UNIVERSITY OF HELSINKI

https://helda.helsinki.fi

Agroekologinen symbioosi: Agroecological symbiosis

Helenius, Juha; Koppelmäki, Kari

Heinonsalo, Jussi

2020

http://hdl.handle.net/10138/311541

Helenius, J & Koppelmäki, K 2020, Agroekologinen symbioosi. julkaisussa J Heinonsalo (Toimittaja), Hiiliopas : katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin. Carbon Action & Baltic Sea Action Group, Kaarina, Sivut 38-41.

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository. https://helda.helsinki.fi
This is an electronic reprint of the original article.
This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.
Please cite the original version.

CARBON ACTION

BSAG®
Baltic Sea Action Group



Hiiliopas

katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin

Toim. Jussi Heinonsalo

Sisällysluettelo

1. Esipuhe

2. Johdanto

2.1 Ilmastoviisas maatalous

2.2 Maan hiili ja vaikutukset maaperään

2.3 Maaperän hiilivaraston koon ja muutoksen määritysmenetelmät

2.4 Tärkeitä maaperän hiilenkiertoon liittyviä prosesseja

3. Maaperän hiilivarasto maataloudessa

3.1 Perustiedot hiilitaselaskennasta maatiloilla

3.2 Hiilivaraston muutokseen vaikuttavat tekijät maataloudessa

3.3 Viljelymenetelmien vaikutus hiilivaraston muutokseen

3.4 Maanparannusaineet

3.5 Turvepellot: kuinka pitää hiili siellä missä sitä jo on?

3.6 Agroekologinen symbioosi - Teollisen ekologian toimintamalli elintarvikeketjuun

4. Käytännön hiiliviljelyä ja kokeilijoita

4.1 Erilaisia Carbon Action -viljelijöitä

4.2 Esikuvia maailmalta

4.3 Tutkimusesimerkkejä

5. Hiilimarkkinat ja taloudelliset ohjauskeinot

5.1 Hiilimarkkinat ja taloudelliset ohjauskeinot

6. Hiilensidonnan lisäämisen haasteet ja mahdollisuudet

7. Lopuksi

Termien määritelmiä

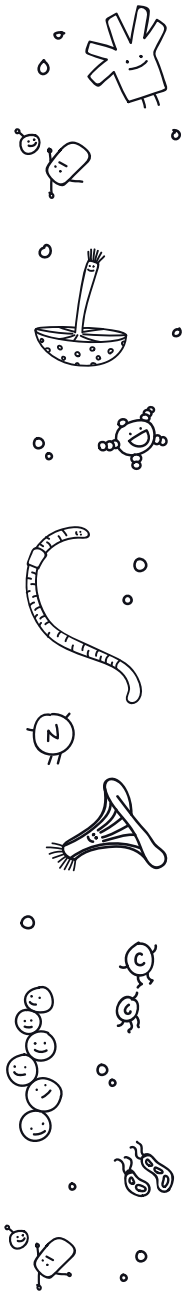
Lähdeluettelo

Hiiliopas
- Katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin

Toim. Jussi Heinonsalo

1.painos

2020 Paino-Kaarina
Kaarina



1. Esipuhe

Tämä opas on tarkoitettu kaikille maatalousmaan hiilensidonnasta kiinnostuneille. Oppaassa käydään läpi perusasioita maaperän hiilestä, sen varastoista ja prosesseista, mittaustavoista sekä siitä, mikä vaikuttaa hiilen varastoitumiseen ja miten sitä voidaan edistää. Maaperän hiilivaraston muutosten tutkimus ja prosessiymmärrys ei ole vielä riittävää. Monien tunnettujen prosessien vaikutuksia todellisissa viljelyolosuhteissa ei ole vielä tutkittu. Tiedeyhteisö tekee parhaillaan töitä laajalla rintamalla peltomaiden hiilivarastojen toiminnan ymmärtämiseksi. Paljon kuitenkin tiedetään ja monet hiilensidonnan pääperiaatteet ymmärretään jo tarpeeksi hyvin oikeansuuntaisten toimenpiteiden aloittamiseksi.

Sekä me, tämän oppaan kirjoittajat, että te lukijat matkustamme kaikki samassa liikkuvassa junassa. Huomenna tiedetään taas jotain uutta, mitä eilen ei osattu kuvitellakaan. Tästä oppaasta tullaan tekemään päivitettyjä painoksia. Olemmekin erityisen kiitollisia kaikesta palautteesta, joka vie maaperän hiilivarastojen tutkimusta ja tietoisuutta eteenpäin.

Antoisia lukuhetkiä!

Hiilioppaan tekijät:

Heimsch Laura, tohtorikoulutettava, Ilmatieteen laitos - LHeim
Heinonsalo Jussi, yliopistotutkija, Helsingin yliopisto ja Ilmatieteen laitos - JHei
Helenius Juha, professori, Ruralia-instituutti, Helsingin yliopisto - JHel
Huusko Karoliina, tutkijatohtori, Helsingin yliopisto - KH
Höijer Laura, sisältöjohtaja, Baltic Sea Action Group - LHö
Joona Juuso, tohtorikoulutettava, Helsingin yliopisto - JJ
Kanerva Sanna, yliopistonlehtori, Helsingin yliopisto - SK
Karhu Kristiina, apulaisprofessori, Helsingin yliopisto - KKa
Kekkonen Hanna, tutkija, Luonnonvarakeskus - HK
Koppelmäki Kari, tohtorikoulutettava, Helsingin yliopisto - KKo
Kulmala Liisa, vanhempi tutkija, Ilmatieteen laitos - LK
Lötjönen Sanna, tohtorikoulutettava, Helsingin yliopisto -SL
Mattila Tuomas, erikoistutkija, Suomen ympäristökeskus - TM
Ollikainen Markku, professori, Helsingin yliopisto - MO
Peltokangas Kenneth, tohtorikoulutettava, Helsingin yliopisto - KP
Regina Kristiina, tutkimusprofessori, Luonnonvarakeskus - KR
Soinne Helena, erikoistutkija, Luonnonvarakeskus - HS
Wikström Ulrika, suunnittelija, Baltic Sea Action Group UW
Viskari Toni, vanhempi tutkija, Ilmatieteen laitos - TV

2. Johdanto

Ihmiskunnan aiheuttamat ympäristön muutokset kuten luonnon monimuotoisuuden väheneminen, ympäristön kemikalisoituminen sekä ilmaston lämpeneminen koettelevat maapallon kestävyyttä. Ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuudet, hiilidioksidi (CO_2) tärkeimpänä, ovat kohonneet viimeisen 50 vuoden aikana merkittävästi.

Mauna Loan saarella Havaijilla on mitattu 1950-luvulta asti ilmakehän taustahiilidioksidipitoisuuksia ja mittaushistorian aikana pitoisuus on noussut 315 miljoonasosasta ppm:stä yli 400 ppm:ään. Nousu ei osoita hidastumisen merkkejä. Vaikka kivihiilen käytön kasvu on pysähtynyt ja uusiutuvan energian tuotanto lisääntyy, öljyn ja maakaasun kulutus kasvavat edelleen. Vuonna 2017 fossiilisista polttoaineista vapautui ilmakehään 34 gigatonnia hiilidioksidia. Maankäytön muutoksista vapautui 5 gigatonnia. Meret muodostivat 9 gigatonnin hiilinielun ja biosfääri, johon kuuluvat kasvillisuus ja maaperä, 12 gigatonnin nielun. Ihmistoiminnan seurauksena ilmakehään jäi vuonna 2017 noin 17 gigatonnia hiilidioksidia. (The Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2018, www.globalcarbonproject.org). Tämä jatkuvasti ilmakehään päätyvä CO_2 ja muut kasvihuoneilmiöön vaikuttavat tekijät aiheuttavat maapallon lämpötilan nousun ja siitä seuraavia ympäristö-, sosiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia.

On selvää, että fossiilisista polttoaineista syntyviä päästöjä on vähennettävä, jotta ilmaston lämpeneminen saadaan hallintaan. Päästöleikkausten lisäksi on tärkeää samalla ylläpitää ja lisätä hiilen nieluja maailmanlaajuisesti. Ilmastonmuutoksen torjunnassa nielujen lisääminen maa- ja metsätaloudessa on keskeisessä roolissa niiden suuren maapinta-alan ja hiilivaraston takia.

Tämä opas keskittyy maatalousmaahan ja maatalouden toimenpiteiden vaikutuksiin maaperän hiilivarastojen muutoksissa. Metsien ja metsätalouden menetelmiin sekä niiden vaikutuksiin ei tässä oteta kantaa.

Maaperä on suuri hiilivarasto. Sen arvioidaan varastoivan 1500-2400 gigatonnia hiiltä 1-2 metrin syvyyteen ulottuvassa kerroksessa. Se on noin kolme kertaa enemmän hiiltä kuin koko ilmakehässä on yhteensä. Se on myös noin 300-500 kertaa vuotuisten fossiilisista polttoaineista syntyvän hiilipäästön määrä. Pienikin muutos maaperän hiilivarastoissa on siis merkittävä ilmakehän CO_2-pitoisuudelle. Tästä lähtökohdasta on saanut alkunsa ns. neljän promillen aloite, jonka Ranska teki Pariisin ilmastokokouksessa 2015. Kasvattamalla vuosittain 4 promillea peltomaiden hiilivarastoja, voidaan merkittävä osa fossiilisten polttoaineiden käytöstä peräisin olevasta lisähiilestä sitoa pois ilmakehästä.

Maatalousmaat ovat jatkuvasti aktiivisen ihmistoiminnan kohteena. Tämä mahdollistaa maan hiilivarastoa kasvattavien viljelymenetelmien nopean käyttöönoton laajoilla alueilla. Monilla viljelymenetelmillä peltomaat kuitenkin menettävät hiilivarastoja. Hajotustoiminnan seurauksena ja biomassan mukana pellosta lähtevän hiilen määrä ylittää peltomaahan kasvien kasvun ja kasvustotähteen kautta päätyvän hiilen määrän.

Tämän maailmanlaajuisen, ja myös Suomessa vallitsevan, kehityskulun suunnan muuttaminen hiiltä sitovaksi vaatii ymmärrystä hiilen käyttäytymisestä maaperässä. Se edellyttää hiilen sitoutumista edistävien viljelymenetelmien käyttöä ja uusien viljelytapojen kehittämistä, mutta myös hiiltä sitovan toiminnan sopeuttamista kaupallisen maanviljelyn taloudellisiin reunaehtoihin.

Myös hiilivaraston kattavampi todentaminen on välttämätöntä.

Vaikka opas keskittyy hiileen, on selvää, että maatalouden käytännöt, maaperän prosessit ja viljelyn kokonaisympäristövaikutukset ovat monimutkainen kokonaisuus. Yhtä osaa tällaisesta kokonaisuudesta ei voi tarkastella erillisenä. Viljelytoiminnan on oltava kokonaisvaltaisesti kestävällä pohjalla. Hiilen varastoimisen lisäksi on otettava huomioon kasvintuotannon vaatimukset, ravinteiden huuhtoumat, ravinteiden huuhtoumat, luonnon monimuotoisuus ja useat muut kokonaisuuteen vaikuttavat tekijät.

(JHei)

2.1. Ilmastoviisas maatalous

Maailmanlaajuisista kasvihuonekaasujen päästöistä 10-14 % on peräisin maataloustuotannosta ja 37 % maaperästä (Paustian ym. 2016). Paremmat viljelykäytännöt voivat vähentää päästöjä sekä lisätä maaperään varastoituvan hiilen määrää. Multavuuden nousun myötä maan eliöstö monipuolistuu, eroosio, valunta ja vesistökuormitus vähenevät sekä maan kestävyys ilmaston ääriolosuhteita vastaan paranee. Samalla mahdollisuudet parantaa maan tuottavuutta lisääntyvät. Peltomaahan sidottava lisähiili onkin yksi edullisimmista ja monihyötyisimmistä tavoista poistaa hiilidioksidia ilmakehästä.

Keith Paustian ja kumppanit esittelivät vuonna 2016 Ilmastoviisas maaperä -artikkelissaan erilaisia tapoja lisätä peltomaan hiilen määrää.

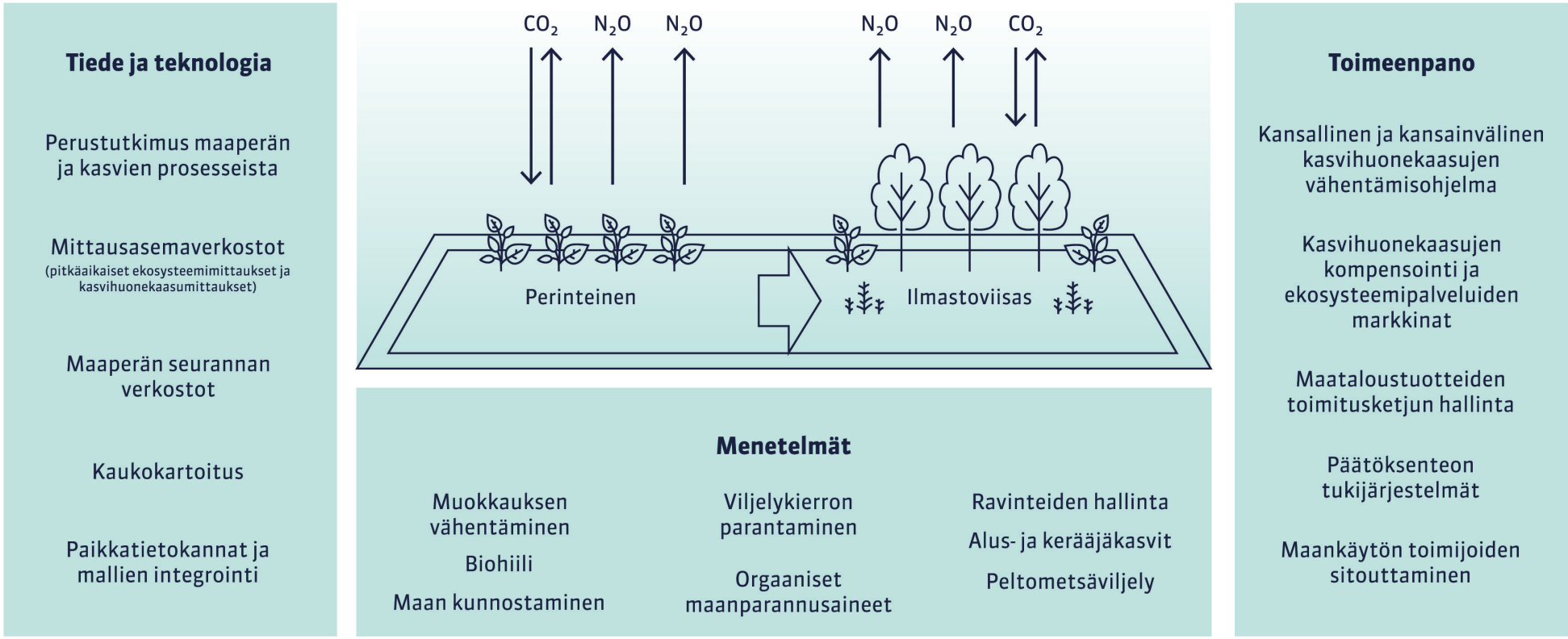
Ne voidaan jakaa seuraaviin päätekijöihin:
1) syväjuuristen kasvien hyödyntäminen, jolloin juurimassaa ja juurieritteitä päätyy myös syviin maakerroksiin ja hitaasti kiertävän hiilen varastoon
2) monipuolinen viljelykierto joka takaa suuren hiilisyötteen
3) suuremman kasvibiomassamäärän jättäminen maahan
4) alus- ja kerääjäkasvien käyttö, jotta pellossa olisi mahdollisimman pitkään yhteyttävää kasvillisuutta ja hiilisyöte maahan suuri

Maanparannusaineiden käyttö maan hiilivaraston lisäämisessä on myös varteenotettava vaihtoehto. Silloin on kunkin maanparannusaineen kohdalla arvioitava materiaalin koko elinkaari ja sen ympäristövaikutukset. Mekanismit, jotka määräävät hiilen pysyvyyden maaperässä, ovat vielä huonosti tunnettuja. Sen vuoksi pysyvän ja syvissä maakerroksissa varastoituneena olevan hiilen hajoamisen lämpötilaherkkyys sekä kuolleiden mikrobien biomassasta maahan päätyvän hiilen määrä ja pysyvyys ovat aktiivisen tutkimuksen kohteena niin Suomessa kuin kansainvälisesti.

Ilmastoviisaan maatalouden edistäminen vaatii samanaikaisia toimia monella rintamalla. Maatalouskäytäntöjä täytyy kehittää ja tutkia, jotta parhaat ja toimivimmat viljelytavat voidaan ottaa käyttöön ja turvata hiilen varastoitumisen lisäksi riittävät satotasot. Tieteen tehtävänä on myös selvittää sekä parantaa menetelmiä, joiden avulla hiilen pitkäaikainen varastoituminen maahan voidaan osoittaa ja määrittää tarkasti.

Taloudellisen ja poliittisen tuen ja ohjauksen tulee edistää ilmastoviisasta maataloustoimintaa, jotta hiilen varastoimisesta maahan tulee osa kannattavaa maatalousyrittäjyyttä. Näiden

tavoitteiden täyttyminen edellyttää, että maatalouskäytäntöjä kehitettäessä otetaan huomioon hiilen varastoitumisen lisäksi viljelyn kaikki ilmasto- ja ympäristövaikutukset, kuten muut kasvihuonekaasupäästöt, vesistökuormitus, lannoitteiden ja energian kulutus sekä käytettyjen materiaalien kaikki elinkaarivaikutukset (Kuva 1) .



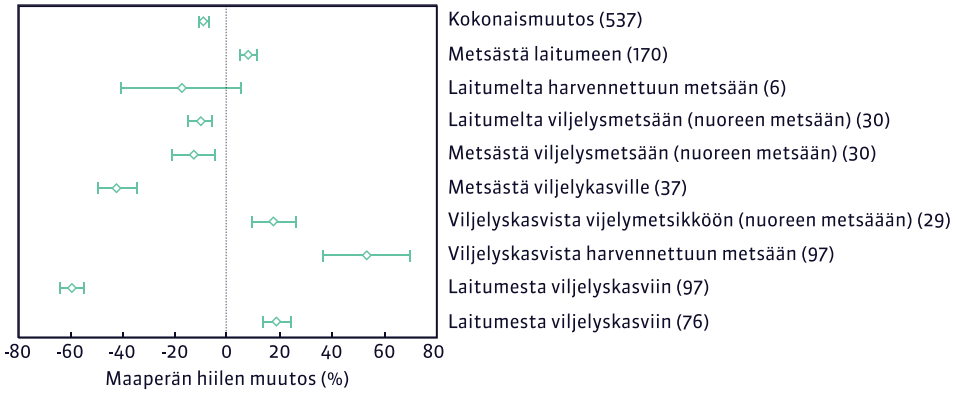
Kuva 1. Ilmastoviisaan maatalouden eri osa-alueet. Ilmastoviisas maatalous perustuu tieteellisesti tutkittuun tietoon ja sen soveltamiseen käytännön maataloudessa. Näiden käytännön toimien toteutusta voidaan edistää yhteiskunnallisilla ohjauskeinoilla, jolloin on mahdollista saavuttaa laajempia, kansallisia ja kansainvälisiä ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. (alkuperäinen kuva Paustian et al. 2016 Nature)

Maankäytön muutoksen vaikutus maaperän hiilivarastoihin

Viljelymaat on raivattu vuosisatojen saatossa luonnonekosysteemeistä maatalouden käyttöön. Maatalouden harjoittaminen (muokkaus, lannoitus, kuivatus, sadonkorjuu jne.) on ajan kuluessa vähentänyt maaperän hiilivarastoja pelloilla. Maailmanlaajuisen meta-analyysin mukaan maankäyttö vaikuttaa merkittävästi hiilivaraston suuruuteen (Guo and Gifford, 2002). Kun metsä raivataan pelloksi, hiilivarasto laskee yli 40 % alkuperäisestä (kuva 2).

Tutkimusten mukaan suurin hiilen hävikki tapahtuu ensimmäisen kymmenen vuoden aikana. Metsän muuttaminen laitumeksi ei vähennä hiilivarastoa, vaan jopa nostaa sitä. Vastaavasti, viljelymaan muuttaminen luonnontilaiseksi tai kasvatusmetsäksi tai laitumeksi kasvattaa hiilivarastoa 18-53 % (kuva 2). Hiilivarasto siis kasvaa ja palautuu hitaasti kasvillisuuden sekä ilmaston määrittelemälle luonnolliselle tasolle. Muutosnopeudet, hiilivaraston suhteelliset muutokset ja tarkat hiilimäärät vaihtelevat tapauskohtaisesti, mutta maankäytön muutosten vaikutus ja muutosten suunta tiedetään varsin hyvin.

Peltokohtaiset hiilensidonnan tavoitteet on syytä suhteuttaa näihin ison mittakaavan muutoksiin ja maankäytön vaikutuksiin. Maankäytön muutoksilla on siis erittäin suuri merkitys valtakunnallisten maaperän hiilensidontatavoitteiden saavuttamisessa. Jotta hiilen lisääminen peltomaahan onnistuisi, on tärkeää pyrkiä etsimään ja vakiinnuttamaan viljelytapoja, jotka sitovat hiiltä maaperään enemmän kuin päästävät. Uusi teknologia esimerkiksi muokkaus- ja kylvökoneissa on mahdollistanut maan muokkauksen merkittävän vähentämisen ja peltojen kasvipeitteisyyden lisäämisen. Se on tärkeää, kun pyritään katkaisemaan kehitys, missä viljelymailta karkaa hiiltä ilmakehään. Vasta kun hiilen hävikki maaperästä on pysäytetty, voidaan tavoitella hiilen kerryttämistä maahan.



Kuva 2. Kansainvälisen meta-analyysin mukaiset arviot maankäytön muutosten vaikutuksista maaperän hiilimäärään (alkuperäinen kuva Guo and Gifford 2002 Global Change Biology).

(JHei)

2.2. Maan hiili ja vaikutukset maaperään

Orgaaninen hiili

Maaperän orgaanisella aineksella tarkoitetaan eloperäistä eli kasveista, mikrobeista ja eläimistä peräisin olevaa kuollutta ainesta, joka esiintyy maassa eriasteisesti hajonneina yhdisteinä. Orgaaninen hiili on puolestaan hiiltä, joka on sitoutunut eloperäiseen ainekseen ja on sen keskeinen rakennekomponentti muodostaen noin puolet eloperäisen aineksen massasta. Hiilen lisäksi orgaaninen aines sisältää monia muitakin alkuaineita, kuten happea, vetyä ja typpeä. Eloperäisen aineksen osaksi hiili päätyy alun perin kasvien fotosynteesin kautta, kun kasvit yhteyttäessään sitovat ilmakehän hiilidioksidin sisältämän hiilen tuottamiensa hiilihydraattien rakenneosaksi.

Maaperän orgaaninen aines on hyvin monimuotoista molekyylikokonsa, rakenteensa ja kemiallisten ominaisuuksiensa puolesta. Se voi esiintyä paitsi osana maan kiintoainesta, myös liuenneena maaveteen. Orgaanisen aineksen monimuotoinen luonne tekee sen tutkimisesta ja luokittelusta varsin haasteellista. Usein luokitteluperusteena käytetäänkin aineksen hajoamisnopeutta. Tämän liukuvarajaisen luokittelun ääripäissä ovat nopeasti eli muutamien kuukausien tai vuosien kuluessa hajoava **labiili** orgaaninen aines sekä erittäin kestävä, jopa satoja vuosia maassa säilyvä **stabiili** orgaaninen aines.

Stabiiliin muotoon orgaaninen aines päätyy, kun hajotuksen eri vaiheissa syntyvät yhdisteet ja mikrobiperäinen aines reagoivat maan kivennäisaineksen kanssa. Orgaanisen ja kivennäisaineksen välille syntyneet kemialliset sidokset sekä maan mururakenne suojaavat orgaanista ainesta hajoamiselta. Orgaanisen aineksen kestävyys hajoamista vastaan syntyy siis ennen kaikkea vuorovaikutuksessa maan kivennäisaineksen kanssa, eikä ole yksinomaan orgaanisen aineksen itsensä ominaisuus. Jos maaperän hiilivarastoa halutaan kasvattaa, on stabiililla aineksella keskeinen rooli. Muruissa ja mineraalien pinnoilla oleva hiili säilyy maassa pitkään, kunhan maaperässä vallitsevat olosuhteet eivät merkittävästi muutu. Orgaanisen aineksen, ja siten orgaanisen hiilen, kokonaismäärä maassa määräytyy pitkälti ilmaston, maan kivennäisaineksen laadun, maahan päätyvän kasviaineksen määrän ja laadun sekä maankäytön perusteella.

Hiilen määrä kasvaa maahan joutuvan kuolleen kasviaineksen, kasvieritteiden, eläinperäisten jätteiden ja orgaanisten lannoitteiden myötä. Samanaikaisesti hiiltä poistuu maaperästä orgaanisen aineksen hajotessa sekä eroosion ja huuhtoutumisen mukana. Maahan tulevan ja sieltä poistuvan hiilimäärän erotus määrää tason, jolle maan hiilipitoisuus asettuu.

Maailmanlaajuisesti maaperän orgaanisen hiilen pitoisuudessa esiintyy suurta vaihtelua, mutta yleisesti ottaen viileä ja kostea ilmasto sekä maan hienojakoinen kivennäisaines suosivat sen kertymistä maahan. Suomen maaperässä orgaanisen hiilen pitoisuus onkin verrattain korkea kivennäismaillakin. Pohjoisilla leveysasteilla on myös runsaasti eloperäisiä, orgaanisia maita kuten multa- ja turvemaat. Turvemaissa orgaanisen hiilen pitoisuus on yli 40 % ja multamaissakin yli 20 %.

(SK)

Humus vai orgaaninen aines?

Humus-termiä on historiallisesti käytetty tarkoittamaan monia eri asioita ja termin merkitys on vaihdellut paljon eri tieteenalojen välillä. Erityisesti metsä- ja peltomaissa humuksella on tarkoitettu kemiallisilta ominaisuuksiltaan tai ekologiselta rooliltaan hyvin erilaisia maa-aineksia. Yleensä humuksella on viitattu maassa esiintyvään stabiiliin orgaaniseen ainekseen, joka on havaittavissa aistinvaraisesti lähinnä sen maalle antaman tumman- tai punaruskean värin kautta.

Humus-termin ulkopuolelle ovat jääneet tunnistettavissa olevat kasvintähteet ja eläinperäiset ainekset, kuten pellolle levitetty karjanlanta. Hajotessaan kasvintähteiden ja lannan on kuitenkin ajateltu edistävän humuksen muodostumista, ja pitkän hajoamisprosessin seurauksena syntyneiden humusyhdisteiden on ajateltu saavuttavan muita kasvi- ja eläinperäisiä yhdisteitä kestävämmän kemiallisen rakenteen.

