

Hiiliviljelyn ympäristövaikutukset

Kirjallisuuskatsaus

Veera Naukkarinen, BSAG 2022



HIILIVILJELY OSANA TUOTTAVAA MAATALOUTTA

Hiilen (C) sitominen maatalousmaahan on yksi tärkeimmistä tavoista poistaa hiilidioksidia ilmakehästä ja varastoida sitä maaekosysteemeihin (Paustian ym. 2019). Kivennäismaiden hiilipitoisuuden lisäämisessä avainasemassa ovat viljelytoimenpiteet, kuten viljelykierron parantaminen, alus- ja kerääjäkasvien viljely, monivuotisten nurmi- ja palkokasvien viljely, agrometsätalous, kasvintähteiden jättäminen maahan, maan muokkaamatta jättäminen tai kevennetty muokkaus, eloperäisten lannoitteiden käyttö, biohiilen ja muiden maanparannusaineiden käyttö sekä laidunnusikäntöjen kehittäminen (Paustian ym. 2019, Almaraz ym. 2021). Tässä kirjallisuuskatsauksessa hiiliviljelyllä tarkoitetaan uudistavan maatalouden tavoitteiden mukaista kokonaisvaltaista lähestymistapaa, jossa vahvistetaan ekosysteemiä ja kasvatetaan maaperän hiilivarastoa ruoantuotannon ohessa (Hagelberg et al. 2020).

Monimuotoisuus on avainasemassa

Monipuolinen viljelykierto, jossa on mukana monivuotisia kasveja sekä alus- ja kerääjäkasveja, on tehokas keino lisätä yhteytystä ja hyödyntää hiilensidontaan ja maan kasvukunnon parantamiseen muutoin tuottamattomia ajanjaksoja (King ja Blesh 2018). Kasvipeitteisen ajan lisääminen ja kasvivalikoiman monipuolistaminen on tärkeää maaperän sienille (Hannula ja Morrien 2022), joilla tiedetään olevan tärkeä rooli hiilen kiertossa (Hannula ja Morrien 2022, Yang ym. 2022). Monimuotoiset ja juuristoiltaan monipuoliset kasviyhteisöt ruokkivat sekä maaperän eliöstön monimuotoisuutta että sienten biomassaa. Monimuotoinen maaperän eliöstö sitoo hiiltä, lisää maan eloperäisen aineksen määrää ja kasvattaa myös satotasoa (Zhang ym. 2021, Hannula ja Morrien 2022).

Pääperiaatteena maaperän hiilen lisäämisessä on lisätä monivuotisten kasvien viljelyä ja pellon jatkuvaa kasvipeitteisyyttä (King ja Blesh 2018). Ruoantuotantoa varten tarvitaan kuitenkin myös

yksivuotisia viljelykasveja. Yksi mahdollinen tapa kasvattaa maaperän hiilivarastoa on valita ja kehittää kasvilajikkeita, jotka lisäävät maahan päätyvää hiilisyötettä joko suuremman juuribiomassan tai juurten laajemman pinta-alan ansiosta. Vaikka juuristo on avainasemassa maaperän eloperäisen hiilen varastoinnissa, ei suurempi juuristo tarkoita automaattisesti pitkäaikaisen hiilivaraston kasvua (Jansson ym. 2021). Esimerkiksi Michiganissa Yhdysvalloissa toteutetussa yhdeksänvuotisessa kenttäkokeessa huomattiin, että maanparannuskasvina käytetty lännenhirssi (*Panicum virgatum* L.) kerrytti huomattavasti vähemmän eloperäistä hiiltä maaperään kuin samalla alueella luontaisesti kehittynyt kasviyhteisö, vaikka lännenhirssin juuristo oli merkittävästi suurempi (Kravchenko ym. 2019). Näin ollen ei ole itsestään selvää, että kasvit, joilla on suurempi juuribiomassa, edistäisivät hiilen varastoitumista tehokkaammin (Jansson ym. 2021). Hiidensidonnasta näkökulmasta on suositeltavaa kylvää syväjuurisia kasveja, mutta myös valita samalle pellolle juuristojen syvyyden ja rakenteen näkökulmasta mahdollisimman monipuolinen kasvivalikoima (Hannula ja Morrien 2022).

Saksan Jenassa toteutettu pitkäaikainen nurmikoel on osoittanut, että kasvilajien runsaus kasvattaa maaperän eloperäisen hiilen määrää lisäämällä juuriston biomassaa, mikrobien kasvua ja mikrobibiomassaan sitoutuneen hiilen määrää (Prommer ym. 2019). Kasvilajiston monimuotoisuuden positiivinen vaikutus hiilen sitoutumiseen todettiin myös Yhdysvaltojen Minnesotassa toteutetussa 22-vuotisessa nurmikokeessa, jossa nurmen tuotanto aloitettiin uudelleen hylätyllä viljelysmaalla (Yang ym. 2019). McDanielin ym. (2013) meta-analyysissä osoitettiin viljelykierron monipuolistamisen tärkeys hiilensidonnalle. Hiilen todettiin lisääntyneen 3,6 %, kun monokulttuuriviljelyyn lisättiin yksi tai useampi viljelykasvi, ja 8,5 % kun viljelykierrossa oli mukana alus- ja kerääjäkasvi. Viljelykasvien monimuotoisuus toimii siis hiiliviljelyn keinona.

HIILIVILJELYN HYÖTY LUONNON MONIMUOTOISUUDELLE RIIPPUU VILJELYKIERROSTA

Hiiliviljely ja luonnon monimuotoisuus kulkevat käsi kädessä

Useiden tutkimusten yhteenvedoissa on todettu, että monilla hiiliviljelymenetelmillä (taulukko 1) on joko positiivinen (Liu ym. 2016, Udawatta ym. 2019, Kim ym. 2020, Puissant ym. 2021, Hannula ja Morrien 2022) tai neutraali (Torralba ym. 2016, Puissant ym. 2021) vaikutus maaperän mikrobien monimuotoisuuteen. Menetelmien vaikutuksista maanpäällisen kasvi- ja eläinlajiston monimuotoisuuteen löytyy vähemmän tutkimustietoa. Tästä poikkeuksena on agrometsätalous, jolla on todistetusti lukuisia positiivisia vaikutuksia monimuotoisuuteen kokonaisuutena (Torralba ym. 2016).

