

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**BIOHIILEN MAHDOLLISUUDET KASVIHUONEKAASU-
PÄÄSTÖJEN KOMPENSOINNISSA**
Possibilities for Biochar in offsetting greenhouse gases

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori, TkT Ville Uusitalo
Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, M.Sc. Miika Marttila

Lappeenrannassa 5.10.2020

Ville Varpula

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Ville Varpula

Biohiilen mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen kompensoinnissa

Kandidaatintyö

2020

37 sivua, 2 taulukkoa ja 5 kuvaa

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori, TkT Ville Uusitalo

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, M.Sc. Miika Marttila

Hakusanat: biohiili, kompensatio, kannattavuus

Keywords: biochar, offset, profitability

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää biohiilen mahdollisuuksia kasvihuonekaasupäästöjen kompensoinnissa. Päästöjen kompensatioita, näiden hintoja sekä kompensatioista saavutettavien päästövähennysyksiköiden maailmanmarkkinoita selvitetään kirjallisuuskatsauksella. Päästöjen kompensoiminen ostamalla päästövähennysyksiköitä on toimiva tapa saavuttaa hiilineutraalius hyvittämällä sellaisten välttämättömien toimintojen päästöt, joita ei pystytä vähentämään. Kompensaatiomarkkinat ovat vaihtelevat, ja eri kompensatiotavoilla saavutettujen päästövähennysyksiköiden väliset erot ovat suuria. Biohiilen tuotannon taustaa, ominaisuuksia ja kustannuksia avataan ja työssä vertaillaan biohiiltä muihin kompensatiotapoihin. Biohiili voi toimia päästöjen kompensointina, koska sillä on selkeästi negatiivinen hiilijalanjälki ja sen tuotannolla voidaan luoda hiilinieluja. Biohiilen ongelma päästöjen kompensoinnissa on sen hinta. Biohiili on tällä hetkellä kallis tuote, ja kompensatiotoiminta nähdään lähinnä lisätienestinä biohiilen muiden sovellusten arvon rinnalla. Biohiilellä saavutetut kompensatiot ovat halvimmillaankin paljon kalliimpia kuin vallitsevat kompensatiotavat. Biohiilellä on kuitenkin merkittävää potentiaalia luoda negatiivisia päästöjä ja sen valmistuksen hinta voi laskea ja hiilensidonnan arvo nousta tulevaisuudessa.

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 KIRJALLISUUSKATSAUS PÄÄSTÖJEN KOMPENSOINNISTA JA NÄIDEN MARKKINOISTA	7
2.1 Kompensaatioiden taustalla olevat toiminnot.....	9
2.1.1 Maankäytön ja metsityksen projektit.....	9
2.1.2 Suoprojektit	10
2.1.3 Uusiutuvan energian projektit	11
2.1.4 Energiatehokkuuden projektit	11
2.1.5 CCS	12
2.1.6 Muut kompensaatiomenetelmät.....	12
2.2 Kompensaatiomarkkinat	13
2.2.1 Päästökaupan tausta ja toiminta.....	15
3 BIOHIILEN OMINAISUUDET JA KUSTANNUKSET	17
3.1 Biohiilen hiilensidontakyky	19
3.2 Biohiilen tuotannon kustannukset ja hinta.....	20
4 KOMPENSOINNIN MAHDOLLISUUDET BIOHIILELLÄ.....	23
4.1 Kompensaatioiden kriteerit biohiilelle.....	23
4.2 Biohiilen kilpailukyky kompensaatiomarkkinoilla.....	24
4.3 Biohiilen potentiaali.....	27
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	29
6 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	34

LYHENNELUETTELO

BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage
CCS	Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CDM	Clean Development Mechanism
CER	Certified Emission Reduction
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
EU	Euroopan Unioni
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
JI	Joint Implementation
khk	Kasvihuonekaasu
MRS	Market Stability Reserve, markkinavakausvaranto
REC	Renewable Energy Certificate
USBI	US Biochar Initiative
VCS	Verified Carbon Standard

Yksiköt

CO ₂ e	hiilidioksidiekvivalentti
tn	tonni
\$	dollari

1 JOHDANTO

Maapallolla oleva hiili kiertää luonnollisesti eri hiilivarastojen, kuten merien, biomassan sekä maaperän, välillä. Hiili vapautuu ja sitoutuu uudestaan ajan kuluessa. Fossiilisten polttoaineiden polttaminen, erilaiset maankäytön muutokset ja muu ihmisten toiminta ovat häirinneet tätä kiertoa vapauttamalla ilmakehään merkittävän määrän kasvihuonekaasuja (khk), joista merkittävin on hiilidioksidi (CO₂). Nämä khk-päästöt voimistavat maapallon luonnollista kasvihuoneilmiötä ja lämmittävät maapallon ilmakehää ja kiihdyttävät näin ilmastonmuutosta. (Ilmasto-opas.fi 2020.) Ilmastonmuutoksen pahimpien seurausten välttämiseksi tulisi Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) vuoden 2018 raportin mukaan pyrkiä pitämään lämpeneminen 1,5 celsiusasteessa vuosisadan loppuun mennessä. Maapallon keskilämpötilan ollessa jo nyt noin yhden asteen esiteollista aikaa lämpimämpi, pitää päästöjä vähentää nopeasti. IPCC:n mukaan hiiltä tulisi myös sitoa pois ilmakehästä lisäämällä hiilinieluja ja negatiivisia päästöjä ja vuonna 2050 hiilinielujen ja -päästöjen tulisi olla saman kokoiset. (IPCC 2018, 96 & 105.)

Ilmastonmuutoksen hillinnän vuoksi hiilineutraaliuden saavuttaminen ja hiilen sitominen pois ilmakehästä on erittäin tärkeää. Monesti ainoa keino saavuttaa hiilineutraalius on kompensoimalla khk-päästöjä. Päästöjen kompensoiminen on palvelu, jossa maksua vastaan ostaja saa päästövähennysyksiköitä (engl. carbon credit). Päästövähennysyksikkö on jonkin tahon, esimerkiksi yrityksen tai yksityisen ihmisen, ostamalla saatu oikeus yhden hiilidioksidiekvivalenttitonnin päästöjen todennettuun kompensaatioon (engl. offset). Kompensaatioita tulisi ostaa päästöjen välttämisen ja vähentämisen jälkeen hyvittämään sellaisten välttämättömien toimien päästöjä, joita ei saada kokonaan poistettua. Tällaisia välttämättömiä toimia ovat esimerkiksi jotkin kohtuuttoman kalliita investointeja vaativat päästövähennykset. Kompensatioille on paljon tarkkoja kriteerejä, joita niiden pitää läpäistä ennen kuin saavutettuja päästövähennysyksiköitä voidaan myydä. Kompensaatiot voivat syntyä esimerkiksi biologiseen hiilensidontaan pohjautuvilla toiminnoilla, kuten puiden istuttamisella, tai vältetyillä päästöillä, joita saadaan esimerkiksi korvaamalla fossiilista energiaa uusiutuvalla energialla. (Kuitunen & Ollikainen 2014, 99.) Myös uudet tekniikat hiilidioksidin sitomiseksi suoraan ilmasta tai maaperään biohiilellä ovat suuren kiinnostuksen kohteina.

Biohiili on paljon vakaata hiiltä sisältävää materiaalia, jota valmistetaan biomassasta kontrolloidulla vähähappisella palamisprosessilla. Biohiiltä pystytään valmistamaan käytännössä mistä tahansa biomassasta, eli myös muuhun hyötykäyttöön kelpaamattomasta jätteestä. Valmistusprosessista saadaan myös energiaa, jota voidaan käyttää esimerkiksi sähkön tuotantoon tai kaukolämpönä. Biohiiltä pystytään käyttämään maanparannusaineena, energiaikäytössä, suodattamisessa sekä lukuisissa muissa sovelluksissa. Kiinnostus biohiiltä kohtaan on kasvanut etenkin tämän hiilensitomispotentiaalin vuoksi. Tätä pidetään lupaavana ja kestäväenä tapana sitoa hiiltä pois ilmakehästä ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta. Biohiilellä pystytään sitomaan vakaata hiiltä maaperään pitkäksi aikaa ja samalla saadaan positiivisia vaikutuksia maassa kasvaville kasveille, prosessista syntynyttä hiilinegatiivista energiaa ja teollisten maanparannusaineiden käyttö voi vähentyä. (Lehmann & Joseph 2009, 1, 5–8.)

Biohiilen lopullinen läpimurto on jäänyt vielä tapahtumatta muun muassa erilaisten tieteellisten ja taloudellisten epävarmuuksien sekä laajan yleisön pienen tietoisuuden takia. Biohiiltä on tutkittu paljon, ja tämän tutkimuksen ansiosta biohiilellä tiedetään olevan monia hyödyllisiä ominaisuuksia. Myös potentiaali ilmastonmuutosta hillitseväenä toimenä on tunnistettu. Jotta biohiilellä voitaisiin luoda laajamittaisesti negatiivisia päästöjä sitomalla hiiltä takaisin maaperään, tulisi toiminnan arvon näkyä myös taloudellisessa mielessä. Tämä tarkoittaa kysynnän kasvua, suuremman sijoittajajoukon mukaantuloa, mahdollisia tukia, selkeää sidotun hiilidioksiditonin arvoa sekä muiden biohiilen arvoa nostavien tekijöiden toteutumista. Hiilen sidonnan kannattavuuden osalta on myös tärkeää, että biohiilellä sidotun hiilidioksiditonin hinta olisi kilpailukykyinen muihin kompensatio- ja hiilensidontakeinoihin verrattuna. Elinarvoisen tärkeää on myös kestävyuden säilyttäminen koko materiaalin elinkaareissa biohiilen kaupallistumisenkin jälkeen. (Lehmann & Joseph 2009, 375–377.)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää biohiilen mahdollisuuksia khk-päästöjen kompensoinnissa. Kandidaatintyössä vastataan kysymykseen, onko biohiili toimintakelpoinen ja kilpailukykyinen tapa kompensoida khk-päästöjä verrattuna muihin kompensatiotapoihin. Kompensatiotapoja sekä päästövähennysyksiköiden maailmanmarkkinoita esitellään kirjallisuuskatsauksella luvussa kaksi. Luvussa kolme esitellään biohiilen erilaisia ominaisuuksia sekä tämän kustannuksia. Luvun neljä tarkastelussa taas selvitetään biohiilen mahdollisuutta päästöjen kompensoinnissa sekä tämän realistisuutta.

