimuksessa satoon positiivisesti vaikuttaneen biohiilen hiili-typpisuhde oli pieni (23 & 47) ja typpipitoisuus iso (339 & 456). Ravinteiden lisääntynyt pitoisuus olisi voinut edistää nurmen biomassatuotantoa (Oram ym. 2014, van de Voorde ym. 2014). Tämän kokeen neljä ja viisi vuotta vanha biohiili ei vaikuttanut maan ravinnepitoisuuksiin, mikä ei myöskään näkynyt nurmen lehtialaindeksin tai biomassatuotannon kasvuna.

Ikääntyvän ja yli 1 – 2 vuotta vanhan biohiilen vaikutuksista on vähän tietoa (Jeffery ym. 2011). Toisissa kokeissa biohiili on nostanut satoa ensimmäisinä kasvukausina levityksen jälkeen (Vaccari ym. 2011, Zhang ym. 2011, Güereña ym. 2016). Hallin & Bellin (2005) kokeessa orgaanisten biohiilipohjaisten maanparannusaineiden aikaansaamien ensimmäisten vuosien satolisäyksien oletettiin johtuvan suorasta ravinteiden lisäyksestä. Vaikutus hävisi ensimmäisten kasvukausien jälkeen ja niillä ei ollut vaikutusta sadontuottoon kolmannen satokauden jälkeen. Myös Güereñan ym. (2016) kokeessa biohiili nosti maissin satoja 1 – 2 vuotta lisäyksestä, mutta neljä vuotta biohiililisäyksestä sadot pienenevät 25 – 57 % huippusadoista. Tämän kokeen biohiili oli neljä- ja viisi vuotta sitten levitettyä, mutta toisaalta sama biohiili ei lisännyt viljan satoa levityksen jälkeisinä kolmena kasvukautena 2010 - 2012 samalla koekentällä (Tammeorg ym. 2014a).

Usein maanparannusaineen kertalisäyksellä ajatellaan voivan saada aikaan vain ohimeneviä vaikutuksia (Muukkonen ym. 2009). Tämä perustuu ajatukseen, että mikrobit hajottavat orgaanisen aineksen nopeasti. Biohiili on kuitenkin kestävää mikrobien hajotustoimintaa vastaan (Kuzakov ym. 2014). Güereñan ym. (2016) kokeessa biohiili

ei nostanut satoja yhtä paljon verrattuna nopeammin hajoavaan orgaaniseen ainekseen, mutta ylläpiti paremmin positiivisia vaikutuksia sadontuottoon kuuden vuoden ajan. Positiiviset vaikutukset sadontuottoon ajan kuluessa voidaan selittää biohiilen pysyvyydellä sekä vaikutuksella maaperän rakenteeseen (Ulyett ym. 2014, Obia ym. 2016) ja sitä kautta maaperän reaktioihin. Viisi vuotta sitten levitetty biohiili ei ole vielä vanhaa, joten ei voida tietää, miten biohiili tulee vaikuttamaan maassa vuosien päästä. Ravinneköyhät ja hitaasti hajoavat aineet kuten biohiili voivat vaikuttaa maaperän hedelmällisyyteen pitkällä aikavälillä. Biohiilellä ei ollut tässä tutkimuksessa suhteellisen viljavalla maaperällä tarpeeksi vaikutusta maaperän kosteuteen eikä hiilipitoisuuteen, jotta biohiilellä olisi ollut niiden kautta vaikutusta nurmen satomäärään tai sadontuottokykyyn. Lisäksi ne eivät olleet kyseisellä maaperällä sadontuottoa rajoittavia tekijöitä. Nurmen hehtaarikeskisatomäärät olivat kaikissa käsittelyissä hyviä, sillä nurmihehtaari voi tuottaa parhaimmillaan yli 10 tonnin kuiva-ainesadon (Suomela ym. 2014). Suhteellisen korkeat satotasot viittaavat kenttäkokeen maaperän hyvään kasvukuntoon, joka ei näytä tarvitsevan maaparannusainetta sadontuoton lisäämiseksi.

6.5 Lannoitekäsittelyiden vaikutus sadontuottoon

Kasvukaudella 2014 kaliumlannoitekäsittelyillä ei ollut vaikutusta nurmen satoon tai kasvuun vaikuttaviin tekijöihin, mikä johtuu luultavasti korkeasta reservikaliumin pitoisuudesta savimaalla (Saarela 2001, Saarela & Mäntylähti 2002) ja vuoden 2014 levitysmääristä. Kannattava kalium-lannoitusosuuden yläraja on ensimmäisenä nurmivuotena 100 - 120 kg/ha (Virkajärvi ym. 2014). Käytetyt kaliumkäsittelyt 100 % (179 kg) ja 75 % (134 kg) ylittivät kirjallisuudessa esitetyn tarpeen ja kaliumkäsittely 30 % (89 kg) oli myös lähellä esitettyä kaliumtarvetta. Toisaalta Yaran (2017) kaliumlannoitusosuus eloperäiselle maalla, kolmelle nurmisadolle, on välttävän kaliumtilan maassa suurempi: 160 kg/ha/a. Tavallinen viljavuusanalyysin kaliumluku, joka kuvaa vaihtuvan kaliumin määrää kyntökerroksessa ei välttämättä ollut riittävä kuvaamaan vaihtuvan ja vaihtumattoman kaliumin riittävyyttä savespitoisessa kenttäkoemaassa lannoitus suunnitelmaa tehtäessä (Virkajärvi ym. 2012, Khan ym. 2013). Reservikaliummääritys maa-analyysissä olisi antanut lisätietoa kenttäkoemaan kaliumvaroista.

Nurmen sadontuoton erot kasvukaudella 2015 ensimmäisen niiton aikana lannoitekäsittelyiden 100 % ja 65 % välillä johtuivat luultavasti nurmen ravinnetarpeesta. Nurmen ravinnesuosituksat eroavat toisistaan ja niihin vaikuttaa palkokasvin määrä kasvustossa. Nurmen lannoitussuositus on 188 - 11 - 86 (NPK) eloperäisessä maassa, jossa on hyvä fosfori- ja välttävä kaliumviljavuusluokka (Yara 2017). Kykkänen & Virkajärvi (2014) taas suosittavat typpilannoituksen maksimimääräksi 230 – 240 kg/ha/a kolmella nurmen sadonkorjuulla. Tällöin typpi jakautuu 90 - 100 kg/ha ensimmäiseen ja toiseen satoon. Apilan typensidonnan määrä nurmessa täytyy kuitenkin huomioida. Niskasen & Huhdan (2008) mukaan sopiva typen määrä 25 – 50 % apila-nurmelle on maksimissaan 30 – 60 kg/ha. Keskimmaisessä lannoitustasossa oli luultavasti liian vähän typpeä (15 kg) timotein kasvulle ensimmäisen niiton aikana, kun apilan määrä oli keväällä, talven jälkeen vähäinen (17 %). Kaliumin määrä (91 kg) oli nimittäin luultavasti riittävä nurmen kasvulle myös keskimmaisessa lannoitustasossa. Typen (22 kg) määrä oli lähinnä typpisuositusta suurimmassa 100 % lannoitustasossa, joka tuotti suurimman sadon. Näyttää siltä, että puna-apila-timoteinurmi saattaa hyötyä lisätypestä keväällä, mikäli puna-apilan määrä on kasvustossa heikentynyt nurmen vanhetessa. Kasvukaudella 2015 ensimmäisen niiton aikana lannoitekäsittely vaikutti myös lehtivihreäpitoisuuteen SPAD-arvon nousuna lannoitustason noustessa, mikä on luonnollista käyttökelpoisen typen lisääntyessä alkukasvukaudesta lannoituksen jälkeen.