Kestävän kemiallisen rakenteen takia humuksen toiminnallinen rooli maaperässä on ollut tukea maan rakennetta ja siihen liittyviä ominaisuuksia, kuten murujen kestävyyttä, vedenläpäisevyyttä sekä veden ja ravinteiden pidätyskykyä. Humuksen roolia ravinteiden lähteenä on sen sijaan pidetty pienempänä, varsinkin tuoreeseen eloperäiseen ainekseen verrattuna.

Uudet tutkimustulokset ovat kuitenkin kyseenalaistaneet humuksen ainutlaatuisen rakenteen ja ominaisuudet. Nykyinen käsitys korostaa ajatusta maan mineraaliaineksen ja eloperäisen aineksen välisistä vuorovaikutussuhteista. Maan hienojakoisilla lajitteilla, kuten saveksella, on erityisen tärkeä rooli maan eloperäisen aineksen kertymisessä.
Humusta ei myöskään enää pidetä erillisenä määriteltävissä olevana aineksena, jota voidaan löytää eri ympäristöistä. Sen tilalle on tullut näkemys, että maan eloperäinen aines koostuu eri hajoamisasteella olevien yhdisteiden jatkumosta, jonka koostumus riippuu kasvillisuuden ja eliöiden (mm. mikrobit, maaperäeläimet) tuottamien yhdisteiden laadusta ja kemiallisesta luonteesta.

Tämän takia humus-termin käyttöä tulisi välttää, tai ainakin sen merkitys tulisi määritellä tarkasti käytön yhteydessä. Olisi parempi puhua yksinkertaisesti maan orgaanisesta aineksesta, joka käsittää kaiken maa-aineksen kanssa läheisessä vuorovaikutuksessa olevan eloperäisen aineksen. Tästä voidaan tarvittaessa erottaa koostumukseltaan tai toiminnaltaan selvästi erilaiset orgaaniset ainekset, kuten maanpinnalla sijaitsevat kasvi- ja eläintähteet tai selvästi poikkeavasti käyttäytyvät yhdisteet, kuten biohiilet.

(KP)

Orgaanisen aineksen vaikutus maaperään

Orgaanisen aineksen osuus maan kokonaismassasta on kivennäismaissa usein melko pieni, vain muutamia prosentteja. Pienestä osuudesta huolimatta sillä on olennainen merkitys maan tuottokyvyn kannalta, koska orgaaninen aines vaikuttaa moniin maan kemiallisiin, fysikaalisiin ja biologisiin ominaisuuksiin.

Helposti hajoava eli labiili aines pitää yllä maan elämää. Se toimii ravintona lukuisille maan eliöille, joiden hajotustoiminnan seurauksena orgaaniseen ainekseen sitoutuneita ravinteita

vapautuu uudelleen kasvien käyttöön. Aktiivinen eliötoiminta on hyväksi myös maan rakenteelle, koska esimerkiksi mikrobien tuottamat lima-aineet stabiloivat maamuruja, jolloin niiden kestävyys paranee ja maan eroosioriski pienenee. Lisäksi hyvä mururakenne vaikuttaa edullisesti maan kaasu- ja vesitalouteen.

Stabiili orgaaninen aines toimii puolestaan reaktiopintana maaperässä. Se voi negatiivisen ominaisvarauksensa avulla pidättää maan ravinnekationeja kasveille käyttökelpoiseen muotoon kun maan pH on riittävän korkea. Se toimii puskurina maan happamoitumista vastaan sitomalla maavedessä olevia vetyioneja eli protoneja. Se lisää myös anionien välistä kilpailua pidättymispaikoista mineraaliaineksen pinnoilla ja parantaa siten anionimuotoisten ravinteiden, kuten fosforin, saatavuutta kasveille. Lisäksi orgaaninen aines voi sitoa haitallisia metalleja, kuten happamissa maissa esiintyvää liukoista alumiinia, kasveille vähemmän haitalliseen muotoon. Stabiili orgaaninen aines toimii myös maamurujen rakenneosana paitsi lujittaen niitä, tuomalla murujen rakenteeseen joustavuutta ja lisäämällä murujen kestävyyttä esimerkiksi pitkään jatkuvissa märissä olosuhteissa.

Täysin kuivalla orgaanisella aineksella on hydrofobisia, eli vettä hylkiviä ominaisuuksia, joiden vuoksi esimerkiksi kuiva vanha nurmi ei ime ja läpäise rankkasadetta samoin kuin kuiva kivennäismaan pinta. Kuivan orgaanisen aineksen kostuminen vaatii aikansa. Toisaalta orgaaninen aines voi kostuttuaan pidättää suuria määriä vettä, jolloin sen kuivuminen on hidasta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että korkea orgaanisen aineksen pitoisuus lisää maan vedenpidätysominaisuuksia ja vähentää poudanarkuutta. Siksi kuivina kesinä multa- ja turvemaat kasvavat kivennäismaita paremmin.

(SK)

Epäorgaaninen hiili

Maaperän epäorgaanisella hiilellä tarkoitetaan karbonaattimineraalien rakenneosana esiintyvää hiiltä. Suomen kallioperässä karbonaattimineraalit ovat harvinaisia. Siksi maaperässämme, jonka kivennäisaines on kallioperästämme peräisin, ei luontaisesti esiinny lainkaan epäorgaanista hiiltä. Karbonaatteja sisältävien kalkitusaineiden eli kalsiitin ja dolomiitin mukana maahan kuitenkin päätyy epäorgaanista hiiltä, mutta sen määrä on varsin pieni maaperässä esiintyvään orgaanisen hiilen määrään verrattuna. Lisäksi karbonaattien neutraloidessa maan happamuutta karbonaattihiili poistuu maasta verrattain nopeasti hiilidioksidina, eli epäorgaanisen hiilen määrä maassa ei kasva kalkitusaineiden käytön vuoksi. Suomessa maiden kokonaishiilipitoisuus on käytännössä sama kuin orgaanisen hiilen pitoisuus, koska epäorgaanisen hiilen osuus on olematon.

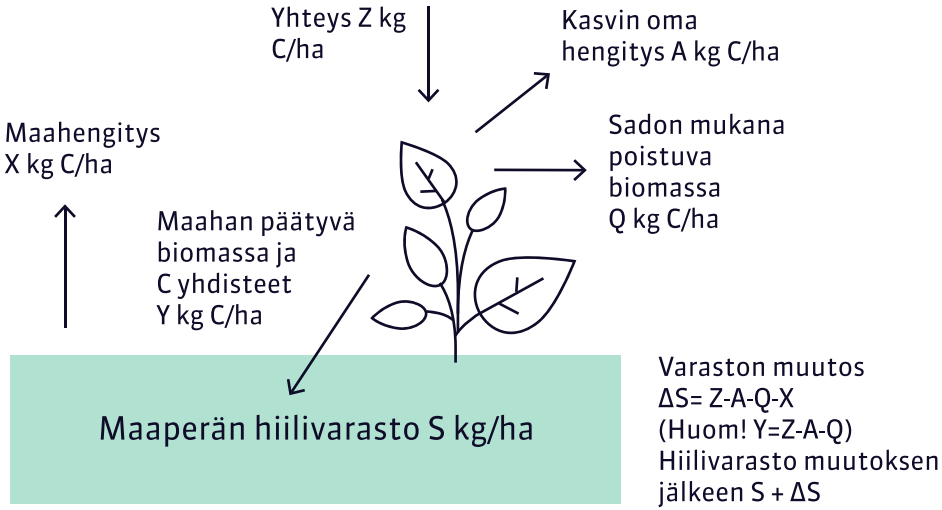
(SK)

2.3 Maaperän hiilivaraston koon ja muutoksen määritysmenetelmät

Hiilivaraston muutos ja käsitteet

Hiilivaraston ja sen muutosten arvioinnissa nousevat esiin termit biomassa, varasto, hiilinielu tai hiilensidonta, fotosynteesi (yhteyttäminen), hiilen päästö tai hiilen lähde. Näin käy, kun puhutaan maaperästä tai koko ekosysteemistä – oli se sitten metsä-, pelto- tai muu ekosysteemi. Hiilivaraston muutoksen arvioinnissa on tärkeää huomioida myös tarkastelun aikajänne, joka voi vaihdella lyhyestä vuoden aikajänteestä pitkiin satojen vuosien ajanjaksoihin. Arvioitaessa erilaisten maankäytön muutosten tai vaikkapa metsänhoitovaihtoehtojen vaikutuksia hiilivaraston suuruuteen on tarkastelun aikajänteen valinta hyvin tärkeää ja loppupäätelmien osalta ratkaisevaa.

Maataloudessa lyhyetkin aikajänteet ovat käyttökelpoisia jaksoja. Viljely on toimenpidevaltaista ja vuosittaisillakin toiminnoilla voi olla suuri merkitys hiilisyötteen määrään. Tosin varaston muutokset tapahtuvat hitaasti myös pelloilla. Kuvassa 3. esitetään hiilivaraston muutoksessa keskeiset käsitteet ja niiden merkitys.



Maaperän hiilivaraston muutos ΔS (’hiilinielu’, ‘hiilen sidonta maahan’)= Kokonaisyhteys Z – kasvien oma hengitys A – Sadon mukana poistuva hiili Q – maahengitys X (maan orgaanisen aineen hajotus)

Huom! Jos muutos on negatiivinen, maaperästä karkaa hiiltä ja maaperä on silloin hiilen lähde. Hiilitaseen määrittämisen aika-askel on malleissa usein yksi vuosi.
Huom2! Nettoyhteys (kokonaisyhteys - kasvin oma hengitys), maahengitys ja sato helpommin mitattavissa kuin maahan menevä hiili

Kuva 3. Maaperän hiilivaraston muutoksen laskentaperiaate.

(JHei)

Maanäytteet

Maaperän hiilivaraston voi määrittää ottamalla maanäytteitä ja mittaamalla näytteen hiilimäärä. Hiilivaraston suuruuden arvioinnin kannalta on ratkaisevaa kuinka hyvin otettu näyte edustaa tutkittavaa aluetta. Edustava ja satunnaistettu näytteenotto on edellytys luotettavalle hiilivaraston määritykselle. Näytteiden suuri määrä luonnollisesti lisää arvion tarkkuutta. Kun näytteitä otetaan runsaasti, hiilivarastoarvion tarkkuus kasvaa voimakkaasti ainakin noin kymmenen ensimmäisen näytteen aikana (Mäkipää ym. 2008). Mäkipää ym. (2008) selvitti miten maanäytteiden kasvava määrä lisäsi hiilivarastoarvion tarkkuutta ja heidän tutkimuksensa mukaan tarkkuus paranee ensimmäisten näytteiden jälkeen voimakkaasti, kun taas 10-20 näytteen jälkeen lisänäytteet parantavat arvion tarkkuutta vähenevässä määrin.

Otettavien näytteiden määrä ja näytteiden analysoinnista syntyvät kulut ja hyödyt onkin suunniteltava huolellisesti. Käytännön syistä, peltolohkojen luontaisen vaihtelun tasoittamiseksi, maaperäanalyysiin toimitettava näyte koostetaan lukuisista pienemmistä osanäytteistä. Tällöin saatu analyysitulos kuvaa paremmin alueen keskimääräistä tilannetta. Nykyinen täsmäviljelyteknologia hyödyntää maaperän ominaisuuksien vaihtelun, joka tulisikin saada mitattua mahdollisimman kattavasti. Digitalisaatio avaa uusia mahdollisuuksia pellon ominaisuuksien monitorointiin ja tukee työlästä maaperänäytteiden analyyseihin perustuvaa mittausta. Kokonaishiilimäärää arvioitaessa kannattaa muistaa, että pelkkä tieto orgaanisen hiilen pitoisuudesta ei riitä. Myös näytteen kuivairtotiheys on tunnettava, jotta hiilen kokonaismäärä voidaan määrittää.

Alueen näytteenottotiheyden lisäksi hiilivaraston arvioinnissa on otettava huomioon hiilen syvyysjakauma spatiaalisen vaihtelun mittaamiseksi. Usein hiilivarasto on suurin muokkauskerroksessa. Maalajista, kasvien juuristosyvyydestä sekä viljely- ja maankäyttöhistoriasta riippuen hiilimäärä voi olla merkittävä myös muokkauskerroksen alapuolella. Normaalisti viljavuusanalyysien maanäytteet otetaan muokkauskerroksesta. Tarkempien tutkimusten kannalta myös syvempien maakerrosten hiilivaraston määritys on tärkeää.

(JHei)

Kemialliset analyysit

Maaperän orgaaninen kokonaishiilimäärä voidaan määrittää mittaamalla näytteen hiilipitoisuus tarkoitusta varten suunnitellulla laitteella. Hiili- (ja typpi-) määrityksessä näyte poltetaan korkeassa lämpötilassa, jolloin näytteen koko orgaaninen hiilimäärä vapautuu. Se hapetetaan hiilidioksidiksi, jonka määrä pystytään tarkasti mittaamaan. Määritys voidaan tehdä mistä tahansa näytemateriaalista. Näytteen mahdollinen epäorgaaninen hiili (karbonaatit) ei tule määritetyksi tämän tyyppisissä analyyseissä. Se on mitattava erikseen. Karbonaattihiilen määritys perustuu siihen, että hiili vapautetaan CO_3^2 -muodosta hapon avulla, ja syntynyt hiilidioksidi määritetään. Suomalaisilla happamilla mailla karbonaattihiilen osuus kokonaishiilestä ei ole merkitsevä, mutta pH:ltaan neutraaleissa tai emäksisissä ympäristöissä epäorgaanisen hiilen osuus voi olla suuri. Kalkituksessa karbonaattihiiltä päätyy peltomaahan, mutta hiili vapautuu toimenpiteen jälkeen vähitellen takaisin ilmakehään kalsiumin jäädessä maaperään.

Maaperäanalyyseissä tehdään usein myös orgaanisen aineen määritys ns. hehkutushäviömenetelmällä. Siinä näyte poltetaan ja orgaanisen aineen määrä, joka ilmoitetaan yleensä prosentteina, on poltossa hävinneen massan osuus näytteen alkuperäisestä kuivapainosta. Orgaanisen aineen määrän avulla voidaan kohtuullisen tarkasti arvioida myös näytteen hiilimäärä. Orgaanisen aineen määrä voidaan karkeasti arvioida myös aistinvaraisesti, kuten yleensä tehdään viljavuustutkimuksissa multavuusluokituksen määrityksessä.

Hiilen kokonaismäärän arviointi on teknisesti yksinkertaista ja tarkkaa. Usein hiilen kokonaismäärä ei kuitenkaan kerro maaperän hiilestä riittävästi. Tarvitaan tarkempaa tietoa siitä, missä muodossa hiili maassa on. Esimerkiksi hiilen pysyvyyden ja pitkäikäisyyden kannalta on tärkeä tietää, onko hiili kemiallisesti helposti vai vaikeammin hajoavassa muodossa, onko se tiukasti sitoutuneena maan mineraalipartikkelien pinnoille, missä maaperän kerroksessa hiili sijaitsee jne.

Maaperän orgaanisen hiilen analyyseistä löytyy paljon lisätietoa esimerkiksi kirjasta Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (2015, Academic Press), kappaleessa 'Methods for Studying Soil Organic Matter' (kirjoittanut Claire Chenu, Cornelia Rumpel ja Johannes Lehmann).

(JHei)

Kaasunvaihto ja sitä mittaavat menetelmät

Kasvien yhteyttäessä hiilidioksidi sitoutuu ekosysteemeihin ja vapautuu takaisin ilmakehään kasvien hengittäessä sekä kuolleen orgaanisen aineen hajotessa maaperässä.

Hiilidioksidin lisäksi metaani on merkittävä kasvihuonekaasu. Metaania syntyy maaperässä hapettomissa olosuhteissa metaania tuottavien mikrobien - metanogeenien- toimesta. Maaperän metaania kuluttavat mikrobit - metanotrofit- taas pystyvät käyttämään sitä omaan aineenvaihduntaansa. Siksi hapeton maaperä on usein metaanin lähde, kun taas hapekas maaperä on metaanin nielu eli se sitoo ilmakehän metaania. Pellon, eli kasvien ja maaperän, hiilivaraston hetkellistä muutosta voidaan arvioida mittaamalla näitä pellon ja ilmakehän välisiä hiilidioksidin ja metaanin virtauksia.

Pyörrekovarianssimenetelmässä (engl. Eddy covariance) ilman kasvihuonekaasupitoisuuksia verrataan tuulen noustessa ja laskiessa. Tätä varten sekä pystysuoran tuulen nopeutta, että kasvihuonekaasupitoisuuksia mitataan hyvin tiheästi; tyypillisesti vähintään kymmenen hertsin taajuudella. Jos esim. hiilidioksidipitoisuus on keskimäärin korkeampi tuulen kulkiessa alhaalta ylös kuin ylhäältä alas, pelto on hiilidioksidin lähde. Jos taas hiilidioksidipitoisuus on alhaisempi ilman noustessa ylöspäin, pelto on hiilen nielu. Tiheä mittausaineisto käsitellään usein puolen tunnin keskimääräisiksi arvioiksi hiilen sitomisesta/vapautumisesta. Menetelmä soveltuu suurille, yhtenäisille ja tasaisille alueille. Tekniikka vaatii riittävän tuulennopeuden. Tyynellä säällä mittaus ei ole luotettava, mikä on menetelmän suurin tunnettu puute.

Kammiomenetelmässä kiinnostava kohde suljetaan kammioon, jonka sisällä mitataan kaasujen pitoisuuksien kehitystä. Niistä voidaan laskea, kuinka suuri nielu tai lähde kohde on hetkellisesti. Kasvien ja maaperän hiilivaraston hetkellistä muutosta arvioitaessa pellon pinnalle asetetaan muovinen tai metallinen matala kaulus, joka usein on paikallaan useita kuukausia tai jopa vuosia. Mittaushetkellä kauluksen päälle asetetaan kammio, jonka sisäilman pitoisuuksia mitataan useimmiten muutaman minuutin ajan.

Jos esim. hiilidioksidipitoisuus läpinäkyvässä kammiossa kasvaa, on kyseinen paikka sillä hetkellä hiilen lähde. Jos kaasun pitoisuus pienenee, on paikka sillä hetkellä hiilen nielu. Toistamalla mittaus erilaisissa ympäristöolosuhteissa voidaan löytää yhteyksiä kaasunvaihtonopeuksien ja olosuhteiden välillä ja kehittää malleja, joilla hetkellistä hiilen sidontaa ja vapautusta voi arvioida myös silloin, kun itse mittauksia ei ole tehty. Mallitusta varten on usein tarkoituksenmukaista mitata kasvien yhteytyksen sekä mikrobien ja kasvien hiilidioksidipäästöjen ympäristöriippuvuuksia erikseen.

Kammiomittausmenetelmä on yleisesti käytössä, ja se sopii erityisesti pienialaisesti vaihtelevaan maastoon ja verrattaessa erilaisia käsittelyjä, kuten esimerkiksi lannoituksen määrän vaikutuksia kasvihuonekaasuvirtoihin. Kammiot voivat olla manuaalisia eli ihmisten liikuttelemia tai täysin automatisoituja. Kammiomenetelmän tunnettuja huonoja puolia on, että mittauksen aikana se saattaa muuttaa esim. kohteen valo-, lämpötila- ja kosteusoloja.

Inkubointi- eli muhituskokeet noudattavat kammiomittauksen periaatteita. Niissä pieni maanäyte suljetaan astiaan, jonka kasvihuonekaasupitoisuuksien kehitystä seurataan. Solvitamaahengitystesti vastaa muhituskoetta, sillä siinäkin seurataan kaasunmuodostusta suljetussa astiassa. Testissä hiilidioksidipitoisuus arvioidaan indikaattorivärin avulla.

(LK)

Hiilivaraston arviointi mallien avulla

Maaperän orgaanisen hiilen mallinnuksilla on monta tehtävää. Pohjimmiltaan mallit edustavat parasta ymmärrystämme eri prosesseista ja tekijöistä, jotka määräävät kiinnostuksen kohteena olevaa olotilaa, kuten esimerkiksi maaperän hiilipitoisuutta. Vertaamalla mallituloksia mittauksiin pystymme testaamaan, kuinka hyvin käsitämme, mitä luonnossa oikeasti tapahtuu ja miten onnistumme ennustamaan myös olotiloja, joista ei ole havaintoja.

Maaperän orgaanisen hiilen mittaus on työlästä ja resursseja vaativaa, mikä luonnollisesti rajoittaa mittausten määrää. Samalla maaperän hiilipitoisuudet voivat muuttua merkittävästikin lyhyidenkin etäisyyksien välillä. Siksi malleilla on tärkeä käytännöllinen tehtävä maaperän orgaanisen hiilen tutkimuksessa. Ne mahdollistavat hiilipitoisuuksien arvioinnin laajoilta alueilta. Lisäksi mallien avulla voidaan nykyiseen tieteelliseen ymmärrykseen perustuen arvioida, miten maaperän orgaaninen hiili reagoi ilmastomuutoksiin ja maaperän käsittelyyn.

Mallit eivät luonnollisesti ole täydellisiä. Osittain se johtuu siitä, että ymmärryksessämme on aina jotain puutteita, mikä heijastuu myös luotuihin malleihin. Lisäksi varsinkin laajempaan käyttöön tarkoitetut mallit vaativat yksinkertaistuksia ja suoraviivaistuksia,

jotta laskenta-ajat pysyvät maltillisina ja sovellettavat yhtälöt voidaan ylipäätään arvioida.

Keskeinen haaste on kuitenkin tarkkojen mittausten rajallisuus. Jotta voimme käyttää malleja luotettavasti, niiden alkutilat ja malliparametrit pitää määritellä havaintojen avulla. Siksi mallikehitys nojaa yhä vahvasti hyviin mittauksiin. Mallien verifiointi tarvitsee dataa, jonka keruuta helpottavat uudet monitorointimenetelmät satelliittien ja dronien avulla.

Maanpäällinen biomassa voidaan määrittää kuva-analyysillä ilman näytteenottoa. Tämä mahdollistaa lohkokohtaisen hiilisyötteen arvioimisen, kun tiedetään mikä osa kasvillisuudesta viedään pois sadonkorjuussa. Kasvilajeille tyypillisten verso-juuri -suhteiden avulla voidaan arvioida juuristobiomassaa ja juuriston kautta menevää hiilisyötettä ilman maaperänäytteiden ottoa ja työläitä juurimittauksia.

(TV)

2.4. Tärkeitä maaperän hiilenkiertoon liittyviä prosesseja

Mikrobien hiilen käytön tehokkuus (CUE)

Mikrobien hiilen käytön tehokkuus määritellään osuutena mikrobien sisäänsä ottamasta hiilestä, jonka ne käyttävät oman biomassansa rakentamiseen (Kuva 4). Loput hengitetään ulos hiilidioksidina. Parempi hiilen käytön tehokkuus tarkoittaa pienempää hiilidioksidipäästöä maaperästä ja suurempaa mikrobiomassaan sitoutunutta hiilen määrää, joka voi lopulta sitoutua maaperän mineraaleihin mikrobien kuollessa ja siirtyä osaksi maaperän pitkäaikaista hiilivarastoa.

Teoriassa maaperän mikrobien hiilen käytön tehokkuus kasvaa, kun mikrobien typen saanti lisääntyy. Silloin mikrobien ei tarvitse kuluttaa hiiltä sellaisten entsyymien valmistamiseen, jotka vapauttavat typpeä hajottamalla monimutkaisia orgaanisia yhdisteitä. Tämä liittyy ns. priming -ilmiöön.

Joissain tutkimuksissa Keski-Euroopassa on havaittu mikrobien hiilen käytön tehokkuuden olevan 1,3-1,5 kertainen typpilannoitetuilla nurmiruuduilla lannoittamattomaan verrattuna (Spohn et al. 2016, Poeplau et al. 2019). Joidenkin tutkimusten mukaan hiilen käytön tehokkuus on suurempi sienivaltaisissa yhteisöissä kuin bakteerivaltaisissa. Siis, jos mineraalityppilannoitus vähentää sienten ja sienijuurien määrää maassa, se voi myös vaikuttaa hiilenkäytön tehokkuutta pienentävästi. Vertailevaa tutkimusta mineraalitypen ja orgaanisen typen (esim. erilaiset kierrätyslannoitteet) vaikutuksista mikrobien hiilen käytön tehokkuuteen ei vielä ole tehty. Myös tutkimuksia pohjoisista oloista on vähän.

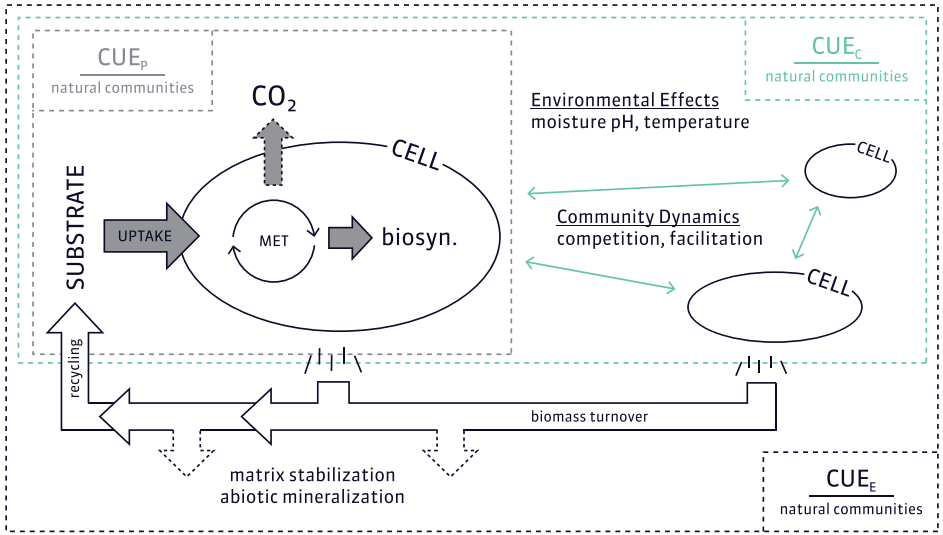
Uudet tulokset (Poeplau et al. 2019) kuitenkin viittaavat siihen, ettei maaperän hiilimääriä pystytä mallintamaan pelkästään hiilisyötteen perusteella. Myös mikrobien anabolialla on tärkeä vaikutus (anabolia = prosessi jossa mikrobit tuottavat monimutkaisempia yhdisteitä solujensa rakenneosiksi yksinkertaisemmista rakenneosista). Suurempi mikrobiyhteisön hiilen käytön tehokkuus voi johtaa pitkällä aikavälillä myös suurempaan maaperän hiilivarastoon. Siihen paljonko kuolleesta mikrobibiomassasta jää pysyvästi maahan

hiiltä vaikuttavat kuitenkin myös muut tekijät, jotka kontrolloivat hiilen stabiloitumista maassa. Näitä ovat mm. maaperän mineraalikoostumus, partikkelikokojakauma ja murujen muodostus.