Kasvien monimuotoisuus on hyödyksi luonnon monimuotoisuudelle. Alus- ja kerääjäkasvien, varsinkin runsaslajisten alus- ja kerääjäkasviseosten lisääminen viljelykiertoon voi edistää maatalouden ekosysteemin toiminnallista monimuotoisuutta (Finney ja Kaye 2016).

Maan muokkaamatta jättämisen ja kevennetyn muokkauksen monimuotoisuusvaikutuksista on saatu vaihtelevia tuloksia. Esimerkiksi saksalaisen aineiston tarkastelussa huomattiin, että maaperän eliöstö reagoi eri tavoin maan muokkaukseen. Lierolajien monimuotoisuus lisääntyi muokkausta vähennettäessä, mutta hyppyhäntäisten ja punkkien monimuotoisuus sen sijaan pieneni siirryttäessä kevennettyyn muokkaukseen (van Capelle ym. 2012).

Hiiliviljelymenetelmillä voi olla päinvastaisia vaikutuksia eri eliöryhmiin. Esimerkiksi Morris (2021) raportoi, että uudistava laidunnus (uudistavalla laidunnuksella tarkoitettu tilannetajuista kierto-laidunnusta, johon kuuluu korkea eläintiheys, lyhyet laidunjaksot ja laidunten pitkät lepojak-sot) lisää maan mikrobitoimintaa ja johtaa usein rikkaampaan maaperäeliöstöön. Tiedetyt kasvi- ja eläinyhteisöt reagoivat kuitenkin epä johdonmu-kaisesti: niiden monimuotoisuus voi lisääntyä, vähentyä tai pysyä ennallaan. Näin ollen uudista-va laidunnus ei ole kaikissa tapauksissa hyödyk-si luonnon monimuotoisuudelle. Menetelmää

voidaan kehittää niin, että tuloksena on laajem-malle eliöstön kirjolle sopiva, heterogeenisem-pi elinympäristö. Maisematasolla tämä voidaan saavuttaa suunnittelemalla vaihtelevasti inten-siivisesti laidunnettuja ja kevyesti laidunnettuja lohkoja. Eläintiheyttä sekä laidunnuksen kestoa ja ajoitusta voidaan muokata niin, että saavute-taan halutunlainen elinympäristöjen kirjo (Morris 2021).

Agrometsätaloudessa ruoantuotanto ja luonnon monimuotoisuuden säilyttäminen sovitetaan usein onnistuneesti yhteen (Rolo ym. 2020). Lu-kuisissa tutkimuksissa peltometsäviljelyllä ja met-sälaidunnuksella on todettu olevan positiivisia vaikutuksia kasvien, eläinten ja maaperän mikro-bien monimuotoisuuteen (Tsonkova ym. 2012, Varah ym. 2013, Moreno ym. 2015, Plieninger ym. 2015, Gibbs ym. 2016, Oldén ym. 2016, Tor-ralba ym. 2016, Udawatta ym. 2019). Agromet-sätalous voi edistää luonnon monimuotoisuutta monin tavoin, kuten muodostamalla elinympä-ristöjä, luomalla ekologisista käytäviä elinympäris-töjen välille ja tarjoamalla vaihtoehtoisen tavan tukea luonnon monimuotoisuutta maatalouden keinoin (Udawatta ym. 2019).

Maatilatasolla jokainen tilalla esiintyvä erilai-nen elinympäristö edistää maatilan luonnon monimuotoisuutta. Näin ollen luonnon moni-muotoisuus riippuu peltoekosysteemien ohella myös tilan muista elinympäristöistä, kuten reu-na-alueista (Moreno ym. 2015). Pellonpientareet tuottavat ekosysteemipalveluita tarjoamalla eli-nympäristön hyödyllisille hyönteisille, jotka huo-lehtivat pölytyksestä ja vastaavat luontaisesta tuholaisten säätelystä (Cole ym. 2020). Varsinkin intensiivisesti viljeltyillä pelloilla kukkivat pellon-pientareet voivat olla avuksi uhanalaisille kima-laislajeille (Marja ym. 2018). Myös peltoja reu-nustavien pensasaitojen on todettu hyödyttävän sekä luonnon monimuotoisuutta (Heath ym. 2017, Vanneste ym. 2020) että hiilen kertymistä maaperään (Biffi ym. 2022). Luonnon monimuo-toisuutta lisäävät viljelytoimet ja pieni peltokoko voivat lisätä luontaisten vihollisten määrää, mikä vähentää riippuvuutta kemiallisesta kasvinsuoje-lusta (Redlich ym. 2021).

Taulukko 1. Hiiliviljelymenetelmien vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen, veden laatuun ja typpioksiduulin eli ilokaasun (N₂O) päästöihin. Solussa näkyvät numerot viittaavat alapuolella listattuihin tutkimuksiin.

Toimenpide	Monimuotoisuus			Veden laatu			N ₂ O		
Ei muokkausta/ minimimuokkaus	+	0	–	+		–			–
	3	12	3	1		15			8, 17, 18
Kateviljely/ kasvintähteiden säilyttäminen	+			+		–			–
	14			11		1			7
Kerääjäkasvi / viherlannoitus	+	0		+	0		+		
	12, 13, 14, 19	19		1, 8, 9, 11, 15, 19	19		17, 19		
Agrometsätalous	+			+			+	0	
	4, 5, 6			6, 8			17, 19	8, 10	
Eloperäinen lannoite/ maanparannusaine	+			+			+		–
	2, 12, 14			1			8		21
Biohiili				+			+		
				8			8, 17, 18		
Monivuotiset nurmet	+			+		–	+		
	19			19		19	19		
Tilannetajuinen kiertolaidunnus	+	0	–				+		
	20	20, 22	20				23		

LÄHTEET

- | | | |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1. Olin ym. 2015 | 9. Valkama ym. 2015 | 17. Guenet ym. 2021 |
| 2. Hannula ja Morriën 2022 | 10. Kim ym. 2016 | 18. Zhang ym. 2020 |
| 3. van Capelle ym. 2012 | 11. Quemada ym. 2013 | 19. Hyvönen ym. 2020 |
| 4. Udawatta ym. 2019 | 12. Puissant ym. 2021 | 20. Morris 2021 |
| 5. Torralba ym. 2016 | 13. Kim ym. 2020 | 21. Zhou ym. 2017 |
| 6. Tsonkova ym. 2012 | 14. Liu ym. 2016 | 22. McDonald ym. 2019 |
| 7. Zhao ym. 2020 | 15. Abdalla ym. 2019 | 23. Gomez-Casanovas ym. 2021 |
| 8. Almaraz ym. 2021 | 16. Huang ym. 2018 | |