Neljä ja viisi vuotta sitten levitetyn biohiilen 0 t/ha - 10 t/ha levitysmäärillä ja lannoitekäsittelyillä ei ollut yhdysvaikutusta sadontuottoon, mikä johtuu luultavasti sekä maaperän että biohiilen ominaisuuksista. Saman havainnon ovat tehneet Hall & Bell (2015) todetessaan, ettei alhaisilla biohiililisäysmäärillä (5 t/ka/ha) ollut vaikutusta kationinvaihtokapasiteettiin tai ravinteiden pidätyskykyyn. Biohiilellä on huokoisuutensa vuoksi suuri pinta-ala (Eykelbosh ym. 2014), jolloin myös ravinteiden pidätyskykyä sekä kationinvaihtokapasiteettia on paljon (Mao ym. 2012). Olisi siis voinut olettaa ravinteiden pidättyvän ruuduille, joille biohiiltä oli levitetty.

Mielenkiintoinen uusi tutkimusaihe olisi tutkia erilaisten biohiilten soveltuvuutta ravinteiden kierrätykseen, vaikka havupuuhakkeesta valmistettu biohiili ja lannoitus yhdessä eivät vaikuttaneetkaan nurmen sadontuottoon. Korkeissa lämpötiloissa pyrolysoitu biohiili näyttäisi sopivan pääasiallisesti hiilensidontakäyttöön pohjoisilla, suhteellisen viljavilla peltomaa-alueilla. Matalissa lämpötiloissa hiilletty biohiili näyttäisi aikaisempien tutkimusten perusteella sopivan paremmin heikentyneillä maatalousmailla

viljelykunnan parantamiseen. Rakeiseen biohiileen voidaan lisätä ravinteita, esimerkiksi valumavesistä voitaisiin sitoa fosforia (Tuomisto 2013). Näin saataisiin ravinteita kierrätettyä takaisin peltoon. Myös Schmidt ym. (2015) totesivat biohiilen kyvyn pidättää ja luovuttaa kasviravinteita. Lehmän virtsan ja biohiilen sekoite pieninä levitysmäärinä paransi satokasvin satoa täsmälevitettynä lähelle kasvin juuria (Schmidt ym. 2015). Ravinteella ladatun biohiilen täsmälevitystä kannattaisi kokeilla tulevaisuuden biohiilikokeissa. Biohiiltä voisi hyödyntää orgaanisissa lannoitteissa.

6.6 Biohiilen ja lannoitekäsittelyiden vaikutus kasvilajisuhteisiin

Alhaiset biohiilen levitysmäärät 5 t/ha ja 10 t/ha eivät vaikuttaneet nurmen kasvilajisuhteisiin, mikä johtuu luultavasti biohiilen vähäisistä vaikutuksista maaperän ravinne- ja kasvuolosuhteisiin. Fosforin (van de Voorde ym. 2014) ja kaliumin (Virkajärvi ym. 2012, Oram ym. 2014, van de Voorde ym. 2014) lisääntynyt pitoisuus sekä typen pienentynyt pitoisuus (Mays 1974 s. 160) olisi voinut edistää puna-apilan kasvua, mutta tässä tutkimuksessa neljä- ja viisi vuotta sitten levitetyllä biohiilellä ei ollut vaikutuksia maaperän fosfori-, kalium- eikä typpipitoisuuksiin. Van de Voordenin ym. (2014) tutkimuksessa biohiilikäsittelyssä puna-apila sitoi neljä kertaa enemmän typpeä verrattuna biohiilettömään käsittelyyn. Lisäksi Rondonin ym. (2007) tutkimuksessa biologista typensidontaa on edistänyt pH:n nousu, boorin ja molybdeenin sekä kalsiumin lisääntynyt saatavuus. Tässä kokeessa maaperän pH oli kuitenkin suhteellisen hyvä jopa korkea puna-apilan kasvulle jo ennen biohiilen levitystä.

Biohiilellä eikä lannoitekäsittelyillä ollut yhdysvaikutusta kasvilajisuhteisiin, mikä johtuu luultavasti siitä, ettei biohiili- ja lannoitekäsittelyillä ollut neljäntenä eikä viidentenä vuotena levityksestä yhdysvaikutusta maaperän ravinnepitoisuuksiin tai myöskään pH:hon. Mian ym. (2014) tutkimuksessa biohiilen ja typpilannoitteen yhdysvaikutus vähensi puna-apilan typensidontaa.

Myöskään lannoitustasot eivät tässä tutkimuksessa vaikuttaneet puna-apilan tai timotein määrään kasvustossa, vaikka kaliumin ja fosforin pitoisuudet maassa muuttivat. Fagerbergin ja Ekbohmmin (1995) tutkimuksessa puna-apilanurmea lannoitettiin 0, 60 ja 120 kg N/ha. Ensimmäisenä nurmivuotena apilan määrä nousi lannoittamattomassa käsittelyssä 50 – 80 %. Apilan määrä väheni talven jälkeen, mutta määrä kasvoi jälleen

70 % toisen nurmivuoden loppuun mennessä. Lannoitetuissa käsittelyissä apilan määrä oli 20 – 40 % pienempi verrattuna lannoittamattomaan käsittelyyn (Fagerberg & Ekbohm 1995). Tässä tutkimuksessa mineraalityypipitoisuudet olivat paljon pienempiä ja erot lannoitustasojen välillä olivat myös paljon pienempiä edelliseen verrattuna, mistä johtui luultavasti typen vaikuttamattomuus maaperän kokonaistypipitoisuuteen sekä puna-apilan määrään nurmessa. Booripitoisuuksien erot maaperässä eri lannoitekäsittelyiden välillä olisivat saattaneet vaikuttaa puna-apilan talvenkestävyyteen, mikäli koetta olisi jatkettu.

Lannoitekäsittely vaikutti vain kerran nurmen kasvilajisuhteisiin tämän tutkimuksen aikana. Kasvukaudella 2014 pienin lannoitekäsittely vähensi merkittävästi rikkakasvien määrää keskimmaiseen lannoitekäsittelyyn verrattuna, mikä lannoituksen jälkeen saattoi johtua kaliumlannoituksen rikkakasvien kasvua edistävästä vaikutuksesta.

Tässä tutkimuksessa ei tilastollisesti analysoitu eri niittojen kasvilajisuhteita toisiinsa. Kuitenkin puna-apilan ja timotein määrä eri niittojen aikaan oli hyvin erilainen, mikä näyttäisi selittyvän sääolosuhteilla, apilan kasvurytmillä ja lannoituksella. Apilasuositus on 40 – 50 % nurmen kuiva-ainesadosta, jotta typensidonta olisi riittävää seuraavan kasvin tarpeisiin (Hakala ym. 2007). Kasvukaudella 2014 apilan määrä pysyi lähellä suositusta, samoin kasvukaudella 2015 toisessa niitossa. Kasvukauden 2015 ensimmäisen niiton aikaan apilan määrä oli vain noin 17 %. Keväällä annettiin mineraalilannoitus, mikä saattoi suosia timoteita apilan sijaan ensimmäisen niiton aikaan. Jos tyypilannoitusta on liikaa, kasvaa heinä apilan yli ja taas ilman lannoitusta käy toisin päin (Hakala ym. 2007). Mineraalityypipitoisuuden noustessa kyntökerroksessa voi biologinen typensidonta vähentyä, mikä johtaa apilan määrän vähenemiseen (Nykänen ym. 2000). Toisaalta tämän tutkimuksen tyypilannoitteen määrä pysyi alhaisena kaikissa lannoitustasoissa (22, 15 ja 7 kg). Myös Fagerbergin ja Ekbohmin (1995) tutkimuksessa puna-apilanurmessa apilan määrä väheni lähes puolella talven aikana kaikissa tyypikäsittelyissä ja apilan määrän väheneminen nurmessa jatkui keväällä, mutta nousi jälleen syksyä kohden eniten lannoittamattomissa käsittelyissä. Lisäksi apilan ja heinän juuria voi kuolla ensimmäisten kasvukausien aikana, mikä voi myös vaikuttaa apilan määrään kasvustossa (Nykänen ym. 2000). Toiseksi ilmat saattoivat vaikuttaa puna-apilan kasvuun. Alkukevät oli kasvukaudella 2015 kuiva ja kuivat kaudet kovalla savimaalla voivat haitata apilan kasvua (Mela 2003). Myöskään viileä sää ei suosi apilan kasvua (Mustonen 2013) ja touko- sekä kesäkuu olivat viileitä ennen niittoa (kuva 2).