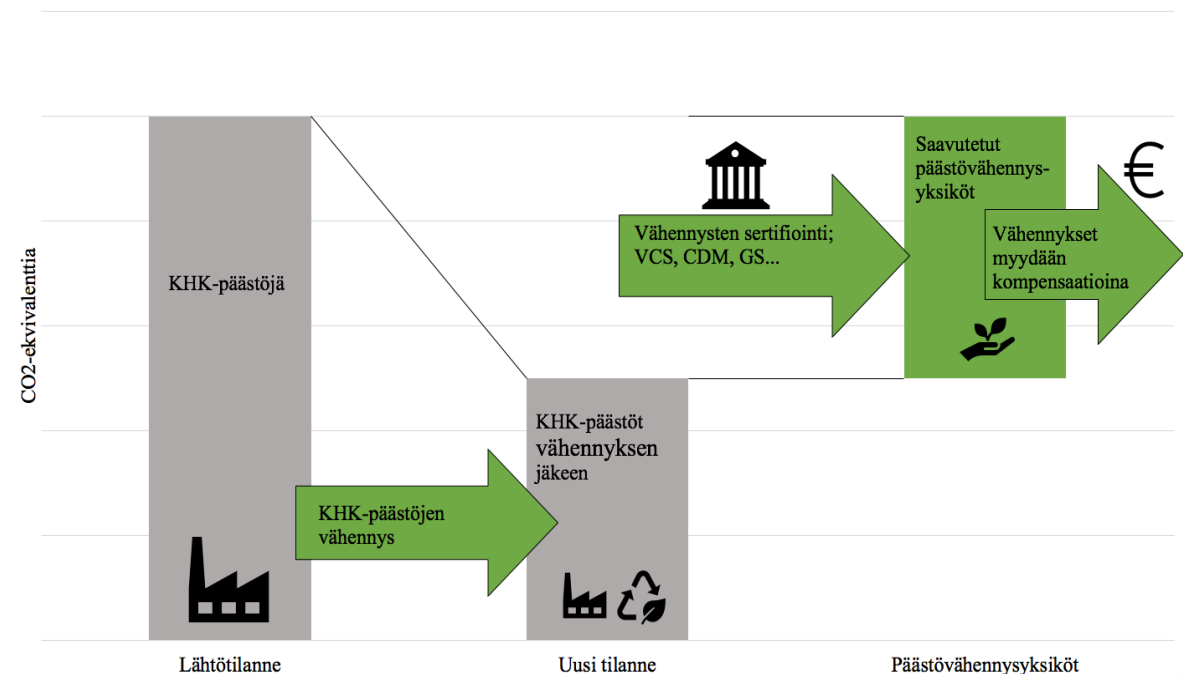
2 KIRJALLISUUSKATSAUS PÄÄSTÖJEN KOMPENSOINNISTA JA NÄIDEN MARKKINOISTA

Päästövähennysyksiköitä on olemassa monia erilaisia, ja niiden taustalla olevat toiminnot voivat erota toisistaan hyvinkin paljon. Päästövähennysyksiköiden pohjimmainen idea on sitoa hiiltä pois ilmakehästä, tai välttää tapahtuvia päästöjä muualla. Maksamalla tästä vähennyksestä rahaa jollekin palvelulle, voidaan nämä päästövähennykset lukea ostajan, joka voi olla yksityinen henkilö, yritys tai vaikkapa kunta tai valtio, omiksi vähennyksiksi. Kun yksikkö on ostettu, se hyllytetään. Tällöin samaa vähennystä ei voida laskea uudestaan jonkin toisen hyväksi. (Kuitunen & Ollikainen 2014, 99–101.)

Päästövähennysyksiköiden tulee läpäistä useita kriteerejä ennen kuin niitä voidaan myydä eri markkinoilla. Tullakseen hyväksytyksi useimmiten päästövähennysyksiköiden tulee olla:

- i) Aitoja: Päästövähennyksien tai hiilensitomisen tulee todistetusti tapahtua.
- ii) Mitattavissa olevia: Kaikki päästövähennykset ja hiilinielut tulee olla määrällisiä ja selkeästi mitattavissa olevia. Lisäksi näitä tulee vertailla järkevään lähtötilanteeseen.
- iii) Pysyviä: Saavutettujen päästövähennysyksiköiden tulee olla pysyviä. Pysyvyyden rajaksi on sovittu kansainvälisesti 100 vuotta. Tämän varmistamiseksi tulee perustaa varatoimia jonka avulla mahdolliset vuodot tai kumoutumiset pystytään korvaamaan sopivilla toimilla.
- iv) Lisäyksellisiä: Saavutetut päästövähennykset ovat lisäystä, eikä niitä olisi tapahtunut ilman siihen kompensatioiden ansiosta panostettua rahallista tukea. Tämä on olennainen kriteeri kaikille kompensatioille.
- v) Todennettuja: Päästövähennysyksiköt ovat jonkin kolmannen osapuolen varmistamia.
- vi) Yksilöllisiä: Yhtä vähennettyä hiilidioksidiekvivalenttitonnia kohden luodaan vain yksi päästövähennysyksikkö. Kaikista päästövähennysyksiköistä pidetään rekisteriä. (Maailmanpankki (World Bank) 2020, 50.)

Päästövähennysyksiköitä vahtivat erilaiset sertifikaatit, joista osa on kansainvälisten sopimusten aikaansaamia ja osa yksityisiä. Nämä pitävät yllä päästövähennysyksiköiden rekisteriä sekä varmistavat esimerkiksi sen, että vähennyksiä todellakin tapahtuu ja että vähennykset ovat kestäviä niin ympäristöllisesti kuin sosiaalisestikin. Yksityisistä sertifikaateista merkittävimpiä ovat eri kansalaisjärjestöjen yhteistyössä perustetut Verified Carbon Standard (VCS) ja Gold Standard. Näiden sertifikaattien vaatimukset ovat samankaltaisia kuin YK:n Kioton pöytäkirjan yhteydessä sovitulla kansainvälisten sopimusten alaisilla CDM-hankkeilla (Clean Development Mechanism). CDM-hankkeiden avulla saadaan kehittyvissä valtioissa tapahtuvien projektien myötä CER-päästövähennysyksiköitä (Certified Emission Reduction). Maailman Pankin vuoden 2020 selvityksen mukaan kautta aikojen kaikista päästövähennysyksiköistä yli puolet on tullut CDM-hankkeista. Lisäksi 22 % yksiköistä on saavutettu toisesta Kioton pöytäkirjan yhteydessä sovitusta valtioiden välisestä JI-päästövähennysmekanismista (Joint Implementation). Myös useita muita eri sertifikaatteja on olemassa ja jotkin kompensointipalvelut tarjoavat omia, riippumattomien yritysten tarkistamia, kompensatioita. (Fair Climate Fund 2019.) Kuvassa yksi näkyy päästövähennysyksikön muodostuminen.



Kuva 1. Päästövähennysyksiköiden muodostuminen. (Maailman Pankki 2020, 48.)

Kuvassa yksi on kuvattu tärkeimmät vaiheet päästövähennysyksikön muodostumisessa. Ensin on lähtötilanne, johon toteutunutta vähennystä tai hiilinielua vertaillaan, sitten tulee vähennys tai nielu, jonka jälkeen saavutetaan uusi, vähäpäästöisempi, tilanne. Tämän jälkeen vähennykset sertifioidaan jonkin kolmannen osapuolen toimesta. Tämä voi olla yksityinen sertifikaatti, Gold Standard tai VCS, tai kansainvälisen sopimuksen alainen, kuten CDM. Sertifioinnin jälkeen on saavutettu uusia päästövähennysyksiköitä, jotka myydään eri markkinapaikoissa. Markkinapaikkoja ovat esimerkiksi internetissä toimivat kompensatiopalvelut. Yksiköitä voi ostaa suoraan sertifikaatin omalta palvelulta. (Maailman pankki 2020, 48–49.)

2.1 Kompensaatioiden taustalla olevat toiminnot

Päästöjen kompensatiotapoja on lukuisia. Tässä kappaleessa käydään läpi yleisimpiä kompensatiotapoja, sekä näiden hintaluokkaa. Osa näistä liittyy biologiseen hiilensidontaan, esimerkiksi uudelleen metsittäminen, ja osa taas vältettyihin päästöihin, esimerkiksi energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvaan energiaan vaihtaminen. Kompensaatioprojektit tapahtuvat usein kehittyvissä valtioissa. Vapaaehtoisten päästövähennysyksiköiden hinnat vaihtelevat taustalla olevien projektien tapaan paljon. Useimmiten yksiköiden tarjonta riippuu lähes täysin kysynnästä, joka tarkoittaa, että jokaiselle yksikölle pitää käytännössä olla ostaja valmiina ennen kuin kompensatioprojektia aletaan toteuttamaan. Hiilensidonnan ja vältettyjen päästöjen todentamisessa on myös paljon vaihtelua. Internetissä on lukuisia päästöjen kompensatioita tarjoavia palveluita, ja suomalaisiakin palveluita on jo useita. (Kuitunen & Ollikainen 2014, 99–101.)

2.1.1 Maankäytön ja metsityksen projektit

Puut, kuten muutkin kasvit, sitovat hiilidioksidia ilmasta yhteyttämällä. Hiili vapautuu takaisin kiertoon kasvin maatuessa. Puut ovat suuren kokonsa ja pitkän ikänsä vuoksi hyviä sitomaan hiiltä pois ilmakehästä. Maankäytön muutokset, kuten metsien kaataminen, ovat fossiilisten polttoaineiden polttamisen lisäksi suurimpia ilmastonmuutoksen aiheuttajia. Tämän vuoksi monet päästöjen kompensatiopalvelut keskittyvätkin maankäyttöön ja metsittämisprojekteihin. Maankäyttöön liittyviä projekteja on paljon erilaisia, mutta karkeasti ne

jakautuvat entisen metsän uudelleen metsittämiseen (engl. reforestation), aiemmin metsittämättömän alueen metsittämiseen (engl. afforestation), uhan alla olevan metsäalueen suojeeluun sekä peltojen suojeeluun viljelyn päästöjen ehkäisemiseksi. (Ramseur 2009, 4–6.) Metsittämisen projektit ovat suosittuja kompensatiotapana. Tämä näkyy myös Forest Trends Ecosystem Marketplacen (2019, 6) selvityksessä, jossa niiden todettiin olevan suosituin kompensatiotapa vapaaehtoisilla markkinoilla vuosina 2017 ja 2018.

Maankäytön ja metsityksen projekteista syntyneet päästövähennysyksiköt maksavat Forest Trends Ecosystem Marketplacen selvityksen (2019, 6) mukaan keskimäärin 3,2 dollaria (noin 2,7 euroa) CO₂-ekvivalenttitonnia kohden. Tässä on mukana vähennyksiä suosituimmilta sertifikaateilta. Suomalainen Compensate-kompensaatiopalvelu hinnoittelee metsityksellä saatuja kompensatioitaan 28 euron arvoiseksi (Compensate 2020). Gold Standardin Fairtrade-hinnoittelun mukainen minimihinta metsityksen projekteilla on 13 € CO₂-ekvivalenttitonnia kohden (Gold Standard 2016). VCS-sertifikaatilla taas metsitysprojektit ovat samaa hintaluokkaa ja esimerkiksi Iso-Britanniassa tapahtuva metsitysprojekti maksaa noin 15 € ja Keniassa tapahtuva noin 11 €. Fuss et al. tekemän katsauksen (2018) mukaan metsityksestä saatavat päästövähennysyksiköt maksavat 5-50 dollaria (noin 4,3-42,6 euroa).

2.1.2 Suoprojektit

Soiden ennallistaminen luonnontilaisiksi on muutamalla toimijalla oleva kompensatiokeino. Esimerkki tällaisesta on Suomen Luonnonsuojeluliiton perustama Hiilipörssi. Suohon tehdyt kompensatiot perustuvat siihen, että ojitetusta suosta luonnontilaiseksi palauttaminen lopettaa suosta ja turpeen hajoamisesta tapahtuvat hiilipäästöt ilmakehään. Luonnontilaiseksi palauttaminen myös mahdollistaa hiilen sitoutumisen uuteen turpeeseen, sekä lisää suon biodiversiteettiä. Hiilipörssissä ei voi ostaa suoraan yhden CO₂-ekvivalenttitonnin yksikköä, vaan pinta-alaa ennallistetusta suosta. Yhden vuosittaisen sidotun CO₂-ekvivalenttitonnin hinnan voi arvioida olevan noin 324 euroa. Sadassa vuodessa tällä sijoituksella sitoo jo sata CO₂-ekvivalenttitonnia. Käytännössä pienemmälläkin sijoituksella, eli sadasosalla (3,24 euroa) saa siis sidottua yhden CO₂-ekvivalenttitonnin. Tämä on tosin ongelmallinen, sillä ei ole mielekäästä, että yhden tonnin kompensatio olisi sitoutunut vasta sadan vuoden

päästä. Tämän vuoksi hinnaksi valittiin välittömästi sidotun hiilidioksiditonnin hinta 324 euroa. (Hiilipörssi 2020.)