Orgaanisten aineiden lisäykset maahan voivat myös vaikuttaa mikrobien hiilen käyttötehoon. Esimerkiksi eräässä tutkimuksessa biohiilen lisäys pienissä määrissä (1-5 % lisäys maan kuivapainosta) paransi mikrobien hiilen käytön tehokkuutta. Sen ajateltiin johtuvan parantuneesta hapen saatavuudesta mikrobeille (Jiang et al. 2016). Toisaalta biohiilen lisäyksen on suurina määrinä (10 % maan kuivapainosta) havaittu pienentävän mikrobien hiilen käytön tehokkuutta. Se johtuu todennäköisesti maaperän kasvavasta hiili-typpi -suhteesta ja mikrobien pienentyneestä typen saatavuudesta. Tai se johtuu siitä, että biohiili pidättäessään typpeä pinnoilleen vähentää sen saatavuutta mikrobeille (Cheng et al. 2017).

Mikrobien hiilen käytön tehokkuus riippuu myös maaperän abioottisista ympäristötekijöistä, kuten kosteusolosuhteista sekä pH:sta. Erilaisten orgaanisten aineiden lisäysten vaikutusta voi olla vaikea ennustaa etukäteen, koska mikrobien toimintaan vaikuttavat tekijät saattavat vaihdella suuresti maiden välillä. Mikrobien hiilen käytön tehokkuuden tärkeys hiilivaraston muodostumiselle on nyt kuitenkin tunnustettu. Tiede tuottaa lähitulevaisuudessa varmasti myös käytäntöön soveltuvaa tietoa siitä, miten mikrobien hiilen käytön tehokkuuteen voidaan vaikuttaa maatalousmaiden käsittelyn avulla (Kallenbach et al. 2019). Esimerkiksi hiilisyötteen ajallinen ja laadullinen monimuotoisuus monipuolisten viljelykiertojen kautta voi auttaa ylläpitämään monimuotoista ja myös hiilen käytöltään tehokasta mikrobiyhteisöä.

Aiheesta tarvitaan lisää perustutkimusta ennen kuin käytännön suosituksia mikrobien hiilen käytön tehokkuuden muokkaamiseksi voidaan antaa. Tällä hetkellä epävarmuuksia on vielä niin paljon, ettei tietyn maatalousmaan käsittelyn muutoksen vaikutusta mikrobien hiilen käytön tehokkuuteen voida tarkasti ennustaa.



Kuva 4. Mikrobien hiilen käytön tehokkuus määritellään osuutena mikrobien sisäänsä ottamasta hiilestä, jonka ne käyttävät oman biomassansa rakentamiseen. (Geyer., K.M. et al. 2016.)

(KKa)

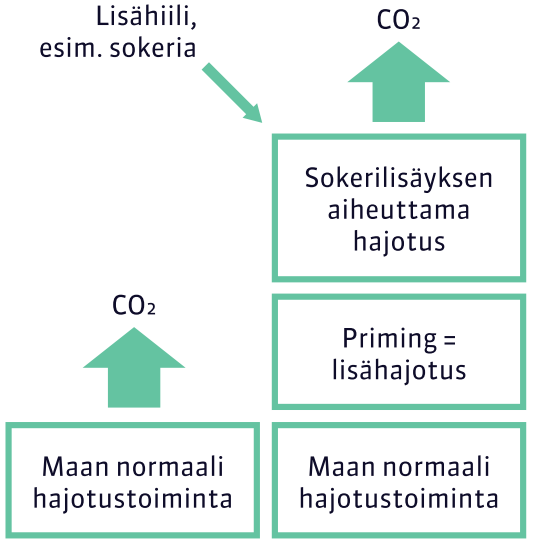
Priming-ilmiö

Priming-ilmiö tarkoittaa, että maahan päätyvä helppokäyttöinen hiili, kuten yksinkertaiset sokerit, lisää maan hajotustoimintaa. Ilmiö perustuu siihen, että helppokäyttöiset hiiliyhdisteet ovat

suoraan mikrobien käytössä. Mikrobien on mahdollista tuottaa energiataloudellisesti ”kalliita” entsyymejä. Niiden avulla mikrobit saavat voimaa lisähajotukseen.

Priming-ilmiötä esiintyy erityisesti ympäristöissä, joissa mikrobeilla on vaikeuksia saada tarpeeksi energiaa helposti saatavilla olevista hiiliyhdisteistä, mutta joissa ravinteita esiintyy sellaisessa muodossa, että niiden vapautuminen vaatii hajotustoimintaa. Ilmiö on erityisen selvä metsämaissa, joissa minimiravinne typpi on tiukasti sitoutuneena orgaaniseen ainekseen ja vaatii vapautuakseen hajotustoimintaa.

Joissakin tilanteissa lisähiili voi myös vähentää maaperän hajotustoimintaa, jolloin puhutaan negatiivisesta primingista. Näin voi käydä silloin kun maaperän mikrobiston toimintaa rajoittavat ravinteiden sijaan itse hiiliyhdisteet. Tässä tapauksessa lisähiili lisää kilpailua ravinteista ja maan muu mikrobitoiminta ja orgaanisen aineen hajotus hidastuu. Kasvien kasvukin voi ainakin hetkellisesti heiketä mikrobien luoman ravinnekilpailun takia. Juuriston kautta maahan päätyvien hiiliyhdisteiden aiheuttamaa lisähajotusta kutsutaan juuristo-primingiksi (rhizosphere priming effect, RPE). Maahan päätyvän hiilen aiheuttama lisähajotus, vapautuvien ravinteiden vauhdittama kasvien parantunut kasvu sekä mikrobien pysyvöittämän hiilen määrä muodostaa vastavoimia, joiden tase vaikuttaa kasvaako hiilen määrä maassa vai ei.



Kuva 5. Esimerkki (positiivisesta) priming-ilmiöstä, jossa sokerilisäys maahan lisää maaperän hajotustoimintaa. Palkkien korkeus kuvaa hiilidioksidipäästön (CO2) suuruutta eri prosesseissa.

(JHei)

Mikrobihiilipumppu

Viime vuosina maaperän hiilivaraston tutkimuksessa on esitetty uusi teoria maaperän pysyvän hiilen muodostumisesta. Sen lisäksi, että hajotessaan kasvimateriaalista jää maahan vaikeammin hajoavia yhdisteitä, uuden teorian mukaan iso osa maaperän pitkäikäisistä ja pysyvistä hiiliyhdisteistä olisikin mikrobien oman biomassan jäänteitä.

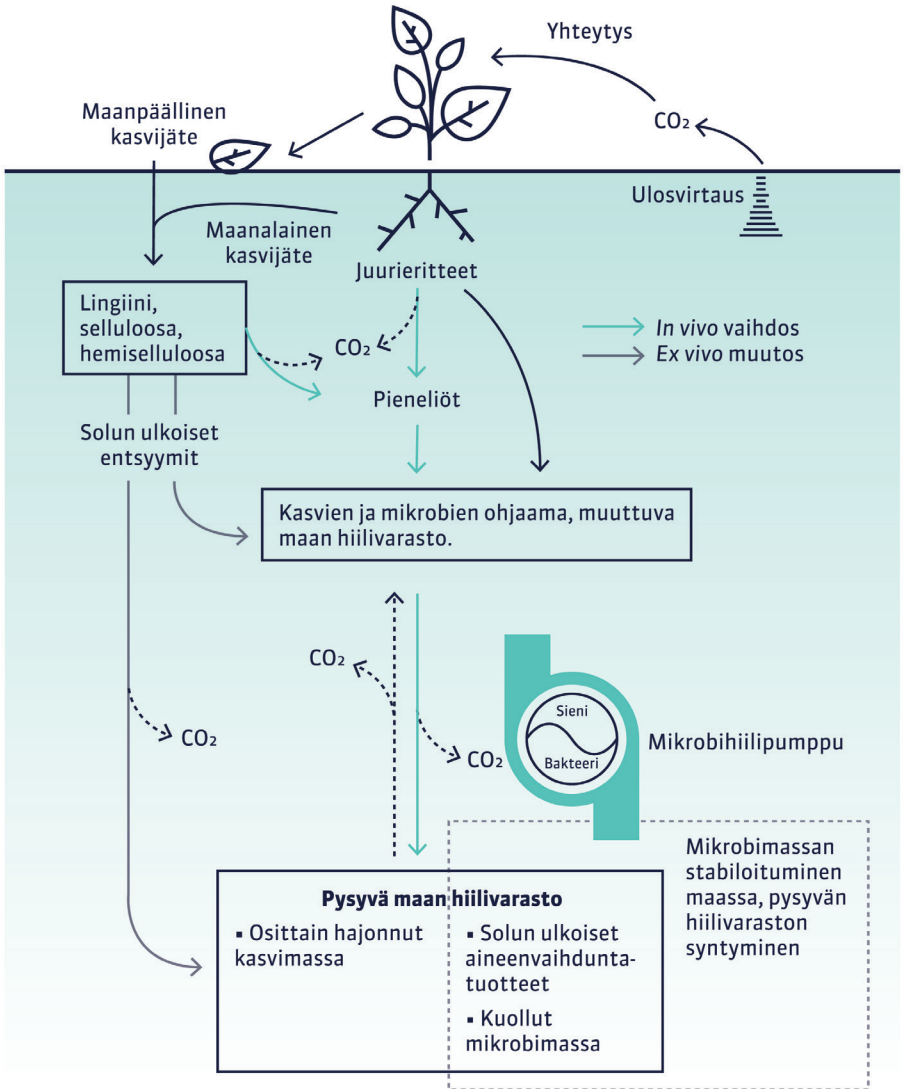
Mikrobien hiilen käytön tehokkuus vaikuttaa niiden kykyyn muodostaa omaa biomassaa energiayksikköä kohti. Teorian mukaan

tämä syntynyt biomassa päätyy maahan myöhemmin, kemiallisesti erilaisena kuin alkuperäinen hajotettava kasvimateriaali.

Mikrobien hajoamistuotteiden tai mikrobien erittämien aineiden on osoitettu vaikuttavan myös maan mururakenteeseen. Mikrobihiilipumpputeoriaa tutkitaan aktiivisesti ympäri maailmaa. Lähivuosina teorian todenperäisyys ja merkittävyys saa lisää todistuspohjaa uudesta tutkimustiedosta.

Kuvan vasemmalla puolella kuollut kasviaines hajoaa mikrobien tuottamien entsyymien avulla joko hiilidioksidiksi tai mikrobien ravinnoksi. Hajoamaton osa päätyy maaperän pysyväksi orgaaniseksi aineeksi. Kuvan oikealla puolella mikrobihiilipumppu (MCP) muokkaa osan mikrobibiomassasta osaksi maan pysyvää hiilivarastoa.
Se kuinka suuri osa mikrobien käyttämästä hiilestä päätyy niiden omaan biomassaan ja pysyväksi hiileksi maahan riippuu mikrobien hiilen käytön tehokkuudesta, ja se kuinka paljon mikrobit aiheuttavat ns. priming-vaikutusta maassa (ks. edellinen kappale) määrittelee tasapainon ja maan hiilivaraston muutoksen suunnan.

(JHei)



Kuva 6. Mikrobihiilipumppu.

Hiilen saturaatio maaperässä

Viljelyjärjestelmässä, jonka ominaisuuksina ovat tietty ilmasto, maalaji ja viljelymenetelmät, maan orgaanisen hiilen pitoisuus saavuttaa tasapainotilan (steady state, equilibrium) vuosikymmenten-vuosisadan aikana (Smith 2004; West & Six 2007). Maan orgaanisen hiilen pitoisuus noudattaa vähenevän lisätuoton periaatetta. Siis mitä enemmän hiiltä lisätään (kumulatiivisesti), sitä vähemmän lisätystä hiilestä sitoutuu maahan. Mitä kauempana systeemi on tasapainotilasta, sitä voimakkaammin hiiltä sitoutuu, tai vapautuu, aikayksikköä kohden. Tasapainotilassa hiilivarasto ei muutu. Tällöin hiilisyöte vastaa päästöä.

Verrattaessa eri viljelyjärjestelmien hiilensidontakykyä lisäämällä hiilen lisäysmäärää, voi vaste eli maan hiilivaraston muutos käyttäytyä joko lineaarisesti kasvaen, eli yhtä paljon kutakin lisättyä yksikköä kohden, tai epälineaarisesti, kasvaen vähenevästi tai voimistuvasti kutakin lisättyä yksikköä kohden. Jos vaste on lineaarinen, olisi maan hiilensidontakapasiteetti rajaton. Jos taas vaste on epälineaarinen, on maan hiilensidontakapasiteetti rajallinen. Tällöin maa kyllästyisi hiilestä tietyn vuosittaisen lisäysmäärän jälkeen. Tätä kutsutaan saturaatioksi. Saturoituneessa systeemissä hiilen lisäysmäärän kasvattaminen ei enää kasvata hiilivarastoa.

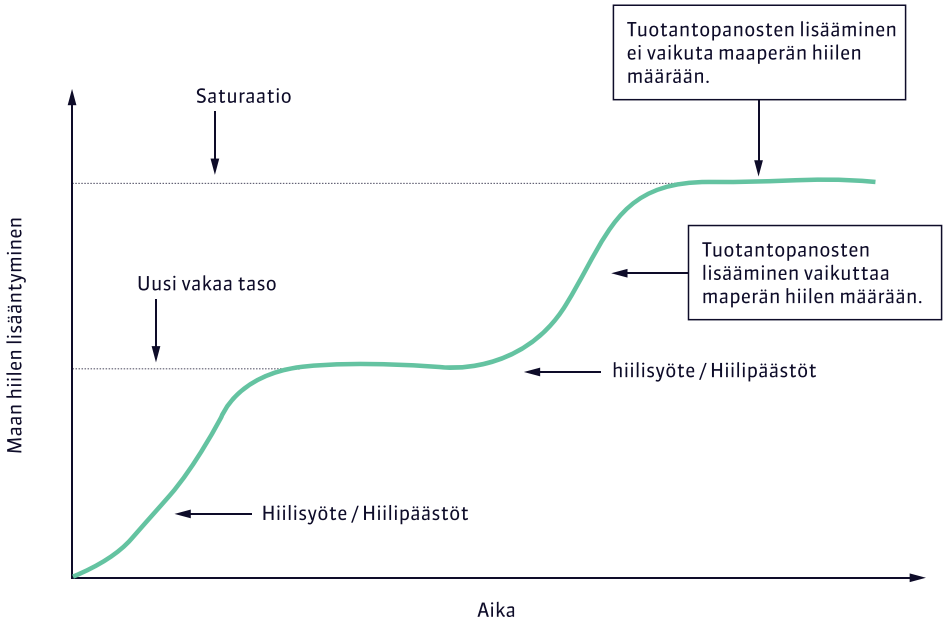
Tasapainotaso on aina systeemin, tässä tapauksessa tietyn viljelyjärjestelmän, ominaisuus. Tasoon voidaan vaikuttaa muuttamalla viljelykäytäntöjä, jotka vaikuttavat systeemiin kohdistuviin hiilisyötteisiin tai orgaanisen aineksen hajoamiseen. Esimerkiksi maan muokkausta keventämällä voidaan vähentää orgaanisen aineksen hajotusta maaperässä.

Osa lisätystä hiilestä päätyy hyvin suojattuun muotoon maan savimineraaleihin. Kun mineraalipinnat ovat täyttyneet, maa on hiilisaturoitunut. Hiilivarastoa voidaan lisätä tämän jälkeenkin, mutta lisätty hiili hajoaa aiempaa nopeammin ja hiilivarasto on herkempi nopealle laskulle.

Saturaatio ilmenee usein pintamaassa, johon hiilen syöte voimakkaimmin kohdistuu. Näin ollen hiilivarastoa voidaan kasvattaa kohdistamalla hiilisyötettä syvemmälle saturoitumattomiin maakerroksiin esimerkiksi syväjuuristen kasvien avulla. Hiilisaturoitunutta maan pintakerrosta voitaisiin myös laimentaa muokkaamalla sitä vähähiilisen pohjamaan kanssa, mutta tällöin häiritään maan pieneliötoimintaa, mikä voi tietyissä oloissa vaikuttaa kokonaisuutena negatiivisesti maan kasvukuntoon ja hiilensidontaan.

Orgaaninen hiili pidättyy maahan kolmen päämekanismin avulla: kemiallisesti muodostaen yhdisteitä mineraalien kanssa, fysikaalisesti suojautumalla savimineraaleihin sekä biokemiallisesti mikrobien muodostaessa pitkäketjuisia hiiliyhdisteitä ja mikrobimassaa (Six et al. 2002). Savimineraaleissa hiili on suojassa hajotukselta ja nämä yhdisteet muodostavat kestäviä muruja. Näin ollen savimailla on karkeita kivennäismaita suurempi kyky varastoida hiiltä.

2. Johdanto



Kuva 7: West, T.O. & Six, J. (2007): Climatic Change, vol. 80:25–41 DOI 10.1007/s10584-006-9173-

(JJ)

3. Maaperän hiilivarasto maataloudessa

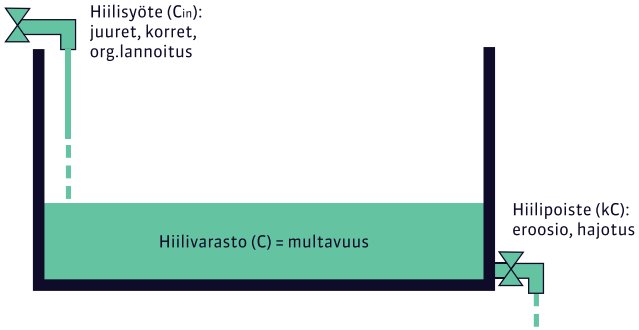
Maatalousmaat ovat merkittäviä hiilivarastoja. Niiden onnistunut ylläpito edellyttää tietoa, pureutumista asiaan, tekemistä ja tahtoa ajatella asioita vastuullisesti myös tulevaisuuteen. Hyviä ratkaisuja kannattaa siis etsiä ja jakaa.

3.1 Perustiedot hiilitaselaskennasta maatiloilla

Hiilivaraston lisäämistä voi ajatella yksinkertaisena taseena, tai ”paljumallina” (Kuva 8). Jos maaperään lisätään enemmän hiiltä kuin sieltä poistuu, varastot kasvavat. Jos oletetaan, että hajoamisnopeus riippuu suoraviivaisesti hiilivaraston koosta, tämä malli voidaan kirjoittaa yhtälönä:

$$dC/dt = Cin - k\,C \qquad (1)$$

missä dC/dt = hiilivaraston C hetkellinen muutos
C = hiilivaraston koko
Cin = hiilisyöte
k = hiilivaraston hajoamisnopeus



Kuva 8. Yksinkertainen ”paljumalli” hiilivaraston muutoksista: hetkellinen varastomuutos muodostuu hiilisyötteen ja hiilipoisteen erotuksena.

Muutosta voidaan tarkastella eri ajanjaksoina. Joissain simulaatiomalleissa (esim. Daycent) tarkasteluvälinä on päivä, jolloin voidaan huomioida tarkasti kasvuolojen, kosteuden ja lämpötilan vaikutukset hajoamiseen ja hiilisyötteeseen. Tässä tarkastelussa asiaa katsotaan pitkällä aikavälillä, useiden vuosien aikana. Jos oletetaan, että hiilisyöte pysyy keskimäärin samana eikä hajoamisnopeus muutu, voidaan mallintaa erilaisia hiilivaraston tilanteita (Kuva 9).

Jos tarkastelu tehdään hiiliyksiköissä, maaperän multavuus pitää muuttaa hiileksi. Jos maan multavuus on 4 % ja orgaanisesta aineesta 58 % on hiiltä, maan hiilipitoisuus on 2,3 % C. Jos tarkasteltavana on 20 cm ruokamultakerros hehtaarin alueella, sen tilavuus on 2000 m3. Tämä pitää muuttaa vielä painoksi. Jos maan irtotiheys on 1,3 kg/l, hehtaari painaa 2600 tonnia ja siinä on hiiltä 2,3 % eli 59,8 t C/ha. Jos tästä hajoaa vuosittain 1 %, se vastaa 598 kg C/ha.
Jos hiilisyöte on tätä pienempi, multavuus laskee vähitellen, kunnes hajoaminen vastaa hiilisyötettä.

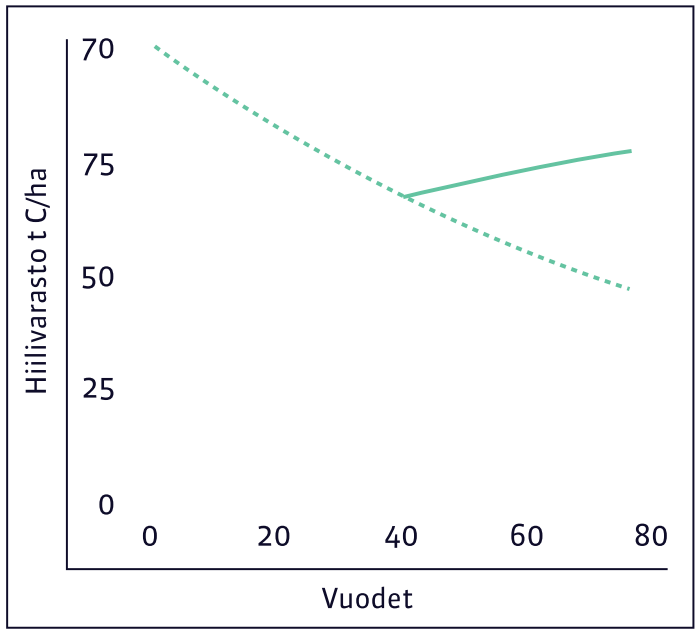
Kutakin hiilisyötettä vastaavan hiilivaraston koon voi laskea kaavalla 1, kun muutos asetetaan nollaksi:

$$dC/dt = 0 = Cin - k\,C$$
$$\leftrightarrow Cin = k\,C$$
$$\leftrightarrow C = Cin / k$$

Esimerkiksi 300 kg C/ha hiilisyöte 1 % hajoamisnopeudella voi ylläpitää 0,3 t C/ha : 0,01 = 30 t C/ha hiilivarastoa. Jos hajoamisnopeus

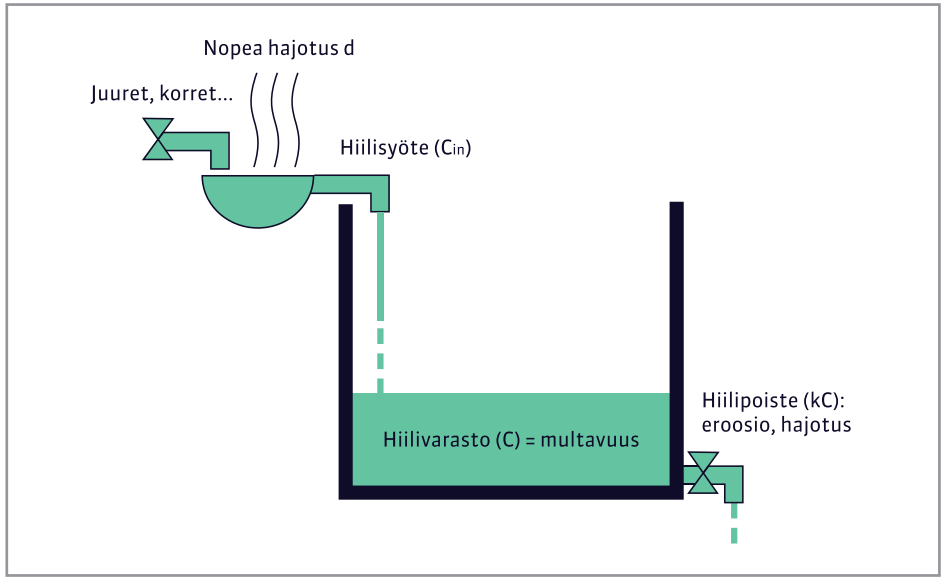
puolitetaan tai hiilisyöte tuplataan, ylläpidettävissä oleva hiilivarasto kaksinkertaistuu. Kun hajotus vastaa hiilisyötettä, järjestelmän sanotaan olevan dynaamisessa tasapainotilassa (steady state).

Kun hiilisyötteessä tai hajoamisessa tehdään muutoksia, järjestelmä ei päädy välittömästi tasapainotilaan. Muutos voi kestää vuosikymmeniä (Kuva 9). Kun maaperän hiilitase on positiivinen ja hiilivarastoa kertyy, pelto toimii hiilinieluna. Kun pelto on saavuttanut uuden tasapainotilan hiilisyötteen ja hajoamisen suhteen, hiilen kertyminen loppuu.



Kuva 9. Kuvitteellinen tilanne, jossa hiilisyöte on alussa paljon pienempi kuin hajoaminen (1 % vuodessa), mutta vuoden 40 kohdalla hiilisyöte nostetaan kaksinkertaiseksi hajoamiseen nähden.

Yhden paljun malli on liian yksinkertainen. Tilannetta voi tarkastella paremmin, kun paljuun tulevalle vesimäärälle oletetaan esilämmitin, joka haihduttaa osan sisään tulevasta vesimäärästä (Kuva 10). Maaperätilanteessa ”esilämmitin” kuvaa maahan lisätyn orgaanisen aineen nopeaa hajoamista (d). Orgaanisen aineen laadusta ja maaperän olosuhteista riippuen 20-80 % lisätystä aineesta hajoaa hyvin nopeasti (1-4 vuoden aikana), jolloin sen sisältämä hiili palaa ilmakehään. Hitaasti hajoavaa osuutta on perinteisesti kutsuttu ”humustuneeksi”, jolloin eri aineiden humustumiskerroin = 1 – d. Maanpäällisten kasvintähteiden humustumiskerroin on alhainen, noin 20 %, juurilla ja juurieritteillä se on noin 40 %, lannalla noin 35 %, kompostilla noin 40 % ja biohiilellä noin 80 % laskettuna alkuperäisestä lisäysmäärästä (ks. osio 3.2).