Kolmanneksi puna-apilan määrän selvä kasvu ensimmäisestä niitosta toiseen niittoon on normaalia apilan kasvaessa parhaiten loppukesällä (Nissinen & Hakkola 1994). Myös Nykänen ym. (2000) ovat raportoineet apilan määrä olevan suurempi puna-apilatimoteinurmen toisessa niitossa (Nykänen ym. 2000). Luultavimmin nurmivuoden 2015 ensimmäisen niiton vähäinen apilapitoisuus johtui puna-apilan vähenemisestä talven aikana sekä puna-apilan ja timotein kasvurytmistä.

Aikaisempien tutkimusten mukaan apila on runsaimmillaan toisen vuoden nurmissa (Nissinen & Hakkolan 1994, Nykänen ym. 2000). Tässä tutkimuksessa apila oli runsaimmillaan kylvön jälkeisenä kasvukautena ja sen määrä väheni hieman kasvukaudella 2015. Apilan määrän väheneminen on normaalia nurmen vanhetessa ja apilaa voi olla vaikea säilyttää nurmessa enää toisen nurmivuoden jälkeen (Nykänen ym. 2000).

Kasvien tunnistaminen toisen niiton sadosta vaikeutui, koska suurempi osa timoteista oli tähkävaiheessa ensimmäisen niiton aikana. Tästä johtuen tunnistamattomien kasvien määrä oli suurempi toisen niiton aikana. Lisäksi rikkakasvien määrä sadossa lisääntyi ajan kuluessa kylvöstä, mikä on tavallista nurmen ikääntyessä (Nissinen & Hakkola 1994). Rikkakasvien määrä vaihteli suuresti koeruuduittain, mistä johtui myös tilastollisen analyysin parametriseen testin edellytysten toteutumattomuus kasvukauden 2014 toisen niiton rikkakasvien määrässä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää vaikuttavatko havupuuhakkeesta valmistetun biohiilen aikaisempi lisäys ja levitysmäärät peltomaahan sekä sitä kautta nurmen kasvuun Suomen olosuhteissa. Neljä ja viisi vuotta sitten levitetyllä havupuupohjaisella biohiilellä oli joitain maaperän ominaisuuksia parantavia vaikutuksia viljavuudeltaan hyvässä maassa pohjoisissa oloissa. Tutkimus osoittaa biohiilen nostavan maaperän kosteus- ja hiilipitoisuutta, hiili-typpisuhdetta sekä pienentävän johtolukua, mikä voi vaikuttaa maassa positiivisesti moneen reaktioon kuten typen huuhtoutumisen ehkäisyyn, ravinteiden liukoisuuden paranemiseen ja vesitalouteen. Biohiilen vaikutukset olivat tässä tutkimuksessa suhteellisen pieniä, mutta suuntaa antavia. Biohiilellä ei ollut merkittävää vaikutusta maaperän ravinnepitoisuuksiin eikä pH:hon maassa, jossa oli

kohtuullisen hyvä pH- ja ravinnetaso. Biohiilellä ja lannoitekäsittelyillä oli yhdysvaikutusta vain maaperän kosteuspitoisuuteen muutamalla mittauskerralla, jolloin niiden yhteisvaikutus saattoi parantaa hetkellisesti kasvua lisäten vedenkulutusta tai tasata kosteutta viitaten maan rakennetta parantavaan vaikutukseen. Biohiilen vaikutukset maaperään olivat kuitenkin niin vähäisiä hyväkuntoisessa maaperässä, ettei niillä ollut negatiivisia eikä positiivisia vaikutuksia nurmen kasvuun, satoon tai kasvilajisuhteisiin, mikä tukee biohiilen turvallista käyttöä ilmastonmuutoksen torjunnassa.

Biohiilen ominaisuudet ja levitysmäärä ovat tärkeitä tekijöitä biohiilen käytössä niin maan kasvukunnon parantamisessa kuin ilmastonmuutoksen torjunnassakin. Lisäksi biohiilen vaikutukset ovat riippuvaisia maaperän viljavuudesta ja näin ollen biohiilen vaikutukset ovat tyyppi- ja paikkakohtaisia. Tässä tutkimuksessa puubiohiilen suurempi levitysmäärä paransi maaperän kosteuspitoisuutta, nosti maaperän hiilipitoisuutta sekä hiili-typpisuhdetta verrattuna pienempään biohiilimäärään, joten 10 t/ha levitysmäärä vaikuttaa suositeltavammalta käyttömäärältä verrattuna 5 t/ha levitysmäärään. Hiilipitoisuuden nousu peltomaassa tukee ominaisuuksiltaan samankaltaisen biohiilen käyttöä hiilensidonnassa. Biohiilellä voisi olla pohjoisissa olosuhteissa potentiaalia orgaanisen lannoiteaineen pohjaksi. Tällöin lannoitteen levityksen yhteydessä biohiili päätyisi peltomaahan hiilinieluksi ja parantaisi samalla maan rakennetta. Tämä kuitenkin vaatii jatkotutkimusta sopivimpien kasvimateriaalien ja pyrolyysin lämpötilojen löytämiseksi lannoiteainepohjana toimivalle biohiilelle.

Biohiilen pitkäaikaisvaikutuksien tutkiminen on tärkeää, sillä kerran levitetty biohiili säilyy maassa kauan. Sen pitkäaikaisvaikutuksista maaperän kasvukuntoon, maan vesi- ja ravinnetalouteen sekä sitä kautta kasvien kasvuun ei ole vielä tarpeeksi tutkimusta. Havupuubiohiiltä voi tämän tutkimuksen perusteella suositella käytettäväksi peltomaassa maanparannusaineena hiilensidontaan torjumaan ilmastonmuutosta. Biohiili voi vastata hiili neutraalin yhteiskunnan tavoitteeseen maatalousinnovaationa, mikäli valmistusmateriaali valitaan tarkasti ja biohiili saadaan tuotteistettua järkevästi.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää agroekologian professoria Juha Heleniusta agroekologisen lähestymistavan opettamisesta. Hän innosti toimimaan kaikilla yhteiskunnan osa-alueilla kestävästi. Helenius toimi kokonaisvaltaisen ekologisesti, taloudellisesti ja sosiaalisesti kestävä ajattelun herättäjänä. Kiitän maisterintutkielmani pääohjaajaa Priit Tammeorgia teknisten, tilastollisten ja laboratoriotöiden ohjaamisesta sekä biohiilituntemuksen jakamisesta. Olen kiitollinen myös biometriikko Elise Ketojalle, joka auttoi ensimmäisten satotulosten tilastollisessa mallintamisessa. Lisäksi kiitän maisterintutkielmani lukemisesta sekä kommentoimisesta Mervi Seppästä. Annikki Saraste-Hovia kiitän tuesta ja tutkielman oikolukemisesta.