2.1.3 Uusiutuvan energian projektit

Uusiutuvan energian projektit, kuten tuuli- ja aurinkovoima, olivat vuonna 2018 Forest Trends Ecosystem Marketplacen selvityksen (2019, 6) mukaan toiseksi suosituin kompensatiotapa. Uusiutuvalla energialla saavutetut kompensatiot perustuvat vanhojen fossiilisten energiantuotantomuotojen korvaamiseen uusiutuvalla energialla, jolloin saadaan leikattua fossiilisen energian muodostamat päästöt. Nämä leikatut päästöt myydään päästövähennysyksiköinä. Kompensaatioiden myyminen tukee uusiutuvan energian kasvua ja tekee siitä kilpailukykyisempää fossiilisia energialähteitä vastaan. (Ramseur 2009.) Uusiutuvan energian projekteista myydään päästövähennysyksiköiden lisäksi REC-yksiköitä (Renewable Energy Certificate), joka syntyy uusiutuvilla energialähteillä tuotetun yhden megawattitunnin lisäyksestä sähköverkkoon. REC-yksiköiden ostamiseen on omat markkinansa, mutta käytännössä taustalla olevat toimet eivät eroa yhtään uusiutuvan energian päästövähennysyksiköstä. (Hewlett 2017.)

Gold Standardin Fairtrade-hinnoittelujärjestelmällä minimihinta uusiutuvan energian projekteille on 8,10 euroa CO₂-ekvivalenttitonnia kohden, mutta hinta vaihtelee muun muassa projektin koon perusteella (Gold Standard 2016). Forest Trends Ecosystem Marketplacen selvityksen (2019, 6) mukaan yksi uusiutuvan energian päästövähennysyksikkö maksoi vuonna 2018 vain 1,7 dollaria (noin 1,5 euroa), ja olikin halvin eri kompensatiotavoista.

2.1.4 Energiatehokkuuden projektit

Energiatehokkuuden projektit keskittyvät lisäämään energiatehokkuutta, ja täten vähentämään hukattua energiaa. Projekteissa esimerkiksi tuetaan siirtymistä energiatehokkaampiin järjestelmiin kohteissa, joissa ei olisi siirtymään muuten varaa. Lisähyötynä voi tulla taloudelliset säästöt pitkällä aikavälillä, sähkön kulutuksen vähentyessä. Energiatehokkuuden

projekteja voivat olla esimerkiksi energiatehokkaampien rakennusten rakentamisen tai tehokkaampiin koneisiin ja laiteisiin vaihtamisen tukeminen. (Ramseur 2009.) Gold Standardin Fairtrade-minimihinta energiatehokkuuden projekteille on 8,20 euroa CO₂-ekvivalenttitonnia kohden (Gold Standard 2016). Forest Trends Ecosystem Marketplacen selvityksen (2019, 6) mukaan yksi energiatehokkuuden päästövähennysyksikkö maksoi 2,8 dollaria (noin 2,4 euroa) vuonna 2018.

2.1.5 CCS

CCS, eli Carbon Capture and Storage, on termi, jota käytetään yleisesti hiilensitomiseen ja varastointiin liittyvistä tekniikoista. Näitä on useita erilaisia, mutta merkittävimpinä voidaan ehkäpä pitää bioenergian sovelluksista aiheutuvien savukaasujen hiilen sitomista (BECCS, Bioenergy Carbon Capture and Storage) ja hiilen sitomista suoraan ilmasta (DACCS, Direct Air Carbon Capture and Storage). BECCS pohjautuu siihen, että kestävästi hyödynnetty bioenergia, jota saadaan esimerkiksi puusta, on hiilineutraalia. Puu on sitonut itseensä hiiltä, ja käyttäessä saman puun energiakäyttöön tämä hiili vapautuu takaisin eikä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus täten muutu. Jos hiili saadaan vielä sidottua bioenergiailaitoksen savukaasuista pitkäaikaiseen säilöön esimerkiksi kallioperään, poistuu tämä hiili lyhyestä kierrosta. DACCS on taas hiilen sitomista suoraan ilmasta käyttäen teknologiaa. Teknologiaa DACCS:n toteuttamiseen on useita erilaisia, mutta näistä monet pohjautuvat kemiallisiin reaktioihin ja erilaisiin sorbentteihin. CCS-teknologiat ovat vielä kehitysasteella ja ongelmat muun muassa skaalauksen ja energiatehokkuuden kanssa ovat vielä ratkaistavana. CCS-tekniikoiden hiilidioksiditonin hinta on myös varsin korkea. BECCS:llä hinta on suunnilleen 100-200 dollaria (noin 85,3-170,5 euroa) ja DACCS:llä 100-300 dollaria (noin 85,3-255,8 euroa) sidottua CO₂-ekvivalenttitonnia kohden. (Fuss et al. 2018.)

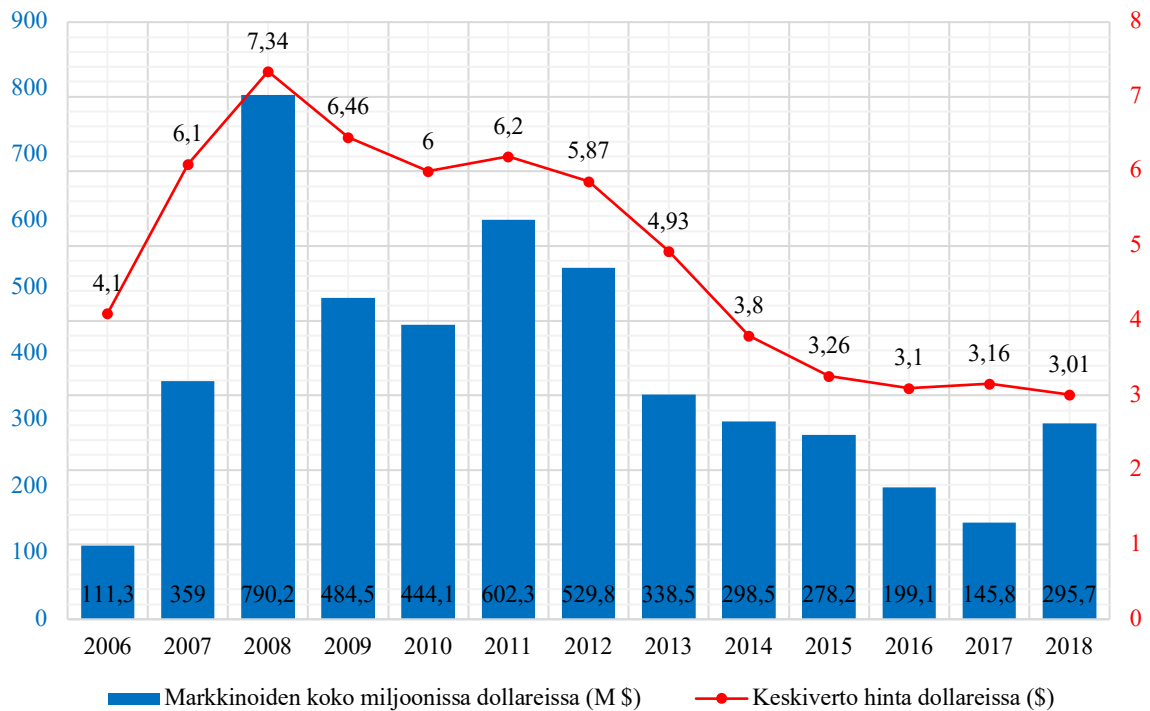
2.1.6 Muut kompensatiomenetelmät

Aiemmin mainittujen tapojen lisäksi markkinoilla on vielä lukuisia muita tapoja kompensoida päästöjä. Yleisimpiä ovat muun muassa vähäpäästöisempiin tekniikkoihin siirtyminen logistiikassa ja jätehuollossa, teollisuuden hajapäästöjen talteen ottaminen sekä muiden kas-

vihuonekaasujen kuin hiilidioksidin päästöjen vähentäminen. CDM-projektit ovat keskittyneet eniten nimenomaan teollisuuden päästöjen vähentämiseen ja hajapäästöihin. Lisäksi niin sanotut non-CO₂ kohteet, eli muiden kasvihuonekaasupäästöjen kuin hiilidioksidin vähentäminen, ovat olleet etenkin CDM-projektien huomion kohteena (Maailman Pankki 2020, 53). Näitä khk-päästöjä ovat muun muassa metaanipäästöt (CH₄) esimerkiksi kaatopaikoilta ja maataloudesta, typpioksiduulin (N₂O) lähteet viljelystä tai tietyistä teollisista prosesseista, sekä fluorihilivetyjen (HFC-yhdisteet) ja rikkiheksafluoridin (SF₆) lähteet tietyistä teollisuuden prosesseista. Näillä kaasuilla on hiilidioksidia merkittävästi suurempi lämmityspotentiaali. (Ramseur 2009.) Näidenkin lisäksi on vielä lukuisia muita tapoja sitoa hiiltä ja kompensoida päästöjä. Esimerkiksi Gold Standardilla on paljon kompensatioprojekteja, jotka perustuvat puhtaampien liesien ja muihin kuin polttoon perustuvien energianlähteiden tarjoamiseen kehittyvissä valtioissa (Gold Standard 2016).

2.2 Kompensaatiomarkkinat

Päästöjen kompensatiopalveluissa myytävien vapaaehtoisten päästövähennysyksiköiden markkinat ovat melko vaihtelevia vuodesta toiseen ja näiden kokoon vaikuttaa erittäin paljon vuosittainen maailmanlaajuinen kysyntä. Maailman vapaaehtoisten päästövähennysyksiköiden markkinoiden arvo oli vuonna 2018 yhteensä 295,7 miljoonaa dollaria (noin 252,1 miljoonaa euroa). Näillä kompensatiolla hyvitettiin vuoden aikana yhteensä 98,4 miljoonaa tonnia CO₂-ekvivalenttia. Tämä on enemmän kuin vuonna 2017, mutta sitä ennen markkinoiden koko oli laskenut monta vuotta putkeen, vuodesta 2011 asti. Myös päästövähennysyksiköiden keskimääräinen hinta vaihtelee paljon. Selvityksen tarkastelemat vähennykset ovat maailman suosituimpien kompensatiosertifikaattien alaisia vähennyksiä. Kuvassa kaksi nähdään punaisella viivalla selvityksessä tarkasteltujen päästövähennysyksiköiden keskimääräisen hinnan kehitys, ja sinisellä pylväällä markkinoiden koon kehitys. (Forest Trends Ecosystem Marketplace 2019, 2–4.)



Kuva 2. Vapaaehtoisten päästövähennysyksiköiden markkinoiden ja keskivertohinnan kehitys. (Forest Trends Ecosystem Marketplace 2019, 2–4.)

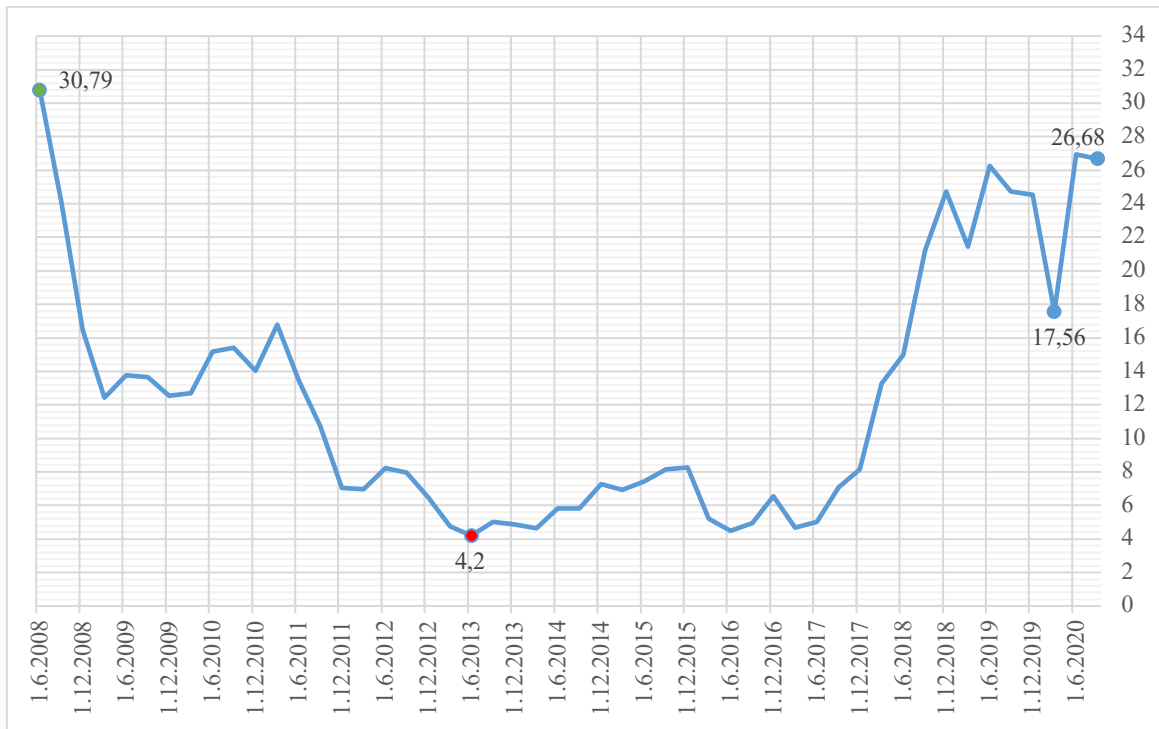
Päästövähennysyksikön hinta muodostuu monen tekijän summana. Taustalla olevan projektin kustannukset vaikuttavat luonnollisesti lopulliseen hintaan. Lisäksi hintaa nostaa mahdollisten tarvittavien investointien koko, sertifiointin ja projektin todentamisen kustannukset sekä projektin toteuttavan tahon mahdollinen voittomarginaali, joka tosin usein menee hallinnollisiin kuluihin. Lisäksi hintaan voi vaikuttaa alentavasti projektin myötä saadut säästöt esimerkiksi energian kulutuksessa. (Gold Standard 2016.)