Kuva 10. Kahden paljun malli

Kahden paljun malli huomioi sen, että vain pieni osa maahan lisätystä orgaanisesta aineesta päätyy maaperän hitaammin hajoavan orgaanisen aineen syötteeseen. Loput hajotetaan nopeasti. Syöte hitaammin hajoavaan osuuteen voidaan silloin laskea kaavalla (2):

$$Cin = Y \times (Ea \times (1-da) + Eb \times (1-db)) + m \times (1-dm) \quad (2)$$

missä Y = korjattu sato (hiilenä)

Ea,b = maanpäällisen (a) ja maanalaisen (b) kasvuston biomassalaajennuskertoimet, eli paljonko tiettyä korjatun sadon yksikköä kohden muodostuu maanpäällisiä kasvintähteitä, juuria ja juurieritteitä

da,b,m= nopeasti hajoava osuus maanpäällisestä (a), maanalaisesta (b) ja lannoituksen mukana lisätystä (m) orgaanisesta aineesta

m = lannoituksen mukana lisätty hiili

Taulukko 1. Eri kasvien biomassalaajennuskertoimet korjatun sadon ja kasvintähteiden sekä juurien ja juurieritteiden määrille kasvihuonekaasuinventaarion mukaan. Korjattu satomäärä kerrotaan taulukon kertoimilla jolloin saadaan arvio kasvintähteiden, juurten ja juurieritteiden määrästä. Kasvihuonekaasuinventaariosta poiketen kertoimet on säädetty jo valmiiksi kuivatun sadon mukaisesti (14 % kosteus), paitsi nurmien osalta käytetään kuiva-ainesatoa.

	Maanpäälliset kasvintähteet	Juuristo	Juurieritteet
Kevätviljat	0,76	0,29	0,11
Syysviljat	1,29	0,38	0,16
Herne	0,86	0,34	0,14
Kevätöljykasvit	1,71	0,52	0,21
Peruna	0,18	0,08	0,03
Sokerijuurikas	0,11	0,06	0,03
Heinänurmi (kuivapaino)	0,19	vakio 1,15 t/ha/vuosi	vakio 1,65 t/ha/vuosi
Säilörehunurmi (kuivapaino)	0,19	vakio 1,15 t/ha/vuosi	vakio 1,65 t/ha/vuosi

Yksinkertaisenkin hiilimallin avulla voidaan hahmotella erilaisia tilanteita. Suomalaisilla peltomailla multavuus on ollut keskimäärin 6 % 1970-2000 luvun seurannoissa (Heikkinen ym. 2013). Jos 1 % tästä hajoaa, hiilivaraston ylläpitoon tarvitaan 900 kg C/ha/vuosi hiilisyöte. Keskimääräisellä ohrasadolla (3,5 t/ha) kasvintähteitä muodostuu 2,7 t/ha maan päälle ja 1,4 t/ha maan alle. Kasvintähteissä oletetaan olevan hiiltä 45 %, joten hiilisyöte on 45 % x (20 % x 2,7 t/ha + 40 % x 1,4 t/ha) = 498 kg C/ha eli noin 500 kg C/ha. Koska hiilisyöte on alempi kuin hajoaminen, hiilivarasto pienenee. Erotuksen perusteella pienentymä on noin 900 kg C/ha/vuosi - 500 kg C/ha/vuosi = 400 kg C/ha/vuosi.

Keskimäärin hiilipitoisuus vähenee hitaammin, koska kaikki Suomen pellot eivät ole ohramonokulttuurissa, ja osalle pelloista käytetään myös orgaanista lannoitusta. Laskelma voidaan tehdä myös toisinpäin, laskemalla, kuinka suuren multavuuden ylläpitoon ohrasadon hiilisyöte riittää. 500 kg C/ha/v : 1 % hajoaminen = 50 t C/ha = 3,3 % multavuutta. Viljelijöille tutumpina multavuusluokkina ilmaistuna ohramonokulttuuri laskee pellon multavuuden vähitellen runsasmultaisesta (6-12 % hehkutuskevennys) vähämultaisen ja multavan rajalle (3 % hehkutuskevennys). Jotta peltoa saataisiin ylläpidettyä runsasmultaisena, tarvittaisiin keskimäärin 6,5 t/ha satotaso tai täydentävää orgaanista lannoitusta 500 kg C/ha/vuosi.

Edelllisessä laskelmassa ei otettu huomioon eroosiota. Eroosion määrä vaihtelee lohkokohtaisesti, alhaisen eroosioriskin lohkoilla se on alle 1 t/ha, korkealla eroosioriskillä se voi olla luokkaa 10-20 t/ha/vuosi. Korkealla 10 t/ha eroosiotasolla ja 6 % multavuudella hiiltä poistuu pellolta 10 000 kg/ha/vuosi x 6 % x 58 % = 350 kg C/ha/vuosi. Käytännössä eroosion myötä poistuu hienojakoista pintamaata, jossa multavuus voi olla moninkertainen keskimääräiseen maahan verrattuna, joten poistuma voi olla vielä tätä suurempi. Jos eroosio on merkittävää, sen hillintä on ensimmäisiä toimenpiteitä hiilivaraston säilyttämisessä ja kasvattamisessa.
Huom! 10 t/ha vastaa alle millimetrin ohenemaa vuodessa ruokamultakerroksen paksuudessa. Sitä on erittäin vaikea havaita ”muistinvaraisesti”.

Eroosioriskejä ja hiilisyötettä voidaan kohentaa kerääjäkasveilla. Jos hyvin onnistuneen kerääjäkasvin maanpäällinen kuiva-ainesato on 2 t/ha, juuristoa ja juurieritteitä voi olla suunnilleen saman verran. Tällöin kerääjäkasvin hiilisyöte maaperään olisi (2 t/ha x 20 % + 2 t/ha x 40 %) x 0,45 t C/t = 540 kg C/ha. Vuosittain käytettynä hyvin onnistunut kerääjäkasvi riittää ylläpitämään multavuuden runsasmultaisena myös kevätviljapelloilla.

Nurmipelloilla hiilisyötteen ajatellaan olevan merkittävästi suurempaa kuin viljapelloilla. Kasvihuonekaasuinventaarion oletuskertoimilla 6 t/ha kuiva-ainesadolla maanpäällisiä kasvintähteitä jää 1,14 t/ha ja juuria ja juurieritteitä 2,8 t/ha/vuosi. Kun huomioidaan hajoaminen ja hiilipitoisuus, hiilisyöte on noin 600 kg C/ha/vuosi. Jos nurmi niitetään lyhyeen (vähän kasvintähteitä) ja sen juuristo on heikko (juuriston määrän ja maanpäällisen sadon suhde alle 1), hiilipitoisuudet laskevat myös nurmipelloilla, mikä vastaa myös pitkäaikaisseurannan tuloksia (Heikkinen ym. 2013).

Nurmissa on kuitenkin merkittävästi vaihtelua ja kasvihuonekaasuinventaarion luvut eivät edusta kaikkia tilanteita. Monissa kansainvälisissä tutkimuksissa juuriston ja maanpäällisen kasvuston suhteeksi on saatu yli 1,5, jolloin 6 t/ha sadolla juuriston määrä olisi 9 t/ha, juurieritteiden 3,7 t/ha ja hiilisyötteen (samalla oletuksella maanpäällisistä kasvintähteistä) noin 2400 kg C/ha/vuosi, jos juuristo uusiutuisi vuosittain. Laskelma havainnollistaa nurmien hiilensidontaan liittyvää vaihtelua ja nurmien juuriston kasvun tärkeyttä. Nurmien avulla suurin hiilisyöte saadaan, kun kasvibiomassa käytetään ”viherlannoitukseksi”. Tällöin maanpäällinen kasvusto niitetään ja yksivuotisten viherlannoituksen osalta myös juuristo päätyy vuosittain hiilisyötteeksi maaperään. Jos viherlannoituksella saadaan 2000 kg C/ha hitaammin hajoavaa hiiltä maaperään, sillä voidaan ylläpitää hiilivaraston vähenemistä runsasmultaisella pellolla 2-3 kevätviljavuoden ajan.

Edellä on käsitelty kivennäismaita. Eloperäisillä pelloilla multavuutta voi olla 20-40 % tai jopa enemmän. Tällöin samalla

1 % hajoamisnopeudella hiilipoiste on 3000-6000 kg C/ha/vuosi, mikä vastaa hyvin kasvihuonekaasuinventaariossa käytettyjä lukuja turvepeltojen hiilikadolle. Hiilivaraston ylläpito viljan kasvintähteillä vaatisi noin 22-44 t/ha viljasadon. Eloperäisillä mailla hiilivaraston ylläpito hiilisyötettä lisäämällä onkin mahdotonta, joten hiiliviljelytoimenpiteet kannattaa kohdentaa hiilivaraston hajoamisen hillitsemiseen. Keinoja ovat mm. pohjaveden pinnan nosto, maaperän pitäminen kasvipeitteisenä ja viileänä.

Edellä esitetyssä yksinkertaisessa laskutavassa on monia rajoitteita. Eri muuttujien arviointi on vaikeaa ja kansainvälisten tutkimusten soveltaminen suomalaisiin oloihin ei ole suoraviivaista. Myöskin koko monimutkainen maaperäekologia pelkistetään kahdeksi hajoamiskertoimeksi. Todellisuudessa esimerkiksi erilaisten selkärangattomien rooli kasvintähteiden hajotuksessa on merkittävä ja nopeuttaa kasvintähteiden hajoamista selvästi. Lisäksi maalaji vaikuttaa merkittävästi hajoamiseen ja hiilen kertymiseen (savipitoisuus ja mururakenne). Yksinkertaisen mallin avulla saa kuitenkin suuruusluokkia ja eri tekijöiden vuorovaikutuksia selville, myöhempien kappaleiden avulla voi pohtia keinoja vaikuttaa hajoamisnopeuteen tai hiilisyötteeseen.

(TM)

3.2 Hiilivaraston muutokseen vaikuttavat tekijät maataloudessa

Viljelymenetelmillä ja tuotetun biomassan määrällä on keskeinen vaikutus siihen, miten peltomaan hiilivarasto muuttuu: väheneekö se vai lisääntyykö se. Viljelymenetelmien vaikutuksista on kerrottu lisää seuraavassa kappaleessa ja pääpiirteet vaikuttavista tekijöistä jäljempänä.

Kasvilajit ja –lajikkeet

Eri kasvilajeilla ja –lajikkeilla on suoria ja epäsuoria vaikutuksia hiilivaraston suuruuteen. Tietyt kasvilajit ovat vaativia viljellä, ja niiden viljely kuormittaa erityisen voimakkaasti maaperää. Esimerkiksi perunan viljelyn on havaittu pitkällä aikavälillä johtavan helposti maan orgaanisen aineen vähenemiseen, kun taas nurmiviljelyn tiedetään parantavan maan kasvukuntoa ja ylläpitävän tai kasvattavan hiilivarastoa. Keskeisenä tekijänä on lajien verso-juuri -suhteet ja biomassan kemiallinen koostumus, joka vaikuttaa hajoamisen nopeuteen ja hiilisyötteen pysyvyyteen. Itse viljelykasvin lisäksi oheiskasvien (alus- ja kerääjäkasvit) ominaisuudet ovat merkityksellisiä maan hiilensidonnan näkökulmasta.

Juuribiomassan ja juuristomikrobien kautta syntyvän kasvustotähteen jakautuminen maaprofiilissa on suurempaa ja tasaisempaa, jos kasvustossa on mukana syväjuurisia kasveja. Kasvilajien monimuotoisuuden on osoitettu lisäävän myös maaperän mikrobien monimuotoisuutta. Sillä taas on yhteys parempaan mururakenteeseen ja pysyvien hiiliyhdisteiden syntyyn. Myös saman lajin eri lajikkeiden yhteisviljelyn on osoitettu lisäävän maaperän monimuotoisuutta ja sen myönteisiä seurannaisvaikutuksia.

(JHei)

Lannoitus

Lannoituksen ja maan hiilivaraston välillä on kaksijakoinen yhteys. Ensinnäkin, riittävä, kasvin tarpeen mukainen ja tasapainoinen lannoitus on perusedellytys, jotta viljeltävä kasvi tuottaa toivotun, hyvälaatuisen sadon ja hyödyntää kasvukauden kasvupotentiaalin. Biomassassa on noin 40 % hiiltä (kuiva-aineessa). Jokainen kilo kasviainesta vaatii pää- ja hivenravinteita oikeassa suhteessa, esimerkiksi fosforia 3-4 mg/kg kasvilajista riippuen. Erilaiset ravinnepuutteet heikentävät kasvien kasvua ja sitä kautta vähentävät ilmakehästä sidottavan hiilidioksidin määrää. Lannoituksella on siis suuri merkitys peltoon päätyvän orgaanisen aineen kokonaismäärälle.

Toiseksi, lannoitus vaikuttaa merkittävästi maaperän mikrobiologiaan. Kasvien kanssa vuorovaikutuksessa ja etenkin symbioosissa elävät hyödylliset mikrobit (kuten keräsienet eli AM-mykorritsat) ovat hyödyllisimmillään silloin, kun kasvi elää ravinteiden suhteen niukkuudessa. Mikrobit voivat edistää kasvin ravinteiden ottoa saaden kasvilta vastavuoroisesti hiiliyhdisteitä energianlähteekseen. Esimerkiksi keräsienet ovat tunnettuja kyvystään parantaa kasvin fosforinottoa.

Ylimitoitettu lannoitus vähentää tai poistaa kokonaan mikrobien vuorovaikutteisen merkityksen ja vähentää kasvin niille kohdentaman hiilen määrää ja hyötymikrobien biomassaa. Tarkasti mitoitettu lannoitus sen sijaan hyödyttää yhtä lailla kasveja sekä hajotukseen keskittyviä mikrobeja. Molemmille on eduksi saada ravinteita helposti käyttöönsä. Ravinteet joita kasvi ei saa, tai ehdi, hyödyntää edistävät siis hajotustoimintaa ja hiilen vapautumista takaisin ilmakehään. Peltomaan hiilivaraston kannalta onkin erittäin tärkeää optimoida lannoitustasot huolella, välttää ylilannoitusta ja korjata ravinnepuutokset etenkin hivenravinteiden osalta. Niukat ravinnevarat johtavat samanlaisten mekanismien käynnistymiseen kuin luonnonekosysteemeissä, joissa luontaisesti on viljelymaita suurempi maaperän hiilivarasto.

Suomen maaperä on luontaisesti hapan, mutta viljelykasvimme ja monet hyötymikrobit suosivat olosuhteita, joissa pH on lähellä neutraalia. Myös ravinteiden saatavuus muuttuu pH:n muuttuessa, joten maan happamuuden hallinta on oleellinen osa kasvukunnon ja siten hiilensidonnan hoitoa. Myös liian korkea pH voi haitata maan pieneliötoimintaa ja kasvien kasvua.

(JHei)

Kasvinsuojelu ja torjunta-aineet

Torjunta-aineiden merkityksestä maaperän hiilivarastoille on verraten vähän tutkimustietoa. Niiden epäsuorina positiivisina vaikutuksina voidaan pitää kasvuston biomassan tuotannon varmuutta, sadon määrää, kasvinterveyttä ja laatua, jolloin systeemiin päätyvän hiilen määrä voi olla suurempi kuin tautisella tai rikkakasvien valtaamalla kasvustolla.

Riippuen tehoaineista, torjunta-aineilla saattaa olla vaikutuksia maaperän mikrobiologiaan ja eläimistöön. Osa torjunta-aineista kohdentuu sieniin kuuluvien taudinaiheuttajien torjuntaan, jolloin myös hyödylliset maaperän sienet voivat reagoida käsittelyjen vaikutuksesta. Aiheesta on varsin vähän tutkittua tietoa, mutta biologiselle monimuotoisuudella ja sen tuomille hyödyille ei

torjunta-aineista ole ainakaan hyötyä, todennäköisesti haittaa. Vaikutus riippuu paljon torjunta-aineesta ja sen käytöstä.

Satokasvien suojelu rikkakasveilta, kasvitaudeilta ja tuholaisilta tulisi kasvinsuojelulain (laki kasvinsuojeluaineista 1563/2011) ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (2009/128/EY) mukaan toteuttaa integroidun torjunnan menetelmin ensisijaisesti ehkäisevin ja epäsuorin keinoin mm. mahdollisimman monipuolisen viljelykierron sekä mekaanisen ja biologisen torjunnan avulla. Kemiallisiin torjunta-aineisiin turvauduttaessa tulee noudattaa havaintoihin perustuvan torjuntatarpeen mukaista käsittelyä ja torjuntakynnysten huomioimista.

(JHei)

Maalaji

Peltomaassa eri maalajien kyky sitoa ja varastoida hiiltä riippuu myös maan partikkelikokojakaumasta eli pidättävien pintojen määrästä ja mururakenteen muodostumisesta. Peltomaissa valtaosa orgaanisesta aineksesta on sitoutuneena kivennäisaineksen pinnoille tai suojassa maamurujen sisällä. Metsämaissa suuri osa orgaanisesta aineksesta voi olla vapaata partikkelimaista orgaanista ainesta, joka on irrallaan maapartikkelien ja murujen välissä. Tämä maassa vapaana oleva orgaaninen aines on kevyttä ja suhteellisen helposti hajoavaa esimerkiksi maankäytön muutoksen seurauksena.

Hienojakoisten peltomaiden orgaanisen hiilen pitoisuus on keskimäärin korkeampi kuin lajitekoostumukseltaan karkeampien peltomaiden. Mitä enemmän peltomaassa on partikkelikooltaan pientä kivennäisainesta, eli savesta tai hienoa hiesua, sitä enemmän maassa on orgaanista ainesta sitovia ja suojaavia pintoja. Sitoutuminen maapartikkelien pinnoille suojaa orgaanista ainesta mikrobien hajotukselta.

Savimaissa myös mururakenteen muodostuminen suojaa orgaanista ainesta mikrobien hajotustoiminnalta. Murun rakentuminen muodostaa fysikaalisen esteen mikrobien pääsylle orgaanisen aineksen luo. Murujen sisällä myös mineraaliaineksen sitoutumaton orgaaninen aines säilyy hajotukselta suojassa. Maan muokkaus kiihdyttää orgaanisen aineksen hajotusta, sillä se paljastaa maan rakenteen ja murujen suojaamaa orgaanista ainesta hajottajamikrobeille ja väliaikaisesti parantaa ilmanvaihtoa maassa. Säännöllisesti muokatuissa pelloissa on usein heikompi pintamaan mururakenne, kuin pelloissa, joissa häirintä on vähäisempää. Heikko mururakenne lisää eroosioriskiä ja eroosioaineksen mukana myös maapartikkeleiden pinnoille pidättynyt orgaaninen aines karkaa pois pelloilta.

Kun kivennäismaapartikkelien pinnat alkavat täyttyä, mineraaliaineksen suojaava vaikutus heikkenee ja hajotustoiminta voi kiihtyä, mikäli happi- ja kosteusolosuhteet sekä lämpötila suosivat hajotusta. Tällöin orgaanista ainesta ei enää kerry maahan yhtä paljon, sillä lisääntyneen hajotustoiminnan myötä orgaanista hiiltä poistuu hiilidioksidina ilmaan aikaisempaa enemmän. Orgaanisen aineksen hajotus ei kuitenkaan välttämättä lisäänny, jos maahan tuleva orgaaninen aines on huonosti mikrobien hajotettavissa tai happi- tai kosteusolosuhteet eivät suosi mikrobihajotusta. Runsaasti orgaanista ainesta sisältävien peltomaiden hiilimäärää voi olla vaikeampi saada lisättyä kuin maiden, joissa on lähtötilanteessa vain vähän orgaanista ainesta.

(HS)

Lämpötila

Lämpötilalla ja lämpövaihtelulla on merkitystä maaperän hiilivaraston kannalta monella tavalla. Tärkein vaikutus liittyy hyviin kasvuedellytyksiin. Lämpimässä hyvin kasvava kasvi tuottaa sadon lisäksi paljon kasvustotähdettä sekä juuristoa eritteineen eli hiilisyöte maahan on suuri. Keskikesän lämpöpiikit kuitenkin saattavat hidastaa kasvua ja viljojen jyvien täyttymistä. Viileys voi toisaalta edesauttaa vegetatiivisessa vaiheessa olevien viljelykasvien pensomista, mikä lisää kasvin sadontuottopotentiaalia.

Lämpötila säätelee maaperän hajotustoimintaa, sillä niin mikrobeilla kuin mikrobien erittämillä entsyymeillä on lämpötilaoptimit joissa ne toimivat tehokkaimmin. Yleensä lämpötilan nousu suosii sekä eliöitä että niiden ylläpitämiä reaktioita. Toki lämpötila voi myös haitata mikrobien toimintaa. Maaperä saavuttaa kuitenkin harvoin niin korkeita lämpötiloja, että siitä olisi suoranaista haittaa mikrobeille. Korkeista lämpötiloista voi toki seurata muita kasvua rajoittavia vaikutuksia, esimerkiksi kuivuutta.

Lämpötilalla on hetkellisten vasteiden lisäksi merkittävä vaikutus koko vuoden ajan hiilinieluihin ja -lähteisiin. Jos kasvukauden jälkeen maaperä pysyy kasvittomana ja sulana, hajotusprosessit jatkuvat alhaisista lämpötiloista huolimatta aktiivisina. Jos sula, lumeton ja roudaton aika on pitkä, lisääntyy vuosittain orgaanisen aineen hajottajien toiminta-aika suhteessa aikaan jolloin ekosysteemissä on aktiivinen yhteytys ja hiilisyöte. Tämänkin takia on erittäin tärkeää että kasvipeitteetön aika pelloilla on mahdollisimman lyhyt.

(JHei)

Kosteus

Maan kosteudella ja kosteusvaihteluilla on hyvin suuri vaikutus hiilen hajoamiseen ja sitä kautta maaperän hiilivaraston suuruuteen. Hiilivarastojen kasvua edistävä runsas kasvien kasvu edellyttää kasville suotuisia kosteusolosuhteita. Toisaalta myös orgaanista ainesta hajottavien mikrobien toiminta on suurimmillaan, kun maa ei ole liian kuiva eikä liian märkä. Hyvin kuivissa olosuhteissa, kuten täysin vedettömässä maassa, ei tapahdu hajotustoimintaa. Voimakas kuivuus estää myös kasvin kasvun.

Liian märissä olosuhteissa, kuten veden alle joutuneessa maassa, maan mikrobiologiset prosessit ovat hapen puuttumisen takia normaalista hapellisesta maasta poikkeavat. Sen seurauksena hajoaminen hidastuu, mutta samalla esimerkiksi metaanin tuotto voi lisääntyä. Veden vaivaamassa hapettomassa maassa juuret eivät voi hengittää eivätkä ottaa ravinteita. Kasvit kellastuvat ja kuolevat. Molemmissa ääripäissä kasvien kasvu siis hidastuu. Sillä on suora vaikutus maahan kohdistuvan hiilisyötteen suuruuteen. Jotta yhteyttäminen ja biomassan kasvu, eli runsas hiilisyöte, on mahdollista, juurten on saatava hengittää ja juurilla on oltava riittävästi vettä.

Maaperän orgaaninen aines hajoaa pitkälti biologisten prosessien seurauksena ja entsyymien avulla. Mikrobit ja muut elävät organismit tuottavat maahan entsyymejä ja aineenvaihduntatuotteita, joiden avulla organismit lisäävät hajotustoimintaa ja saavat hajoamisprosessista energiaa sekä vapauttavat orgaaniseen aineeseen kiinnittyneitä ravintoaineita.

Maan kosteus vaikuttaa näihin prosesseihin merkittävästi. Kasvimateriaalia tehokkaimmin hajottavat entsyymit (esimerkiksi oksidaasit, oksygenaasit ja peroksidaasit) ja niitä tuottavat organismit tarvitsevat toimiakseen hapelliset olosuhteet, koska happi toimii reaktioissa elektronien vastaanottajana. Nämä ns. hapettavat (oxidative) entsyymit eivät toimi hapettomissa olosuhteissa, esimerkiksi veden vaivaamilla mailla.

Hapettomissa olosuhteissa kemiallisissa hajotusreaktioissa ja mikrobien elintoiminnoissa tapahtuva elektronien vastaanotto kohdistuu erilaisiin yhdisteisiin. Silloin voi syntyä monille eliöille haitallisia hajoamistuotteita kuten rikkivetyjä.

Myös metaanin (CH_4) synty liittyy maaperän kosteuteen, sillä hapettomissa olosuhteissa käynnistyvät reaktiot, joissa hiilidioksidista (tai asetaatista) ja vedystä syntyy metaania ja vettä. Ns. hydrolysoivat entsyymit (hydrolaasit) toimivat myös hapettomissa olosuhteissa, sillä toisin kuin hapettavat entsyymit ne tarvitsevat toimiakseen vesimolekyylejä. Hydrolaasit eivät kuitenkaan pysty hajottamaan tehokkaasti kaikkein pysyvimpiä kasvi- ja eläinperäisiä yhdisteitä.

(JHei)

Mikrobiologia

Maaperän mikrobiologialla on suuri merkitys maaperän hiilivaraston suuruuteen. Kuten edellisessä kappaleessa (Kosteus) jo mainittiin, maaperän mikrobiologiset prosessit ovat vastuussa orgaanisen aineen hajotuksesta, mutta olosuhteiden muuttuessa myös erilaisten muiden yhdisteiden ja hajoamistuotteiden synnystä.

Mikrobitoiminta on välttämätöntä ravinteiden luonnolliselle kierrolle, sillä hajottaessaan orgaanista ainesta mikrobit vapauttavat ravinteita kasvienkin käyttöön. Osa mikrobeista onkin tiiviissä vuorovaikutuksessa kasvien kanssa, jopa symbioosissa kuten keräsienijuurisienet tai osa typensitojista, kun taas toiset mikrobit toimivat itsenäisinä orgaanisen aineen hajottajina.
Maaperän mikrobisto koostuu bakteereista, sienistä ja arkeoneista ja kaikkia näitä löytyy niin kasvien vaikutuspiiristä kuin hajottajistakin.

Mikrobiston vaikutus maan hiilivarastoon liittyy ensisijaisesti hajotustoimintaan ja kasvin kasvua edistäviin vaikutuksiin. Näiden tekijöiden tasapaino vaikuttaa suoraan hiilivaraston suuruuteen ja mahdollisen muutoksen suuntaan. Mikrobistolla on suoran hajotusvaikutuksen lisäksi osoitettu olevan merkitystä myös maan muihin prosesseihin, maan kasvukuntoon sekä hiilivaraston suuruuteen. Esimerkiksi maaperän typen kierrossa (typen vapautumiseen orgaanisesta aineesta mineraalimuotoon, muutokset eri yhdistemuotojen välillä, typen sidonta jne.) mikrobit ovat avainasemassa. Keräsienijuurten tiedetään auttavan kasvia fosforin otossa erittämiensä orgaanisten happojen ja entsyymien avulla, erityisesti silloin kun fosforia on niukasti ja se on huonosti liukenevassa muodossa. Ravinteiden kierron lisäksi mikrobien monimuotoisuuden on osoitettu korreloivan positiivisesti myös maaperän mururakenteen parantumisen kanssa. Kehitykseen vaikuttavat niin keräsienijuurisienten tuottamat glomaalini-glykoproteiinit, jotka lisäävät murujen muodostumista suoraan, mutta myös bakteerien ja maaperäeläinten tiedetään vaikuttavan positiivisesti maan rakenteeseen.