LÄHTEET

- Abbasi, M.K. & Anwar, A.A. 2015. Ameliorating Effects of Biochar Derived from Poultry Manure and White Clover Residues on Soil Nutrient Status and Plant growth Promotion – Greenhouse Experiments. *PlosOne* 10(6): 1 – 18.
- Agegnehu, G., Bass, A., Nelson, P., Muirhead, B., Wright, G. & Bird, M. 2015. Biochar and biochar-compost as soil amendments: Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 213: 72 – 85.
- Agegnehu, G., Bass, A., Nelson, P. & Bird, M. 2016. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment* 543: 295 – 306.
- Ahokas, H. 2012. Crop evolution under fire: the past cultivation with sequential kytö burning selected against the scattering weedy forms and comparison between Finnish kytö and Ethiopian guie. *Interdisciplinary Biology, Agriculture, Linguistics and Anquities*. Kave. Helsinki.
- Alakukku, L. 2013. Maan rakenne - tärkeä osa viljelyä ja ympäristön hoitoa. Kohtaavatko maatalouden taloudellisuus ja ympäristöystävällisyys? BalticDeal-, Ravi- ja Peltonen – hankkeet ja WWF Suomi seminaari. Kouvola 11.3.2013.
- Artiola, J.F., Rasmussen, C. & Freitas, R. 2012. Effects of a biochar-amended alkaline soil on the growth of romaine lettuce and bermudagrass. *Soil Science* 177: 561 – 570.
- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. & Horie, T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research* 111: 81 – 84.
- Atkinson, C., Fitzgerald, J. & Hipps, N. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337: 1 – 18.
- Baldock, J.A. & Smernik, R.J. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 33: 1093 – 1109.
- Barnes, R.F., Nelson, C.R., Moore, K.J. & Collins, M. 2003. Forages, Vol I. An Introduction to Grassland Agriculture. 6th Edition. Blackwell Publishing Company. Iowa.
- Batool, A., Taj, S., Rashid, A., Khalid, A., Qadeer, S., Saleem, A. & Ghufraan, M. 2015. Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench. *Frontiers in Plant Science* 6: 733.

- Birk, J.J., Steiner, C., Teixeira, W.C., Zech, W. & Glaser, B. 2009. Microbial Response to Charcoal Amendments and Fertilization of a Highly Weathered Tropical Soil. Chapter 16. Teoksessa: Amazonian Dark Eaths: Wim Sombroek's Vision. Springer, Netherlands, 309 – 324.
- Biederman, L. & Harpole, W. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy* 5 (2): 202 – 214.
- Biolan 2016. Puutarhauutuudet 2016.
www.biolan.fi/suomi/ajankohtaista/uutuustuotteet/uutuudet-2016/istutusmulta.
 Viitattu 22.12.2016.
- Bousquet, P., Ringer, B., Pison, I., Dlugokencky, E.J., Brunke, E.G., Carouge, C., Chevalier, F., Fortems-Cheiney, A., Frankenberg, C., Hauglustaine, D.A., Krummel, P.B., Langenfelds, R.L., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L.P., Szopa, S., Yver, C., Viovy, N. & Ciais, P. 2011. Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006 – 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11: 3689 – 3700.
- Brewer, C.E., Unger, R., Schmidt-Rohr, K. & Brown, R. 2011. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. *Bio Energy Research* 4: 312 – 323.
- Brozyna, M., Peterson, S., Chirinda, N. & Olesen, J. 2013. Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 181: 115 – 126.
- Buss, W., Graham, M., Shepherd, J., Masek, O. 2016. Suitability of marginal biomass-derived biochars for soil amendment. *Science of the Total Environment* 547: 314 – 322.
- Cao, H., Xin, Y. & Yuan, Q. 2016. Prediction of biochar yield from cattle manure pyrolysis via least squares support vector machine intelligent approach. *Bioresource Technology* 202: 158 – 164.
- Case, S., McNamara, N., Reay, D., Stott, A., Grant, H. & Whitaker, J. 2015. Biochar suppresses N₂O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry* 81: 178 – 185.
- Cayuela, M., Van Zwieten, L., Singh, B., Jeffery, S., Roig, A. & Sánchez-Monedero, M. 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Environment Benefits and Risks of Biochar Application to Soil. Agriculture, Ecosystem & Environment* 191: 5 – 16.
- Charcoal Finland Oy 2016. EcoKoivu Maanparannushiili.
www.charcoalfinland.fi/maanparannushiili.jpg.
 Viitattu 22.12.2016.

- Cheng, C.H., Lehmann, J., Thies, J.E. & Burton, S.D. 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research* 113: GO2027.
- Cheng, C. & Lehmann, J. 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere* 75: 1021 – 1027.
- Cloy, JM., Rees, RM., Drewer, J., Helfrich, M., Ball, BC., Buckingham, S., Topp, CFE., Walker, RL., Watson, CA. & Mayer, C. 2015. Assessing soil organic matter changes in an organically managed long-term crop rotation experiment. *Aspects of Applied Biology* 128: 111 – 118.
- Coumaravel, K., Santhi, R. & Maragatham, S. Effect of biochar on yield and nutrient uptake by hybrid maize and on soil fertility. 2015. *Indian Journal of Agricultural Research* 49: 185 – 188.
- Criscuoli, I., Baronti, S., Alberti, G., Rumpel, C., Giordan, M., Camin, F., Ziller, L., Martinez, C., Pusceddu, E. & Miglietta, F. 2016. Anthropogenic charcoal-rich soils of the XIX century reveal that biochar leads to enhanced fertility and fodder quality of alpine grasslands. *Plant and Soil* 1 – 18.
- Crotty, F.V., Fychan, R., Sanderson, R., Rhymes, J.R., Bourdin, F., Scullion, J. & Marley, C.L. 2016. Understanding the legacy effect of previous forage crop and tillage management on soil biology, after conversion to an arable crop rotation. *Soil Biology and Biochemistry* 103: 241 – 252.
- Das, O., Sarmah, A., Zujovic, Z. & Bhattacharyya, D. 2016. Characterisation of waste derived biochar added biocomposites: chemical and thermal modifications. *Science of the Total Environment* 550: 133 – 142.
- Dewhurst, R.J., Delaby, L., Moloney, A., Boland, T. & Lewis, E. 2009. Nutritive value of forage legumes used for grazing and silage. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 48: 167 - 187.
- EBC. 2012. European Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. Version 6.1 of 19th June 2015.
- Egamberdieva, D., Wirth, S., Behrendt, U., Allah, E. & Berg, G. 2016. Biochar Treatment Resulted in a Combined Effect on Soybean Growth Promotion and a Shift in Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Frontiers in Microbiology* 7: 209.
- Energia Suomessa. 2004. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. VTT prosessit. Edita Prima Oy. Helsinki.

- Eriksen, J., Askegaard, M., Rasmussen, J. & Sjøgaard, K. 2015. Nitrate leaching and residual effect in dairy crop rotations with grass-clover leys as influenced by sward age, grazing, cutting and fertilizer regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 212: 75 – 84.
- Evangelou, M., Brehm, A., Ugolini, F., Abiven, S. & Schulin, R. 2014. Soil application of biochar produced from biomass grown on trace element contaminated land. *Journal of Environmental Management* 146: 100 – 106.
- Evira 2015. Luonnonmukainen tuotanto 1. Yleiset ja kasvintuotannon ehdot. 5. painos. Eviran ohje 18219/5.
- Evira 2012. Tuhkan lannoitekäyttöä ohjaava lainsäädäntö. Kotimaista energiaa puusta ja turpeesta 18.6.2012.
- Eykelbosh, J., Johnson, M., Santos de Queiroz, E., Dalmagro, H. & Couto, E. 2014. Biochar from Sugarcane Filtercake Reduces Soil CO₂ Emissions Relative to Raw Residue and Improves Water Retention and Nutrient Availability in a Highly-Weathered Tropical Soil. *PLOS ONE* 9: 6.
- Fagerberg, B. & Ekbohm, G. 1995. Variation in Clover Content and in Nutritional Value of Grass-Clover Leys. *Crop Production Science* 23: s. 46.
- FAO 2015a. Soils are the foundation for vegetation which is cultivated or managed for feed, fibre, fuel and medical products.
<http://www.fao.org/publications/card/en/c/dd7761ba-8255-46a7-8bca-7dca1cbe6092/>. Viitattu 8.11.2016.
- FAO 2015b. How to feed the world in 2050. Database of Food and Agriculture, Organization of the United Nations.
http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Viitattu 10.11.2016.
- FAO 2010. Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceeding of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change. *Integrated Crop Management*. Vol. 11 – 2010. Database of Food and Agriculture, Organization of the United Nations.
<http://www.fao.org/3/a-i1880e.pdf>. Viitattu 4.12.2016.
- Felber, R., Leifeld, J. Horak, J. & Neftel, A. 2014. Nitrous oxide emission reduction with greenwaste biochar: comparison of laboratory and field experiments. *European Journal of Soil Science* 65: 128 – 138.