PELLON TOIMIVA VESITALOUS HIILIVILJELYN PERUSTANA

Jotta maaperään saadaan varastoitumaan enemmän hiiltä, täytyy kasvien kasvaa tehokkaasti. Se puolestaan vaatii kasvien kasvulle suotuisat kosteusolosuhteet. Sekä liian kuivat että liian märät olosuhteet rajoittavat kasvien kasvua, mikä vaikuttaa suoraan maahan päätyvän hiilisyötteen määrään (Heinonsalo, toim., 2020). Kivennäismailla maaperän hyvä vedenläpäisevyys on hiiliviljelyn edellytys. Rankkasateiden ja kuivuuden on ennustettu yleistyvän ilmastomuutoksen myötä, ja hallitulla, riittävän matalalla ojituksella voidaan edesauttaa viljelyn sopeutumista muuttuvaan ilmastoon (Castellano ym. 2019).

Kun pellon kuivatus on kunnossa, voidaan hiiliviljelyllä vaikuttaa positiivisesti maaperän vesitalouden hallintaan. Monivuotisten nurmien, alus- ja kerääjäkasvien (Hyvönen ym. 2020) tai agrometsätalouden (Tsonkova ym. 2012, Torralba ym. 2016) avulla saavutettava lisääntynyt kasvipeitteisyys parantaa eroosion hallintaa ja maan vedenpidätyskykyä. Maan eloperäisen aineksen pitoisuuden lisääntyminen parantaa maan murekkestävyyttä, mikä puolestaan vähentää veden aiheuttamaa eroosiota. Eloperäisen aineksen vaikutusta maan vedenpidätyskapasiteettiin kuitenkin rajoittaa se, että lisääntynyt eloperäinen aines kertyy usein ensisijaisesti pintamaahan eikä jakaudu kauttaaltaan maaperän syvempiin kerroksiin (Murphy 2015).

HIILIVILJELYN VAIKUTUKSET VEDEN LAATUUN RIIPPUVAT MAAPERÄN JA KASVIEN KYVYSTÄ PIDÄTTÄÄ JA KÄYTTÄÄ RAVINTEITA

Hiiliviljely voi auttaa vähentämään typen huuhtoutumista

Hiiliviljelyllä on kokonaispositiivinen vaikutus veden laatuun. Hiiliviljelymenetelmien on useissa tutkimuksissa osoitettu vähentävän typen (N) huuhtoutumista (Quemada ym. 2013, Olin ym. 2015, Abdalla ym. 2019, Hyvönen ym. 2020, Almaraz ym. 2021). Joidenkin menetelmien osalta muutamassa tutkimuksessa huomattiin myös tuloksia, joiden mukaan typen huuhtoutuminen on lisääntynyt kasvintähteiden maahan jättämisen (Olin ym. 2015) ja maan muokkaamatta jättämisen takia (Abdalla ym. 2019).

Almarazin ym. (2021) meta-analyysin mukaan hiiliviljelymenetelmien nettovaikutus typen kiertoon oli positiivinen. Vaikutukset ovat erittäin vaihtelevia, ja riippuvat esimerkiksi viljelykasvista. Myös alueellinen vaihtelu on suurta. Maaperän hiilivaraston kasvattaminen vaatii riittävästi

saatavilla olevaa typpeä. Hiiliviljelymenetelmien käyttöönotto voi vähentää typen hävikkiä ja pienentää typpilannoitteiden käytön tarvetta. Joissakin tapauksissa voidaan tarvita lisää typpisyötettä ylläpitämään hiilensidontaa, minkä seurauksena typen hävikki saattaa myös lisääntyä. Erilaisten hiiliviljelymenetelmien, kuten agrometsätalouden, biohiilen, orgaanisten maanparannusaineiden, alus- ja kerääjäkasvien ja maan muokkaamatta jättämisen yhdistäminen voi vähentää typen huuhtoutumista ja typpipäästöjä niin, että satotaso pysyy samana (Almaraz ym. 2021).

Suurin osa nitraatin (NO_3^-) huuhtoutumisesta taaphtuu silloin, kun pellolla ei kasva mitään. Alus- ja kerääjäkasvien hyödyntäminen satokasvien välissä edistää ylimääräisen typen sitoutumista ja vähentää sen huuhtoutumista (Almaraz ym. 2021). Varsinkin heinäkashin käyttäminen kerääjäkasvina näyttää vähentävän typen huuhtoutumista (Quemada ym. 2013, Valkama ym. 2015).

Liukoinen fosfori on riski vesistöille

Vaikka pellon pitkäaikainen kasvipeitteisyys vähentää eroosiota ja kiintoainekseen sitoutuneen fosforin (P) aiheuttamaa vesistökuormitusta, se myös lisää liukoisen fosforin määrää vesistöissä. Maan pitkäaikainen muokkaamattomuus ja kasvipeitteisyys lisäävät fosforin kerrostumista pintamaahan, mikä taas lisää liukoisen fosforin

huuhtoutumisen riskiä (Hyvönen ym. 2020). Lisääntyneestä liukoisen fosforin kuormituksesta huolimatta Hyvösen ym. (2020) tutkimuksessa kasvipeitteiset pellot aiheuttivat huomattavasti vähäisemmän kokonaisriskin vesistöille kuin edellisenä syksynä kynnetyt kevätiljapellot. Lisää tutkimusta liukoisen fosforin aiheuttamasta riskistä erilaisissa viljelysysteemeissä ja viljelykierroissa kuitenkin tarvitaan.

HIILIDIOKSIDIN OHELLA HUOMIOITAVA MUUTKIN KASVIHUONEKAASUT

Typpioksiduulipäästöjen riski riippuu viljelymenetelmästä

Maatalousmaa on merkittävä typpioksiduulin eli ilokaasun (N_2O) lähde. N_2O on voimakas kasvihuonekaasu. Hiiliviljelyn mahdollisuudet hillitä ilmastomuutosta saatetaan yliarvioida, jos N_2O -päästöjä ei oteta huomioon. Jotkut menetelmät, kuten biohiilen lisääminen maaperään, voivat vähentää N_2O -päästöjä (Zhang ym. 2020, Almaraz ym. 2021, Guenet ym. 2021). Maan muokkaamattomuus tai kevennetty muokkaus (Huang ym. 2018, Almaraz ym. 2021, Guenet ym. 2021), eloperäinen lannoitus (Charles ym. 2017, Zhou ym. 2017), ja kasvintähteiden jättäminen maahan ovat puolestaan niitä hiiliviljelymenetelmiä, joiden kohdalla tulisi huomioida mahdollisesti lisääntyvä N_2O -päästöjen riski (Zhao ym. 2020).