Viime vuosina on noussut esiin uusi teoria, jonka mukaan mikrobien oma karike olisikin merkittävä tekijä maan orgaanisen aineen muodostumisessa, kasviperäisen karikkeen lisäksi (Liang et al. 2017). Uusien tutkimustulosten myötä mikrobien monimuotoisuuden lisäämisen ja siitä syntyvien hyötyjen (mm. mururakenne ja hiilivaraston kasvu) selvittäminen onkin juuri nyt tiedeyhteisön suuren kiinnostuksen kohteena.

(JHei)

3.3.Viljelymenetelmien vaikutus hiilivaraston muutokseen

Eri viljelytoimien vaikutusta maaperän hiilivarastoon on tutkittu jo pitkään. Pisimmät kokeet perustuvat Rothamstedin pitkäaikaiskokeisiin, joissa tutkittiin mm. lannoituksen ja kasvinvuorotuksen vaikutusta maan tuottavuuteen. Eri kokeissa on saatu erilaisia tuloksia, joiden yhteenveto on haastavaa. Tässä osiossa yhteenvetoa lähestyttiin maaperän hiilensidontaprosessien näkökulmasta.

Hiilen sitoutuminen on kahden kilpailevan prosessin summa: hiilisyöte lisää maan multavuutta ja hajotustoiminta vähentää sitä. Jotta hiiltä saataisiin varastoitumaan maahan, on lisättävä joko hiilisyötettä ja hiilen stabiloitumista tai hidastettava hajotustoimintaa. Ensiksi hiilisyötettä voidaan lisätä kasvattamalla alueella enemmän kasveja (kokonaisbiomassa, mukaan lukien juuristo ja juurieritteet) tai tuomalla hiiltä muualta. Toiseksi hiilen stabiloitumista voidaan edistää muuttamalla maaperän mikrobiyhteisöä sellaiseksi, että se muuntaa hiiliyhdisteitä suojatumpaan muotoon (yleisesti ottaen enemmän sieniä) tai lisäämällä maan murustuvuutta ja murukestävyyttä. Kolmanneksi hajotustoimintaa voidaan hidastaa vaikuttamalla maaperän kosteuteen, lämpötilaan ja happitilanteeseen.

Seuraavassa taulukossa 2. on esitetty joukko toimenpiteitä ja pyritty arvioimaan niiden vaikutusta maan hiilivarastojen muutokseen neliportaisella asteikolla: - haitallinen vaikutus, + lievä positiivinen vaikutus, ++ kohtalainen positiivinen vaikutus ja +++ voimakas positiivinen vaikutus.

		Hiilisyöte						Suojaaminen		Hajotuksen hidastus			
	Toimenpide	**Yhteytys-tehon lisäys**	**Yhteytys-ajan lisäys**	**Juuriston määrä**	**Juuriston syvyys**	**Juuri-eritteet**	**Ulko-puolinen hiilisyöte**	**Mikrobi-yhteisön muutos**	**Muru-kestävyys**	**Viilennys**	**Kosteus**	**Happi**	**Pohjavesi**
Lannoitus ja kasvinsuojelu	Typpi- ja fosforilannoitus	+++		+		-		-					
	Sivu- ja hivenlannoitus	++		+	+	+							
	Eloperäinen lannoitus	++					+	+	+				
	Orgaaniset maanparannusaineet						+++	+++	++				
	IPM kasvinsuojelu	+						++					
Kasvit	Lajikkeet	++	++	+++	+++	+++							
	Kerääjäkasvit	+	+++	++	++	++		+++	+++	+++	++		
	Nurmiseokset	++	++	++	++	++		++	++				
	Seosviljely	+	+	++	++	++		+	+	+			
	Peltometsäviljely												
Maan rakenne	Tehostettu kuivatus	++	++	++	++	+		++	+	-	-	-	-
	Säätösalaojitus								-	+	+	++	+++
	Matalamuokkaus: oljet pintaan							++	++	++		+	
	Suorakylvö				-			++	+++	++	++	+	
	Syväkuohkeutus			+++	+++							-	
Laidunnus ja nurmet	Lyhyt laidunnus, pitkä lepo	+++	+++	+++	+++	+++	+	++	++	++	++		
	Nurmien niittokorkeus	++	++	++	++	++				+	+		

Taulukko 2.

Yksittäisellä toimenpiteellä voi olla sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Esimerkiksi lisälannoitus lisää yhteytystä kasvukaudella ja voi lisätä juuriston kasvua. Sillä on kuitenkin negatiivisia vaikutuksia juurieritteiden määrään sekä maaperän mikrobiyhteisöön. Samoin esimerkiksi maan syväkuohkeutus lisää juuriston syvyyttä ja määrää, mutta samalla se tuo syviin maakerroksiin lisää happea ja nopeuttaa hajotusta.

Toimenpiteiden vaikutus peltolohkotasolla riippuu siitä, mikä on niiden yhteisvaikutus maaperän prosesseihin ja mikä on prosessien lähtötilanne lohkolla. Esimerkiksi maaperän kuivatuksen tehostaminen voi johtaa hiilivaraston kasvuun, jos siten saadaan lisättyä hiilisyötettä yhteytystä, juuristoa ja mikrobistoa enemmän kuin happi-, vesi- ja lämpötalouden myötä lisääntynyt hajotus kuluttaa. Toimenpiteiden arvioinnissa ja toteutuksessa on syytä kiinnittää huomiota sekä siihen, mikä toimenpide toteutetaan, että miten toimenpide toteutetaan.

Lannoitus voidaan hiilivaraston kasvattamisen näkökulmasta jakaa liukoisen typen ja fosforin, hivenravinteiden lannoitukseen sekä orgaanisen aineen lisäykseen. Orgaanisesta aineesta vapautuu hitaasti ravinteita, minkä lisäksi sillä on muitakin kasvin kasvua ja juuristoa edistäviä vaikutuksia.

Todettuun kasvin tarpeeseen perustuva liukoisen typen ja fosforin lannoitus lisää yhteytystä ja hiilisyötettä maahan. Jos lannoitus ylittää kasvin välittömän tarpeen voivat ravinteet kiihdyttää orgaanisen aineksen hajotusta ja häiritä pieneliötoimintaa kuten sienijuuria. Hivenravinnepuutokset voivat usein olla kasvien kasvua rajoittavia tekijöitä ja niiden korjaamisella voidaan tehostaa yhteytystä, juuriston kasvua ja juurieritystä. Orgaanisen lannoituksen ohessa maahan tulee orgaanista ainesta ja valtaosa ravinteista on hitaasti vapautuvassa muodossa.

Kasvuston yhteytys voidaan maksimoida mahdollisimman suurella lehtialalla ja jatkuvalla elävällä kasvipeitteisyydellä. Yksivuotisilla kasveilla suuri lehtiala saadaan aikaan seoskasvustoilla, joissa voi olla useita eri satokasveja yhtä aikaa ja vähintäänkin aluskasveja, jotka jätetään sadonkorjuun jälkeen yhteyttämään. Jatkuvaa kasvipeitteisyyttä toteuttavat hyvin syyskylvöiset, joita niitäkin voidaan viljellä seoskasvustoina eri satokasvien tai kumppanuuskasvien kanssa. Monivuotisilla kasveilla ympärivuotinen kasvipeitteisyys on valmiina. Yhteytystä voidaan maksimoida niin ikään monilajisilla (vähintään 7 lajia) nurmiseoksilla. Peltolohko- ja maisematasolla kasvillisuuden monipuolisuutta voidaan lisätä puu- ja pensaskujanteilla ja piennarpusikoilla, jotka myös tehostavat maaperän hiilivaraston kasvattamista.

Maan muokkauksella on monia vaikutuksia maaperän hiilivarastojen muutoksiin. Esimerkiksi maan muokkaaminen kynnöllä lisää voimakkaasti maan lämpötilaa, kuivattaa sitä ja tuo maahan runsaasti happea, mitkä kaikki tekijät lisäävät maan hajotustoimintaa. Kevennetty muokkaus kuohkeuttaa matalamman syvyyden ja jättää kasvintähteet pintaan, mikä vähentää maan kuumenemista ja ylimääräistä happea. Samalla maata häiritään vähemmän, mikä lisää murukestävyyttä ja pinnalle jäävät kasvintähteet ruokkivat sieniä ja lieroja. Riskinä kevennetyssä muokkauksessa on kuitenkin liian raju muokkaus (esimerkiksi lautasmuokkaimella), joka rikkoo muruja.

Minimissään muokkaus on suorakylvössä, jossa maata ei muokata lainkaan ja kylvö tehdään mieluiten mahdollisimman vähän maata häiritsevällä koneella eli ainoastaan mahdollisimman kapeilla ja terävillä kylvö- ja lannoitusvantailla. Tällöin hidastetaan maaperän hajotustoimintaa ja pidetään kasvustotähde maan pinnalla. Suurimmat hyödyt suorakylvöstä saadaan, kun sitä täydennetään kerääjäkasveilla ja viljelykierrolla (conservation agriculture = kerääjäkasvit + kasvinvuorotus + minimimuokkaus).

Pellon kuivatustilanne ohjaa hajotustoimintaa. Kuivatuksen lisääntyminen lämmittää maata ja lisää siihen happea, mikä kiihdyttää hajotusta. Samalla hyvä kuivatus mahdollistaa juuriston laajemman ja syvemmän kehityksen, mikä lisää hiilisyötettä. Kuivatuksen ja maan rakenteen korjaamisen kokonaisvaikutus multavuuteen riippuu siitä, onko kiihtyneen hajotustoiminnan vaikutus suurempi kuin lisääntyneen hiilisyötteen. Lisääntynyt hiilisyöte on kytköksissä sadon määrään, juuriston laajuuteen ja maaperän happitilanteeseen.

Nurmiviljelyssä moni asia on kohdillaan hiilen sitoutumisen

kannalta: pelto on kasvipeitteinen ja häirintä on vähäistä. Nurmen hoidolla voidaan tehostaa hiilen sitoutumista, kun huolehditaan siitä, että niiton tai laidunnuksen jälkeen nurmikasveilla on riittävästi lehtialaa yhteytyksen jatkamiseen, juuriston ylläpitoon ja nopeaan jälleenkasvuun. Kun nurmikasvusto jää tyypillistä matalaa, alle 5 cm, leikkuukorkeutta pidemmäksi, n. 10-15 cm korkeaksi, se myös pitää maan pinnan viileämpänä ja kosteampana, mikä vaikuttaa mikrobiyhteisöihin ja hidastaa hajotustoimintaa. Laidunnuksessa voidaan lisäksi saada lisähyötyä siitä, että lannan mukana palautuu maaperään hiiltä ja mikrobeja juuri ennen nurmen jälleenkasvua. Parhaat tulokset hiilensidonnassa on saavutettu laidunnuskierroilla, joissa laidunnusjakso on lyhyt (2-5 päivää) ja lepojakso on pitkä (40-180 päivää).

(JJ ja TM)

3.4. Maanparannusaineet

Orgaanisten lannoitteiden ja maanparannusaineiden käyttö on nopein keino lisätä hiiltä maaperään. Kun tavoitteena on lisätä maan orgaanisen aineksen määrää, orgaanisten maanparannusaineiden osalta ratkaisevaa on kuinka paljon materiaalia voidaan lisätä maahan. Ravinteet rajoittavat. Joko niitä on liikaa suhteessa rajoituksiin tai liian vähän kasvinviljelyn näkökulmasta.

Parhaimmillaan orgaaninen maanparannusaine on ravinteiden ja hiilen suhteen tasapainossa niin, että käyttömäärä voi olla hyvinkin korkea (jopa satoja kuutioita hehtaarille), jolloin merkittäviä hyötyjä on saavutettavissa yhdenkin käyttökerran jälkeen. Useimmiten orgaanisen aineksen merkittävä lisääminen vaatii kuitenkin toistuvia käyttökertoja yhdessä monipuolisen viljelykierron ja kevennetyn muokkauksen kanssa. Jotta hyödyt olisivat mahdollisimman suuret, tulee tuotteiden ominaisuudet olla hyvin tiedossa, ettei aiheuteta haittaa satokasveille. Olennaista on käytön sovittaminen oikeaan vaiheeseen viljelykiertoa ja kasvukautta sekä tarvittava täydennyslannoitus.

Orgaanisten maanparannusaineiden vaikutukset maan biologiseen aktiivisuuteen

Orgaanisen aineksen lisääminen maahan ruokkii maan pieneliöstöä, lisää sen aktiivisuutta ja määrää maassa. Vauhti riippuu orgaanisen aineksen laadusta; sen hiili-typpi -suhteesta (C/N) ja hajoavuudesta. Suhdelukua 25 on pidetty rajana, jota suuremman C/N:n omaavat tuotteet ovat maanparannusaineita ja alhaisemmat lannoitteita.

Maanparannusaineiden typpi on usein pääosin orgaaniseen ainekseen pidättyneenä hitaasti vapautuvassa muodossa. Jos typpeä on erittäin vähän, voi orgaanisen aineksen hajoaminen myös pidättää typpeä ympäristöstään mikrobimassaan. Jos typpeä on enemmän kuin lisättävän massan hajoamiseen kuluu, on se välittömästi kasvien käytettävissä, huuhtoutumisherkkänä tai mikrobien käytettävissä maassa jo olevan orgaanisen aineksen hajottamiseen.

Myös hiilen laatu vaikuttaa aineen ominaisuuksiin. Tuore hajoamaton tai vähän hajonnut materiaali hajoaa mikrobien toimesta nopeasti, jopa muutamassa kuukaudessa ja vapauttaa ravinteita. Pitkälle hajonneet tai kompostoituneet materiaalit hajoavat hitaasti sienten avulla.

Ligniinipitoisissa materiaaleissa, kuten oljessa, järviruo´ossa ja puuperäisissä materiaaleissa hitaasti hajoavan aineksen osuus on korkea.

Orgaaniset maanparannusaineet, etenkin aerobisesti kompostoituneet massat, sisältävät itsessään runsaasti mikrobeja, jotka voivat siirtyä peltomaan mikrobistoon. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää käyttämällä korkealaatuisia komposteja ymppeinä muutamia kymmeniä, tai jopa satoja, kiloja hehtaarille. Näin voidaan myös lisätä maan tautisuppressiivisuutta eli kykyä ehkäistä kasvitauteja.

Maan mikrobiston lajisto ja sieni-bakteeri -suhde vaihtelee paljon riippuen olosuhteista ja viljelyjärjestelmästä. Yleisesti runsaasti liukoisia ravinteita ja muokkausta käyttävässä systeemissä bakteerit ovat vallalla kun taas orgaanisten ainesten lisäys, ravinteiden orgaaniset muodot, jatkuva kasvipeite ja minimimuokkaus suosii sieniä, jotka ovat tärkeitä kasvien ravinnehuollon kannalta.

Biohiili poikkeaa muista maanparannusaineista

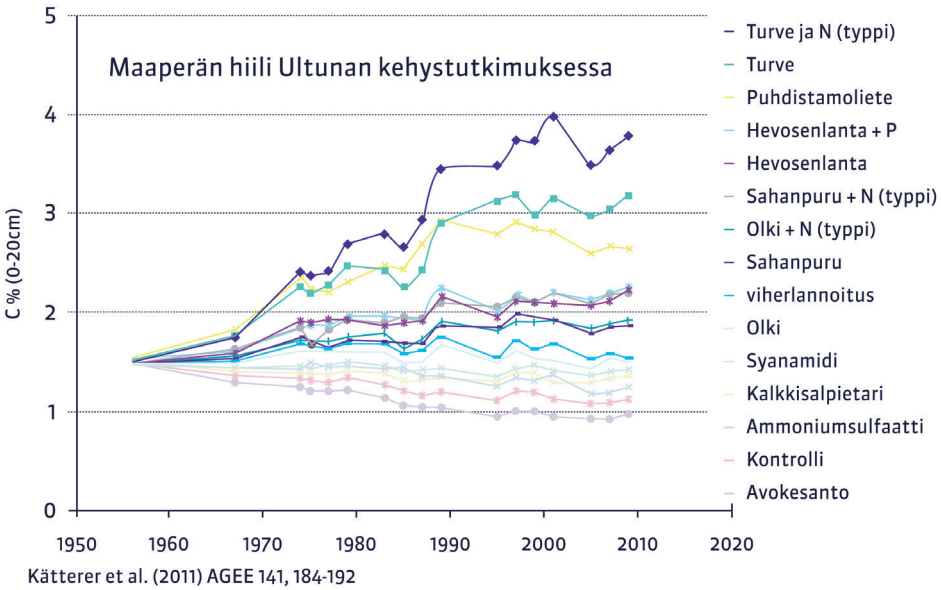
Biohiili on hapettomassa tai vähähappisessa pyrolyysissä biomassasta syntyvää hiiltä. Se on hyvin kestävää hajotukselle ja voi säilyä maassa satoja, jopa tuhansia, vuosia. Biohiilellä on suuri ominaispinta-ala ja se on hyvin huokoista pidättäen vettä ja ravinteita. Se tarjoaa mikrobeille asuinpaikkoja. Biohiili voi myös olla orgaanisen lannoitteen tai maanparannusaineen komponenttina, jolloin se voi vähentää ravinteiden huuhtoutumis- ja haihtumisriskiä.

Biohiili lisää tehokkaasti maan hiilivarastoa ja voi parantaa sen fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia etenkin karkeilla mailla. Se ei kuitenkaan ruoki pieneliöitä, vaikka tarjoaa niille elintilaa. Biohiili voi olla ominaisuuksiltaan hyvin vaihtelevaa riippuen siitä, mistä materiaalista ja minkälaisissa pyrolyysiolosuhteissa se on tuotettu. Etenkin pyrolyysin lämpötilalla on suuri vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin.

Tutkimustulokset tukevat käytäntöä

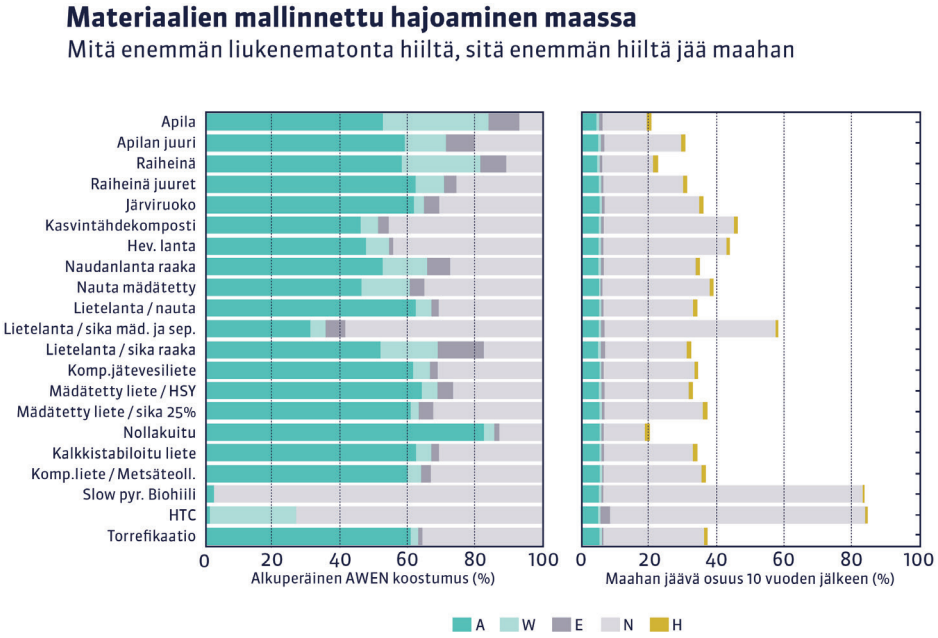
Orgaanisia materiaaleja tarkastelevia kokeita on tehty pitkään Ruotsin maatalousyliopistossa Uppsalan Ultunassa. Tulokset osoittavat, että hitaasti hajoava orgaaninen aines, kuten turve ja mädätejäännös nostavat maan orgaanisen hiilen pitoisuutta merkittävästi (1-2 % yks. n. 50 vuoden aikana).

Myös oljen, lannan ja sahanpurun lisäämisen on havaittu nostavan maan hiilipitoisuutta.
Pelkkä mineraalilannoitus on johtanut hiilipitoisuuden laskuun. (Kuva 11.)



Kuva 11. Erilaisten orgaanisten materiaalien ja mineraalilannoitteiden vaikutus maan hiilipitoisuuteen ruotsalaisessa pitkäaikaiskokeessa.

Suomessa Luonnonvarakeskuksen MAHTAVA-hankkeessa on laboratoriotutkimuksena analysoitu ja mallinnettu erilaisten orgaanisten lannoitteiden ja maanparannusaineiden hiilen hajoavuutta. Tulosten perusteella biohiili on omaa luokkaansa. Sen kokonaishiilestä jää maahan pitkäaikaisesti (10 v) yli 80 %. Sen jälkeen eniten hiiltä, n. 40 % kokonaishiilestä, jää maahan pitkälle hajonneista materiaaleista kuten lietelannoista ja mädätejäännöksistä sekä hitaasti hajoavaa ainesta sisältävistä tuotteista kuten hevosenlannasta ja komposteista.



Kuva 12. Luonnonvarakeskuksen MAHTAVA-hankkeessa analysoituja ja mallinnettuja tuloksia orgaanisten materiaalien hiilen pysyvyydestä maassa. Vasen kuva: materiaalin kemiallinen koostumus jaettuna happoliukoiseen (A), vesiliukoiseen (W), etanoliliukoiseen (E) ja ei-liukoiseen ositteeseen. Oikea kuva: osuus, joka jäljellä 10 vuotta maahan lisäämisen jälkeen Yasso-mallin mukaan.

Uusista materiaaleista kuten maanparannuskuiduista tai biohiilistä ei vielä ole pitkäaikaisia tutkimustuloksia, mutta meneillään olevat kenttäkokeet sekä käytännön kokemukset osoittavat niiden olevan tehokkaita maan hiilivaraston kasvattajia.

(JJ)

3.5 Turvepellot: kuinka pitää hiili siellä missä sitä jo on?

Katsojasta riippuen suopellot voivat näyttäytyä ravinteikkaina viljelymaina, tai märkinä, hallanarkoina ja happamina maaperinä. Pelloksi muokatun suon ominaisuudet riippuvat hyvin paljon suon syntytavasta. Kahta ominaisuuksiltaan täysin samanlaista turvepeltoa tuskin löytyykään. Kokemukset turvemaiden viljeltävyydestä voivat siis olla hyvinkin erilaisia. Päätökseen kuivattaa suota peltomaaksi voi vaikuttaa esimerkiksi lannanlevitysalan tarve tai kivennäispeltojen heikko saatavuus lähialueelta.

Suota pelloksi raivatessa kannattaa miettiä toiminnan pitkäkestoisia ilmastovaikutuksia. Kivennäismailla keskustelu maaperän hiilestä ja hiilensidonnasta keskittyy usein hiilivaraston kasvattamiseen, mutta turvemailla asia on hiukan erilainen: hiiltä on turvemaissa kyllä runsaasti, mutta ongelmana on, miten saisimme sitä estettyä karkaamasta ilmakehään.

Luonnontilainen suo voi metaanipäästöjensä vuoksi olla toisina vuosina hienoinen kasvihuonekaasujen päästölähde, mutta pitkän ajan saatossa pääsääntöisesti hiilinielu, josta ilmeisenä todisteena meille näyttäytyy soille kertyvä turve. Turve on pitkän ajan saatossa veden alle kerrostuneesta kasvimassasta muodostunutta orgaanista ainesta, joka muodostuessaan pidättää runsaasti kasviperäistä hiiltä sekä typpeä.

Päästöjä alkaa syntyä, kun ojituksen jälkeen tämä aiemmin veden alle varastoitunut turvemassa pääsee kosketuksiin ilman kanssa, josta seuraa sen hajoaminen. Mielikuvana voi käyttää vaikkapa suolakurkkupurkkia: neste säilöö kurkkuja hyvän aikaa, mutta kun vesi poistetaan, kurkuissa alkaa näkyä piakkoin luonnollisen hajoamisen merkkejä.

Suosta kuivatettu turvepelto kutistuu ajan saatossa. Aluksi se johtuu veden poistumisesta, mutta myöhemmin tapahtuva pinnan vajoaminen on konkreettista seurausta turpeen hajoamisesta. Hajotuksen seurauksena turpeeseen sitoutunut hiili vapautuu joko kaasumaisina yhdisteinä, kuten hiilidioksidina (CO_2) tai huuhtoutuu liuenneina ioneina.

Kuivatuksen ohella maan muokkaus- ja viljelytoimet, kuten kalkitus ja kyntö, edistävät mikrobiologista toimintaa ja turpeen hajoamista. Suurin osa turvemaiden vuotuisista päästöistä tulee juuri pintaturpeen hajoamisesta, joka muokkauksen seurauksena on usein alempia kerroksia ilmavampaa. Hiilidioksidin ohella turvemailta muodostuu vuosittain myös merkittävä määrä typpioksiduulipäästöjä (N_2O), joka on hiilidioksidia monta kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu.

Turvemaiden ilmastokestävät viljelytavat

Ilmastopolitiikan näkökulmasta turvepellot voidaan nähdä myös hyödyntämättömänä mahdollisuutena vähentää päästöjä tehokkaasti. Niille tehtävien päästövähennystoimien vaikutus per hehtaari voi olla moninkertainen kivennäismaihin verrattuna, joten jokainen toimi pienelläkin alalla voi pienentää tilakohtaista hiilijalanjälkeä merkittävästi.

Turvemailta muodostuvien päästöjen hillitseminen vaatii viljelijältä taitoa optimoida pellonkäyttöä. Omalle tilalle sopivia turvepeltojen

ilmastokestäviä viljelymenetelmiä pohtiessa voi joutua tekemään kompromisseja taloudellisten, viljelyteknisten ja tavoiteltavien päästövähennysten välillä. Ymmärrettävästi jotkin ratkaisut, kuten ennallistaminen, voivat merkitä nykyisen tukipolitiikan mukaisten maataloustukien menetystä tai jonkin lohkon viljelyintensiteetin nostamista. Toisaalta päätös ennallistamisesta tai metsittämisestä voi säästää viljelijän uudelleenojittamisen kustannuksilta. Turvemaiden ilmastokestävät viljelytoimet voidaan jaotella karkeasti kolmeen eri luokkaan: hajotusta hillitseviin, aktiivisiin sekä ennaltaehkäiseviin päästövähennystoimiin.

Turpeen hajotusta hillitsevät viljelymenetelmät

Turvekerroksen paksuus on avainasemassa haettavien päästövähennystoimien pitkäkestoisuutta ajatellen. Toimia kannattaakin miettiä peltolohkon turvekerroksen paksuuden mukaan. Pitkäikäisimmät vaikutukset saavutetaan paksuilla turvemailla, joissa hajotukselle altista orgaanista ainesta on saatavilla vuosikymmeniksi.