- 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.
- Güereña, D., Kimeru, J., Rihan, S., Neufeldt, H. & Lehmann, J. 2016. Maize productivity dynamics in response to mineral nutrient additions and legacy organic soil inputs of contrasting quality. *Field Crops Research*. 2016.
- Hakala, K., Nykänen, A. & Yli-Mattila, T. 2007. Avaimet puna-apilan viljelyn menestykseen. *Maaseudun tie* 64: 10.
- Hale, S., Lehmann, J., Rutherford, D., Zimmerman, A., Bachmann, R., Shitumbanuma, V., O'Toole, A., Sundqvist, K. Arp, HP. & Cornelissen, G. 2012. Quantifying the Total and Bioavailable Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Dioxins in Biochars. *Environmental Science and Technology* 46 (5): 2830 – 2838.
- Hall, D. & Bell, R. 2015. Biochar and Compost Increase Crop Yields but the Effect is Short Term on Sandplain Soils of Western Australia. *Pedosphere* 25: 720 – 728.
- Han, F., Ren, L. & Zhang, X-C. 2016. Effect of biochar on the soil nutrients about different grasslands in the Loess Plateau. *Catena* 137: 554 – 562.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S. Oliver, G. & Close, D. 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil* 376: 347 – 361.
- Hille, M.G. & Ouden, J. 2005. Charcoal and activated carbon as adsorbate of phytotoxic compounds – a comparative study. *Oikos* 108: 202 – 207.
- Hossain, M.K., Strezov, V., Chan, K.Y. & Nelson, P.F. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals on production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 78(9): 1167 – 1171.
- Hyrkäs, M. & Virkajärvi, P. Nurmen kasvu- ja kehitysprosessit. 2012. Raportti 56. Jokioinen, Suomi: MTT. 120 s.
- Hyytiäinen, T. & Hiltunen, S. 1999. Kasvintuotanto 1. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Ilmasto-opas. 2017. Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. Ilmatieteen laitos. <http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>. Viitattu 17.1.17.
- Ilmasto-opas. 2016. Metaani. Ilmatieteen laitos. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/dec264e2-6350-418c-a1bc-3ef7c80676aa/metaani.html>. Viitattu 26.4.16.

- Inyang, M. & Dickenson, E. 2015. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere* 134: 232 – 240.
- International Biochar Initiative. 2015. Key Findings. http://www.biochar-international.org/State_of_industry_2013. Viitattu 23.4.2015.
- Jaafar, N., Clode, P. & Abbott, L. 2015. Biochar-Soil Interactions in Four Agricultural Soils. *Pedosphere* 25: 729 – 736.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M. & Bastos, A.C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144: 175 – 187.
- Jokela, R. & Valtonen, O. 2013. Nurmipeltojen havainnointia. Nurmen viljely ympäristöhuomioiden. ProAgria Oulu. <http://www.proagrioulu.fi/fi/nurmen-viljely-ymparisto-huomioiden/>. Viitattu 10.12.16.
- Jokimäki, A. 2011. Metaanin päästöjä ja ilmastovaikutuksia. CO²-raportti. Ilmastouutisia.
- Jones, D.L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T.H. & Murphy, D.V. 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry* 45: 113 – 124.
- Joonas, J., Kuisma, M., Alakukku, L. & Kahiluoto, H. 2012. Carbon flows of waste biomasses applicable to agricultural soils in Finland. ORBIT. Rennes. Ranska 12. – 14.6.2012.
- Kammann, C., Linsel, S., Göbbling, W. & Koyro, H-W. 2011. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations. *Plant Soil* 345: 195 – 210.
- Kaupunkisuunnitteluvirasto. 2004. Viikin latokartanon tilan historia. Helsingin kaupunki. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston julkaisuja 2004:15. http://www.hel.fi/hel2/ksv/julkaisut/julk_2004-15.pdf. Viitattu 28.2.2017.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I. & Regina, K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140: 309 – 313.
- Khan, S.A., Mulvaney, R.L. & Ellsworth, T.R. 2013. The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. Department of Natural Resources and Environmental Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign. *Renewable Agriculture and Food Systems* s. 1/25.

- Kuzyakov, Y., Bogomolova, I. & Glaser, B. 2014. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 70: 229 – 236.
- Kykkänen, S. & Virkajärvi, P. 2014. Nurmen lannoitusuusitukset muuttuvat. MTT, Maaninka. *Nauta* 5: 32 – 36.
- Känkänen, H., Suokannas, A., Tiilikkala, K. & Nykänen, A. 2012. Biologinen typensidonta fossiilisen energian säästäjänä. Raportti 76. Jokioinen, Suomi: MTT. 60 s.
- Kässi, P. & Niskanen, O. 2014. Apilapeltojen määrä kasvussa. MTT. Maaseudun tiede. https://issuu.com/mttelo/docs/maaseudun_tiede_3-2014/12. Viitattu 10.4.16.
- Ledgard, S., Schils, R., Eriksen, J. & Luo, J. 2009. Environmental impacts of grazed clover/grass pastures. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 48: 209 – 226.
- Lehmann, J., Pereira da Silva Jr. J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basi: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343 – 357.
- Lehmann, J., Rillig, M., Thies, J., Masiello, C., Hockaday, W. & Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*. 43: 1812 – 1836.
- Lehmann, J. & Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management. Science and Technology*. Sterling, USA: Earthscan. 448 s.
- Lehmann, J., Abiven, S., Kleber, M., Pan, G., Singh, B.P., Sohi, S.P., Zimmerman, A.R. 2015. Persistence of biochar in soil. Teoksessa: Lehmann, J., Joseph, S. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology, and Implementation*. Routledge, London, 235 – 282.
- Lehti, A. 2015. Havupuusta hidaspölytysoidun biohiilen vaikutuksia nurmiin Etelä-Suomen olosuhteissa. Helsingin yliopisto. Maisterintutkielma. Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta.
- Li, D., Lanigan, G. & Humphreys, J. 2011. Measured and Simulated Nitrous Oxide Emissions from Ryegrass- and Ryegrass/White Clover-Based Grasslands in a Moist Temperate Climate. *PlosOne* 10(6): 1 – 18.
- Liebman, M., Castellano, M. & Johanns, A. 2015. Impacts of conventional and diversified rotation systems on crop yields, soil functions and environmental quality: Stage II/Year 2. Leopold Center Completed Grant Reports. Paper 488.

- Lindström, B.E.M., Frankow-Lindberg, B.E., Dahlin, A.S., Wivstad, M. & Watson, C.A. 2013. Micronutrient concentrations in relation to phenological development of red clover (*Trifolium pratense* L.), perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and timothy (*Phleum pratense* L.) Grass and Forage Science 69: 276 – 284.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B. & Glaser, B. 2012. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 175: 698 – 707.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G. & Paz-Ferreiro, J. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions – a meta-analysis of literature data. Plant and Soil 373 (1): 583 – 594.
- Liu, L., Chen, P., Sun, M., Shen, G. & Shang, G. 2015. Effect of biochar amendment on PAH dissipation and indigenous degradation bacteria in contaminated soil. Journal of Soils and Sediments 15: 313 - 322.
- Liu, S., Zhang, Y., Zong, Y., Hu, Z., Wu, S., Zhou, J., Jin, Y. & Zou, J. 2016. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. GCB Bioenergy 8(2): 392 – 406.
- Lone, A., Najar, G., Ganie, M., Sofi, J. & Ali, T. 2015. Biochar for Sustainable Soil Health; A Review Of Prospects and Concerns. Pedosphere 25: 639 – 653.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. & Lehmann, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. Plant Soil. 333: 117 – 128.
- Mao, J., Johnson, R., Lehmann, J., Oik, D., Neves, E., Thompson, M. & Schmidt-Rohr, K. 2012. Abundant and Stable Char Residues in Soils: Implications for Soil Fertility and Carbon Sequestration. Environmental Science & Technology 46: 9571 – 9576.
- Masto, R. E., Kumar, S., Rout, T.K., Sarkar, P., George, P. & Ram, L.C. 2013. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. Catena 111: 64 – 71.
- McDaniel, M. & Grandy, A. 2016. Soil microbial biomass and function are altered by 12 years of crop rotation. SOIL 2: 583 – 599.
- Mays, D. A. 1974. Forage fertilization. American society of agronomy, Crop science society of America, Soil science society of America. USA. s. 621.
- Mela, T. 2003. Red clover grown in a mixture with grasses: yield, persistence and dynamics of quality characteristics. Agricultural and Food Science in Finland 12: 195 – 212.
- Mela, T. 2004. Puna-apila on typen yhteytäjää. Koetointa ja käytäntö 61(4): 5.

