

# TAASTAV PÕLLUMAJANDUS JA SÜSINIKU SIDUMINE

Lühendatult trükisest:

*REGENERATIVE AGRICULTURE and the SOIL CARBON SOLUTION*

Väljaandja: Rodale Instituut, september 2020

Autorid: Jeff Moyer, Andrew Smith, PhD, Yichao Rui, PhD, Jennifer Hayden, PhD

## TAASTAVA PÕLLUMAJANDUSE PÕHIMÕISTED

### Mulla tervise ja süsiniku sidumine

Taastav põllumajandus - süsteemne lähenemine, mis toetab bioloogilist mitmekesisust maa peal ja all, et tagastada süsinikku ja toitaineid tagasi mulda, parandades nii mulla tervist.

Bioloogiline mitmekesisus on peamine süsiniku mulda sidumise mõjutaja ning toob ka muud kasu nii põllumajandusettevõttele kui ka ökosüsteemile [25]. Mulla orgaaniline süsinik ja mulla orgaaniline aine, milles see sisaldub, on taimede kasvuks eluliselt tähtsad, sest nad mõjutavad mulla temperatuuri, vee läbilaskevõimet ja säilitamist ning toitainete ringlust.

Mulla orgaaniline aine toetab ka ökosüsteemi teenuseid: vähendab erosiooni, filtreerib saasteaineid ning pakub elupaiku ja toitu paljudele liikidele.

Ilma piisava hulga orgaanilise aineta ei suuda muld ilma suurte koguste imporditud sisenditeta toetada mikroobide ja taimede elu. Kahes kolmandikus maisi ja nisu tavapõldude mullas on orgaanilise aine sisaldus kahanenud vähem kui kahe protsendini [12], mis piirab saagikust ja nõuab keemiliste sisendite suuremat kasutamist. See on toiduainete tootmine „intensiivraviosakonnas“, eirates tohutut potentsiaali kasvatada tervislikku toitu mulla enda tervendamise abil. Nagu J. I. Rodale, üks Ameerika mahepõllumajandusliikumise algatajatest, 1942. aastal kirjutas: **Terve muld = tervislik toit = terved inimesed**

Põllu- ja karjamaad saab taastada, mulla orgaanilise aine saab taastada ning mulla elustik võib taas areneda taastava põllumajanduse abil.

Kuigi taastav põllumajandus peab olema kohapõhine, kohandatud, süsteemne lähenemisviis, on olemas teatavad omavahel seotud praktikad, mis kuuluvad enamiku taastavate süsteemide juurde.

Need tavad üksi ei tähenda uuenemist - need on alguspunkt, mitte lõpp-punkt. Minimaalselt hõlmavad taastavad põllumajandustavad, mis toetavad süsiniku sidumist mullas, järgmist:

1. Viljavahelduse/külvikorra mitmekesistamine.
2. Kattekultuuride, haljasväetiste ja mitmeaastaste taimede kasvatamine.
3. Põllukultuuride jääkide säilitamine.

4. Looduslike väetiste, näiteks komposti kasutamine.
5. Väga hästi korraldatud karjatamine ja/või põllukultuuride ja kariloomade integreerimine.
6. Kündmise sageduse ja sügavuse vähendamine.
7. Sünteetiliste sisendite kasutamise kaotamine.

Taastav põllumajandus keskendub tulemustele ja tulemust tagavatele tavadele: need omavahel seotud tavad toetavad mullaelustikku ja vähendavad erosiooni, säilitades biomassi mitmesuguste elavatest ja surnud juurtest, võrsetest ja mikroobidest, mis töötavad koos süsiniku sidumiseks [8,26].

Kuigi enamik tavasid, mis võimaldavad süsiniku sidumist mullas, on seotud taastavate põllumajandussüsteemidega, on need "parimad majandamisviisid", mida saab kohandada mis tahes tüüpi põllumajandusettevõttele.