Tehokkain tapa vähentää turvemaiden päästöjä olisi nostaa pohjaveden pinnan tasoa esimerkiksi säätösalaojituksen avulla. Jokaisella veden pinnan alle säästetyllä sentillä on merkitystä, sillä vuosittain turvetta hajoaa keskimäärin noin 1 cm kerros hehtaarilta, jonka päästövaikutus hiilidioksidin osalta on 20-30 t CO_2/ha/vuosi ja typpioksiduulin osalta 4-6 t CO_2-ekv/ha/vuosi. Osittainenkin vedenpinnan nosto on kannattavaa, sillä usein turvekerroksen alta paljastuva kerros ei ole viljelyominaisuuksiltaan hyvä. Samalla voidaan välttää uudelleenojituksen kustannukset.

Ohuemmillakin turvemailla kannattaa panostaa olemassa olevan turpeen hajoamisen hidastamiseen. Turpeen hajoamista edistävin vaihtoehto on yksivuotisten kasvien viljely ilman aluskasvia sekä syyskyntö, jolloin maan pinta jää pitkäksi aikaa paljaaksi ja ilmavaksi. Kasvipeitteisyyden vaaliminen vähentää niin päästöjä kuin ravinteiden huuhtoutumista. Turvemailla monivuotisten kasvien viljely olisi yksivuotisia kasveja parempi vaihtoehto. Esimerkiksi yksivuotisista viljelykasveista pitkäaikaiseen nurmiviljelyyn siirryttäessä vuotuinen päästökuorma vähenisi jo noin kolmanneksella. Jos nurmiviljelyn ohella myös pohjaveden pinnan nosto on mahdollista, niin päästöt voivat vähentyä puoleen yksivuotiseen kasviin nähden.

Mikäli mahdollista, kannattaa tilan nurmentuotantoa siirtää kivennäismailta eloperäisille maille, ja vastaavasti turvemailla viljeltyjä yksivuotisia kasveja kivennäismaille. Jos tilan tuotantosuunnan kannalta nurmen viljely ei ole mahdollista, aluskasvin käyttö, kevätkyntö, suorakylvö tai kevennetty muokkaus vähentävät hiukan turvemaiden päästökuormaa yksivuotisia kasveja viljeltäessä. Kevennetyllä muokkauksella saattaa tosin olla vaikutusta esimerkiksi rikkakasvipaineen lisääntymiseen sekä viljelytöiden ajoitukseen keväällä.

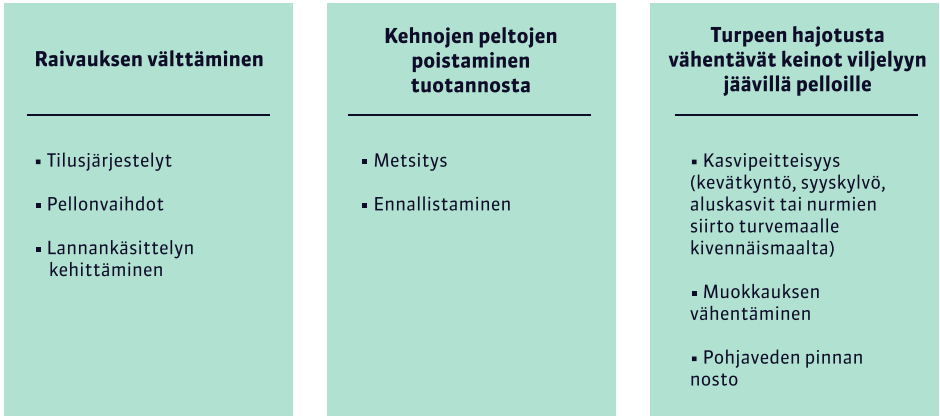
Aktiiviset vähennystoimet

Oma lukunsa ovat vajaatuottoiset eloperäiset turvemaat. Kivennäismailla väliaikainen laajaperäistäminen esimerkiksi kesannoimalla on keino parantaa maan viljavuutta. Turvepeltojen tuottoon ei laajaperäistäminen useinkaan auta ja pellot nostavat tilakohtaista päästökuormaa pelkällä olemassaolollaan. Silloin

kannattaa ensisijaisena toimena harkita vajaatuottoisen viljelyn sijaan päästövähennysten saavuttamista alan turvekerroksen paksuuden mukaan vaikkapa pellon metsittämisellä, ennallistamisella tai kosteikkoviljelyllä jossa viljellään kosteissa oloissa viihtyviä kasvilajeja kuten esimerkiksi energiapajua. Vajaatuottoinen, laajaperäistetty turvepelto tuottaa pelkällä olemassaololollaan valtavan päästökuorman vuosittain, vaikkei sillä kyettäisi tuottamaan korjattavaa elintarvike- tai rehukäyttöön soveltuvaa satoa.

Ennaltaehkäisy

Lähtökohtaisesti paras tapa välttää turvemailta syntyviä päästöjä olisi välttää turvemaiden raivaamista pelloksi. Laajentavilla tai lisäalaa tarvitsevilla tiloilla ennen turvepellon raivausta kannattaa pohtia vaihtoehtoja, voisiko pellonraivauksen välttää vaikkapa tilusjärjestelyin, ostamalla tai vuokraamalla kivennäispeltoa, tai löytyisikö tilalle suon sijaan pelloksi kelpaavaa kivennäismaata. Jos lisäalan hankinta turvemaata kuivattamalla on ainoa vaihtoehto, tulisi turvepeltoa viljellä ja hyödyntää siellä tuotetut tuotteet mahdollisimman intensiivisesti jotta tuotekohtaiset päästöt jäävät alhaisemmiksi.



Kuva 13. Ilmastokestäviä viljelymenetelmiä turvepelloille

3.6 Agroekologinen symbioosi

Teollisen ekologian toimintamalli elintarvikeketjuun

Maatalous on elintarvikeketjun alku ja perusta. Vaikka ruoan elinkaarisista kasvihuonekaasupäästöistä, kuten muistakin ympäristövaikutuksista, suurin osa syntyy maataloudessa, on päästöjen vähentäminen yhteistyössä ketjun muiden toimijoiden kanssa mahdollista ja järkevää. Teollisen ekologian idea on, että yhden yrityksen jäte tai hukkalämpö voi olla toisen yrityksen raaka-aine ja energianlähde. Idean mukaan näiden yritysten on ekotehokasta ja kannattavaa toimia fyysisesti lähekkäin ja muodostaa ns. ekoteollisia symbiooseja. Elintarvikeketjuun sovellettuna ekoteolliset symbioosit ovat agroekologisia symbiooseja.

Agroekologisen symbioosin pilottia on kehitelty Hyvinkään Palopurolla. Puhutaan Palopuron agroekologisesta symbioosista tai yksinkertaisemmin Palopuron symbioosista. Yritykset ovat maatila, puutarha, munituskanala sekä leipomo. Symbioosin rakentaminen aloitettiin vuonna 2015. Tavoitteena oli ensin lisätä energiaomavaraisuutta. Kun energiantuotanto alkoi näyttää merkittävältä, mukaan symbioosiin liittyi vielä energiayhtiö. Lopputuloksena on ruoan alkutuotannon, elintarvikejalostuksen ja bioenergiatuotannon symbioosi, joka tuottaa ruokaa ja energiaa yli oman tarpeen sekä kierrättää ravinteet.

Koska elintarviketuotanto ja kulutus eli koko ruokajärjestelmä on ikiaikaista biotaloutta, on elintarvikesektorin luonnollista ja tavoiteltavaa olla energiaomavarainen nimenomaan oman bioenergian tuotannon avulla. Kun vertailukohtana on fossiilitaloutta edeltänyt ja sen jälkeinen tuleva kestävästi typpiomavarainen tuotantotapa, jonka perustalle agroekologiset symbioosit rakennetaan, saadaan niissä energiantuotannosta huolimatta – itse asiassa energiantuotannon ansiosta – tuotetuksi enemmän ruokaa peltohehtaaria kohden.

Typpiomavaraisen viljelyn on kuvannut jo A.I. Virtanen vuonna 1943. Kestävä typpitalous perustuu biologiseen typensidontaan apilanurmien avulla. Agroekologisessa symbioosissa viherlannoitusnurmea ei energioineen ja ravinteineen päivineen kynnetä lohkolleen, vaan sato korjataan symbioosin biokaasulaitokseen. Palopuron symbioosissa toimii 3000 tuoretonnin kuivamädätyslaitos. Peltolohkoille ravinteet palautetaan vasta mädätysjäännöksen muodossa. Välistä ei ole ”vedetty” ravinteita, ainoastaan bioenergiaa biokaasun muodossa. Tuloksena on merkittävä energiasato. Palopuron symbioosi tuottaa vuodessa 280 000 m3 normaalipaineiseksi laskettua biometaania. Sen energiasisältö on 2800 MWh vuodessa. Symbioosin yritysten oma energian käyttö on 1650 MWh, joten bioenergiaa jää myytäväksi lähes puolet koko tuotannosta.

Palopuron symbioosin bioenergian tuotanto korvaa maatilan ja leipomon kevyen polttoöljyn käyttöä noin 70 000 litraa vuodessa. Tästä koituu 240 hiilidioksiditonnin päästövähennys vuosittain. Jos - ja kun - traktorien sekä leipomon jakeluautojen fossiilinen polttoaine myös korvataan biokaasulla, ja loppu biokaasu myydään muun liikenteen moottoripolttoaineeksi, hiilidioksidipäästön vähennys kasvaa 770 tonniin vuodessa. Palopuron symbioosi käyttää noin 400 peltohehtaaria, joten tämä päästövähennyksen potentiaali fossiilisen polttoaineen alkutilanteeseen verrattuna on noin 2 t CO2/ ha.

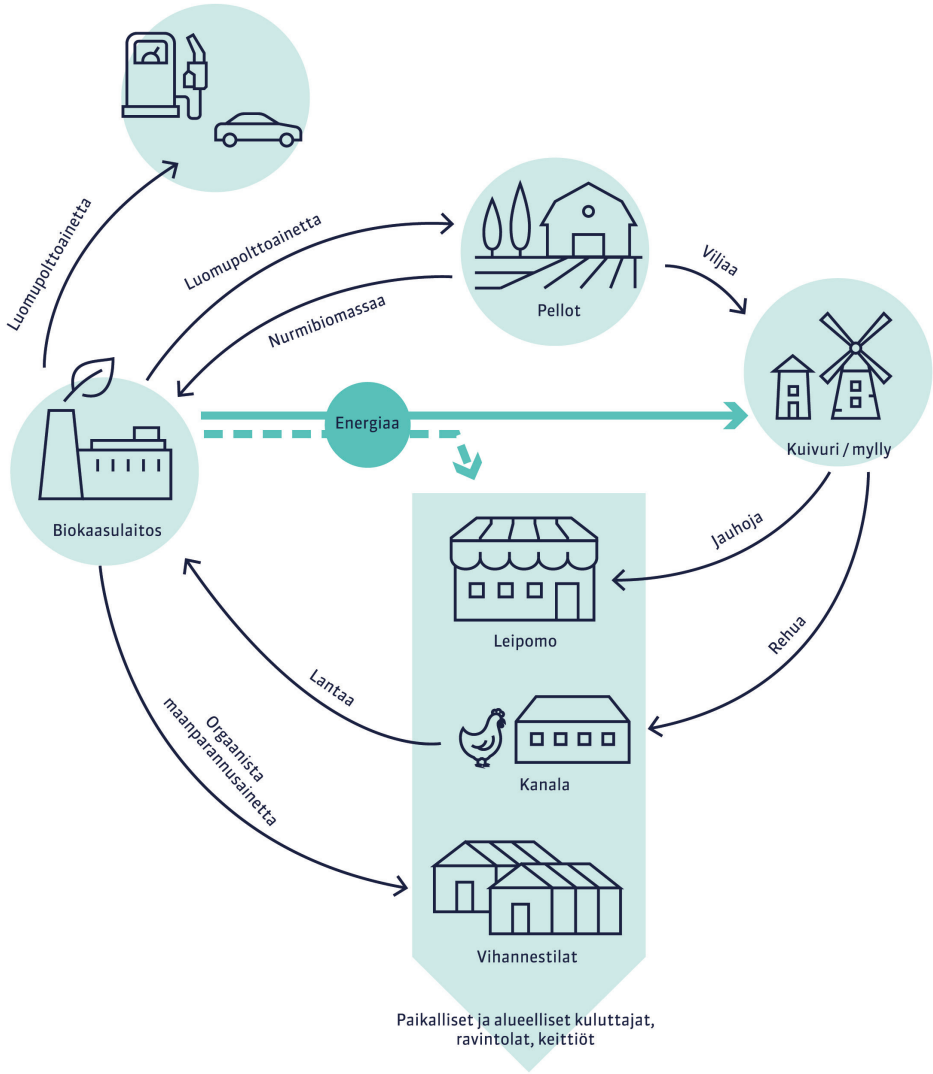
Ravinteiden kierrätys mädätysjäännöksen lannoitekäytön muodossa vähentää lannoituksen elinkaarisesti mitattuja kasvihuonekaasupäästöjä tavanomaiseen tuotantotapaan verrattuna 60 %, noin 500:sta hiilidioksidiksi lasketusta kilosta hehtaaria kohden noin 200 kiloon hehtaaria kohden. Palopuron symbioosin peltoalalle tämä merkitsee 120 tonnia vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin tavanomaisesti toimittaessa syntyisi.

Kolmantena ilmastoetuna tavanomaiseen tuotantotapaan verrattuna on orgaanisella lannoitteella, eli mädätysjäännöksellä sekä sen tuotantoon vaaditulla apilanurmen osuudella, joka on noin 25 % viljelykierron peltoalasta, saavutettava hiilen sitoutuminen maan multavuudeksi. Tätä ei ole Palopuron symbioosissa mitattu, mutta varovaisin mahdollinen arvio on, että tuotantotapa pysäyttää Suomen mineraalisille peltomaille

mitatun keskimääräisen hiilen kadon, joka on noin 220 kg C/ha. Vastaava päästösäästö on 0,8 t CO_2 vuositasolla hehtaaria kohden. Palopuron noin 400 ha peltoalalle tämä merkitsee vähintään 320 t hiilidioksidin päästövähennystä vuosittain. Todennäköisempää on, että bionurmeen ja mädätelannoitukseen perustuva tuotantotapa ei ainoastaan pysäytä hiilikatoa, vaan nostaa maan hiilivaraston kokoa. Mikäli nurmiviljelykierto ja orgaaninen lannoitus mädätteellä lisäksi vähentävät maaperän dityppioksidipäästöjä, myönteinen ilmastovaikutus edelleen kasvaa.

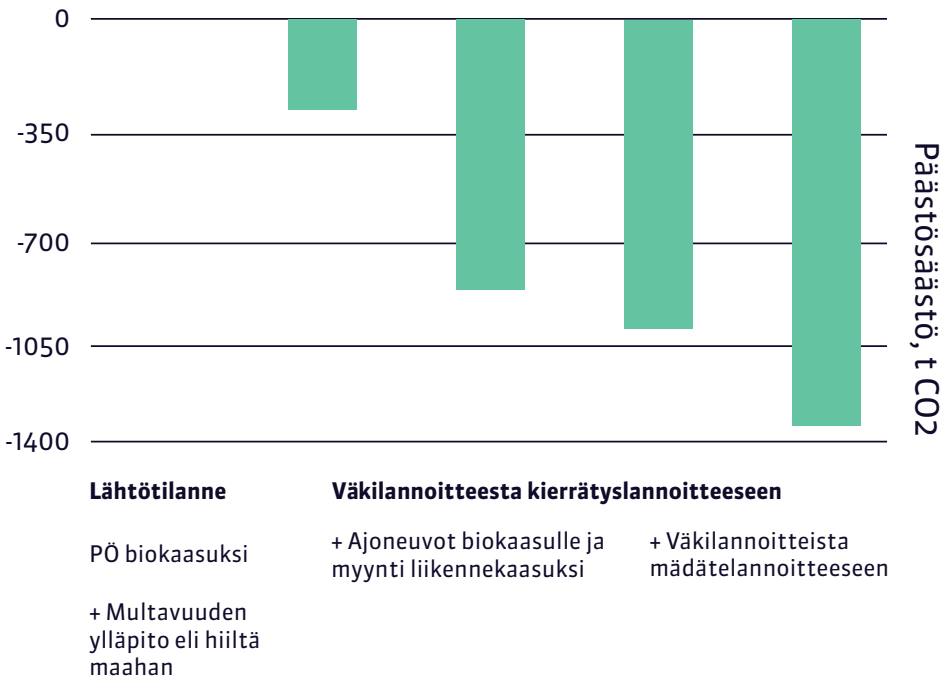
Kaikki edellä lukuina arvioidut päästösäästöt yhteenlaskettuina muodostavat Palopuron agroekologisen symbioosin tapauksessa noin 1 200 tonnia CO_2 per vuosi tälle yhdistetylle maatalouden, elintarvikejalostuksen ja energiantuotannon symbioosille. Sen käyttämälle peltoalalle jaettuna säästö on noin 3 tonnia CO_2 per peltohehtaari. Hiileksi laskettuna säästö on noin 800 kg C/ha/vuosi. Symbioosi tuottaa siis tämän verran vähemmän hiilidioksidiksi laskettuja päästöjä per vuosi kuin mitä syntyy tavanomaisessa maataloudessa ja leipäketjussa.

Ilmastohyötyjen lisäksi on tärkeä ottaa huomioon mallin vaikutukset alkutuotannon asemaan ruokajärjestelmässä. Agroekologisessa symbioosissa maatilat ovat lähempänä kuluttajaa ja osana ruoanjalostusta sen sijaan, että ainoa tehtävä olisi tuottaa raaka-ainetta ruokatehtaille. Tämä lisää mallin hyväksyttävyyttä viljelijöiden keskuudessa ja edesauttaa mallin monistettavuutta.



Kuva 14. Agroekologinen symbioosi (kuva: NivosOy)

3. Maaperän hiilivarasto maataloudessa



Kuva 15. Agroekologisen symbioosin avulla saavutetut hiilidioksiditonnia vastaavat päästösäästöt Palopuron yritysyhteistyön tapauksessa. Maatalouden lisäksi laskelmassa on mukana viljan leiväksi jatkojalostavan leipomoyrityksen päästösäästöt. Palopuron symbioosi viljelee n. 400 ha peltoa. Hehtaaria kohden lasketut säästöt ovat 2,7 t/ha hiilidioksidiksi laskettuina. Tätä voi verrata Suomen maatalouden keskimääräiseen päästöön, joka turvemaiden suuri osuus mukaan luettuna on 2,8 t/ha. Jos koko peltoala olisi leipävilja – bionurmi –kierrossa, symbioosi voisi tuottaa noin 2500 kg leipää/ha vuodessa. Ruis- tai vehnäleivän tavanomaisen tuotannon elinkaarinen päästö on noin 1,5 kg hiilidioksidia vastaava määrä kiloa leipää kohden; luku pitää sisällään viljelyn osuuden, joka on noin 40 %. Leipäkilon tuottamisessa syntyvistä päästöistä saadaan Palopuron mallissa säästettyä noin 70 %.

(JHel ja KK)

4. Käytännön hiiliviljelyä ja kokeilijoita

Suurien muutosten saavuttaminen edellyttää tutkimusta ja selvittämistä, kokeilua ja asialle omistautumista. Erehdyksistä otetaan oppia ja uusia keinoja ongelmien ratkaisemiseen rakennetaan käytännössä. Töitä tehdään yhdessä. Tavoite on tärkeä ja motivoiva. Kestävä ruoantuotanto on avain tulevaisuuteen.

4.1. Erilaisia Carbon Action -viljelijöitä

Carbon Action -alustan (www.carbonaction.org) viljelijäyhteistyössä on mukana sata vapaaehtoista, omasta motivaatiostaan mukaan lähtenyttä hiiliviljelijää. Nämä viljelijät opiskelevat tulevien vuosien aikana hiilen varastoitumisen prosesseja ja menetelmiä pienryhmissä viljelijäkollegojen, neuvojien ja tutkijoiden tuella. Tavoitteena on kääntää koko tilan pelto- ja laidunalueiden viljely hiiltä varastoivaksi.

Hiilitiloilla ensimmäinen askel hiiliviljelyyn on ollut tutkimuslohkon perustaminen ja maanäytteiden otto tältä valitulta lohkolta. Vähintään kolmen hehtaarin suuruinen tutkimuslohko on jaettu verrokkiosioksi ja koeosioksi. Tutkimus lohkolla kestää viisi vuotta. Sen tuloksia arvioidaan maanäytteiden avulla. Niistä analysoidaan mm. tutkimuslohkon koeosioon ja verrokkiosioon sitoutuneen hiilen määrää.

Koelohkoilta tehdään koko koejakson ajan havaintoja muun muassa sadon määrästä, viljelytoimenpiteistä, sääolosuhteista sekä viljelykasveista. Carbon Action -hiiliviljelijät pitävät tarkasti kirjaa koelohkollaan tekemistään toimenpiteistä ja havainnoista, ja lopulta ne yhdistetään maanäytteistä saatuihin tuloksiin.

Verrokkiosiossa viljelyä toteutetaan kuten ennenkin ja koeosiossa sovelletaan yhtä tai useampaa hiilensidontaan ja maan kasvukunnon parantamiseen tähtäävää viljelytoimenpidettä, kuten maanmuokkauksen keventäminen, yhteyttämisen lisääminen kasvipeitteisyyden lisäämisellä, kasvuajan pidentämisellä ja satojen kasvattamiseen tähtäävillä laji- ja lajikevalinnoilla sekä viljelykasvivalikoiman ja viljelykierron monipuolistaminen. Sopivat toimenpiteet on valittu tilan tuotantosuunnan ja siihen liittyvien tarpeiden mukaisesti.

Sadan hiilitilan joukosta on valittu tarkemman tarkastelun kohteeksi 32 tilaa, joilla tutkitaan syvällisemmin keinoja nopeuttaa hiilen varastoitumista maaperään, muun muassa metrin syvyydestä otettavien maanäytteiden avulla. Lisäksi 20 tilan peltolohkoille perustetaan kokeita hiilen kulun ja hiilivarastojen tarkempaan tutkimukseen.

Esimerkkejä Carbon Action -hiilitiloista

Hiilitilat edustavat monipuolisesti erilaisia kasvin- ja kotieläintuotannon tuotantosuuntia sekä tavanomaista ja luonnonmukaista tuotantoa. Tilat tuottavat tutkimuslohkoillaan toteutettavan tutkimuksen avulla arvokasta ja hyödyllistä tietoa hiilensidonnan keinoista käytännön viljelyssä.
Esimerkkejä Carbon Action hiilitiloista ovat Pertti Pasurin tila Juupajoella, Siri Taalaksen ja Jani Pekkolan tila Hauholla, Laura Heimschin tila Espoossa, Heikki Salomaan tila Orivedellä, Antti Lähteen tila Joutsenossa sekä Perttu Perälän tila Laihialla.

Pertti Pasurin tilalla Juupajoella tavoitellaan hiilineutraaliutta ja osataan katsoa tulevaisuuteen. Myös tilan tuleva, nuori jatkaja

pitää hiilen sidontaa tärkeänä. Tila on erikoistunut kasvattamaan vaatimattomiin olosuhteisiin sopeutuneita ympärivuotisesti laiduntavia Highland-sonneja. Pasurin mukaan hänen tilansa tuotantosuunta soveltuu hyvin hiiliviljelykäytäntöjen testaamiseen, sillä hiilipilottiin osallistuminen ei vaatinut suuria muutoksia tuotannossa.

Tilalle testiin valikoituneita hiiliviljelytoimenpiteitä ovat runsas, kahdeksan eri lajin heinäkasvivalikoima ja maan kunnosta huolehtiminen. Heinäkasvien runsas lajikirjo edesauttaa hiilensidontaa, sillä eri lajit ovat parhaassa kasvuvaiheessaan eri olosuhteissa ja kasvukauden eri aikoina. Tällä pyritään maksimoimaan kasvukaudenaikaista yhteyttämistä.

Siri Taalas ja **Jani Pekkola** kasvattavat tilallaan Hauholla lampaita ja viljelevät noin sadan hehtaarin pinta-alalla viljaa, härkäpapua ja nurmea. Viljelyssä toteutetaan minimimuokkausta ja viljelijät ovat kiinnostuneita hiilen sidonnasta ja muutoin ympäristöystävällisestä viljelystä. Siksi myös Carbon Action herätti kiinnostuksen ja tila päätti osallistua sen viljelijäyhteistyöhön.

Hiiliviljelykäytännöistä he valitsivat testiin nurmen lajikirjon lisäämisen ja monipuolistamisen. Tilan hiilipilottiin kuuluvalla tutkimuslohkolla verrokkiosion nurmessa kasvaa yhteensä kolmea kasvilajia ja koeosion nurmessa yhdeksää. Tämä käytäntö soveltui hyvin olemassa olevaan nurmituotantoon. Tutkimustiedon perusteella voidaan odottaa lajirikkaamman seoksen sitovan paremmin hiiltä verrattuna vähälajiseen seokseen. Nurmituotannon hiilen sidonnan kannalta tärkeää on myös, ettei kasvustoa niitetä liian matalaksi.

Hiilen sidonnan lisäksi tilalla nurmituotantoa ja laidunnusta pidetään muutoinkin monin tavoin hyödyllisenä ja tärkeänä. Se muun muassa ylläpitää ja parantaa maan kasvukuntoa sekä vaikuttaa positiivisesti luonnon monimuotoisuuteen. Samalla sopeutuminen erilaisiin, myös ääreviin, olosuhteisiin paranee. Taalas ja Pekkola näkevätkin hiiliviljelyn pelkkää ilmastokysymystä laajempana ja ymmärtävät myös sillä saavutettavat tuotannolliset hyödyt.

PienenKylän tilaa Espoossa viljelevä **Laura Heimsch** näkee maatalousmaiden hiilen sidonnan monelta kannalta positiivisena asiana. Hiilen sitominen paitsi hillitsee ilmastonmuutosta, myös parantaa maan hyvinvointia. Heimsch pitää monimuotoista ja hyvinvoivaa maata etuna niin ympäristölle, viljelijöille kuin kuluttajillekin, sillä hänen mukaansa se parantaa viljelykasvien satojen laatua ja takaa maan tuottavuuden myös tulevaisuudessa. PieniKylä on mukana Carbon Actionissa, koska viljelijän mukaan hiilen sidonnasta on tärkeää saada tieteellistä tietoa käytännön tasolta. PienenKylän tilalla monimuotoisuus ja maanhoito ovat alusta lähtien olleet tärkeitä lähtökohtia koko viljelylle. Pilottiin kuuluvalla tutkimuslohkolla toteutettaviksi toimenpiteiksi tilalla on valittu runsas ja monimuotoinen kasvipeitteisyys, syväjuuristen kasvilajien suosiminen, kevytmuokkaus sekä kompostilla lannoittaminen. Tila testaa siis yhtäaikaisesti useampia hiiliviljelytoimenpiteitä.