- de Melo Carvalho, M.T., de Holanda Nunes Maia, A., Madari, B.E., Bastiaans, L., van Oort, P.A.J., Heinemann, A.B., Soler de Silva, M.A., Petter, F.A., Marimon Jr, B.H. & Meinke, H. 2014. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth* 5: 939 – 952.
- Mia, S., Van Groenigen, J. van de Voorde, T., Oram, N., Bezener, T. Mommer, L. & Jeffery, S. 2014. Biochar application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 191:83 – 91.
- Mickwitz, P., Seppälä, J., Kauppi, L. & Hildén, M. 2014. Kohti hiilineutraalia kiertotaloutta –tutkimus vauhdittamaan muutosta. Syke policy briefs 13.6.2014. Suomen ympäristökeskus.
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/135242/SYKE_Policy_Brief_13062014.pdf?sequence=1. Viitattu 3.3.2017.
- MMM 2014. Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma 2014 – 2020. Maa- ja metsätalousministeriö. Maaseutu 2020. Versio 2.0.
- MMM 2015. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen muuttamisesta. Asetus nro 21/15.
http://mmm.fi/documents/1410837/1898467/LANNOITEVALMISTEASETUS21_15_muutos-FI_03112015.pdf/607ea8f6-ff90-446f-bb3d-5ca27daa0230.
Viitattu 29.12.2016.
- Mohammadi, A., Cowie, A., Anh Mai, T., de la Rosa, R., Kristiansen, P., Brandão, M. & Joseph, S. 2016. Biochar use for climate-change mitigation in rice cropping systems. *Journal of Cleaner Production* 116: 61 – 70.
- MTT. 2014. Nurmitutkimus. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus.
<https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/mtt/esittely/toimipaikat/maaninka/tutkimus/nurmentuotanto>. Viitattu 23.11.2016.
- Mukherjee, A. & Lal, R. 2014. The biochar dilemma. *Soil Research* 52: 217 – 230.
- Mukome, F., Zhang, X., Silva, L., Six, J. & Parikh, S. 2013. Use of Chemical and Physical Characteristics To Investigate Trends in Biochar Feedstocks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61: 2196 – 2204.
- Mustonen, A. 2013. Nurmikasvien kehitysrytmi hallintaan. Miten säilörehun sulavuutta ja valkuaispitoisuutta säädellään? ProAgria Pohjois-Savo.
- Mustonen, E. 2015. Red Clover Isoflavonoids in Feed, Plasma and Milk of Ruminants. Doctoral thesis. Department of Production Animal Medicine. Helsinki. 90.

- Muukkonen, P., Hartikainen, H. & Alakukku, L. 2009. Boardmill sludge reduces phosphorus losses from conservation-tilled clay soil. *Soil & Tillage research*. 104: 285 – 291.
- Niskanen, M. & Huhta, H. 2008. Puna-apila. Teoksessa: Kangas, A. & Harmoinen, T. *Peltokasvilajikkeet 2008. Maaseutukeskusten liiton julkaisuja 1050: Tieto tuottamaan* 122: 79 – 80.
- Niskanen, M. & Sihto, U. 2008. Timotei. Teoksessa: Kangas, A. & Harmoinen, T. *Peltokasvilajikkeet 2008. Maaseutukeskusten liiton julkaisuja 1050: Tieto tuottamaan* 122: 65 – 67.
- Nissinen, O. & Hakkola, H. 1994. Korjuutavan ja kasvilajin vaikutus nurmen sadontuottokykyyn Pohjois-Suomessa. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 19.
- Niu, Y., Nie, Z., Li, J., Han, Z., Yang, H., Wang, G., Mei, Y., Li, X., Tang, J., Ye, X. & Liu, H. 2015. Effects of Different Biochar Dosages and Types on Growth, Yield and Output Value of Flue-cured Tobacco in Hanzhong Area. *Agronomy and Horticulture* 16(11): 2476 – 2480.
- Novak, J., Sigua, G., Watts, D., Cantrell, K., Shumaker, P. Szogi, A., Johnson, M. & Spokas, K. 2015. Biochars impact on water infiltration and water quality through compacted subsoil layer. *Chemosphere* 142: 160 – 167.
- Nykänen, A., Granstedt, A., Laine, A. & Kunttu, S. 2000. Yields and Clover Contents of Leys of Different Ages in Organic Farming in Finland. *Biological Agriculture & Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems* 18: 55–66.
- Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G. & Børresen, T. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research* 155: 35 – 44.
- Oram, N., van de Voorde, T., Ouwehand, G-J., Bezemer, M., Mommer, L., Jeffery, S. & Van Groenigen, J. 2014. Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 191: 92 – 98.
- Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. (toim.) 2009. Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys ry. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. 452 s.
- Pahkala, K. & Lötjönen, T. 2015. Peltobiomassat tulevaisuuden energiarekursina. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 55. 59 s.
- Palojärvi, A., Alakukku, L., Martikainen, E., Niemi, M., Vanhala, P., Jørgensen, K. & Esala, M. 2002. Luonnonmukaisen ja tavanomaisen viljelyn vaikutukset maaperään. MTT. Maa- ja elintarviketalous 2. 88 s.

- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, P. & Smith, P. 2016. Climate-smart soils. *Nature* 532: 49 – 57.
- Pietola, L. & Tanni, R. 2000. Juurten kasvua seurataan videokameran avulla – millaisia eroja viljelykasveissamme on? *Koetoiminta ja käytäntö* 57 (5): 3.
- Pikula, D. & Rutkowska, A. 2014. Effect of leguminous crop and fertilization on soil organic carbon in 30-years field experiment. *Plant, Soil and Environment* 60: 507 – 511.
- Power, E. & Stout, J. 2011. Organic dairy farming: impacts on insect-flower interaction networks and pollination. *Journal of Applied Ecology* 48: 561 – 569.
- Pühringer, H. 2016. Effects of different biochar application rates on soil fertility and soil water retention in on-farm experiments on smallholder farms in Kenya. Second cycle, A2E. Uppsala: SLU, Dept. of Soil and Environment.
- Puurunen, T. 2002. Nurmenviljelyn suunnittelu ja taloudellisuus. *Laiduntaminen kannattaa. Maaseutukeskusliiton julkaisuja* 984: Tieto tuottamaan 99: 5 – 9.
- Quilliam, R., Rangelcroft, S., Emmett, B., DeLuca, T. & Jones, D. 2012. Is biochar a source or sink for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds in agricultural soils? *GCB Bioenergy*.
- Quilliam, R., DeLuca, T. & Jones, D. 2013. Biochar application reduces nodulation but increases nitrogenase activity in clover. *Plant Soil* 366: 83 - 92.
- Rajala, J. 2006. *Luonnonmukainen maatalous. Toinen painos. Helsingin yliopiston Maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus, Mikkeli. Julkaisuja* 80. 494 s.
- Rajala, J. 2012. *Viljelykierron suunnittelu. Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti.* <http://docplayer.fi/3816468-Viljelykierron-suunnittelu-jukka-rajala-erikoissuunnittelija-helsingin-yliopisto-ruralia-instituutti-2012.html>. Viitattu 10.2.17.
- Rinne, M. & Nykänen, A. 2000. Timing of primary growth harvest affects the yield and nutritive value of timothy-red clover mixtures. *Agricultural and Food Science in Finland*. 9: 121 – 134.
- Roberts, K., Gloy, B., Joseph, S., Scott, N. & Lehmann, J. 2010. Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental Science and Technology* 44 (2): 827 – 833.
- Rondon, M.A., Lehmann, J., Ramírez, J. & Hurtado, M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *Biol Fertil Soils* 43: 699 – 708.