M maailman markkinoilla keskimääräistä hintaa vetää alaspäin CER-vähennysyksiköt, joita on markkinoilla erittäin paljon, ja jotka maksavat usein vain joitakin kymmeniä senttejä. CER:ien hinta romahti jopa reilun 20 euron yksikköhinnasta reilusti alle euroon 2010-luvun taitteessa, eikä ole palautunut tästä. CER-yksiköistä on ollut myös paljon ylijäämää, joka pitää hinnan alhaisena. (Maailman Pankki 2019, 58–59.) CER:it ovat hiljalleen väistymästä kasvavien yksityisten sertifikaattien kuten VCS:n tieltä, joka on nykyään suurin yksittäinen päästövähennysyksiköiden tuottaja. Yksityiset sertifikaatit tuottivat vuonna 2019 jopa 65 %

kaikista päästövähennysyksiköistä, joka on merkittävä nousu vuodesta 2015 jolloin yksityiset sertifikaatit tuottivat vain 17 % maailman laajuisista yksiköistä. (Maailman Pankki 2020, 53.)

2.2.1 Päästökaupan tausta ja toiminta

Maailman hiilimarkkinat muodostuvat vapaaehtoisten päästövähennysyksiköiden lisäksi päästöoikeuksista (engl. emission allowance). Päästöoikeus on päästökaupassa myytävä lisenssi yhden hiilidioksiditonin päästöjen päästämiseen. Päästökauppoja on maailmassa useita, mutta näistä merkittävin on EU:n päästökauppa, joka on ollut käynnissä jo vuodesta 2005 ja kattaa 40 prosenttia Euroopan khk-päästöistä. Päästökaupan ideana on vähentää saastuttavien alojen päästöjä vähentämällä myytävien oikeuksien määrää vuosien mittaan vaiheittain. Yritykset joutuvat täten valitsemaan ylimenevistä päästöistä koituvan sakon uhalla ostaako se päästöoikeuksia vai satsaako se rahaa vähäpäästöisempään teknologiaan. EU:n päästötonnin hinta määräytyy markkinavoimien mukaan ja se on ollut päästökaupassa varsin volatiili, käyden pahimmillaan todella alhaalla. Päästöoikeuksista on ollut monena vuonna myös paljon ylijäämää, eli tarjonta on ollut suurempi kuin kysyntä, joka on laskenut hintaa. Vuonna 2019 EU:n päästökaupassa otettiin käyttöön markkinavakauserä (MSR, market stability reserve), jonka ideana on vähentää ylijäämää ja poistaa markkinoilta ylimääräisiä päästöoikeuksia. (Poussa 2019.) Viime vuosina päästöoikeuden hinta on kohonnut jälleen. Kuvassa kolme näkyy EU:n päästöoikeuden kehitys vuodesta 2008 eteenpäin. Kuvajasssa on esitetty hinta kvartaalin välein.



Kuva 3. EU:n päästökaupan päästöoikeuden hinnan kehitys 2008-30.6.2020. (Quandl 2020.)

Kuvassa vihreän pallon kohdalla oleva hinta on aikavälillä korkeimmalla ollut hinta, ja punaisen pallon kohdalla oleva on matalimmalla. Kuvaajasta huomataan muun muassa hinnan merkittävä putoaminen 2008-2013 sekä hinnan nopea nousu vuodesta 2017 eteenpäin. Kuvaajan loppupuolelta on myös nostettu esiin hinnan hetkellinen merkittävä putoaminen koronapandemian seurauksena vuoden 2020 alussa. Nämä näkyvät sinisten pallojen kohdalla olevista hinnoista.

Päästökauppa ei itsessään ole kompensatiotapa, mutta sen suuren vaikutusalueensa ansiosta EU:n päästökaupan kehitys vaikuttaa myös päästövähennysyksiköiden hintaan. CER-päästövähennysyksiköt kelpaavat tiettyin ehdoin EU:n päästökaupassa, ja EU onkin historiallisesti suurin CER:ien ostaja. EU:n päästökaupan hintaa voidaankin pitää maailmanlaajuisesti tärkeänä hiilitonnin arvon asettajana (Maailman Pankki 2020, 53). Lisäksi päästöoikeuksia voi ostaa pois markkinoilta vain kompensatiomielessä, jolloin päästöoikeuksia on markkinoilla tarjolla vähemmän ja päästökaupan alaiset yritykset joutuvat vähentämään pois ostetun päästöoikeuden satsaamalla puhtaampaan teknologiaan. Tällaista kompensatiotapaa käyttää ainakin suomalainen CO2esto. CO2estolla yhden tonnin päästöoikeus maksaa 42,22 euroa. (CO2esto 2020.)

3 BIOHIILEN OMINAISUUDET JA KUSTANNUKSET

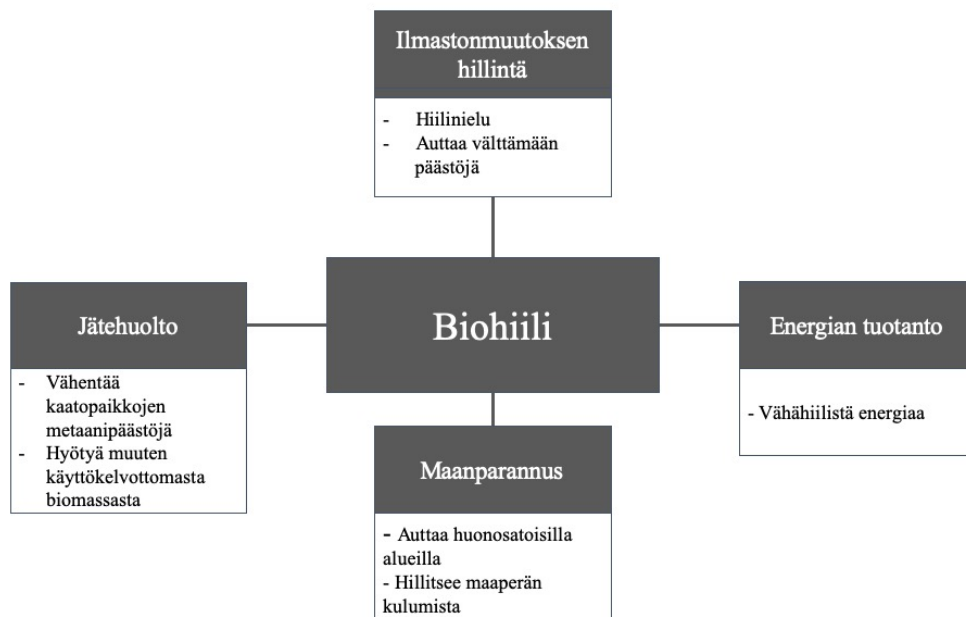
Tässä luvussa käydään läpi biohiilen hyötyjä ympäristöllisiin tarkoituksiin, etenkin ilmastomuutosnäkökulmasta. Biohiili myös esitellään tarkemmin sekä käydään läpi biohiilen taustalla olevia taloudellisia yksityiskohtia. Näihin lukeutuu muun muassa biohiilen valmistuksesta aiheutuvat kustannukset sekä hinta markkinoilla.

Biohiiltä valmistetaan useimmiten pyrolyysillä, eli vähähappisella kontrolloidulla palamisella, melko korkeassa lämpötilassa (< 700 °C). Pyrolyysiprosessin eri parametrit muuttavat paljon lopullisen biohiilen ominaisuuksia. Merkitseviä parametreja ovat muun muassa lämpötila, viipymisaika, palamisnopeus sekä tietenkin syötettävän materiaalin eri ominaisuudet kuten rakenne ja ravinnesisältö. Muita hiilimateriaaleja, kuten puuhiiltä ja grillihiiltä, valmistetaan samankaltaisilla prosesseilla, mutta biohiilellä tarkoitetaan yksinomaan biomassasta valmistettua ja maanparannusaineeksi, tai muuhun ympäristön hallinnalliseen tarkoitukseen, tarkoitettua materiaalia. (Lehmann & Joseph 2009, 1-3.) Prosessissa saadaan biohiilen lisäksi bioöljyä sekä kaasuja, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi energiantuotantoon. Hitaammalla pyrolyysiprosessilla saadaan useimmiten enemmän biohiiltä ja nopeammalla enemmän muita tuotteita. (Campbell et al. 2018.)

Biohiili mahdollistaa kestävämmän viljelyn uhraamatta satojen kokoa. Biohiili parantaa maaperää mm. sitomalla ravinteita ja vettä, sekä parantamalla maaperän viljavuutta ja orgaanisten yhdisteiden esiintyvyyttä. Se voi myös vähentää tarvetta teollisille maanparannusaineille ja lannoitteille. Oikein hyödynnettynä biohiili kasvattaa monien kasvien satoja. Satojen parantuminen biohiilellä ei ole kuitenkaan itsestäänselvyys, vaan biohiilen toimivuus kussakin tapauksessa riippuu muun muassa kyseisen biohiilen ominaisuuksista, alueen maaperästä ja ilmastosta sekä kasvatettavasta kasvista. (Galinato et al. 2011.) Biohiili ei ole uusi keksintö, vaan sitä on käytetty maanparannustarkoituksiin jo satoja vuosia sitten. Maahan silloin laitettu hiili on siellä suureksi osaksi vieläkin, ja se on parantanut maaperää alueilla merkittävästi. Biohiili nähdään ratkaisuna maaperän häviämiseen ja pilaantumiseen, joka on maapallolla tehomaanviljelyn vuoksi kasvava ongelma. Sen maanparannustehokkuus voisi

myös tuoda kallisarvoista ruokaturvaa monelle huonosti satoa tuottavalle seudulle maailmassa. (Lehmann & Joseph 2009, 5–6.)

Biohiilellä on myös monia muita hyötyjä. Biohiilen tuotannolla, kestävästi hyödynnettynä, on merkittävä potentiaali hillitä ilmastonmuutosta biohiilen hiilensidontakyvyn ja vältettyjen päästöjen ansiosta. Tuotannosta saadaan myös hiilineutraalia bioenergiaa. Biohiilellä on myös lukuisia hyötyjä jätehuollossa. Biohiiltä voidaan tehdä maatalouden muuten mätänemään menevästä ja usein käyttökelvottomasta sivutuotteena tulevasta biomassasta. Tätä on esimerkiksi eläinten jätteet sekä viljelyn sivutuotteet. Myös puutarhajäte ja erilaiset jätehuollon lietteet voivat toimia biohiilen valmistukseen. Tällöin saadaan muuten arvottomasta materiaalista talteen energiaa ja ravinteita, sekä vältetään usein päästöjä ja joitain jätteen kuljetuksia. Biohiilen on myös huomattu pidättävän ravinteita ja vettä paremmin sidottuna maaperään. Teollisten lannoitteiden, etenkin typen ja fosforin, valuminen vesistöihin aiheuttaa rehevöitymistä. Biohiilen on huomattu vähentävän näitä ravinnevalumia. Kuvassa neljä näkyy joitakin biohiilen eri käyttötarkoituksia. (Lehmann & Joseph 2009, 6–8 & 271–273.)