Heikki Salomaa Orivedeltä toimii yrittäjänä **Kotaniemen** maitotilalla. Pelloilla kasvatetaan myös nurmirehua lehmille. Salomaa on kiinnostunut tuotantonsa vaikutuksista ympäristöön ja havainnut ympäristöystävällisten käytäntöjen olevan edullisia myös tuotantoa ajatellen. Jo ennen hiilipilottiin liittymistä tilan

nurmiseokset ovat olleet monipuolisia ja tavanomaiseen tuotantoon on liitetty luomussa hyväksi havaittuja käytäntöjä. Niistä Salomaa mainitsee esimerkkinä pelloilleen levitettävän lehmien kylmäpihatosta saatavan kuivalannan. Hän kertoo sen olevan hyvää maanparannusainetta, joka ylläpitää ja parantaa maan kuntoa monin tavoin.

Salomaa on tyytyväinen Carbon Action- koulutuksesta saamiinsa oppeihin siitä, kuinka eri viljelykäytännöt vaikuttavat nautatilan tuotantoon, maaperään ja hiilen sidontaan. Hänen tilansa tutkimuslohkolla testattaviksi hiiliviljelykäytännöiksi valikoituu todennäköisesti keinoja, joilla nurmen kasvuaikaa pidennetään. Kasvuaikaa pidentämällä saadaan lisättyä nurmikasvuston yhteyttämistä. Maitotilalla on luonnollista keskittyä hiilen sidontaan nimenomaan nurmipelloilla.

Kasvinviljelytilan yrittäjä ja opinnoissaan loppusuoralla oleva agrologiopiskelija **Antti Lähde** viljelee tilallaan Joutsenossa ruista, vehnää, kuminaa sekä rypsiä ja rapsia. Tilan viljelykäytännöissä huomionarvoista on vuodesta 2002 asti toteutettu kevennetty muokkaus ja suorakylvö. Pelloilla on siis jo pitkään vältetty liiallista muokkauksen aiheuttamaa maaperän luontaisen toiminnan häirintää. Maaperän hyvinvointi ja sen positiiviset vaikutukset tuotannolle ja ympäristölle olivatkin Lähteen syitä lähteä mukaan Carbon Actionin viljelijäyhteistyöhön. Hän toivoo hiiliviljelyn auttavan ilmastonmuutoksen hillinnässä. Ilmastonmuutos tai muut ympäristöongelmat eivät kuitenkaan ole viljelijän ainoa syy toteuttaa hiiliviljelyä. Lähde tietää hiiliviljelyyn kuuluvien viljelytoimien parantavan myös peltojen kasvukuntoa. Tämä on tärkeää, jotta ymmärtää toimien mahdollisuudet myös tilan tuotannon ja kannattavuuden kehittämisessä ja parantamisessa.

Lähteen tilan tutkimuslohkoon on kylvetty ruista. Tutkimuslohkoon kuuluvan koeosion ja verrokkiosion erottaa toisistaan rukiin sekaan kylvetyt nurmiseokset. Koeosioon on rukiin lisäksi kylvetty kahdeksan eri lajin nurmiseos. Verrokkiosiossa rukiin sekaan kylvetty nurmiseos on vain kaksilajinen. Nurmikasvusto jatkaa yhteyttämistä ja kasvua, kun rukiin kasvu päättyy ja sato korjataan. Tässä tapauksessa runsaslajisen nurmen pitäisi sitoa hiiltä paremmin kuin vähälajisen nurmen.

Laihialla **Naskalin** tilaa pitävä **Perttu Perälä** on mukana Carbon Action viljelijäyhteistyössä. Hän on kiinnostunut peltojensa kasvukunnosta ja tuottavuudesta. Pellon lisääntyvän multavuuden ja mikrobiaktiivisuuden positiiviset vaikutukset tuotannolle ovat Perälän tiedossa ja hän uskoo hiiliviljelytoimien tuovan hyötyä niin ympäristölle kuin tuotannollekin. Hänen mukaansa lisääntyvä multavuus parantaa pellon viljelyominaisuuksia kaikin puolin. Tämä saattaa näkyä esimerkiksi kalliiden tuotantopanosten vähentyneinä käyttömäärinä tulevaisuudessa. Pitkällä aikavälillä toimet siis vaikuttavat edullisesti myös tuotannon kannattavuuteen. Carbon Actionin viljelijäyhteistyöstä Perälä odottaa saavansa oppia ja kokemuksia hiiliviljelykäytäntöjen toimivuudesta käytännössä. Hänen tilallaan tutkimuslohkolla viljellään ensimmäisenä vuonna ohraa ja seuraavina vuosina muita satokasveja pellon viljelykierron mukaisesti.

Verrokkiosiossa satokasvia viljellään tilan aikaisempien käytäntöjen mukaisesti ja koeosioon kylvetään satokasvin lisäksi kerjääjäkasviksi raiheinää. Koeosiossa satokasvin alapuolella kasvava raiheinä jatkaa kasvuaan mahdollisimman pitkään satokasvin puinnin jälkeen. Tämän hiiliviljelykäytännön tarkoituksena on siis lisätä pellolla tapahtuvaa vuodenaikaista yhteyttämistä. Kerääjäkasvi hyödyntää

kasvukautta satokasvin kasvun päättyessä ja siten ylläpitää elävää kasvipeitettä kauemmin kuin varsinainen satokasvi.

Osaa hiilitiloista haastateltiin kesän 2019 aikana. Haastatteluissa tuli kattavasti ilmi viljelijöiden motiiveja ja syitä mukaan lähtemiselle sekä kokemuksia nyt, kun viljelijät ovat jo osallistuneet hiiliviljelykoulutukseen ja hiiliviljelytoimien toteuttaminen tilojen koelohkoilla ja muu viljelijöille kohdistettu toiminta on alkanut.

Todella monen viljelijän kärkimotiiveissa oli halu parantaa omien peltojensa kasvukuntoa ja saavuttaa sen myötä tärkeitä tuotannollisia hyötyjä. Samalla viljelijät toivovat onnistuvansa kasvattamaan peltojensa hiilipitoisuutta pitkällä aikavälillä, jolloin tuotanto olisi arvokasta työtä myös ilmastonmuutoksen hillinnässä. Tämän myötä suomalaisen maatalouden toivotaan saavan myös positiivista näkyvyyttä ja arvostusta kuluttajien keskuudessa. Kyse on samalla ilmastonmuutoksen vaikutuksiin ja muihin tulevaisuuden haasteisiin sopeutumisesta tilan tuotantoa kehittäen.

Moni viljelijä on esimerkiksi tunnistanut erityisesti viime vuosina kuivuus- ja märkyysjaksojen sekä heikossa kasvukunnossa olevan peltomaan aiheuttamat haitat tuotannossa. Nyt viljelijät haluavatkin tehdä tosissaan töitä peltojensa kasvukunnon parantamiseksi. Viljelijöiden yhteistyöhalukkuus ja motivoituminen ovat todella tärkeitä ja arvokkaita asioita Carbon Action -työssä. Lue tarkemmin: https://carbonaction.org/carbon-actionin-uudet-tutkimukset-kaynnistyneet-viljelijat-kiinnostuneina-mukana/

(LHö ja UW)

4.2. Esikuvia maailmalta

Hiiliviljelyyn ja maatalousmaan orgaanisen hiilivaraston kasvattamiseen liittyviä esimerkkejä löytyy muun muassa Yhdysvalloista, Australiasta, Pohjanmeren alueelta, Afrikasta ja Ranskasta. Maailmalla toimii useita voittoa tavoittelemattomia järjestöjä ja ryhmiä, jotka kehittelevät tieteelliseen tietoon perustuvia hiiliviljelykäytäntöjä, edistävät niiden käyttöönottoa maataloudessa, kouluttavat viljelijöitä hiiliviljelyyn sekä lisäävät hiiliviljelyn tunnettavuutta tiedottamalla. Näitä ovat muun muassa yhdysvaltalaiset Green America- ja Kiss the Ground-organisaatiot, australialainen Green Collar-organisaatio sekä organisaatioita yhteen kokoava yhdysvaltalainen Carbon Cycle Institute. Kannattaa seurata 4/1000 -aloitteen kotisivuja ja uutiskirjettä, aloitteen sihteeristö tehokkaasti koostaa yhteen eri puolilla tehtävää työtä.

https://www.greenamerica.org/food-climate/what-carbon-farming
https://kisstheground.com/farmland/
https://greencollar.com.au/carbon-farming/
https://www.carboncycle.org/carbon-farming/
https://www.4p1000.org/

Lisäksi on esimerkkejä maatalouden osallistamisesta hiilipäästökauppaan hiiliviljelyn avulla (Carbon Farmers of Australia) sekä hiiliviljelyä maatiloilla pilotoivista ja edistävistä projekteista (The Marin Carbon Project ja Interreg North Sea Region Carbon Farming). Muita esimerkkejä ovat muun muassa laajan mittakaavan viljelyyn soveltuvia hiiliviljelyn käytäntöjä Afrikan pientiloille soveltava Carbon Farmer, maatilojen hiilijalanjälkeä laskeva nettipalvelu COMET-farm, laaja aloite maaperän hyvän kunnon palauttamisesta ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi (Soil

Carbon Initiative) sekä hiilen sidontaan liittyvää tutkimusta ja tiedonvälitystä synergisoiva hanke (CIRCASA). Keskeisimmistä EU:ssa käynnissä olevia hiiliviljelyaloitteista ja -hankkeista keskusteltiin Brysselissä syksyllä 2019 (kts kooste: https://www.ecologic.eu/16816).
https://carbonfarmersofaustralia.com.au/carbon-farming/
https://www.marincarbonproject.org/carbon-farming
https://northsearegion.eu/carbon-farming/.
http://www.carbon-farmer.com
http://cometfarm.nrel.colostate.edu
https://www.soilcarboninitiative.org
https://www.circasa-project.eu

Käytännöllisiä esimerkkejä hiiliviljelystä ja pilotoinnista löytyy ainakin Australiasta (Carbon Farmers of Australia), Yhdysvalloista (The Marin Carbon Project ja Kiss The Ground) sekä Pohjanmeren alueelta (Interreg North Sea Region Carbon farming).

Carbon farmers of Australia on Australiassa toimiva alueellinen hiilikauppaneuvoja. Se auttaa maanviljelijöitä ja maanomistajia pääsemään mukaan hiilikauppaan ja ansaitsemaan hiilihyvitystä erilaisten hiiliviljelykäytäntöjen avulla. Maatiloilla toteutettavia hiilihyvitykseen oikeuttavia yleisiä keinoja on viisi, joista kaksi liittyy hiilen sidontaan.

Toinen mahdollisuuksista on alueen kotoperäisten puu- ja pensaslajien kasvattaminen maatalousmaalle. Puut ja pensaat sitovat maanpäälliseen biomassaansa sekä laajaan juuristoonsa hiiltä ja tämän avulla viljelijä voi ansaita hiilihyvitystä. Hiilen sidonnan laskeminen tapahtuu Australian hallinnon toimittaman laskurin avulla.

Toinen Australiassa sovellettava hiilen sidontaan perustuva hiilihyvityksen ansaintamahdollisuus liittyy hiilen sitomiseen ja varastoimiseen maaperään maatalousmaalla. Toistaiseksi saatavilla on vain laidunjärjestelmille sovellettava menetelmä. Viljelymaahan sovellettava menetelmä on vasta kehitteillä. Laidunmaille sovellettavassa menetelmässä viljelijällä on oltava pysyvä laidun, tai laidun joka muutetaan pysyväksi.

Hiilihyvityksen ansaitsemiseksi hiiliviljelylaitumella on otettava käyttöön vähintään yksi uusi hiilen sidontaan tähtäävä käytäntö. Näitä käytäntöjä ovat esimerkiksi viljelymaan muuttaminen laidunmaaksi, laitumen lajikoostumuksen muuttaminen yksivuotisista kasveista monivuotisiksi, laiduntamisen säätely liikalaidunnuksen välttämiseksi tai käytettävien mineraalilannoitteiden vaihtaminen orgaanisiin.

Maasta otetaan maanäytteet ja niistä määritetään maaperän orgaanisen hiilen määrä ennen hiiliviljelyn aloitusta. Myöhemmin maaperästä otetaan maanäytteitä, joiden orgaanisen hiilen pitoisuuksia verrataan ensimmäisiin näytteisiin ja tämän perusteella arvioidaan hiilen sitoutumisen onnistumista.

The Marin Carbon Project pyrkii parantamaan hiilen sitoutumista maaperään laidun-, viljely- ja metsämailla soveltavan tutkimuksen, pilotoinnin ja käytäntöjen avulla. Kaliforniassa Marinin piirikunnan alueella toimivan projektin tavoitteena on kehittää monistettava maatalouden hiilensidontaohjelma, joka sisältää viljelijöiden kenttätyön, teknisen infrastruktuurin sekä taloudellisen tuen.

Projekti aloitti vuonna 2013. Mukaan otettiin kolme pilottitilaa.

Ensimmäinen niillä toteutettu toimenpide oli kompostin levittäminen tilojen tietyille viljelymaille. Tämän jälkeen tehtiin tilakohtaiset hiiliviljelysuunnitelmat. Keinoja ovat muun muassa kompostin levitys pelloille, laiduntamisen muuttaminen kiertolaidunnukseksi sekä suojakaistojen perustaminen.

Myöhemmin ohjelmaan on otettu mukaan lisää viljelijöitä. Tavoitteena on lisätä ohjelmassa mukana olevien hiiliviljelytilojen määrä kahteenkymmeneen vuoteen 2020 mennessä.
Näille tiloille laskettu hiilen sidontapotentiaali on noin 124 tonnia hiilidioksidia kahdenkymmenen vuoden aikana.

Kiss the Ground -aloite on maaperäasioiden puolestapuhuja neljässä eri ohjelmassa. Yksi ohjelmista keskittyy maatalousmaahan ja regeneratiivisen viljelyn edistämiseen. Aloite rahoittaa sellaisia viljelijöiden koulutuksia sekä maanäytteiden ottoja, jotka tukevat viljelijöiden ja tilojen siirtymistä regeneratiiviseen viljelyyn.

Viljelijöitä koulutetaan omaksumaan muun muassa maan muokkausta vähentävää viljelyä, aluskasvien käyttöä sekä mukautuvaa laidunnusta. Koulutuksen lisäksi ohjelmaan osallistuvat viljelijät saavat asiantuntijoiden toteuttaman pellon konsultoinnin ja ilmaiset maanäytteet ohjelman ensimmäisenä ja kolmantena vuonna.

North Sea Region Carbon farming -projekti käynnistyi Pohjanmeren alueella syksyllä 2018. Kolmevuotisessa projektissa on mukana seitsemän toimijaa Pohjanmeren alueen valtioista.
Tavoitteena on parantaa maatalousmaan maaperän kuntoa ja hillitä samalla ilmastonmuutosta, jolloin projektista hyötyy viljelijöiden lisäksi koko yhteiskunta. Tarkoituksena on tuoda tuoreita teknisiä näkökulmia maatalouteen sekä luoda uusia liiketoimintamalleja.

Projektin tavoitteena on kannustaa viljelijöitä hiilen sitomiseen sekä kasvattaa tietoisuutta hiilensidonnan keskeisestä roolista Pohjanmeren alueen maatalouden ympäristöystävällisyyden lisäämisessä. Projektin nettisivuilla listattuja hiiliviljelykäytäntöjä ovat mm. aluskasvien kylväminen satokasvien jälkeen, viljelykierrot, peltometsäviljely, maanmuokkauksen vähentäminen tai lopettaminen sekä pysyvien nurmien perustaminen.

(LHö ja UW)

4.3 Tutkimusesimerkkejä

Kaasunvaihtomittaukset Qvidjassa 2018

Ilmatieteen laitos mittaa hiilidioksidin virtoja tuorerehunurmen ja ilmakehän välillä jatkuvatoimisella pyörrekovarianssimenetelmällä Qvidjan tilalla Paraisilla, Varsinais-Suomessa (kuva 16). Mittaukset alkoivat toukokuussa 2018 ja jatkuvat edelleen. Menetelmä mittaa nettovaihtoa eli hiilidioksidin vapautumisen ja kasvien yhteyttämisen erotusta.

Kuvassa 17. negatiiviset mittausarvot kertovat, että nurmikasvien yhteyttäminen on ollut voimakkaampaa kuin kasvien hengittäminen ja maan orgaanisen aineen hajoaminen. Tällainen tilanne on tyypillinen kesällä keskipäivän aikaan. Positiiviset arvot sen sijaan tarkoittavat, että hiilidioksidin vapautuminen on ollut suurempaa kuin yhteyttäminen, eli hiiltä on vapautunut pellosta ilmakehään.

Tällainen tilanne on tyypillisesti aina öisin tai kasvien yhteyttämisen ollessa muuten vähäistä esimerkiksi niiton tai huonon säätilan yhteydessä. Summaamalla hetkellisiä tuloksia voidaan tarkastella, onko peltoekosysteemi ollut hiilen lähde tai nielu esimerkiksi vuoden aikana.
Pelto niitettiin kaksi kertaa kesän aikana, kesäkuussa ja syyskuussa, minkä lisäksi se niittomurskattiin kertaalleen elokuussa.

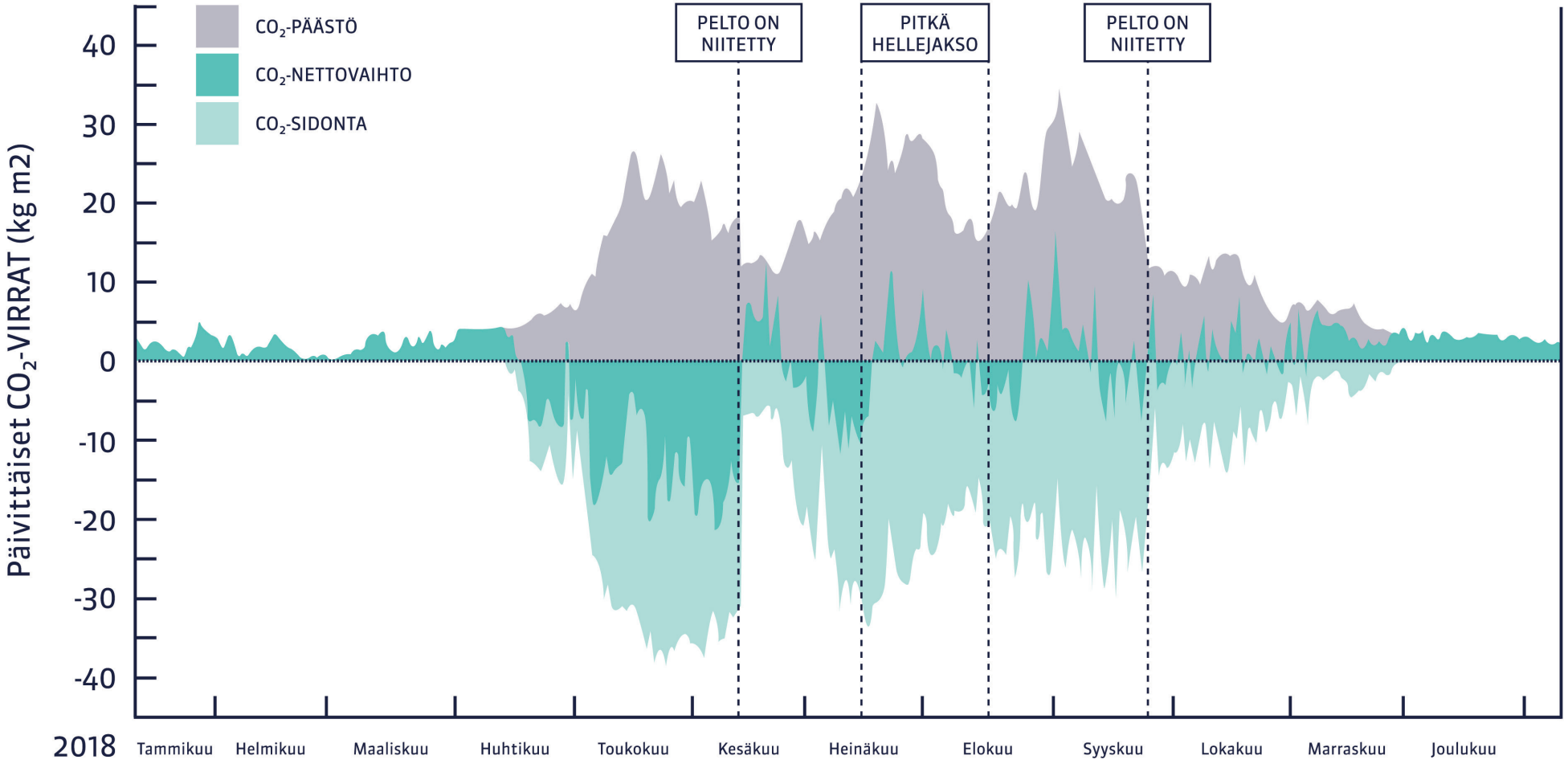


Kuva 16. Pyörrekovarianssilaitteisto Qvidjan nurmella. Kuva: Laura Heimsch

Melassilannoitetta levitettiin peltoon heinäkuun puolessavälissä ja elokuun lopulla. Niittomurskauksessa sänki jätettiin 15 cm korkeaksi, eikä se juurikaan vaikuttanut hiilen sitoutumiseen. Muut toimenpiteet sen sijaan heikensivät hiilen sitoutumista maahan.

Niitossa suurin osa yhteyttävästä lehtipinta-alasta leikataan pois, joten myös hiilen sitoutuminen heikkenee heti niiton jälkeen. Kesäkuussa 2018 lisäksi kuivuus vaikeutti nurmen palautumista niitosta. Pelto olikin hiilen lähde jonkin aikaa. Melassin levitys lisäsi pellossa maaeliöiden hengitystä ja siten hiilidioksidin vapautumista maasta ilmakehään. Tämä näkyy molempien levityskertojen jälkeen nettovaihdon kasvamisena.

Kuivuus oli pahimmillaan heinä-elokuussa, jolloin myös kasvien yhteyttämiskyky heikentyi. Sateiden yleistyttyä elokuun loppupuolelta alkaen nurmi alkoi kasvaa paremmin ja hiiltä sitoutui tehokkaammin. Suhteellisen korkeiden lämpötilojen takia huomattavaa hiilensitoutumista havaittiin vielä marraskuussa. Kokonaisuudessaan pelto oli vuonna 2018 hiilen nielu eli se sitoi hieman enemmän hiiltä kuin siitä vapautui, kun huomioidaan myös niitoissa poistunut ja melassin mukana peltoon tullut hiili.



Kuva 17. Pyörrekovarianssimittauksilla määritetty nurmen päivittäinen hiilitase Qvidjan tilalla Paraisilla vuonna 2018.

(LHeim ja LK)

Hiilen kierron mikrobien toiminnan ja vaikutusten tutkimus Qvidjassa 2018

Helsingin yliopiston tutkijat tutkivat kaurapellolla Qvidjan tilalla Paraisilla neljän maanparannusaineen vaikutusta kauran juuriston ja maaperän mikrobiologiaan, mururakenteeseen sekä hiili-typpi (C/N) suhteeseen. Koealaa ylläpitää Soilfood Oy ja se perustettiin vuonna 2016, jolloin maanparannusaineet levitettiin ensimmäisen kerran.

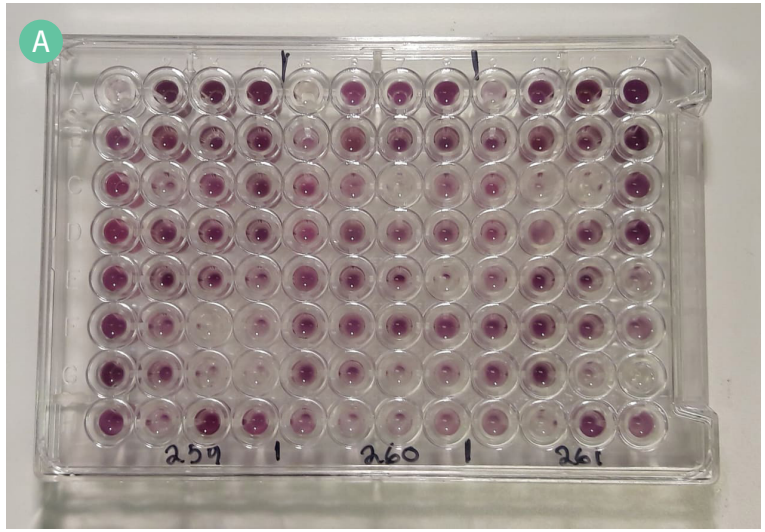
Mikrobeilla on tärkeä rooli hiilenkierrossa. Ne toimivat esimerkiksi orgaanisen hiilen hajottajina ja mahdollisesti sitojina pysyvämpään muotoon. Mikrobien hajotustoiminta on tarpeellista ravinteiden kierrolle. On myös mahdollista, että mikrobien toiminnan, kasvun ja maan mururakenteen välillä on yhteys. Maanparannusaineilla pyritään parantamaan maan rakennetta ja kasvukuntoa. Vielä ei kuitenkaan tiedetä tarkasti, miten ne vaikuttavat maan ja juuriston mikrobeihin.

Kesän 2018 aikana näytteitä otettiin maasta kuusi kertaa ja kauran juurista kolme kertaa. Jotta näytteet eivät sekoittuisi, kerättiin näytteet omiin puhtaisiin pusseihinsa. Lisäksi näytteenottovälineet puhdistettiin ja steriloitiin koeruutujen välissä. Useimmat mikrobien toimintaan liittyvistä mittauksista tehtiin tuoreesta maasta heti, kun maa oli seulottu. Sitä ennen maanäytteet pidettiin viileässä (+ 4 astetta) mikrobiologisen toiminnan hidastamiseksi. Mikrobien DNA:han perustuva mikrobiyhteisöjen määritys edellyttää, että maa- ja juurinäytteet pakastetaan mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen. Näin tehtiin.