RPK Hiili Oy. 2016. Biohiili Original.

www.rpkhiili.fi/biohiili/biohiili-original.

Viitattu 22.12.2016.

Ruyschaert, G., Nelissen, V., Postma, R., Bruun, E., O'Toole, A., Hammond, J., Rödger, J.-M., Hylander, L., Kihlberg, T., Zwart, K., Hauggaard-Nielsen, H., Shackley, S. 2016. Chapter 5: Field applications of pure biochar in the North Sea region and across Europe. In: Biochar in European Soils and Agriculture (Shackley S., Ruyschaert G., Zwart K., Glaser B., eds). Routledge 99 – 135.

Saarela, I., Huhta, H., Salo, Y., Sippola, J., Vuorinen, M. 1998. Kaliumlannoituksen porraskokeet 1997 – 1994. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 42.

Saarela, I. 2001. Maan vaihtumattoman reservikaliumin merkitys nurmilla. MTT. Koetoiminta ja käytäntö. 4/2001, s. 6.

Saarela, I. & Mäntylähti, V. 2002. Kiiilepitoisten karkeiden maiden kaliumin vapautuminen kasveille. Julkaisussa: Pietola, L. & Esala, M. Maa, josta elämme. II Maaperätieteen päivien laajennetut abstraktit. Pro Terra 15: 140 – 142.

Saarnio, S., Heimonen, K. & Kettunen, R. 2013. Biochar addition indirectly affects N₂O emissions via soil moisture and plant N uptake. Soil Biology and Biochemistry 58: 99 – 106.

Schimmelpfennig, S., Müller, C., Grünhage, L., Koch, C. & Kammann, C. 2014a. Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland -Effects on greenhouse gas emissions and plant growth. Agriculture, Ecosystems & Environment 191: 39 – 52.

Schimmelpfennig, S., Kammann, C., Moser, G., Grünhage, L. & Müller, C. Changes in macro- and micronutrient contents of grasses and forbs following *Miscanthus x giganteus* feedstock, hydrochar and biochar application to temperate grassland. 2014b. Grass and Forage Science 70: 582 – 599.

Schmidt, H., Pandit, B., Martinsen, V., Cornelissen, G., Conte P. & Kammann, C. 2015. Fourfold Increase in Pumpkin Yield in Response to Low-Dosage Root Zone Application of Urine-Enhanced Biochar to a Fertile Tropical Soil. Agriculture. 5: 723 – 741.

Schulz, H., Dunst, G. & Glaser, B. 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. Agronomy for Sustainable Development 33: 817 – 827.

Shrestha, B.M., Singh, B.R., Forte, C. & Certini, G. 2015. Long-term effects of tillage, nutrient application and crop rotation on soil organic matter quality assessed by NMR spectroscopy. Soil Use and Management 31: 358 – 366.

- Sihvonen, M. 2013. Biohiili – perinnetiedosta innovaatioksi. MTT. elo.
<http://mttelo.mtt.fi/256>.
 Viitattu 16.1.17.
- Sipilä, A. & Nykänen, A. 2006. Puna-apila. Nurmitieto 2.1.3. Suomen Nurmiyhdistyksen ja MTT:n julkaisusarja.
- Sipiläinen, T. & Ovaska, S. 2012. Maitotilalle kilpailukykyä tuottavuutta ja tehokkuutta kehittämällä. Kilpailukykyä maidontuotantoon –hanke. MTT. Raportti: 78.
- Snyder, C. & Leep, R. 2007. Fertilization. Teoksessa: Barnes, R., Nelson, C., Moore, K. & Collins, M. Forages volume II: The Science of Grassland Agriculture. Ames, Iowa. Blackwell Publishing. S. 791: 355 – 377.
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E. & Bol, R. 2010. Chapter 2 – A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy* 105: 47 – 82.
- Soinne, H., Hovi, J., Tammeorg, P. & Turtola, E. 2013. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma* 219 – 220: 162 – 167.
- Solaiman, Z.M., Murphy, D.V. & Abbott, L.K. 2012. Biochars influence seed germination and early growth of seedlings. *Plant and Soil* 353: 273 – 287.
- Sprent, J. 1972. The effects of water stress on nitrogen-fixing root nodules. *New Phytologist* 71: 603 – 611.
- Stoddard, F., Hovinen, S., Kotturi, M., Lindström, K. & Nykänen, N. 2009. Legumes in Finnish agriculture: History, present status and future prospects. *Agricultural and Food Science* 18: 191 – 205.
- Sun, F. & Lu, S. 2014. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177: 26 – 33.
- Suomela, R., Toivakka, M., Luoma, S. & Kauppila, R. 2014. Korjuurytmin ja lannoituskäytännön vaikutus säilörehunurmen satopotentiaaliin ja ravinnetaseisiin Pohjois-Suomessa. Maataloustieteen päivien 2014 verkkojulkaisu. http://www.smts.fi/MTP_julkaisu_2014/Posterit/061Suomela_ym_Korjuurytmityksen_ja_lannoituskaytannon_vaikutus_sailorehunurmen_satopotentiaaliin_ja_ravinnetaseisiin.pdf. Viitattu 21.2.2017.
- Suomen Ympäristöpalvelu. 2017. Yritys.
<http://www.suomenymparistopalvelu.fi/index.php?p=Yritysesittely>. Viitattu 1.2.2017.
- Suttle, N. 2010. Mineral nutrition of livestock. 4 th edition. Wallingford, UK: CAB International. S. 579.

- Tammeorg, P., Brandstaka, T., Simojoki, A., Helenius, J. 2012. Nitrogen mineralization dynamics of meatbone meal and cattle manure as affected by the application of softwood chips biochar in soil. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 103: 19 – 30.
- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F., Alakukku, L., Helenius, J. 2014a. Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. *Plant and Soil* 374: 89 – 107.
- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F., Alakukku, L. Helenius, J. 2014b. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 191: 108 – 116.
- Tammeorg, P., Parviainen, T., Nuutinen, V., Simojoki, A., Vaara, E., Helenius, J. 2014c. Effects of biochar on earthworms in arable soil: avoidance test and field trial in boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191: 151 – 157.
- Tammeorg, P. 2014. Softwood biochar as a soil amendment material for boreal agriculture. Doctoral thesis. Department of agricultural sciences. Helsinki. 33.
- Tang, J., Li, X., Luo, Y., Li, G. & Khan, S. 2016. Spectroscopic characterization of dissolved organic matter derived from different biochars and their polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) binding affinity. *Chemosphere* 152: 399 – 406.
- Teat, A., Neufeld, H., Gehl, R. & Gonzales, E. 2015. Growth and Yield of *Miscanthus x giganteus* Grown in Fertilized and Biochar-Amended Soils in the Western North Carolina Mountains. *Castanea* 80(1): 45 – 58.
- Tiilikkala, K., Holstila, T. & Rasa, K. 2013. Testaus hitaan pyrolyysin soveltuvuudesta biomassojen prosessointiin uusiksi tuotteiksi ja energiaksi. Loppuraportti. MTT. Jokioinen.
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W., Simberloff, D. & Swarcckhamer, D. 2001. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science* 292: 281 - 284.
- Toivonen, M., Herzon, I. & Kuussaari, M. 2016. Community composition of butterflies and bumblebees in fallows: niche breadth and dispersal capacity modify responses to fallow type and landscape. *Journal of Insect Conservation*: 20 (1): 23 - 34.
- Tuomisto, J. 2013. Maan rakenne osana perunamaan tuottavuutta ja ympäristönhoitoa. TP 3/2013.