Siiski ei ole mullaelustiku toetamine nii lihtne, ei saa kasutada lihtsalt ühte praktikast; mulla süsinikku siduvate bioloogilise mitmekesisuse võtmeks on kogu süsteemi omavahel seotud praktikate koostoime [27].

### **Süsiniku sidumine mulda**

Süsiniku sidumine mulda tähendab süsinikdioksiidi eemaldamist atmosfäärist ja süsiniku kadude minimeerimist mullas.

Selleks, et mullas süsiniku sidumine toimiks, peab kogu mulla orgaaniline süsinik olema pärit atmosfääri süsiniku reservist ning kanduma taimede, taimejääkide, mikroobijääkide ja muude orgaaniliste tahkete ainete kaudu mulla orgaanilisse ainesse [28].

Kuigi mulla orgaaniline aine on väga varieeruv, koosneb see umbes 50% ulatuses mulla orgaanilisest süsinikust [29].

### **Süsiniku sidumise praktikaid:**

- Multšimine/komposti kasutamine
- Taimejäänused ja harimisvõtted
- Anaeroobne kääritamine
- Tuuletõkke/varjuala rajamine

- Metsakarjamaade rajamine
- Sööda- ja biomassikultuuride külvamine
- Toitainete majandamine
- Puude/põõsaste istutamine
- Metsa puistu parandamine
- Puhveralad põlluservades
- Kaldaäärte taastamine
- Kaldaäärsed puistud
- Kaldaäärne rohttaimestik
- Taimestikuga ribad/barjäärid
- Puisturibade/hekkide rajamine
- Rohtsed tuuletõkked
- Kriitilistel aladel püsiva taimkatte rajamine
- Metsa raiumine
- Märjalade taastamine

## **BIOLOOGILINE MITMEKESISUS MAA ALL**

Mullaelustik on erakordselt keeruline, koosnedes tohutust mikroskoopiliste bakterite, seente, algloomade ja nematoodide kogukonnast, aga ka meso- ja makrofaunast, nagu lülijalgsed, vihmaussid, hooghännalised, ämblikud ja putukad.

Neid organisme on miljardeid vaid ühes teelusikatäies terves mullas. Mullaelustik loob süsinikuvarusid maa-aluste vastastikuste mõjutuste kaudu mulla füüsilise struktuuri, elusate juurte ja laguneva orgaanilise aine vahel ning maapealsete vastastikuste mõjutuste kaudu taimede, loomade, ilmastiku, inimeste ja nende poolt kasutatavate majandamispraktikate vahel.

Mullaelustiku arvukus ja koostis on tugevalt mõjutatud tootmissüsteemist. Et kasutada mulla süsiniku sidumist ja sellega kaasnevaid eeliseid, saavad valida põllumajandustootjad omavahel seotud majandamisstrateegiaid, mis suurendavad bioloogilist mitmekesisust nii maa peal kui ka maa all. Enam kui 50 rahvusvahelise uuringu süstemaatilises ülevaates leiti, et mahepõllumajanduslikult majandatud põllumajandusettevõtetes on mulla

mikroorganismide biomass ligi 60% suurem kui tavaettevõtetes [30]. Samuti oli mullaelustik mahepõllumajanduslikes süsteemides üle 80% aktiivsem kui tavasüsteemides [30].

See ei ole üllatav, sest enamik mahepõllumajandussüsteeme ja kõik taastavad süsteemid põhinevad omavahel seotud praktikatel, mille eesmärk on suurendada bioloogilist mitmekesisust ja toetada mulla tervist.

Hiljutised uuringud rõhutavad mulla mikroobide ülekaalukat rolli mulla süsinikuvarude loomisel. Vastupidiselt varasemale arvamusele ei ole mitte taimed need, mis hoiavad ja loovad pikaajalisi süsinikuvarusid mullas. Kõige rohkem vastutavad mulla süsiniku sidumise eest mikroobid, kes seda taimset ainet töötlevad [31,32]. Stabiilne mulla süsinik moodustub peamiselt surnud mikroobide biomassist, mis on seotud mulla mineraalidega (tolm ja savi).