Kuva 4. Biohiilen eri käyttötarkoituksia ja esimerkkejä näiden vaikutuksista. (Lehmann & Joseph 2009, 5.)

3.1 Biohiilen hiilensidontakyky

Biohiilen tuotanto hiilivarastoksi on selkeästi hiilinegatiivista. Eri lähteet kertovat biohiilen hiilijalanjäljeksi hieman eri lukuja, mutta nämä ovat aina selkeästi negatiivisia. Biohiilen hiilinegatiivisuus perustuu siihen, että pyrolyysiprosessin ansiosta osa biomassassa olevasta hiilestä saadaan vakaaseen muotoon, jossa sen hajoaminen kestää pitkään. Laittamalla biohiiltä maahan saadaan prosessin ansiosta vakautunut hiili sidottua maaperään pois nopeamasta kasvien ja ilmakehän hiilenkierrosta. Lisäksi samalla saadaan hiilineutraalia energiaa, hyötykäyttöä muuten turhalle biomassalle ja tarve teollisille maanparannusaineille voi vähentyä. Ollakseen toimiva hiilinielu tulee biohiili valmistaa kestävästi. Kestävässä tuotannossa biohiilen valmistuksen ei tule aiheuttaa maankäytön muutoksia tai olla ristiriidassa ruoantuotannon kanssa. Kestävässä tuotannossa hiilletävää materiaalia tulisi myös kerätä vain siihen tahtiin kuin luonto sitä pystyy tuottamaan ja pyrolyysilaitoksen tulisi olla vähäpäästöinen. (Woolf et al. 2010.) Biohiilen hiilijalanjälkiä ja näiden vaihteluvälejä eri lähteistä on eritelty taulukossa yksi. Osassa hiilijalanjäljistä on vaihteluväliä, joka johtuu tutkimuksessa huomioitujen eri parametrien vaikutuksesta hiilijalanjälkeen.

Taulukko 1. Biohiilen hiilijalanjälkiä ja näiden vaihteluvälejä eri lähteistä

Lähde	Yhden kilon biohiiltä hiilijalanjälki (kgCO _{2e} / kg biohiiltä)	Huomioita
Forsström 2019	-1,1 [-0,63; -1,90]	LCA-mallilla laskettu pajubiohiilen hiilijalanjälki. Suluissa herkkyysanalyysin vaihteluväli
Carbofex & Puro.earth 2020	-3,11	Konsulttityhtiön laskema hiilijalanjälki Carbofex Oy:n biohiillelle

Galinato et al. 2011	-2,2; -2,93	Vaihteluväli hiilijalan- jäljelle
Lehmann & Joseph 2009, 353	-0,823; -1,113	Ensimmäinen luku on nopealla pyrolyysipro- sessilla saavutettu hiili- jalanjälki ja toinen hi- taalla prosessilla

Biohiilen hiilijalanjälki laskee paljon, jos laskuihin otetaan mukaan biohiilen ansiosta vältettyjä suuripäästöisiä toimia. Näitä on etenkin fossiilisilla polttoaineilla tuotetun energian korvaaminen prosessista saadulla hiilineutraalilla energialla, sekä muuten kaatopaikalle mädäntymään menevän materiaalin valmistaminen biohiileksi. Biohiilen maanparannusominaisuuksien ansiosta maaperästä tulevat khk-päästöt, joihin kuuluu metaani- sekä typpioksiduulipäästöjä, vähentyvät joissain tapauksissa. Vältettyjä päästöjä tulee myös mahdollisesti pienemmän teollisten lannoitteiden ja maanparannusaineiden tarpeen myötä, joiden valmistuksen ja levittämisen ympäristöllinen kuormitus voidaan välttää. (Lehmann & Joseph 2009, 321–333.)

3.2 Biohiilen tuotannon kustannukset ja hinta

Biohiilen maailmanlaajuisen vuosittaisen tuotannon koko on arvioitu olevan noin miljoona tonnia, ja tuotanto kasvaa jopa 30% vuodessa. Suomessa tuotanto on vasta pientä, ja maanparannusaineeksi tarkoitetun biohiilen vuosittainen tuotanto Suomessa on vain noin 200 tonnia. Biohiilen kysyntä ylitti Suomessa tarjonnan jo vuonna 2016 ja kysynnän on ennustettu kasvavan entisestään, mikä tulee mitä luultavammin kasvattamaan myös tuotannon määrää. Biohiilen hinta on ollut Suomessa korkealla juurikin tarjonnan pienehkön koon vuoksi. Markkinoiden kasvua ajaa biohiilen tunnistettu suuri potentiaali eri tarkoituksiin, mutta materiaaliin liittyvät monet epävarmuustekijät sekä yleisen tietoisuuden vähyys ovat pitäneet tuotannon marginaalisena. (Salo 2018.)

Biohiilen hinta muodostuu useasta eri komponentista, ja tämän lisäksi siihen vaikuttavat erilaiset muuttajat, kuten verotus ja markkinat. Biohiilen valmistuksen kustannuksiin vaikuttavat komponentit ovat karkeasti jaoteltuna materiaalin hankinta, materiaalin valmistelu, kuljetus sekä materiaalin valmistus biohiileksi. Näiden lisäksi biohiilen valmistuksen kustannuksiin vaikuttaa suurestikin esimerkiksi pyrolyysilaitoksen rakentaminen. Valmistuksen kustannukset ja markkinavoimat, sekä prosessin aikana saadut säästöt, vaikuttavat biohiilen lopulliseen myyntihintaan. Säästöjä ovat muun muassa prosessista saadun sähkön ja oheistuotteiden, kuten bioöljyn, myynnistä saadut tulot. (Ahmed et al. 2016.) Biohiilen valmistaminen on taloudellisesti kannattavaa todennäköisemmin, jos hiilletävä biomassaa on jätettä eikä kasvatettua, kaikkien pyrolyysituotteiden arvo saadaan talteen ja biohiilellä saavutetun hiilinielun arvo saadaan myytyä päästövähennysyksiköinä (Campbell et al. 2018).

Campbell et al. (2018) analyysissa biohiilitonnin hinnan vaihteluväliksi saatiin 838-1504 dollaria (noin 715-1282 euroa) tonnilta biohiiltä. Analyysissa myös todettiin eri biohiilien laatujen suuren vaihteluvälin sekä laajamittaisten globaalien markkinoiden puuttumisen, tai näiden epävarmuuden, vaikuttavan hintojen suureen vaihteluun. Vaihteluväli biohiilen hintojen välillä maailmalaajuisesti huomattiin olevan jopa yli 11 000 euroa biohiilitonnia kohden halvimman ja kalleimman välillä. USBI:n (US Biochar Initiative) tekemän kyselyn mukaan (2018) Yhdysvalloissa toimivien biohiiliyritysten keskivertohinta tonnilta biohiiltä oli 1032 dollaria (noin 880 euroa), ja kyselyssä useimmin mainittu hinta tonnilta oli 1600 dollaria (noin 1364 euroa). Suomalainen biohiiltä valmistava Carbofex myy biohiiltä 240-260 euron hinnalla kuutiometriä kohden. Carbofex ei hinnoittele biohiiltä massan mukaan, mutta sähköpostiviestissä antamiensa tietojen mukaan Carbofexin biohiilen teoreettisen tonnihinnan voi laskea olevan noin 1400-1 520 euroa. Joskin suoraan nettisivujen verollisen kuluttajahinnan mukaan laskettu teoreettinen tonnihinta on jopa yli 3 000 euroa. Nämä ovat kuitenkin vain suuntaa antavia ja vertailukelpoiseksi muutettuja hintoja Carbofexin biohiilelle (Carbofex Oy, sähköpostiviesti 26.6.2020). Löydettyjä biohiilen eri hintoja on esitelty taulukossa kaksi.

Taulukko 2. Biohiilen hintoja

Lähde	Hinta	Huomioita
-------	-------	-----------

Campbell et al. (2018)	838-1504 \$/tn (715-1282 €/tn)	
USBI (2018)	1032 \$/tn (880 €/tn)	Kyselyn keskiarvo
USBI (2018)	1600 \$/tn (1346 €/tn)	Kyselyssä useimmin ilmoitettu hinta
Carbofex Oy sähköposti (2020)	240-260 €/m ³	
Carbofex Oy sähköposti (2020)	1400-1520 €/tn	Laskettu yhtiön antamien tietojen perusteella teoreettinen hinta tonnille biohiiltä

Biohiili on useimmissa tapauksissa liian kallista viljelypelloille levittämiseen. Biohiili voi olla viljelyn näkökulmasta järkevää, jos materiaalilla on selkeitä todettuja hyötyjä kyseisessä paikassa, mutta biohiilen hinta on usein liian korkea sen soveltamiseen. Biohiilellä kylläkin on omat ekolokeronsa esimerkiksi puutarhoissa ja nurmikkoalueilla, sekä arvokasvien kasvatuksessa. Hinnan ollessa korkea, saattaa olla taloudellisesti kannattavampaa jopa vain polttaa biohiiltä ja korvata tällä kivihiilen polton päästöjä. Biohiilen hinnan halventuessa ja/tai hiilensidonnan arvon kasvaessa tulee toiminnasta kannattavampaa. (Galinato et al. 2011.)

4 KOMPENSOINNIN MAHDOLLISUUDET BIOHIILELLÄ

Biohiilellä voidaan kompensoida khk-päästöjä, sillä kuten kappaleessa 3.1 todettiin, se on selkeästi hiilinegatiivista, ja sillä saadaan hiiltä pois lyhyestä hiilen kierrosta. Luvussa 2 selvitettiin kompensatioiden vaatimuksia ja taloudellisia taustoja. Ollakseen toimiva päästöjen kompensatiotapa, tulee myös biohiilen läpäistä tiettyjä kompensatioille vaadittuja kriteerejä, sekä olla taloudellisesti kilpailukykyinen muihin kompensatioihin verrattaessa. Tässä luvussa esitellään biohiilen mahdollisuuksia khk-päästöjen kompensoinnissa, ja pohditaan tämän realistisuutta.

4.1 Kompensatioiden kriteerit biohiilelle

Päästövähennysyksiköiden tulee olla aitoja, mitattavissa olevia, pysyviä, lisäyksellisiä, todennettuja sekä yksilöllisiä. Nämä kriteerit esiteltiin tarkemmin luvussa kaksi. Biohiilellä tehtyjen kompensatioiden tulee siis myös läpäistä nämä. Seuraavaksi tarkastellaan biohiiltä näitä kriteerejä vasten ja vertaillaan tätä myös muihin tapoihin.