Kun maata ei muokata, maaperään kertyy enemmän kosteutta ja maaperän ilmanvaihto on vähäisempää. Tämä lisää hapettomissa olosuhteissa toimivien maamikrobien aktiivisuutta, mikä puolestaan lisää N_2O -päästöjä (Huang ym. 2018). Maan muokkaamattomuuden on osoitettu lisäävän N_2O -päästöjä silloin, kun maaperän ilmanvaihto ja vedenläpäisevyys on heikkoa. Ilmavammassa maassa vaikutus on pienempi (Rochette 2008). Mei ym. (2018) meta-analyysin mukaan maan muokkaamatta jättäminen tai

vähennetty muokkaus aiheuttaa tavanomaista muokkausta merkitsevästi enemmän N_2O -päästöjä trooppisessa ja lämpimänlauhkeassa ilmastossa, mutta ei viileänlauhkeassa ilmastossa.

Eloperäisten lannoitteiden käyttö voi lisätä N_2O -päästöjä. Zhou ym. (2017) totesivat, että mineraaliseen typpilannoitukseen verrattuna raa-
kalannan levitys lisäsi N_2O -päästöjä merkitsevästi 1,83 prosentilla, kun määrä ilmaistiin N_2O -päästökertoimella. Esikäsittelyn lannan levittäminen ei kuitenkaan aiheuttanut merkitsevästi suurempia päästöjä kuin mineraalinen typpilannoitus. Charles ym. (2017) osoittivat, että eloperäisten lannoitteiden käyttö yhdessä mineraalilannoitteiden kanssa tuotti enemmän päästöjä, kun taas Xia ym. (2020) eivät todenneet eroa N_2O -nettopäästöissä lannan, maahan jätettyjen kasvintähteiden ja mineraalilannoitteiden käytön välillä. Lannan sijoittaminen peltoon, joka on vahvasti suositeltu käytäntö ammoniakkin (NH_3) haihtumisen vähentämiseksi maaperästä, näyttää lisäävän N_2O -päästöjä (Zhou ym. 2017). Eloperäisten lannoitteiden käytön vaikutukset ovat myös paikka-kohtaisia ja riippuvaisia esimerkiksi maalajista ja pellon kuivatustilanteesta (Charles ym. 2017, Zhou ym. 2017). Tehokkaita käytäntöjä N_2O -päästöjen vähentämiseksi ovat muun muassa lannan käyttö satokasvien tarpeiden mukaan, alus- ja kerääjäkasvien käyttö sekä laidunnuksen intensiteetin säätely (Montes ym. 2013).

Kivennäismaiden metaanivuot vähäisiä

Metaania (CH₄) syntyy maaperässä hapettomissa olosuhteissa. Kosteikat ja riisipellot ovat merkittäviä metaanipäästöjen lähteitä (Dutaur ja Verchot 2007). Ojituksella voidaan parantaa maaperän ilmanvaihtoa, mikä vähentää metaanipäästöjä (Castellano ym. 2019). Isossa-Britanniassa kerätyn laajan aineiston perusteella huomattiin, että kivennäismaat olivat metaanin suhteen joko pieniä päästölähteitä tai pieniä nieluja. Metaanipäästöt olivat vähäisiä eloperäisten maiden tuottamiin päästöihin verrattuina (Levy ym. 2012). Boreaalissa ilmastossa tehdyssä

tutkimuksessa huomattiin, että monivuotinen nurmi toimi metaanin nieluna kivennäismaalla, jossa oli toimiva kuivatus (Lind ym. 2020).

Tilannetajuisen kiertolaidunnuksen (Adaptive multi-paddock grazing, AMP) on todettu vähentävän maaperän metaanipäästöjä (Shrestha ym. 2020, Gomez-Casanovas ym. 2021). Siinä märehitijöiden pötsikäymisestä johtuvat päästöt voivat kuitenkin kasvaa, erityisesti jos laidunnuksen intensiteetti on suuri. Ei tiedetä, voiko laidunuskäytännöstä johtuva maaperän metaanipäästöjen väheneminen osittain kompensoida märehitijöiden tuottamia suurempia päästöjä (Gomez-Casanovas ym. 2021).

HIILENSIDONNAN PYSYVYYS KAIPAA LISÄÄ TUTKIMUSTA

Maaperän pitkäaikaisen hiilivaraston synty on monimutkainen prosessi

Kysymys maaperään sitoutuneen hiilen pysyvyydestä on usein esillä hiilikompensaatioihin liittyvissä keskusteluissa (Dynarski ym. 2020). Maaperä on monimutkainen ympäristö, jossa yhdisteet liikkuvat ja muuttavat muotoaan jatkuvasti, vaikuttaen samalla hiilen pitkäikäisyyteen. Yleisesti hyväksytty teoria on, että mikrobien ja erityisesti sienten kuollut biomassa edistää kaikkein pysyvimmän eloperäisen hiilen kertymistä maaperään (Liang ym. 2019, Hannula ja Morrien 2022). Mekanismi, jolla sienet säätelevät maaperän hiilen stabiloitumista, on toistaiseksi tuntematon (Hannula ja Morrien 2022). On mahdollista, että hiiltä kertyy pysyvästi syvempiin maakerroksiin, mutta syvempiä kerroksia on tutkittu harvoin (Dynarski ym. 2020).

Maaperän hiilivarasto ei kasva rajattomasti. Kun hiiltä sitova viljelymenetelmä otetaan käyttöön, hiilivarasto kasvaa. Ajan mittaan kasvu kuitenkin hidastuu, kunnes systeemi saavuttaa tasapainotilan. Jotta hiili pysyy maaperässä, täytyy hiiliviljelytoimenpiteen käyttöä jatkaa, muutoin pelto- maahan varastoitunut hiili vapautuu uudelleen ilmakehään (Thamo ja Panell 2016).