- Työ- ja elinkeinoministeriö 2014. Tiekartta 2050: Hiilineutraali Suomi on haastava, mutta mahdollinen tavoite. Tiedotteet 2014.
<https://www.maaseutu.fi/fi/maaseutuohjelma/viestinta/Uutiset/uutiset-2014/Sivut/141016-tiekartta-2050.asp>. Viitattu 8.12.2016.
- Ulyett, J., Sakrabani, R., Kibblewhite, M. & Hann, M. 2014. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. *European Journal of Soil Science* 1: 96 – 104.
- Vaccari, F.P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F. & Miglietta, F. 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy*: 34(4): 231 – 238.
- 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 and Soil*, 327: 235 – 246.
- van de Voorde, T.F.J., Bezemer, T.M., Van Groenigen, J.W., Jeffery, S. & Monner, L. 2014. Soil biochar amendment in a nature restoration area: effects on plant productivity and community composition. *Ecological Applications* 24:1167 – 1177.
- Vanhatalo, A., Kuoppala, K., Ahvenjärvi, S. & Rinne, M. 2006. Puna-apilasäilörehun vaikutus lypsylehmien ravintoaineiden saantiin. MTT Eläinravitsemus.
- Venelampi, O. 2013. Biohiilen lannoitevalmistekäyttöä koskevat vaatimukset. Biohiilestä lisätienestää –seminaari 6.6.2016. Rehu- ja lannoitevalvontayksikkö. Evira.
- Vertés, F., Hatch, D., Velthof, G., Taube, F., Laurent, F., Loiseau, P. & Recous, S. 2007. Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. *Grassland Science in Europe* 12: 227 – 246.
- Virkajärvi, P. 2003. Effects of defoliation height on regrowth of timothy and meadow fescue in the generative and vegetative phases of growth. *Agricultural and Food Science in Finland* 12: 177 – 193.
- Virkajärvi, P., Isolahti, M., Hyrkäs, M., Sihto, U., Rätty, M. & Kauppila, R. 2012. Maan reservikalium ja nurmien kaliumlannoitus. MTT. Kotieläintuotannon tutkimus.
- Virkajärvi, P., Kykkänen, S., Rätty, M., Hyrkäs, M., Järvenranta, K., Isolahti, M., Kauppila, R. 2014. Nurmien kaliumtalous. Maan reservikaliumin merkitys kaliumlannoituksen suunnittelussa. MTT. Raportti 165.
- Virkajärvi, P., Rinne, M., Mononen, J., Niskanen, O., Järvenranta, K. & Sairanen, A. 2015. Dairy production systems in Finland. *Grassland Science in Europe* 20: 51 – 66.

- Vuori, S. 2005. Lehtivihreä kertoo kasvin tyyppilanteen. Tarvitseeko lohko tänä kesänä lisätyypeä tai laontorjuntaa? Maatilan pellervo.
www.pellervo.fi/maatila/mp6_06/lehtivkerto.html. Viitattu 15.11.2016.
- Ympäristöanalyysit 2016. Johtoluvun määrittäminen maanäytteestä. Opetushallitus.
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/ymparistoanalyysit_maanaytteen_johtoluku.html. Viitattu 2.6.2016.
- Wagner, A. & Kaupenjohann, M. 2015. Biochar addition enhanced growth of *Dactylis glomerata* L. and immobilized Zn and Cd but mobilized Cu and Pb on a former sewage field soil. *European Journal of Soil Science* 66 (3): 505 – 515.
- Wang, Z., Li, Y., Chang, S., Zhang, J., Jiang, P., Zhou, G. & Shen, Z.. 2014. Contrasting effects of bamboo leaf and its biochar on soil CO₂ efflux and labile organic carbon on an intensively managed Chinese chestnut plantation. *Biology and fertility of Soils* 7: 1109 – 1119.
- Wang, Y., Wang, L., Wang, Y.J., Fang, G.D. & Zhou, D.M. 2015. Measuring the bioavailability of polychlorinated biphenyls to earthworms in soil enriched with biochar or activated carbon using triolein-embedded cellulose acetate membrane. *Journal of Soils and Sediments* 16(2): 527 – 536.
- Wang, J., Xiong, Z. & Kuzyakov, Y. 2016. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *CCB Bioenergy* 8(3): 512 – 523.
- Warnock, D., Lehmann, J., Kuypers, T. & Rillig, M. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant and Soil* 300 (1): 9 – 20.
- Warnock, D., Mummey, D., McBride, B., Major, J., Lehmann, J. & Rillig, M. 2010. Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: Results from growth-chamber and field experiment. *Applied Soil Ecology* 46 (3): 450 – 456.
- Wiedner, K., Rumpel, C., Steiner, C., Pozzi, A., Maas, R. & Glaser, B. 2013. Chemical evaluation of chars produced by thermochemical conversion (gasification, pyrolysis and hydrothermal carbonization) of agro-industrial biomass on a commercial scale. *Biomass and Bioenergy* 59: 264 – 278.
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J. & Joseph, S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*. 1(56): 1 – 9.
- Worldometers. 2017. Current World Population. <http://www.worldometers.info/world-population/>. Viitattu 3.3.2017.

- Yara. 2017. Nurmen lannoitusohjelmat. Eloperäiset maat. Ei karjanlanta. <http://www.yara.fi/lannoitus/kasvit/nurmi/lannoitus/nurmen-lannoitusohjelma/>. Viitattu 3.3.2017.
- Zhang, A., Liu, Y., Pan, G., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J. & Zhang, X. 2011. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant Soil* 351 (1): 263 – 275.
- Zhang, A., Pan, G., Wu, G., Kibue, G., Li, L., Zhang, X., Zheng, J., Zheng, J., Cheng, K., Joseph, S. & Liu, X. 2016. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere* 142: 106 – 113.
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S. & Xing, B. 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206: 32 – 39.
- Zimmerman, A., Gao, B. & Ahn, M.-Y. 2011. Positive and negative mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 43: 1169 – 1179.

LIITE 1 Koealueen kartta

Kerranne 1	10 metriä	Kerranne 2	10 metriä	Kerranne 3	10 metriä	Kerranne 4	10 metriä	Käsittelet
suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		Biohiili
B3		C1		A2		C3		A= 0 t/ha
B2		C2		A1		C2		B= 5 t/ha
B1		C3		A3		C1		C= 10 t/ha
suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		Lannoitus
A3		B2		C2		A3		2014
A2		B1		C3		A1		Kaliumtaso
A1		B3		C1		A2		1=50 %
suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		2=75 %
C3 TDR 60 cm		A1		B1		B1		3=100%
C2		A3		B3		B3		2015
C1		A2		B2		B2		Lannoitustaso
suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		1=30 %
3 metriä		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		2=65 %
suojaruutu		C1		A2		C3		3=100%
B3		C2		A1		C2		
B2		C3		A3		C1		
B1		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		B2		C2		A3		
A3		B1		C3		A1		
A2		B3		C1		A2		
A1		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		A1		B1		B1		
C3		A3		B3		B3		
C2		A2		B2		B2		
C1		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
3 metriä		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		C1		A2		C3		
B3		C2		A1		C2		
B2		C3		A3		C1		
B1		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		B2		C2		A3		
A3		B1		C3		A1		
A2		B3		C1		A2		
A1		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		A1		B1		B1		
C3		A3		B3		B3		
C2		A2		B2		B2		
C1		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		
3 metriä		suojaruutu		suojaruutu		suojaruutu		