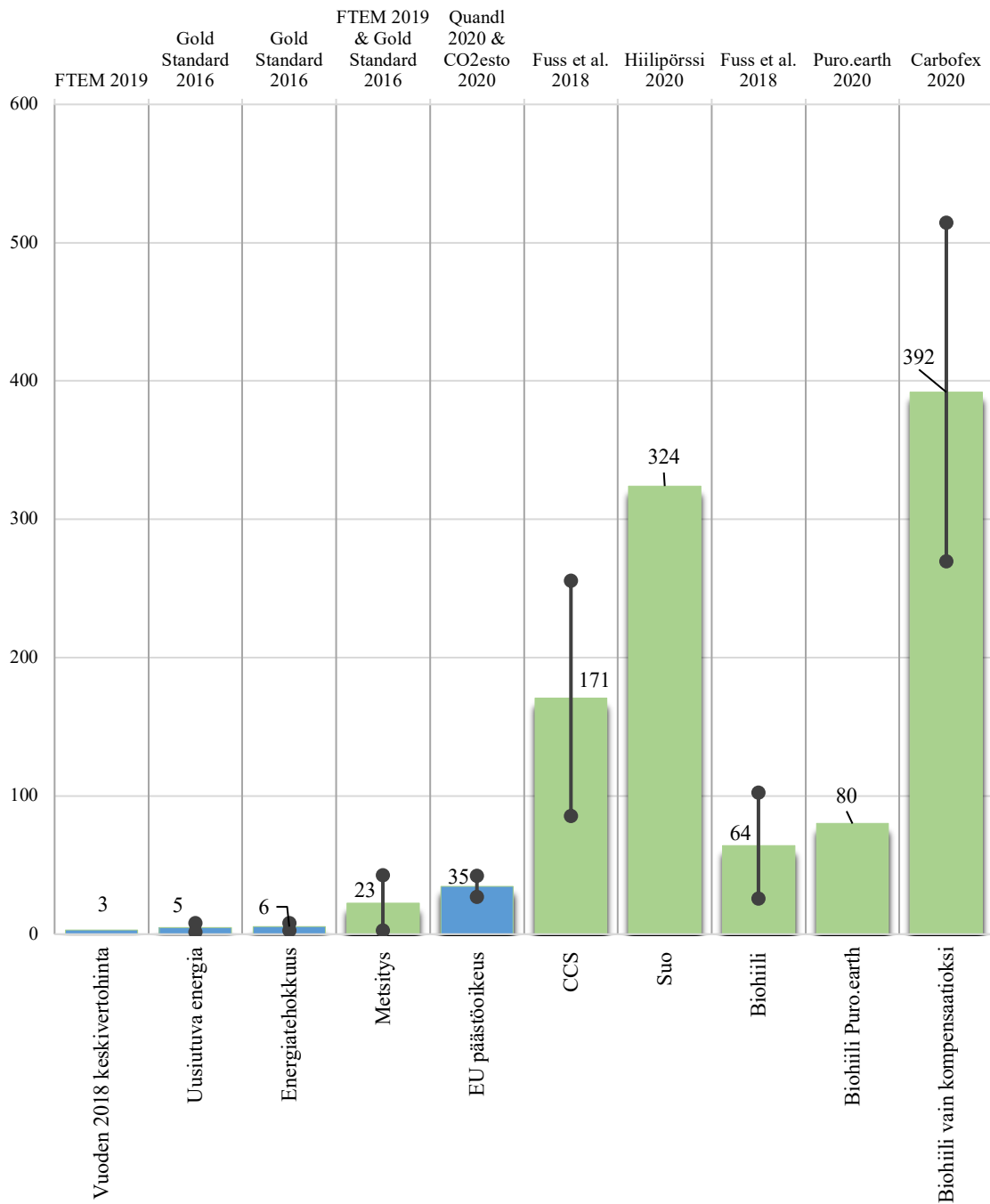
Aitous on biohiilellä läpäistävässä, sillä kuten kappaleessa 3.1 todettiin, materiaali on hiilinegatiivista. Hiilijalanjälki tosin vaihtelee useiden asioiden vaikutuksesta, ja etenkin välteytyt päästöt muun muassa maataloudesta ja maaperästä ovat vielä jonkin verran epävarmoja. Jos olosuhteiden vaihtelun vuoksi tapahtuvat liikkumavarat ja mahdolliset vuodot otetaan huomioon päästövähennysyksiköiden määrässä luoden vain pienimmän mahdollisen hiilinelun verran yksiköitä, ovat kompensatiot varsin aitoja. Näitä vähennyksiä tulisi myös verrata järkevään lähtötasoon, jolloin vähennysten voidaan todeta olevan myös mitattavissa olevia. Biohiilen on myös huomattu pysyvän maassa erittäin pitkään, sillä pyrolyysiprosessin ansiosta biomassassa oleva hiili muuttuu vakaaseen ja hiljaa hajoavaan muotoon. Täten pysyvyys on myös biohiilellä läpäistävässä oleva kriteeri. Todennettavuus ja yksilöllisyys vaativat jonkin sertifiointijärjestelmän, joka todentaa jokaisen vähennyksen tapahtuvan sekä hyllyttää yksikön oston jälkeen, jolloin samaa vähennystä ei voida käyttää uudestaan. Tätä varten biohiilen valmistusta, loppukäyttöä sekä loppukäytön vaikutuksia tulee seurata ja raportoida tarkasti. (Lehmann & Joseph 2009, 320–335.)

Lisäyksellisyys on kriteereistä haastavin. Biohiili on kallis tuote, ja tämän hetken hiilitonnin arvolla ei biohiilen valmistus ole kannattavaa tai järkevää vain päästövähennysyksiköiden myynnin kannalta, vaan se nähdään lähinnä mahdollisena lisätulona maanparannusaineen rinnalla (Carbofex Oy, sähköpostiviesti 26.5.2020). Tällöin on vaikeaa sanoa tapahtuisiko vähennystä ilman yksiköstä maksettua summaa. Suomessa toimii ainakin yksi päästöjen kompensoimispalvelu, jossa pystyy kompensoitioita ostamaan biohiileen pohjautuvalla hiilensidonnalla. Puro.earth palvelun kompensoitiot ovat tosin vain taloudellista lisätukea biohiiltä valmistavalle Carbofexille eikä kata koko hintaa. Tämä tuki auttaa yhtiötä valmistamaan enemmän biohiiltä, ja sitomaan täten lisää hiiltä. (Puro.earth 2020.) Tämän kaltainen toimintamalli ei ole ainakaan täysin lisäyksellistä, mutta voi kenties auttaa biohiiltä kuromaan eroa halvempiin tekniikkoihin.

4.2 Biohiilen kilpailukyky kompensoitiomarkkinoilla

Ollakseen hyödyllinen päästöjen kompensoitotapa, tulisi biohiilellä tehtyjen kompensoitoiden olla kilpailukykyisiä luvussa kaksi esitellyillä päästövähennysyksiköiden markkinoilla. Tällä hetkellä biohiilellä tehdyt kompensoitiot ovat erittäin uusi käsite, joten myös biohiilellä sidotun hiilidioksiditonin hintaa ei ole vielä muodostunut. Puro.earth kompensoitopalvelussa CO₂e-tonnin kompensoiminen biohiilellä maksaa 80 euroa. Tämä on taloudellista lisätukea biohiiltä valmistavalle Carbofexille eikä kata koko hintaa (Puro.earth 2020). Fuss et al. katsauksen (2018) mukaan biohiilellä sidotun CO₂-ekvivalenttitonnin hinta on 30-120 dollaria (noin 25,6-102,3 euroa). Jos biohiiltä tehtäisiin vain kompensoitioita varten, olisi hinta paljon korkeampi.

Kuvassa viisi näkyä hintoja erilaisille khk-päästöjen kompensoitioille. Kuvaan on valittu tässä työssä jo aikaisemmin mainittuja hintoja. Kuvassa näky hintojen ylä- sekä alarajat ja näiden keskiarvot. Vihreällä olevat pylväävät ovat hiilensidontaan perustuvia kompensoitiotapoja.



Kuva 5. Eri kompensatiomenetelmien hintoja ja hintojen vaihteluvälejä. Lähteet ylemmässä vaaka-akselissa (huom. FTEM = Forest Trends Ecosystem Marketplace)

Kuvasta viisi huomaa, että vältettyihin päästöihin perustuvat kompensatiot ovat yleisesti halvempia, kuin hiilensidontaan perustuvat. Kuvassa on kolme eri hintaa biohiilellä, joista ensimmäinen on Fuss et al. (2018) arvio biohiilen hiilensidontan arvoksi, toinen on

Puro.earth palvelun hinta ja kolmas on arvio hinnasta, jos biohiiltä tuotettaisiin vain päästöjen kompensoimista varten. Arvio hinnasta vain kompensatioita varten on saatu jakamalla löydettyjen biohiilen hintojen alin ja ylin hinta sekä näiden keskiarvo biohiilen hiilijalanjäljellä. Hiilijalanjäljeksi valittiin Carbofexin hiilijalanjälki -3,11 kgCO₂-ekvivalenttia, sillä se oli pienin. Kuvasta huomaa, että biohiilen tuottaminen vain kompensatioiksi ei ole kovin kannattavaa edes parhaalla mahdollisella hiilijalanjäljellä. Vaikka hiilidioksiditonin hinta nousisi kompensatiomarkkinoilla merkittävästi, ei se luultavasti kattaisi biohiilen tuotantoa vain kompensatioita varten nykyisillä biohiilen markkinahinnoilla. Halvimmillaan biohiilellä tuotetut kompensatitot voisivat pärjätä kilpailussa tietyissä tapauksissa. Nämä kompensatitot ovat tosin vain lisäarvoa biohiiltä tuottaville yrityksille eikä kata koko summaa.

Kompensaatioprojekteilla on usein myös monia muita hyötyjä kuin vältetyt tai sidotut khk-päästöt. Näitä on esimerkiksi luonnolle saavutetut hyödyt, kuten biodiversiteetin kasvaminen, ja monet sosiaaliset hyödyt, kuten paikallisen talouden parantuminen, joita projekteilla voidaan saavuttaa. YK:n kestävän kehityksen tavoitteet (SDG, sustainable development goals) ovat usein projektien suunnittelun taustalla. Gold Standard luokittelee eri projektien vaikutuksia kestävän kehityksen tavoitteiden mukaan, ja useissa projekteissa vaikutuksia on lukuisia. Gold Standard on myös arvioinut kompensatioidensa todellisia rahallisia arvoja. Näissä esimerkiksi metsityksen päästövähennysyksikön arvoksi tulee 177 dollaria ja biokaasulla tehtyjen päästövähennysten arvoksi jopa 465 dollaria. Todellinen arvo saadaan esimerkiksi uusien terveyshyötyjen, kuten puhtaan ilman, ja sosiaalisten hyötyjen, kuten köyhyyden vähentymisen, arvioidusta rahallisesta arvosta. (Gold Standard 2020, 13.) VCS:llä on taas omia erityisesti biodiversiteettiin ja kestävään kehitykseen vaikuttavia yksiköitä, joita myydään erillään päästövähennysyksiköistä (VERRA 2020). Kuluttajien on myös huomattu arvostavan etenkin kestävään kehitykseen vaikuttavia päästövähennysyksiköitä. Useat kompensatioiden ostajat ovat kyselyn mukaan valmiita maksamaan enemmän rahaa yksiköstä, jos tämä edistää kestävän kehityksen tavoitteita (Parnphumesup & Kerr 2015).

Biohiilellä on lukuisia positiivisia vaikutuksia, jotka pärjäävät vertailussa muihin kompensatiotapoihin ja parantavat biohiilen kilpailukykyä kompensatiomarkkinoilla. Biohiili on

aito hiilinielu eikä pohjaudu vältettyihin päästöihin, toisin kuten esimerkiksi uusiutuva energia. Hiilinielujen tarve lisääntyy koko ajan, kun hiilineutraaliuden saavuttaminen tulee kii-reellisemmäksi. Biohiilellä saavutetut hiilinielut ovat myös vakaampia kuin esimerkiksi selvästi halvemmalla ja suosittumalla metsityksellä. Metsitys on altis esimerkiksi myrskytuhoille tai metsäpaloille, jolloin tulee hiilivuotoja. Biohiilen hiilinielun koon laskenta on myös melko varmaa. Jos tuotetun biohiilen loppusijoituksesta ja tuotannosta pidetään tarkkaa kirjaa, saadaan negatiiviset päästöt selvitettyä varsin tarkasti. Epävarmuuttakin toki löytyy, etenkin vältettyjen ja maaperän päästöjen kohdalla. Biohiilellä voidaan saavuttaa myös sosiaalisia hyötyjä, kuten ruokaturvaa maanparannusominaisuuksien ansiosta, sekä puhtaampaa ilmaa pyrolyysilaitoksen korvatessa vanhempia polttolaitoksia. (Lehmann & Joseph 2009, 320, 370.) Biohiilen valmistaminen ei myöskään tarvitse merkittäviä maankäytön muutoksia, eikä vedenkäyttöä. Sitä voidaan myös valmistaa biomassasta, jota pidetään ennestään jätteenä. Biohiilen tuotannossa saadaan myös uusiutuvaa energiaa, joka on itsessään jo kompensaatiotapa, toisin kuin esimerkiksi DACCS:ssä johon kuluu energiaa. (Smith 2016.)