Hiilen saturaation ajankohta vaihtelee suuresti. Saturaation tapahtuminen on paikkakohtaista, ja riippuu myös viljelykäytännöistä. Saturaation saavuttamiseen voi mennä 10 tai jopa 100 vuotta, vaihtelu on huomattavan suurta (Ruseva ym. 2020). Lisäksi eloperäisen aineksen lisäys maaperään voi priming-ilmionä tunnetun prosessin kautta kiihdyttää maaperän vanhan, ja teoreettisesti pysyvän hiilen hajoamista (Dynarski ym. 2020, Liu ym. 2020). Positiivinen vaikutus hiilen kiertoon esimerkiksi alus- ja kerääjäkasvien sekä monivuotisten satokasvien viljelyssä voi olla vähäisempi, jos käytettävissä olevan hiilen lisääntyminen kiihdyttää mikrobien hajotustoimintaa (Dynarski ym. 2020). Ilmaston lämpeneminen monimutkaistaa maaperän hiilen dynamiikkaa entisestään, mikä voi vaikuttaa negatiivisesti maaperän hiilivarastoon ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden pienentämiseen (Chen ym. 2020).

Hiiliviljelymenetelmien käyttöönotto ei saisi johdattaa hiilivuotoon (engl. 'carbon leakage'), jolla tarkoitetaan kasvihuonekaasupäästöjen siirtymistä toisaalle tiukan ilmastopolitiikan seurauksena. Vuoto voidaan jakaa kahteen tyyppiin: epäsuora vuoto tarkoittaa sitä, että hiilensidontaa lisäävä toiminta aiheuttaa päästöjä lisääviä toimia muualla, ja suora vuoto tarkoittaa sitä, että itse hiilensidontatoiminta tuottaa päästöjä (Thamo ja Panell 2016). Ilmastopolitiikkaan liittyvän hiilivuodon riskiä maataloussektorilla ei ole tutkittu riittävästi (Arvanitopoulos ym. 2021).

Monimuotoisuus lisää maatalousekosysteemien resilienssiä

Maatalousluonnon monimuotoisuus on olennainen osa hiiliviljelyä, kuten tässä raportissa on jo aiemmin todettu. Se voi myös tarjota viljelijöille luonnollisen vakuutuksen ympäristö- ja markkinaolosuhteista johtuvaa tuotannon vaihtelua vastaan (Baumgärtner ja Guaas 2007, Augeraud-Véron ym. 2019). Suuremman lajimäärän turvaaminen ja maatalousmaisemien toiminnallisen monimuotoisuuden ennallistaminen

tuottavat ekosysteemipalveluja, kuten pölytys, tulvasuojelu ja tuholaiden hallinta. Nämä vuorostaan vähentävät maatalouden tuottavuuden epävakautta (Gangatharan ja Neri 2012, Augeraud-Véron ym. 2019). Luonnon monimuotoisuus voi myös parantaa maaperän viljavuuden resilienssiä vähentämällä tuulen ja veden aiheuttamaa eroosiota. Kasvipeitteisyys, sen monimuotoisuudesta riippumatta, yleensä vähentää eroosion aiheuttamia ongelmia. Monipuolinen kasvivalikoima taas tarjoaa todennäköisemmin ympärivuotista suojaa pellolle (Gangatharan and Neri 2012).

JOHTOPÄÄTÖKSET

On vaikea vetää yleispätevää johtopäätöstä siitä, mitkä hiiliviljelymenetelmät ovat parhaita ekologisen kestävyysnäkökohtien kannalta. Hiiliviljelytoimet tulisi aina sopeuttaa paikallisiin olosuhteisiin, ottaen huomioon alueelliset sekä kuhunkin maatalaan ja peltoon liittyvät olosuhteet.

Tutkimusnäytön mukaan yksittäisiin toimenpiteisiin perustuva hiiliviljely ei ole tehokkain tapa tuottaa ilmastonmuutosta hillitseviä vaikutuksia. Maataloudessa on aina kyse kokonaisvaltaisesta maatalan ja viljelykierron hallinnasta, joka taas vaikuttaa tuotannon kokonaisvaikutuksiin kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemisen, luonnon monimuotoisuuden ja veden laadun suhteen.

Hiilen sidonta ja hiilivaraston ylläpito edellyttää aktiivista maaperän hoitoa. Hiiliviljely täytyy myös integroida tuottavaan maatalouteen, jotta se tarjoaisi käyttökelpoisen ja kestävä vaihtoehdon hiilidioksidin poistamiseen ilmakehästä.