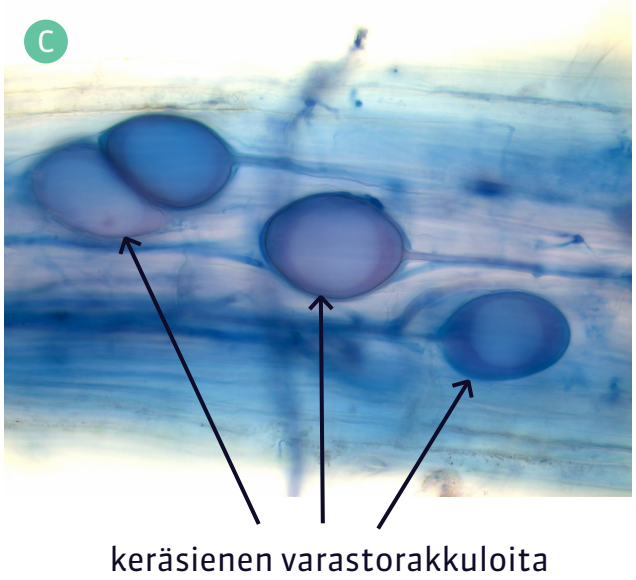
Mikrobien toimintaa mitattiin maasta maahengityksenä ja solunulkoisten entsyymien aktiivisuuksina. Lisäksi maanäytteiden mikrobiyhteisöille määritettiin Biolog Ecoplate -levyjen avulla erilaisten hiiliyhdisteiden käyttöpotentiaaliin perustuvat profiilit (KUVA 1A). Mikrobien läsnäoloa mitattiin maanäytteistä määrittämällä niiden kokonaisbiomassa kloroformifumigaatio-uuttomenetelmällä sekä juurinäytteistä mikroskopoimalla.

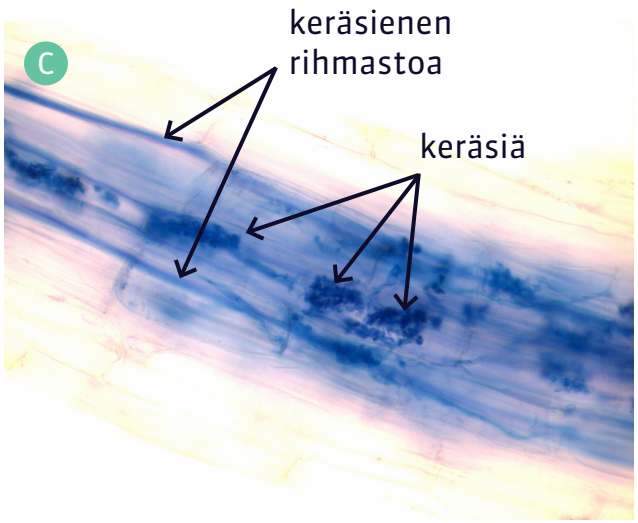
Mikroskopoimista varten juuret (KUVA1B) ensin pestiin ja sen jälkeen värjättiin, juurissa esiintyvien sienirakenteiden (KUVA1C) erottamiseksi. Tarkimman mahdollisen tiedon saamiseksi mikrobiyhteisöt määritettiin maa- ja juurinäytteistä myös eristäen näytteiden kokonais-DNA ja sen jälkeen tutkimalla tästä DNA:sta esiintyvä mikrobi-DNA Illumina Miseq sekvensoinnin avulla.

Koska eliöyhteisöt muuttuvat yleensä elottoman tai elollisen ympäristön muuttuessa, mikrobeihin liittyvät tiedot haluttiin kytkeä maanparannusaineiden lisäämisen myötä tapahtuneisiin peltomaan fysikaalisiin ja kemiallisiin muutoksiin. Tällaisina mittareina tutkimuksessa käytettiin eri maanparannusaineilla käsitellyistä koe- ja kontrolliruuduista tehtyjä maan mururakenteen, kosteuden, multavuuden, pH:n ja hiili-typpi suhteen määrityksiä. Mikrobiologian lisäksi tutkittiin kauran biomassaa ja satoa. Biologisten, kemiallisten ja fysikaalisten tekijöiden yhteyksien mallintaminen on vielä kesken.









Kuva 18. A) Pipetoitu Biolog Ecoplate levy, B) pestyjä kauran juuria C) Kuvassa värjättyjä kauran juuria, joissa näkyy keräsienten rakenteita mikroskoopissa.

Kuvat 18A ja 18B: Karoliina Huusko.
Kuva 18C: Anna-Reetta Salonen.

5. Hiilimarkkinat ja taloudelliset ohjauskeinot

Maatalousmaiden maaperän hiilivaraston kasvattamisen mahdollisuuksien täysimittainen hyödyntäminen edellyttää ilmastoviisaan maataloustoiminnan laajamittaista, pitkäjänteistä ja systemaattista toteuttamista maatiloilla. Jotta hiiltä maaperään pitkällä aikavälillä varastoiva maataloustoiminta yleistyy ja on taloudellisesti kannattavaa, tarvitaan siihen kannustimia ja yhteiskunnan tukea ja ohjausta.

Yksi vaihtoehto on ottaa maatalous mukaan vapaaehtoiseen hiilikauppaan ja luoda maatalouden maankäytön hiilinielut hyväksyvä markkinapaikka. Hiilimarkkinat syntyvät, kun toimijat hankkivat päästövähennyksiä tai hiilinieluhyvityksiä kompensoidakseen päästöjään, joko vapaaehtoisesti tai ilmastopolitiikan velvoittamana.

Hiilikaupasta puhuttaessa keskeisiä käsitteitä ovat päästöyksikkö, päästöoikeus, päästövähennyshyvitys ja hiilinieluhyvitys.
Päästöyksiköllä tarkoitetaan yhden ekvivalenttisen hiilidioksiditonnin (1 t CO2-ekv.) suuruista kasvihuonekaasupäästöä tai –päästövähennystä.
Päästöoikeus puolestaan on viranomaisen myöntämä oikeus yhden päästöyksikön suuruiseen päästöön.
Päästökatolla rajoitetaan päästöoikeuksien kokonaismäärää.
Päästövähennyshyvitys ja **hiilinieluhyvitys** ovat yhden päästöyksikön suuruisesta päästövähennyksestä ja yhden päästöyksikön suuruisesta hiilivaraston kasvattamisesta jonkin tietyn standardin mukaisesti maksettavia hyvityksiä. Hyvitys ansaitaan tuottamalla päästövähennys tai lisäämällä hiilinielua ja myymällä vähennys tai nielu toiselle toimijalle korvaamaan tämän aiheuttamia päästöjä.

Maatalouden tapauksessa kasvatettava hiilivarasto eli tavoiteltu hiilinielu on maatalousmaan hiilivarasto ja maatalousyritysten ansaintamahdollisuus hiilimarkkinoilla on hiilinieluyksiköiden myyminen. Kaupan kohteena olevien päästövähennys- ja nieluhyvitysyksiköiden tulee olla lisäisiä, eli ilman hiilikauppaa niitä ei olisi tuotettu normaalissa toiminnassa. Lisäisyys määritetään normaalia toimintaa kuvaavan perusuran avulla. Päästöihin liittyvällä perusuralla tarkoitetaan tiettyä normaalikehityksen mukaista päästömäärää tiettynä ajanhetkenä. Myyntikelpoisia päästövähennysyksiköitä voidaan ansaita vähentämällä päästöjä hyväksytyn perusuran alapuolelle eli tuottamalla lisäinen päästövähennys.

Samalla logiikalla toimii tietyn kasvatettavan hiilivaraston eli hiilinielun perusura. Perusura eli hiilivaraston koko, ja sen oletettu normaalikehitys, määritetään ja hyväksytään tietylle tasolle. Myytäviä hiilinieluyksiköitä voidaan tuottaa kasvattamalla kyseistä olemassa olevaa hiilivarastoa suuremmaksi kuin se on arvioidun perusuran mukaan. Näin ollen hiilivaraston kasvussa huomioidaan ensin niin sanotun normaalin, joka tapauksessa tapahtuvan kehityksen myötä syntyvä hiilinielu ja vasta sen lisäksi tuotettu hiilinielu on varsinaista lisäistä nielua.

Päästövähennyshyvitys on hiilinieluhyvitystä yksinkertaisempi hyvitysmalli ja helpommin vietävissä hiilimarkkinoille. Päästövähennykset voidaan aikaansaada nopeasti ja niiden vaikutus on yksiselitteinen ja pysyvä, kun ilmakehään päätyvä kasvihuonekaasupäästömäärä vähenee tietyn päästöyksikkömäärän verran.

Hiilinieluhyvityksiin liittyviä haasteita ovatkin lisäisyyteen ja

pysyvyyteen liittyvä epävarmuus sekä nielun muodostumisen aikaviive. Lisäisyyden epävarmuus liittyy perusuran määrityksen haasteellisuuteen esimerkiksi maatalousmaiden maalajien eroavaisuuksista ja muista hyvin paikallisista tekijöistä johtuen. Aikaansaatujen lisäisten hiilinielujen pysyvyyteen liittyy myös kysymys hiilinieluyksiköiden myymiseen liittyvien sopimusten pituudesta eli siitä, kuinka kauan lisäisen hiilinielun oletetaan varastoivan kyseistä hiilimäärää vapauttamatta sitä takaisin ilmakehään.

Ilmastollisesti kestävien hiilinieluhyvitysten aikaansaaminen vaatii muun muassa luotettavan laskentamenetelmän perusuran määrittämiseksi, mittausjärjestelmän todentamaan sidotun ja varastoidun hiilen määrä eli aikaansaadun lisäisen hiilinielun suuruus ja sen pysyvyys. Kaiken tämän tulee lisäksi olla läpinäkyvää ja verifioitavissa.

Hiilinieluhyvityksien aikaansaamiseen liittyvien haasteiden ratkaiseminen hiilinieluyksikön tuottamisprosessissa synnyttää myös transaktiokustannuksia eli prosessille välttämättömiä kustannuksia, jotka eivät kuitenkaan liity varsinaisten hiilinieluyksiköiden tuottamiseen vaan niiden saamiseen hyvityskelpoisiksi hiilimarkkinoille. Tästä johtuen hiilinieluyksiköiden tuottaminen hiilimarkkinakelpoisiksi saattaa muodostaa myytäville hiilinieluyksiköille niin korkean hinnan, että ne eivät ole hiiliyksikköä kohden edullisempia päästövähennysten tuottamiseen verrattuna. Tällöin tuotetuille hiilinieluyksiköille ei olisi toivottua kysyntää hiilimarkkinoilla.

Hiilinielujen todelliseen tarkoitukseen eli ilmastonmuutoksen hillintään liittyen yksi hiilinieluhyvityksien keskeisimmistä ongelmista on hiilivuotoilmiö, joka syntyy silloin kun tietyssä paikassa lisääntyneet hyvitettävät hiilinielut aiheuttavat hiilinielujen vähenemistä toisaalla. Tämä ongelma aiheutuu, mikäli hiilinieluja tuotannon yhteydessä lisäävä toiminta kasvattaa tuotannon kustannuksia, laskee tarjontaa ja vaikuttaa korottavasti markkinoille päätyvien maataloustuotteiden hintoihin. Samojen tuotteiden tarjonta saattaa lisääntyä muualla. Hiilivuotoa aiheutuu, jos tämä lisääntyvä tarjonta tuotetaan ilmaston kannalta ongelmallisilla, esimerkiksi maatalousmaan hiilivarastoa vapauttavilla tuotantomenetelmillä.

Maatalousmaiden potentiaali hiilinieluina on tunnistettu ja hiilinieluyksiköiden tuottaminen hiilimarkkinoille voi siten olla tulevaisuudessa mahdollista myös maataloudessa. Aiheeseen liittyy kuitenkin monia edellä mainittuja haasteita, jotka vähintäänkin hidastavat tällaisen markkinapaikan syntyä ja maatalouden hiilinielut huomioivan hiilikauppatoiminnan käynnistymistä.

(MO ja SL)

6. Hiilensidonnan lisäämisen haasteet ja mahdollisuudet

Haasteista

Hiilen sitominen maahan pysyvään muotoon on tavoite, johon pääseminen sisältää monenlaisia haasteita. Suurin haaste on erilaisten tavoitteiden, toimintatapojen ja olosuhteiden yhteensovittaminen siten, että maatalouden päätehtävä, sadon ja ruoan tuotanto, on tehokasta ilman että maaperä kärsii.

Luonto on onnistunut optimoimaan maaperän hiilivarastojen maksimoinnin. Jotta ihminen pystyy viljelyn ohessa samaan, viljelijältä ja koko maatalousyhteisöltä vaaditaan osaamista ja ymmärrystä siitä mitkä toimenpiteet ovat hiilensidonnalle hyväksi, mitkä suureksi haitaksi. Tutkitun tiedon puute on yksi suurista haasteista maaperän hiilensidonnan lisäämisessä. Monista hyvistä käytännöistä on kokemusperäistä ja tutkittua tietoa. Pitkän aikavälin vaikutuksista ja erilaisista yhdysvaikutuksista tarvitaan lisää tietoa.

Erityisen suuri haaste on selvittää ja määritellä ns. maan pysyvän hiilen määrä ja osuus. Osa maaperän hiilestä kun palaa ilmakehään hyvin nopeasti hiilidioksidina ja hiilensidonnassa tavoitteena on erityisesti pysyvän ja pitkäikäisen hiilivaraston luominen maahan. Luotettavien mittarien ja määritystapojen kehitystyö onkin ensiarvoisen tärkeää. Lisätieto ja varmuus erilaisten käytäntöjen toimivuudesta juuri omalla tilalla helpottaisi uusien menetelmien käyttöönottoa.

Oma tärkeä haasteensa on talous. Toimenpiteet, jotka aiheuttavat lisäkuluja, epävarmuutta tai sadon pienenemisen uhkaa, voivat olla esteenä hiiltä sitovan viljelyn aloittamiselle. Erilaiset kannustimet ja tukimuodot, jopa maatalouden hiilikauppa, nopeuttaisivat hiiltä sitovan viljelyn lisääntymistä entisestään.

Aikajännekysymys

Maaperän hiilivaraston muutokset ovat hitaita ja maaperän hiilivarastoja on vaikea mitata niin tarkasti, että pienet muutokset olisi helppoa havaita. Luonnollisen vaihtelun takia mitattavia, tilastollisesti merkitseviä muutoksia, nähdäänkin usein vasta vuosien, jopa vuosikymmenten jälkeen.

Hiilivaraston kasvattamisessa on luotettava yleensä epäsuoriin indikaattoreihin ja tunnetusti hyviin toimintamalleihin. Uusien viljelymenetelmien kokeilu on tärkeää, jotta myös niistä saadaan vähitellen niin käyttäjäkokemuksia kuin tutkimustietoa. Tässä työssä aktiiviset hiiliviljelivät ovat ratkaisevan tärkeässä asemassa.

Maaperämallien avulla pyritään arvioimaan erilaisten viljelymenetelmien vaikutuksia maan hiilivarastoon myös lyhyellä aikavälillä ja erilaisia laskureita maan hiilivaraston määrittämiseksi on kehitteillä myös Suomessa.

Mahdollisuudet

Haasteista ja hitaasta muutoksesta huolimatta tiedämme jo riittävän paljon siitä, mitkä viljelymenetelmät parantavat maaperän hiilivarastoa ja käynnistävät muutoksen oikeaan suuntaan. Tiedämme myös, että maaperän hiilivarastojen kasvattaminen parantaa maaperän multavuutta ja siten maan viljeltävyyttä.

6. Hiilensidonnan lisäämisen haasteet ja mahdollisuudet

Hiiliviljely ei siis ole este tehokkaalle ja tuottavalle viljelytoiminnalle. Hyväkuntoinen, multava pelto on monin tavoin kestävämpi häiriöitä ja poikkeustiloja, kuten kuivuutta, vastaan, kuin vastaava heikossa kunnossa oleva vähämultainen pelto. Maan kasvukunnon merkitys kasvaa tulevaisuudessa, jolloin säiden ääri-ilmiöiden ennustetaan lisääntyvän.

Hiiliviljely on niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin yksi lupaavimmista keinoista ehkäistä ilmastonmuutoksen etenemistä poistamalla hiiltä ilmakehästä. Ilmastonmuutoksen edetessä, hiilen sitomisen merkitys on niin suuri, että sitä tukevista käytännöistä tullaan todennäköisesti maksamaan tukea tai siitä tulee muulla tavoin osa maatalouden ympäristötukijärjestelmää.

Ehkä hiiliyksiköiden kauppa, kuten teollisuuden päästökauppa, on tulevaisuuden tapa hyvittää viljelijää hiiltä sitovasta toiminnasta. Tutkimus pyrkii luomaan niin tarkkoja ja luotettavia hiilen määritysjärjestelmiä ja mittaustapoja, että tulevaisuudessa myös maatalous voisi osallistua hiiliyksiköiden kaupankäyntiin.

(JHei)

7. Lopuksi

Tämä opas on syntynyt monen tutkijan yhteistyöllä. Kiitos kaikille tekijöille! Opas käsittelee hyvin monenlaisia hiileen ja maatalouteen liittyviä näkökulmia. Monia jäi vielä tämän oppaan ulkopuolelle.

Peltomaiden hiilensidonnan tutkimus on hyvin aktiivista niin Suomessa kuin maailmanlaajuisesti ja uutta tietoa tulee koko ajan lisää. Toisaalta muutosprosessit ovat hitaita, eikä kaikkia ensituloksia vielä pystytä suoraan siirtämään käytäntöön. Mutta koska uutta tietoa tulee koko ajan lisää, tätäkin opasta on tarkoitus päivittää säännöllisesti ja toimituskunta toivoo myös viljelijöiltä ja muilta oppaan lukijoilta palautetta, uusia havaintoja ja tutkimustuloksia, jotta voimme tehdä oppaan seuraavasta versiosta vieläkin paremman.

Kohti onnistunutta hiilensidontaa!



Liite 1: Termien määritelmiä

Biomassa = Tietyn alueen eliöiden yhteismassa. Esimerkiksi kasvibiomassa on tietyn alueen kaiken kasvillisuuden massa.

C = Hiili, hiilen kemiallinen merkki.

CO2 = Hiilidioksidi. Hiilen ja hapen epäorgaaninen yhdiste. Yhteyttämis- eli fotosynteesireaktion toinen lähtöaine ja hengitys- eli respiraatioreaktion toinen lopputuote. Ilmakehän säteilypakotetta lisäävä kasvihuonekaasu.

CH4 = Metaani. Hiilen ja vedyn epäorgaaninen yhdiste. Mädätysreaktion lopputuote eli hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa tapahtuvan orgaanisen aineksen hajoamisen lopputuote. Ilmakehän säteilypakotetta lisäävä kasvihuonekaasu, joka on ilmakehässä kasvihuonekaasuvaikutukseltaan 25 kertainen ja sen elinikä 5 kertaa lyhyempi hiilidioksidiin verrattuna.

SOC = Soil organic carbon eli maaperän orgaaninen hiili eli maaperän orgaanisen aineksen sisältämä hiili.

Orgaaninen hiili = Orgaanisen eli eloperäisen aineksen sisältämä hiili.

Orgaaninen aines = Eloperäinen aines. Kasvi- ja eläinperäistä ainesta, niiden rakennekomponentteja ja hajoamistuotteita.

Eloperäinen aines = Orgaaninen aines. Kasvi- ja eläinperäistä ainesta, niiden rakennekomponentteja ja hajoamistuotteita.

Multavuus = Peltomaan orgaanisen aineksen pitoisuus, jonka perusteella kivennäismaat luokitellaan vähämultaisiksi (orgaanista ainesta alle 3 %), multaviksi (3-6 %), runsasmultaisiksi (6-12 %) ja erittäin runsasmultaisiksi (12-20 %).

Hiilisyöte = Hiilen lisäys maaperään. Hiilisyötettä ovat esimerkiksi kasvien juuriston ja kasvustotähteen sekä erilaisten orgaanisten lannoitteiden ja maanparannusaineiden sisältämä hiili.

Hiilivarasto = Ekosysteemi tai sen osa, jolla on kyky sitoa tai vapauttaa hiiltä. Valtameret ovat maapallon suurin hiilivarasto. Maaekosysteemien suurin hiilivarasto on maaperä. Suomessa metsät ovat merkittävä hiilivarasto, mutta myös metsissä maaperän hiilivarasto on suurempi kuin kasvillisuuden hiilivarasto.

Hiilen sidonta = Prosessi, jossa ilmakehän hiiltä kertyy maaperään pysyvässä muodossa ja maaperän hiilivarasto kasvaa. Hiilivarastoa voidaan kasvattaa lisäämällä hiilisyötteitä maahan (esim. orgaaniset lannoitteet ja jatkuva kasvipeite, joka sitoo hiiltä ilmasta ja syöttää sitä maahan) ja hillitsemällä orgaanisen aineksen mineralisaatiota (esim. kevennetty muokkaus).

Hiilinielu = Ekosysteemi tai sen osa, jossa tapahtuvat prosessit sitovat ilmakehän hiilidioksidia orgaanisten aineiden muodostamaksi hiilivarastoksi. Vrt. hiilen lähde.

Hiilen lähde = Ekosysteemi tai sen osa, jossa tapahtuvat prosessit kasvattavat ilmakehän hiilivarastoa. Vrt. hiilinielu.

Lähdeluettelo

Artjoki, A. (2019): Hiilipolut tutuiksi. Maito ja me, Valion omistajayrittäjien ammattilehti/01-2019, 50-51

Baltic Sea Action Group: Carbon Action. https://carbonaction.org/viljelijat/. Luettu 10.5.2019.
Carbon Farmers of Australia (2018): Carbon Farming, available Methods. https://carbonfarmersofaustralia.com.au/carbon-farming/available-methods/. Luettu 13.5.2019.

Cheng, B-H. – Zeng, R.J. & Jiang, H. (2017): Recent developments of post-modification of biochar for electrochemical energy storage. Bioresource Technology, vol. 246, 224-233.

Geyer., K.M., Kyker-Snowman, E., Grandy, A.S. & Frey, S.D. 2016. Microbial carbon use efficiency: accounting for population, community, and ecosystem-scale controls over the fate of metabolized organic matter. Biogeochemistry 127:173–188.

Global carbon project (2019): The Global Carbon Project. www.globalcarbonproject.org.

Guo, L. B. & Gifford, R. M. (2002) Soil carbon stocks and land use change: a meta analysisGlobal Change Biology, Volume8, Issue 4, April 2002, p. 345-360

Hirvonen, T. (2019). Juupajokinen viljelijä muutti karjatilansa ilmastonmuutosta vastaan taistelevaksi hiilinieluksi. YLE uutiset 15.2.2019. https://yle.fi/uutiset/3-10642206. Luettu 10.5.2019.

Interreg North Sea Region: Carbon Farming. https://northsearegion.eu/carbon-farming/. Luettu 13.5.2018.

Jiang, X. – Denef, K. – Stewart, C.E. & Cotrufo, M.F. (2016): Controls and dynamics of biochar decomposition and soil microbial abudance, composition, and carbon use efficiency during long-term biochar-amended soil incubations. Biology and Fertility of Soils, vol. 52, 1-14.

Kallenbach, C.; Wallenstein, M.; Schipanksi, M.; Grandy, S. (2019): Managing Agroecosystems for Soil Microbial Carbon Use Efficiency: Ecological Unknowns, Potential Outcomes, and a Path Forward. In: Frontiers in Microbiology 10, S. 51. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01146

Kiss the Ground: Connecting restaurants and customers to their regional farmers trough a farmer training scholarship fund. https://kisstheground.com/farmland/. Luettu 13.5.2019.

Lajunen, K. (2019): Hiiliviljely opettaa uutta viljelijälle – Joutsenolainen Antti Lähde haluaa omalta osaltaan toimia ilmastonmuutosta vastaan. Etelä-Saimaa 22.5.2019.

Lehmann, A. – Zheng, W. & Rillig, M.C. (2017): Soil biota contributions to soil aggregation. Nature Ecology & Evolution, vol 1, 1828-1835.

Liang, X. – Yuan, J. – Yang, E. & Meng, J. (2017): Responses of soil organic carbon decomposition and microbial community to the addition of plant residues with different C:N ratio. European Journal of Soil Biology, vol. 82, 50-55.

Mäkipää, R. – Häkkinen, M. – Muukkonen, P. & Peltoniemi, M. (2008): The costs of monitoring changes in forest soil carbon stocks. Boreal Environmental Research, vol. 13 (B), 120-130.

Paustian, K. – Lehmann, J. – Ogle, S. – Reay, D. – Robertson, G.P. &

Smith, P. (2016): Climate-smart soils. Nature, vol. 532, 49-57.

Pietola, L. & Tanni, R. 2003. Response of seedbed physical properties, soil N and cereal growth to peat application during transition to conservation tillage. Soil and Tillage Research 74: 65-79.

Poeplau, C. –Helfrich, M. – Dechow, R. – Szoboszlay, M. – Tebbe, C.C. – Don, A. – Greiner, B. – Zopf, D. – Thumm, U. – Korevaar, H. & Greets, R. (2019): Increased microbial anabolism contributes to soil carbon sequestration by mineral fertilization in temperate grasslands. Soil Biology and Biochemistry, vol. 130, 167-176.

Pohjala, P. (2019): Ilmastotoivo piilee pelloissa – tutkijaryhmä yrittää kääntää maanviljelyn hiilipäästöstä hiilinieluksi. Suomenmaa 17.3.2019. https://www.suomenmaa.fi/uutiset/ilmastotoivo-piilee-pelloissa--tutkijaryhma-yrittaa-kaantaa-maanviljelyn-hiilipaastosta-hiilinieluksi-6.3.482670.defc308daa. Luettu 10.5.2019.

Rasa, K., Horn, R., Räty, M., Yli-Halla, M., Pietola, L. 2007. Water repellency of clay, sand and organic soils in Finland. Agricultural and Food Science 16: 267-277.

Six, J. – Conant, R.T. – Paul, E. & Paustian, K. (2002): Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, vol. 241, 155-176.

Smith, P. (2004a): Soils as carbon sinks: the global context. Soil Use and Management, vol. 20, 212-218.

Spohn, M. – Klaus, K. – Wanek, W. & Richter, A. (2016): Microbial carbon use efficiency and biomass turnover times depending on soil depth- Implications for carbon cycling. Soil Biology and Biochemistry, vol. 96, 74-81.

The Marin Carbon Project (2018): Carbon Farming. https://www.marincarbonproject.org/carbon-farming. Luettu 13.5.2019.

Thomsson, I. (2019): Ilmastoystävälliseen viljelyyn etsitään keinoja myös pohjalaistiloilla. YLE uutiset 27.5.2019. https://yle.fi/uutiset/3-10782137. Luettu 27.5.2019.

Valkama, V. (2019): Hauholaisen nurmipellon alla kytee ratkaisu ilmastonmuutokseen – ”Hiiliviljelystä pitäisi tulla uusi normaali”. Hämeen Sanomat 19.4.2019.

West, T.O. & Six, J. (2007): Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. Climatic Change, vol. 80, 25-41.

West, T.O. & Six, J. (2007): Climatic Change, vol. 80:25–41 DOI 10.1007/s10584-006-9173-

4 per 1000 (2018): Welcome to the “4 per 1000” initiative. https://www.4p1000.org/.



Qvidja Gård

ILMATIETEEN LAITOS

strategic RESEARCH

CARBON ACTION
STN MULTA