4.3 Biohiilen potentiaali

Biohiilen maailmanlaajuinen läpimurto loisi merkittävän määrän hiilinieluja. Erään arvion mukaan kestävästi tuotetun biohiilen vuosittainen potentiaali sitoa hiilidioksidipäästöjä on 1,8 gigatonnia hiilidioksidia. Hiilensidonta vastaa reilua kahta prosenttia maailmanlaajuisista khk-päästöistä, jotka vuonna 2019 olivat 55,3 gigatonnia hiilidioksidiekvivalenttia (UNEP 2019). Tämän mittakaavan hiilensidonta on käytännössä teoreettinen, ja ei mahdollistaisi samanaikaista laajaa bioenergian käyttöä, mutta sen suuri koko kertoo biohiilen potentiaalista. (Woolf et al. 2010.) Biohiilestä tehdyn katsauksen mukaan arviot maailmanlaajuisesta potentiaalisesta vuosittaisesta hiilensidonnasta vaihtelee 0,6 gigatonnista jopa 11,9 gigatonniin hiilidioksidia (Fuss et al. 2018). Maailmanlaajuisista khk-päästöistä tämä vastaa noin 1-21 prosenttia. Biohiilellä voitaisiin siis arviosta riippuen sitoa yhdestä prosentista jopa 21 prosenttiin maailman vuosittaisista khk-päästöistä. Maaperän hiilensidontaa, johon biohiilikin voidaan mieltää, pidetäänkin toimivana tapana lisätä hiilinieluja. Suomen Luonnonsuojeluliiton kyselyssä (2019) asiantuntijat pitivät maaperän hiilensidontaa parhaimpana

tapana kompensoida päästöjä verrattaessa (järjestys huonoimmasta parhaaseen) biopolttoaineisiin, jätteenkäsittelyyn, julkisen liikenteen edistämiseen, uusiutuvaan energiaan, metsittämiseen sekä soiden ennallistamiseen. Asiantuntijoiden mukaan maaperän hiilensidonta voisi lisääntyä kompensatorahoituksen tuodessa taloudellista varmuutta.

Biohiili on tällä hetkellä liian kallista ollakseen realistinen tuote vain päästöjen kompensoimiseen. Vaikka jotkin arviot sanovatkin, että hiilidioksiditonnin hinnan pitäisi olla jopa vain 30 dollaria (noin 25,6 euroa) ollakseen riittävä biohiilen hyödyntämiseen kannattavasti, vaikuttaa tämä hieman liian optimistiselta. Luultavasti hinnan pitäisi olla ainakin lähempänä sataa dollaria tai sen yli (Fuss et al. 2018). Biohiilellä on hiilensidonnan lisäksi paljon muitakin hyötyjä, joita esiteltiin tämän työn kolmannessa luvussa. Nämä hyödyt tuovat biohiille arvoa, ja kompensatiotoiminta nähdäänkin lähinnä lisätienestinä. Tällä hetkellä biohiili on kallis tuote muissakin sovelluksissaan. Tämä rajoittaa sen laajaa käyttöönottoa esimerkiksi viljelyssä, jossa sillä voisi olla potentiaalia laajaan hyödyntämiseen ja merkittävään määrään negatiivisia päästöjä. Biohiilen käyttöönottoa viljelyssä edesauttaisi sidotun hiilitonin arvon selkeä nousu ja itse biohiilen valmistamisen kustannusten lasku. Ehdoton kriteeri biohiilen kannattavuudelle on markkinat, jotka ottaisivat huomioon biohiilellä aikaansaadun hiilinielun (Galinato et al. 2011). Tällä hetkellä tämän kaltaiset markkinat ovat käytännössä olemattomat. Biohiilen valmistuksen kustannukset tulevat luultavasti laskemaan tulevaisuudessa tuotantokapasiteetin kasvaessa ja tuotannon tehostuessa, jolloin voidaan valmistaa suurempia määriä biohiiltä pienemmällä yksikköhinnalla. Tuotannon kasvun vaikutus hintaan on kylläkin vielä epävarmaa ja vaatii jatkotutkimusta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

IPCC:n tavoitteen toteutuminen hiilineutraalista maailmasta vuonna 2050 vaatii paljon päästöleikkauksia sekä paljon uusia hiilinielujä. Hinnan asettamista hiilipäästöille pidetään yleisesti tärkeänä keinona hillitä ilmastonmuutosta. Tähän tähtäävät kansainväliset sopimukset, kuin myös yleinen maailmanlaajuinen tahto ja kiinnostus, ovat luoneet maailmanlaajuiset markkinat hiilipäästöille. Hiilidioksiditonin päästämisen, kuin myös sitomisen, hinnan tulisi nousta nykyisestä merkittävästi, jotta päästöjen vähentäminen ja hiilen sitominen olisi yksiselitteisesti aina kannattavampi vaihtoehto. Tällä hetkellä yritykset voivat saavuttaa hiilineutraaliuden helposti ostamalla halvimpia, alle euron maksavia, päästövähennysyksiköitä. IPCC:n arviot hiilidioksiditonin hinnasta vuosisadan loppuun mennessä ylettyvät jopa kymmeneen tuhansiin euroihin (IPCC 2018, 152). Vaikka hinta ei koskaan nousisikaan niin korkealle, voidaan odottaa, että hiilidioksiditonien markkinat, niin vapaaehtoisilla kompensatiomarkkinoilla kuin päästökaupassa, kehittyvät nykyisestä vielä merkittävästi.

Päästöjen kompensoiminen ja hiilensidonta tulee mitä luultavammin yleistymään tulevaisuudessa, hiilineutraaliuden saavuttamisen useimmiten vaatiessa näitä. Kompensaatioiden markkinat ovat tällä hetkellä hieman sekavat, hintojen vaihdellessa laidasta laitaan taustalla olevien toimintojen mukaan. Vaikka kompensatioita sertifioidaan tarkasti ja luotettavasti, voidaan joissain tapauksissa kompensatioita pitää jopa hieman kyseenalaisina. Erityisen kyseenalaisena voidaan pitää kompensatioilla saavutettua hiilineutraaliutta ilman varsinaista päästöjen vähennystä. Kompensatioissa on sertifioinnista huolimatta aina pieni epävarmuus, sillä kompensatioprojektit tapahtuvat usein kaukana ja päästövähennysyksikön ostajan pitää yleensä vain luottaa yksikön myyjän sanaan ja laskelmiin. Omat päästövähennykset taas tapahtuvat aina varmasti, ja siksi oikea hiilineutraalius vaatii tämän. Päästöjen kompensoiminen on yleishyödyllinen ja toimiva tapa saavuttaa hiilineutraalius kumoamaan sellaisten välttämättömien toimintojen päästöt, joita ei pystytä vähentämään. Oikeaoppisen päästöjen kompensoinnin ehtona on, että päästöjä tulee ensin välttää ja vähentää. Vasta sitten voidaan kompensatioita ostamalla, tai hiilinielujä luomalla, saavuttaa hiilineutraalius.

Kaikkia kompensatiokeinoja ei voida välttämättä pitää saman tasoisina. Suurin jakoviiva on erityisesti vältettyjen päästöjen ja hiilensidontan välillä. Hiilensidontaa voidaan pitää

yleisesti tarpeellisena, sekä toimivana kompensautiona. Vaikka hiilinielun laskennassa olisikin epävarmuutta, ovat nettopäästöt aina selkeästi negatiivisia. Vältetyissä päästöissä ei taas sidota ilmasta hiilidioksidia, vaan vältetään päästöjä verrattaessa johonkin, jopa kuvitteelliseen, lähtötilanteeseen. Vältettyjen päästöjen taustalla olevat projektit ovat usein hyödyllisiä ja vaikutukset voivat olla erittäinkin suuria. Päästöjen kompensautioita voitaisiin silti rajata käsittämään vain hiilinielujä. Vältettyjen päästöjen projektit voisivat toimia erillisenä toimintona auttamaan esimerkiksi siirtymisessä puhtaampaan teknologiaan paikoissa, joissa ei ole varaa uusiin investointeihin. Myös kompensautioiden markkinat voisivat selkeytyä kompensautioiden käsittäessä vain hiilinielujä. Hiilitonnien markkinahinnat voisivat myös nousta, sillä yleisesti hiilinieluista syntyneet päästövähennysyksiköt ovat kalliimpia. Kompensautioiden yleinen luotettavuus paranisi myös hiilensidonnan ollessa aina todellista eikä vain vertausta johonkin lähtötasoon.

Biohiilellä savutetut kompensautiot ovat tällä hetkellä liian kalliita verrattuna muihin kompensautiotapoihin, mutta myös varsin uusi käsite. Biohiilen tuotannon hinta voi laskea tulevaisuudessa muun muassa teknologisen kehityksen tai kompensautioiden ja erilaisten valtion tukien tuoman taloudellisen varmuuden myötä paljonkin. Esimerkkinä voidaan pitää aurinkopaneelien hintaa, joka on muuttunut vuosien mittaan varsin kilpailukykyiseksi fossiiliin verrattuna, tippuen noin sadasta dollarista wattia kohden vuodelta 1975 jopa alle dollariin vuoteen 2015 mennessä. Aurinkopaneelien vallankumousta ovat auttaneet paljon erilaiset tuet niiden tutkimukseen ja kehitykseen, kuin myös itse kilpailukykyyn markkinoilla. Paneelien teknologian ja tehokkuuden kehitys on ollut myös suurena syynä hinnan laskuun. Paneelien hintaa on laskenut merkittävästi myös tuotannon yleistymisen, jolloin erilaiset suurttuotannon edut laskevat hintaa. Suurttuotannon edut ovat laskeneet paneelien hintaa etenkin viime vuosina, ja luultavasti myös tulevaisuudessa. (Kavlak et al. 2018.) Laajempi biohiilen tuotanto laskisi myös luultavasti biohiilitonnin keskihintaa, laitosten ja prosessien tullessa yleisemmäksi ja tutummiksi. Biohiili on toki aurinkopaneeleista merkittävästi poikkeavaa teknologiaa, mutta molemmilla on yhteistä tunnistettu potentiaali ilmastonmuutoksen hillinnässä. Entistä laajempi kiinnostus biohiiltä kohtaan voisi myös käynnistää samanlaisen merkittävän hinnan laskun.

Biohiilellä on kestävästi hyödynnettynä paljon mahdollisuuksia tuoda ratkaisuja useampaan kestävyysaasteeseen, ilmastonmuutoksesta maaperän kulumiseen ja ruokaturvan puutteesta jätehuollon kiertotalousratkaisuihin. Biohiili ei ole lääke kaikkiin näihin ongelmiin, vaan materiaalin hyödyllisyys riippuu paljon tilanteesta. Biohiilen soveltaminen ei ole useimmissa tilanteissa tällä hetkellä taloudellisesti kannattavaa, mutta tämä voi muuttua tulevaisuudessa. Biohiilellä ei ole juurikaan negatiivisia puolia, mutta sen sovelluksia on useita ja saavutettuja hyötyjä on aina lukuisia. Tämän vuoksi biohiilellä on merkittävää potentiaalia olla muun muassa erittäin toimiva kompensatiotapa. Kompensationa sillä on vielä selkeänä etuna pysyvyys. Biohiilen potentiaali on merkittävä, mutta se ei ole ihmelääke ilmastonmuutoksen hillintään. Biohiili on yksi ratkaisu monien joukossa, ja sen kestävä hyödyntäminen on varmasti kannattavaa ilmastonmuutosnäkökulmasta, sillä hiilinielut tulevat koko ajan tarpeellisemmiksi.