LÄHTEET

- Abdalla, Mohamed & Hastings, Astley & Cheng, Kun & Yue, Qian & Chadwick, Dave & Espenberg, Mikk & Truu, Jaak & Rees, Bob & Smith, Pete. (2019). **A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity**. Global Change Biology. 25. 10.1111/gcb.14644.
- Almaraz, Maya & Wong, Michelle & Geoghegan, Emily & Houlton, Benjamin. (2021). **A review of carbon farming impacts on nitrogen cycling, retention, and loss**. Annals of the New York Academy of Sciences. 1505. 10.1111/nyas.14690.
- Arvanitopoulos, Theodoros & Garsous, Grégoire & Agnolucci, Paolo. (2021). **Carbon Leakage and Agriculture: A Literature Review on Emissions Mitigation Policies**, OECD Food, Agriculture and Fisheries Working Papers, No. 169. 10.1787/9247f1e7-en.
- Augeraud-Véron, Emmanuelle & Fabbri, Giorgio & Schubert, Katheline. (2019). **The Value of Biodiversity as an Insurance Device**. American Journal of Agricultural Economics. 101. 10.1093/ajae/aaz002.
- Baumgärtner, Stefan & Quaas, Martin. (2007). **Agro-Biodiversity as Natural Insurance and the Development of Financial Insurance Markets**. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.1013549.
- Biffi, Sofia & Chapman, Pippa & Grayson, Richard & Ziv, Guy. (2022). **Soil carbon sequestration potential of planting hedgerows in agricultural landscapes**. Journal of Environmental Management. 307. 10.1016/j.jenvman.2022.114484.
- Castellano, Michael & Archontoulis, Sotirios & Helmers, Matthew & Poffenbarger, Hanna & Six, J.. (2019). **Sustainable intensification of agricultural drainage**. Nature Sustainability. 2. 914-921. 10.1038/s41893-019-0393-0.
- Charles, Anaïs & Rochette, Philippe & Whalen, Joann & Angers, Denis & Chantigny, Martin & Bertrand, Normand. (2017). **Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis**. Agriculture, Ecosystems & Environment. 236. 88-98. 10.1016/j.agee.2016.11.021.
- Chen, Ji & Elsgaard, Lars & van Groenigen, Kees Jan & Olesen, Jørgen & Liang, Zhi & Jiang, Yu & Lærke, Poul & Zhang, Yuefang & Luo, Yiqi & Hungate, Bruce & Sinsabaugh, Robert & Jørgensen, Uffe. (2020). **Soil carbon loss with warming: New evidence from carbon-degrading enzymes**. Global Change Biology. 26. 1944-1952. 10.1111/gcb.14986.
- Cole, Lorna & Stockan, Jenni & Helliwell, Rachel. (2020). **Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: A review**. Agriculture, Ecosystems & Environment. 296. 106891. 10.1016/j.agee.2020.106891.
- Dutaur, Laure & Verchot, Louis. (2007). **A global inventory of the soil CH₄ sink**. Global Biogeochemical Cycles - GLOBAL BIOGEOCHEM CYCLE. 21. 10.1029/2006GB002734.
- Dynarski, Katherine & Bossio, Deborah & Scow, Kate. (2020). **Dynamic Stability of Soil Carbon: Reassessing the "Permanence" of Soil Carbon Sequestration**. Frontiers in Environmental Science. 8. 514701. 10.3389/fenvs.2020.514701.
- Finney, Denise & Kaye, Jason. (2016). **Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system**. Journal of Applied Ecology. 54. 10.1111/1365-2664.12765.
- Gangatharan, R. & Neri, Davide. (2012). **Can Biodiversity improve Soil Fertility Resilience in Agroecosystems?**. New Medit. 11. 11-18.
- Gibbs, Sophie & Koblents, Hanita & Coleman, Brent & Gordon, Andrew & Thevathasan, Naresh & Williams, Peter. (2016). **Avian diversity in a temperate tree-based intercropping system from inception to now**. Agroforestry Systems. 90. 10.1007/s10457-016-9901-7.

Gomez-Casanovas, Nuria & Blanc-Betes, Elena & Moore, Caitlin & Bernacchi, Carl & Kantola, I. & DeLucia, Evan. (2021). **A review of transformative strategies for climate mitigation by grasslands.** Science of The Total Environment. 799. 149466. 10.1016/j.scitotenv.2021.149466.

Guenet, Bertrand & Gabrielle, Benoît & Chenu, Claire & Arrouays, Dominique & Balesdent, Jerome & Bernoux, Martial & Bruni, Elisa & Caliman, Jean-Pierre & Cardinael, Rémi & Chen, Songchao & Ciais, Philippe & Desbois, Dominique & Fouché, Julien & Frank, Stefan & Hénault, Catherine & Lugato, Emanuele & Naipal, Victoria & Nesme, Thomas & Obersteiner, Michael & Zhou, Feng. (2021). **Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage?** Global Change Biology. 27. 237-256. 10.1111/gcb.15342.

Hagelberg, E., Wikström, U., Joona, J. & Mattila, T. (2020). **Regenerative agriculture: the new direction of food production.** Baltic Sea Action Group.

Hannula, Silja & Morriën, Elly. (2022). **Will fungi solve the carbon dilemma?** Geoderma. 413. 115767. 10.1016/j.geoderma.2022.115767.

Heath, Sacha & Soykan, Candan & Velas, Karen & Kelsey, Rodd & Kross, Sara. (2017). **A bustle in the hedgerow: Woody field margins boost on farm avian diversity and abundance in an intensive agricultural landscape.** Biological Conservation. 212. 153-161. 10.1016/j.biocon.2017.05.031.

Heinonsalo, J (eds.) , Heimsch , L , Helenius , J , Huusko , M K , Höjjer , L , Joona , J M , Kanerva , S , Karhu , K , Kekkonen , H R , Koppelmäki , K , Kulmala , L , Löjtönen , S , Mattila , T J , Ollikainen , M , Peltokangas , K , Regina , K , Soinne , H , Wikström , U & Viskari , T 2020. **Hiiliopas : Katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin.** 1 toim , Carbon Action & Baltic Sea Action Group , Kaarina .

Huang, Yawen & Ren, Wei & Wang, Lixin & Hui, Dafeng & Grove, John & Yang, Xiaojuan & Tao, Bo & Goff, Ben. (2018). **Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis.** Agriculture, Ecosystems and Environment. 268. 144-153. 10.1016/j.agee.2018.09.002.

Hyvönen, Terho & Heliölä, Janne & Koikkalainen, Kauko & Kuussaari, Mikko & Lemola, Riitta & Miettinen, Antti & Rankinen, Katri & Lång, Kristiina & Turtola, Eila. (2020). **Maatalouden ympäristötoimenpiteiden ympäristö- ja kustannustehokkuus (MYTTEHO): Loppuraportti.** Report number: Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 12/2020. Affiliation: Natural Resources Institute Finland (Luke).

Jansson, Christer & Faiola, Ceila & Wingler, Astrid & Zhu, Xin-Guang & Kravchenko, Alexandra & Graaff, Marie-Anne & Ogden, Aaron & Handakumbura, Pubudu, & Werner, Christiane & Beckles, Diane. (2021). **Crops for Carbon Farming.** Frontiers in Plant Science. 10.3389/fpls.2021.636709.

Kim, Dong Gill & Kirschbaum, Miko & Beedy, Tracy. (2016). **Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies.** Agriculture, Ecosystems & Environment. 226. 65-78. 10.1016/j.agee.2016.04.011.

Kim, Nakian & Zabaloy, María & Guan, Kaiyu & Villamil, María. (2020). **Do cover crops benefit soil micro-biome? A meta-analysis of current research.** Soil Biology and Biochemistry. 142. 107701. 10.1016/j.soilbio.2019.107701.

King, A.E. and Blesh, J. (2018). **Crop rotations for increased soil carbon: perennality as a guiding principle.** Ecol Appl, 28: 249-261. <https://doi.org/10.1002/eap.1648>

Kravchenko, A. N., Guber, A. K., Razavi, B. S., Koestel, J., Quigley, M. Y., Robertson, G. P., et al. (2019). **Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization (vol 10, 3121, 2019).** Nat. Commun. 10:12000.

Levy, Peter & Burden, Annette & Cooper, Mark & Dinsmore, Kerry & Drewer, Julia & Evans, Chris & Fowler, David & Gaiawyn, Jenny & Gray, Alan & Jones, Stephanie & Jones, Timothy & Mcnamara, Niall & Mills, Robert & Ostle, Nicholas & Sheppard, Lucy & Skiba, U. & Sowerby, Alwyn & Ward, Sue & Zieliński, Piotr. (2012). **Methane emissions from soils: Synthesis and analysis of a large UK data set.** Global Change Biology. 18. 1657 - 1669. 10.1111/j.1365-2486.2011.02616.x.

- Liang, Chao & Amelung, Wulf & Lehmann, Johannes & Kaestner, Matthias. (2019). **Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter.** *Global Change Biology*. 25. 10.1111/gcb.14781.
- Lind, Saara & Virkajärvi, Perttu & Hyvönen, Niina & Maljanen, Marja & Kivimäenpää, Minna & Jokinen, Simo & Antikainen, Sanna & Latva, Mira & Rätty, Mari & Martikainen, Pertti & Shurpali, Narasinha. (2020). **Carbon dioxide and methane exchange of a perennial grassland on a boreal mineral soil.** *Boreal Environment Research*. 25. 1-17.
- Liu, Ting & Chen, Xiaoyun & Hu, Feng & Ran, Wei & Shen, Qirong & Li, Huixin & Whalen, Joann. (2016). **Carbon-rich organic fertilizers to increase soil biodiversity: Evidence from a meta-analysis of nematode communities.** *Agriculture Ecosystems & Environment*. 232. 199-207. 10.1016/j.agee.2016.07.015.
- Liu, Xiao-Jun Allen & Finley, Brianna & Mau, Rebecca & Schwartz, Egbert & Dijkstra, Paul & Bowker, Matthew & Hungate, Bruce. (2020). **The soil priming effect: Consistent across ecosystems, elusive mechanisms.** *Soil Biology and Biochemistry*. 107617. 10.1016/j.soilbio.2019.107617.
- Marja, Riho & Viik, Eneli & Mänd, Marika & Phillips, James & Klein, Alexandra & Batary, Peter. (2018). **Crop rotation and agri-environment schemes determine bumblebee communities via flower resources.** *Journal of Applied Ecology*. 55. 10.1111/1365-2664.13119.
- Mcdaniel, Marshall & Tiemann, L. & Grandy, Stuart. (2013). **Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis.** *Ecological Applications*. 24. 10.1890/13-0616.1.
- McDonald, Sarah & Lawrence, Rachel & Kendall, Liam & Rader, Romina. (2019). **Ecological, biophysical and production effects of incorporating rest into grazing regimes: A global meta-analysis.** *Journal of Applied Ecology*. 56. 10.1111/1365-2664.13496.
- Mei, Kun & Wang, Zhenfeng & Huang, Hong & Zhang, Chi & Shang, Xu & Dahlgren, Randy & Zhang, Minghua & Xia, Fang. (2018). **Stimulation of N₂O emission by conservation tillage management in agricultural lands: A meta-analysis.** *Soil and Tillage Research*. 182. 86-93. 10.1016/j.still.2018.05.006.
- Montes, F & Meinen, Robert & Dell, C & Rotz, C.A. & Hristov, A & Oh, Joonpyo & Waghorn, G & Gerber, Pierre J. & Henderson, Benjamin & Makkar, Harinder & Dijkstra, Jan. (2013). **SPECIAL TOPICS -- Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options.** *Journal of animal science*. 91. 5070-5094. 10.2527/jas.2013-6584.
- Moreno, Gerardo & Gonzalez-Bornay, Guillermo & Pulido, Fernando & López-Díaz, María Lourdes & Bertomeu, Manuel & Juárez, Enrique & Díaz, Mario. (2015). **Exploring the causes of high biodiversity of Iberian dehesas: the importance of wood pastures and marginal habitats.** *Agroforestry Systems*. 90. 10.1007/s10457-015-9817-7.
- Morris, Craig. (2021). **How Biodiversity-Friendly Is Regenerative Grazing?.** *Frontiers in Ecology and Evolution*. 23. 9:816374.. 10.3389/fevo.2021.816374.
- Murphy, B.W. (2015). **Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils.** *Soil Research* 53, 605 - 635. *Soil Research*. 53. 605 - 635. 10.1071/SR14246.
- Oldén, Anna & Raatikainen, Kaisa & Tervonen, Kaisa & Halme, Panu. (2016). **Grazing and soil pH are biodiversity drivers of vascular plants and bryophytes in boreal wood-pastures.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 222. 171-184. 10.1016/j.agee.2016.02.018.
- Olin, S., Lindeskog, M., Pugh, T. A. M., Schurgers, G., Wårlind, D., Mishurov, M., Zaehle, S., Stocker, B. D., Smith, B., and Arneth, A. (2015). **Soil carbon management in large-scale Earth system modelling: implications for crop yields and nitrogen leaching,** *Earth Syst. Dynam.*, 6, 745–768.
- Paustian, Keith & Larson, Eric & Kent, Jeffrey & Marx, Ernie & Swan, Amy. (2019). **Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy.** *Frontiers in Climate*. 1. 10.3389/fclim.2019.00008.