6 YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi olisi elintärkeää, että hiilineutraalius saavutettaisiin mahdollisimman laajasti. Kasvihuonekaasupäästöjen kompensoiminen ostamalla päästövähennysyksiköitä on toimiva tapa saavuttaa hiilineutraalius, mutta vasta tavoitteellisen khk-päästöjen vähennyksen jälkeen. Päästövähennysyksiköitä sertifioidaan tarkasti, niin kansainvälisten projektien kuin yksityisten sertifiointiohjelmien kautta. Nämä sertifikaatit pitävät huolen muun muassa siitä, että kompensatiot täyttävät niille asetetut kriteerit. Merkittävimpiä sertifikaatteja ovat YK:n alainen CDM, sekä yksityiset Gold Standard ja VCS. Hiilidioksidonniin markkinat koostuvat vapaaehtoisten päästövähennysyksiköiden lisäksi lain velvoittamasta päästökaupasta, jolla on etenkin EU:ssa suuri vaikutusvalta hiilitonniin hintaan.

Myytävien päästövähennysyksiköiden hinnoissa erot ovat valtavia eri kompensatiotapojen välillä. Erot kalliimpien ja halvimpien päästövähennysyksiköiden välillä ovat jopa yli sata euroa, halvimpien ollessa joitakin kymmeniä senttejä, ja kalliimpien yli sata euroa sidottua hiilidioksidonnia kohden. Etenkin CER-vähennykset maksavat erittäin vähän, ja vetävät päästövähennysyksiköiden keskivertohintaa alaspäin. Kompensatioiden taustalla olevat projektit voidaan jaotella vältettyihin päästöihin perustuviin kompensatioihin, kuten uusiutuvan energian lisäämiseen, sekä hiilensidontaan perustuviin, kuten metsitykseen. Hiilinieluihin perustuvat kompensatiot ovat yleisesti kalliimpia kuin vältettyihin päästöihin perustuvat. Uudempiin teknologioihin, kuten CCS:n ja biohiileen, perustuva hiilensidonta on tällä hetkellä harvinaista ja erittäin kallista.

Biohiili on biomassasta vähähappisella palamisprosessilla, pyrolyysillä, valmistettavaa materiaalia, jolla on useita sovelluksia. Merkittävää hyötyä biohiilestä on etenkin maanparanukseen, jolloin se luo useissa tapauksissa positiivisia vaikutuksia maaperään sekä siinä kasvavaan satoon. Pyrolyysiprosessin myötä osa biomassassa olevasta hiilestä muuttuu vakaaseen, hiljaa hajoavaan, muotoon. Maahan laitettaessa tämä hiili siirtyy pois lyhyestä, biomassan ja ilmakehän, hiilen kierrosta. Biohiili luo pysyviä negatiivisia päästöjä ja sillä on selkeitä mahdollisuuksia hiilensidonnassa, ja tämän myötä khk-päästöjen kompensoinnissa. Biohiilestä saavutetut kompensatiot ovat tällä hetkellä lisäarvoa biohiilestä saatavien mui-

den sovellusten luoman arvon rinnalla. Biohiilen hinta on tosin useissa tapauksissa liian kallis muihinkin sovelluksiinsa. Jotta biohiiltä voitaisiin hyödyntää koko potentiaaliinsa, tarvittaisiin sekä lisätutkimusta, että biohiilen valmistuksen kustannusten laskua ja hiilensidonnan arvon nousua.

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin mahdollisuuksia kompensoida kasvihuonekaasupäästöjä biohiilellä. Työssä tutkittiin aiheesta löytynyttä kirjallisuutta. Kompensoiminen biohiilellä todettiin mahdolliseksi, mutta toiminnan hinta nykyhetkellä turhan kalliiksi ollakseen järkevää. Biohiilellä saavutettujen kompensatioiden hinnat huomattiin olevan alimmillaankin turhan kalliita ollakseen kilpailukykyisiä. Biohiilen todettiin pääosin täyttävän kompensatioille asetettavat kriteerit, joskin biohiilikompensatioiden lisäyksellisyys on hieman epävarmaa. Biohiilen valmistaminen vain päästöjen kompensoimista varten huomattiin olevan erittäin kallista, sekä epärealistista. Biohiilen merkittävimpiä vahvuuksia verrattaessa muihin kompensatiotapoihin ovat mahdollisuudet luoda todellisia ja pysyviä hiilinieluja ilman merkittävää tarvetta maankäytön muutoksille saaden samalla energiaa, sekä hyötykäyttöä muuten turhalle biomassalle.

Epävarmuutta työssä aiheuttaa laajemman kirjallisuuden puute muun muassa kompensatioiden sekä biohiilen hinnoista ja markkinoista. Etenkin biohiilen osalta hinnat ovat myös epävarmoja markkinoiden pienen koon vuoksi. Löytynyttä tietoa pyrittiin tosin hyödyntämään sekä arvioimaan tarkasti. Kompensatioiden ollessa vielä melko tuore käytäntö, luojonkin verran epäselvyyttä myös etenkin suomenkielelle vakiintumaton termistö. Kompensatioiden termeissä on myös paljon markkinanimiä. Termistö pyrittiin tunnistamaan varmasti, ja käyttämään työssä vain yleisiä ja selkeitä termejä kuvaamaan kompensatioita mahdollisimman tarkasti. Jatkotutkimusta aiheen osalta on mahdollista tehdä monesta eri näkökulmasta. Biohiilen laajemman soveltamisen mahdollistamiseksi olisi hyödyllistä selvittää esimerkiksi mistä komponenteista biohiilen hinta rakentuu, ja syitä materiaalin korkeaan hintaan.

LÄHTEET

Ahmed, M, B., Zhou, J, L., Ngo, H., Guo, W. 2016. Insight into biochar properties and its cost analysis. *Biomass and Bioenergy*, 2016: 84. 76-86. ISSN 0961-9534.

Campbell, R., Anderson, N., Daugaard, D., Naughton, H. 2018. Financial viability of biofuel and biochar production from forest biomass in the face of market price volatility and uncertainty. *Applied Energy*, 2018: 230. 330-343. ISSN 0306-2619.

Carbofex. 2020. sähköpostiviestikeskustelu. Kaksi sähköpostiviestiä 26.5 sekä 26.6. Vastaaottaja Ville Varpula.

CO2esto. 2020. Yleisimmin kysytyjä kysymyksiä. [verkkosivu]. [viitattu 25.6.2020]. Saatavissa: <https://co2esto.com/yleisimmin-kysytyja-kysymyksia>

Compensate. 2020. Usein kysyttyä. [verkkosivu]. [viitattu 25.6.2020]. Saatavissa: <https://compensate.com/fi/faq>

Fair Climate Fund. 2019. From 30 eurocents to 25 euros: the price of a tonne of CO₂. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 26.5.2020]. Saatavissa: <https://www.fairclimatefund.nl/en/news/from-30-eurocents-to-25-euros-the-price-of-a-tonne-of-co>

Forest Trends' Ecosystem Marketplace. 2019. Financing Emissions Reductions for the Future - State of the Voluntary Carbon Markets 2019. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 26.5.2020]. Saatavissa: <https://app.hubspot.com/documents/3298623/view/63001900?accessId=eb4b1a>

Fuss, S., Lamb, W., Callaghan, M., Hillaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G., Rogelj, J., Smith, P., Vincente, J., Wilcox, J., Dominguz, M., Minx, J. 2018. Negative emissions Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental research letters*, 2018: 13. 063002. ISSN 1748-9326.

Galinato, S., Granastein, D. Yoder, J. 2011. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Energy Policy*, 2011: 39. 6344-6350. ISSN 0301-4215.

Gold Standard. 2016. CARBON PRICING: What is a carbon credit worth?. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.6.2020]. Saatavissa: <https://www.goldstandard.org/blog-item/carbon-pricing-what-carbon-credit-worth>

Gold Standard. 2020. Gold Standard Market report 2019. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 11.8.2020]. Saatavissa: https://www.goldstandard.org/sites/default/files/market_report_2019_hd.pdf

Hewlet, O. 2017. Ensuring Renewable Electricity Market Instruments Contribute to the Global Low-Carbon Transition and Sustainable Development Goals. Gold Standard. [verkkojulkaisu]. [viitattu 25.6.2020]. Saatavissa: https://www.goldstandard.org/sites/default/files/documents/g_s_recs_position_paper.pdf

Hiilipörssi. 2020. Hiilensidonnain laskutapa. [verkkosivu]. [viitattu 16.6.2020]. Saatavissa: <https://hiiliporssi.fi/info/laskenta/>

Ilmasto-opas.fi. 2020. Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. [verkkosivu]. [viitattu 21.5.2020]. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>

IPCC. 2018. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* [viitattu 21.5.2020]. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

Kavлак, G., McNerney, J., Trancik, J. 2018. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy*, 2018: 123. 700-710. ISSN 0301-4215.

Kuitunen, A., Ollikainen, M. 2014. OSA 5: VAPAAEHTOISET PÄÄSTÖJEN KOMPENSAATIOMARKKINAT – HAHMOTELMIA SUOMALAISIKSI LISÄTOIMIKSI. Ilmastopaneeli: “Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa”. Toim. Jyri Seppälä. [verkkojulkaisu]. [viitattu 4.6.2020]. Saatavissa: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Hiili-neutraalisuus_taustraraportit_2014.pdf

Lehmann, J., Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management, science and technology. First edition. London: Earthscan. 450 s. ISBN 978-1-84407-658-1

Maailman Pankki (World Bank). 2019. State and Trends of Carbon Pricing 2019. Washington, DC: World Bank. © World Bank. ISBN 978-1-4648-1435-8. Saatavissa: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31755>.

Maailman Pankki (World Bank). 2020. State and Trends of Carbon Pricing 2020. Washington, DC: World Bank. © World Bank. ISBN 978-1-4648-1586-7. Saatavissa: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33809>.

Parnphumeesup, P., Kerr, S. 2015. Willingness to Pay for Gold Standard Carbon Credits. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2015:10. 412-417. DOI: 10.1080/15567249.2010.551251.

Poussa, L. 2019. Päästökauppa remontissa. Sitra. [verkkojulkaisu]. [viitattu 7.7.2020]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/artikkelit/paastokauppa-remontissa/>

Puro.earth. 2020. Biochar. [yrityksen www-sivustolla]. [viitattu: 4.6.2020]. Saatavissa: <https://puro.earth/biochar/>.

Quandl. 2020. ECX EUA Futures, Continuous Contract #1 (C1) (Front Month). [tietokanta]. [viitattu: 7.7.2020]. Saatavissa: https://www.quandl.com/data/CHRIS/ICE_C1-ECX-EUA-Futures-Continuous-Contract-1-C1-Front-Month

Ramseur, J. 2009. Voluntary Carbon Offsets: Overview and Assessment. Congressional Research Service. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 10.6.2020]. Saatavissa: <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL34241.pdf>.

Salo, E. 2018. CURRENT STATE AND FUTURE PERSPECTIVES OF BIOCHAR APPLICATIONS IN FINLAND. Master's thesis. Jyväskylä University School of Business and Economics. Corporate Environmental Management. 53s. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/56920/URN%3aNBN%3afi%3ajyu-201801261337.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Smith, P. 2016. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 2016: 22. 1315-1324. ISSN 1354-1013.

UNEP (2019). Emissions Gap Report 2019. Executive summary. United Nations Environment Programme, Nairobi. [verkkojulkaisu]. [viitattu 2.10.2020]. Saatavissa: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>

USBI. 2018. Survey and Analysis of the US Biochar Industry Preliminary Report Draft; August 16, 2018. [viitattu 30.7.2020]. Saatavissa: https://biochar-us.org/sites/default/files/news-files/Preliminary%20Biochar%20Industry%20Report%2008162018_0.pdf

VERRA. 2020. VCS-registry. [www-sivusto]. [viitattu 11.8.2020]. Saatavissa: <https://registry.verra.org/>

Woolf, D., Amonette, J., Street-Perrott, F. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 2010: 1. 1-9. ISSN 2041-1723.