- Plieninger, Tobias & Hartel, Tibor & Martín-López, Berta & Beaufoy, Guy & Bergmeier, Erwin & Kirby, Keith & Montero, María & Moreno, Gerardo & Oteros-Rozas, Elisa & Van Uytvanck, Jan. (2015). **Wood-pastures of Europe: Geographic coverage, social–ecological values, conservation management, and policy implications.** *Biological Conservation*. 190. 70–79. 10.1016/j.biocon.2015.05.014.
- Prommer, Judith & Walker, Tom & Wanek, Wolfgang & Braun, Judith & Zezula, David & Hu, Yuntao & Hofhansl, Florian & Richter, Andreas. (2019). **Increased microbial growth, biomass and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity.** *Global Change Biology*. 26. 10.1111/gcb.14777.
- Puissant, Jérémy & Villenave, Cécile & Chauvin, Camille & Plassard, Claude & Blanchart, Eric & Trap, Jean & Blanchart, Eric. (2021). **Quantification of the global impact of agricultural practices on soil nematodes: A meta-analysis.** *Soil Biology and Biochemistry*. 10.1016/j.soilbio.2021.108383.
- Quemada, M. & Baranski, Marcin & Lange, M.N.J. & Vallejo, A. & Cooper, Julia. (2013). **Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 174. 1–10. 10.1016/j.agee.2013.04.018.
- Redlich, S, Martin, EA, Steffan-Dewenter, I. **Sustainable landscape, soil and crop management practices enhance biodiversity and yield in conventional cereal systems.** *J Appl Ecol*. 2021; 58: 507– 517. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13821>
- Rochette, Philippe. (2008). **No-till only increase N₂O emissions in poorly-aerated soils.** *Soil and Tillage Research*. 101. 97–100. 10.1016/j.still.2008.07.011.
- Rolo, Victor & Hartel, Tibor & Berg, Staffan & Crous-Duran, J. & Franca, Antonello & Mirck, Jaconette & Palma, Joao & Pantera, Anastasia & Paulo, Joana & Pulido, Fernando & Seddaiu, Gioavanna & Thenail, Claudine & Varga, Anna & Viaud, Valérie & Burgess, Paul & Moreno, Gerardo. (2020). **Challenges and innovations for improving the sustainability of European agroforestry systems of high nature and cultural value: stakeholder perspectives.** *Sustainability Science*. 15. 10.1007/s11625-020-00826-6.
- Ruseva, Tatyana & Hedrick, Jamie & Marland, Gregg & Tovar, Henning & Sabou, Carina & Besombes, Elia. (2020). **Rethinking standards of permanence for terrestrial and coastal carbon: implications for governance and sustainability.** *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 45. 69–77. 10.1016/j.cosust.2020.09.009.
- Shrestha, Bharat M. & Bork, Edward & Chang, Scott & Carlyle, Cameron & Ma, Zilong & Döbert, Timm & Kaliskar, Dauren & Boyce, Mark. (2020). **Adaptive Multi-Paddock Grazing Lowers Soil Greenhouse Gas Emission Potential by Altering Extracellular Enzyme Activity.** *Agronomy*. 10. 1781. 10.3390/agronomy10111781.
- Thamo, Tas & Pannell, David. (2016). **Challenges in developing effective policy for soil carbon sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence.** *Climate Policy*. 16. 973–992. 10.1080/14693062.2015.1075372.
- Torralba, Mario & Fagerholm, Nora & Burgess, Paul & Moreno, Gerardo & Plieninger, Tobias. (2016). **Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 230. 150–161. 10.1016/j.agee.2016.06.002.
- Tsonkova, P., Böhm, C., Quinkenstein, A. et al. **Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: a review.** *Agroforest Syst* 85, 133–152 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9494-8>
- Udawatta, Ranjith & Rankoth, Lalith & Jose, Shibu. (2019). **Agroforestry and Biodiversity.** *Sustainability*. 11. 2879. 10.3390/su11102879.
- Valkama, Elena & Lemola, Riitta & Känkänen, Hannu & Turtola, Eila. (2015). **Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries.** *Agriculture Ecosystems & Environment*. 203. 93–101. 10.1016/j.agee.2015.01.023.

- van Capelle, Christine & Schrader, Stefan & Brunotte, Joachim. (2012). **Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data.** *European Journal of Soil Biology*. 50. 165–181. 10.1016/j.ejsobi.2012.02.005.
- Vanneste, Thomas & Van Den Berge, Sanne & Riské, Enya & Brunet, Jörg & Decocq, Guillaume & Diekmann, Martin & Graae, Bente & Hedwall, Per-Ola & Lenoir, Jonathan & Liira, Jaan & Lindmo, Sigrid & Litza, Kathrin & Naaf, Tobias & Orczewska, Anna & Wulf, Monika & Verheyen, Kris & Frenne, Pieter. (2020). **Hedging against biodiversity loss: Forest herbs' performance in hedgerows across temperate Europe.** *Journal of Vegetation Science*. 31. 10.1111/jvs.12917.
- Varah, Alexa & Jones, H. & Smith, Jo & Potts, Simon. (2013). **Enhanced biodiversity and pollination in UK agroforestry systems.** *Journal of the science of food and agriculture*. 93. 10.1002/jsfa.6148.
- Xia, Fang & Mei, Kun & Xu, Yan & Zhang, Chi & Dahlgren, Randy & Zhang, Minghua. (2020). **Response of N₂O emission to manure application in field trials of agricultural soils across the globe.** *Science of The Total Environment*. 733. 139390. 10.1016/j.scitotenv.2020.139390.
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G. et al. **Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity.** *Nat Commun* 10, 718 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>
- Yang, Yali & Xie, Hongtu & Mao, Zhun & Bao, Xuelian & He, Hongbo & Zhang, Xudong & Liang, Chao. (2022). **Fungi determine increased soil organic carbon more than bacteria through their necromass inputs in conservation tillage croplands.** *Soil Biology and Biochemistry*. 167. 108587. 10.1016/j.soilbio.2022.108587.
- Zhang, Qi & Xiao, Jing & Xue, Jianhui & Zhang, Lang. (2020). **Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-Analysis.** *Sustainability*. 12. 3436. 10.3390/su12083436.
- Zhang, Kaile & Maltais-Landry, Gabriel & Liao, Hui-Ling. (2021). **How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations.** *Soil Biology and Biochemistry*. 156. 108219. 10.1016/j.soilbio.2021.108219.
- Zhao, Xin & Liu, Bingyang & Liu, Shengli & Qi, Jianying & Xing, Wang & pu, Chao & Li, Shuai-Shuai & Zhang, Xiong-Zhi & Yang, Xiao-Guang & Lal, Rattan & Chen, Fu & Zhang, Hailin. (2020). **Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis.** *Land Degradation and Development*. 31. 10.1002/ldr.3492.
- Zhou, Minghua & Zhu, Bo & Wang, Shijie & Zhu, Xinyu & Vereecken, Harry & Brüggemann, Nicolas. (2017). **Stimulation of N₂O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis.** *Global change biology*. 23. 10.1111/gcb.13648.



Hiiliviljelyn ympäristövaikutukset - kirjallisuuskatsaus

Veera Naukkarinen
BSAG 2022

Tämä raportti on käännös LIFE Carbon Farming Scheme -hankkeen raportista "Impacts of carbon farming practices on biodiversity, nutrient leaching and climate – summary of the literature. Report from activity A4 of the LIFE CarbonFarmingScheme project."



Osarahoitettu
EU LIFE ohjelmasta