Süsiniku pikaajaline säilitamine sõltub mikroobide poolt toodetud süsiniku kaitsest lagunemise eest. See kaitse toimub mulla poorides, mille suurus on 30-150 mikromeetrit ja mis tekivad mitmekesise taimeestiku - mitte monokultuuride - juurtest [33].

See tähendab, et süsiniku säilitamise võimaldamiseks mullas peaksid põllumajandustootjad keskenduma süsiniku mitmekesise sidumise soodustamisele, et luua poorsed struktuurid ja pakkuda toitu mulla mikroobidele, mõlemad saavutatakse taimejuurte mitmekesisuse kaudu. Juured aitavad mikroobidel ehitada biomassi, mis muutub nekromassiks-mineraalamalgaamiks, mis salvestab süsiniku väga pikaks ajaks [34].

Mullaelustiku toitmine nende mitmekesisuse ja arvukuse suurendamiseks tähendab, et ettevõtet majandatakse nii, et võimalikult suure osa aastast oleksid mullas elusad taime juured. Juured aitavad mulla tervisele kaasa, sest nad toidavad mikroobe otse juureeritistega, mis sisaldavad suhkruid, aminohappeid ja orgaanilisi happeid, loovad õige mullastruktuuri, et kaitsta süsinikku, ning teevad koostööd mükoriisaseentega, et säilitada süsinikku ja ringlusse viia toitaineid [33,35]. Nagu ütleb juhtiv mullaökoloog Francesca Cotrufo, PhD Colorado Riiklikust Ülikoolist: "On väga selge, et muldade taastamiseks on vaja pidevat ja mitmekesist sisendit, ja see tuleb enamasti elavatest juurtest."

Põllumajandustootjad peavad ka majandama mikroobide süsiniku kasutamise tõhusust, rakendades kvaliteetseid taimseid sisendeid. Taimsete sisendite töötlemisel kasutavad mikroobid samaaegselt süsinikku nii kasvuks kui ka elutegevuseks. Süsiniku kasutamise tõhususe all mõeldakse mikroobide poolt omastatava süsiniku osakaalu võrreldes süsteemist

kaotatud, või süsinikdioksiidina väljahingatava süsiniku osakaaluga [36]. Mulla konservatiivne süsiniku ja lämmastiku suhe on umbes 10:1. See tähendab, et mulla süsiniku sidumiseks on iga 10 süsinikuühiku kohta vaja ühte ühikut lämmastikku. See seletab, miks vastupidiselt sellele, mida võiks eeldada, pole suur süsiniku sisend seotud mulla süsinikdioksiidi proportsionaalse juurdekasvuga. Mitmekesisiste, kuid madala kvaliteediga (kõrge C:N suhe) sisendite (nt suur osa saepuru või puiduhaket) või teatud kattekultuuride kasutamine (nt ainult teravili) põhjustab ebatõhusat süsiniku kasutamist, mis omakorda põhjustab suuremat proportsionaalset süsiniku kadu. Sellised suure süsiniku ja lämmastiku suhtega sisendid tekitavad ka mikroobidel stressi, mille tulemuseks on lämmastiku võtmine olemasolevast orgaanilisest ainest. Selle vältimiseks peaksid põllumajandustootjad kasutama kvaliteetseid (madala C:N suhtega) sisendeid, näiteks liblikõielisi kultuure ja sõnnikut, köögiviljal baseeruvat või vermikomposti, mis on süsiniku kogumisel tõhusamad.

Taimed sõltuvad kättesaadavatest toitainetest mullas. See toitainete tsükkel sõltub süsinikku sisaldava materjali kiirest ümbertöötamisest mikroobide poolt, mille tulemuseks on tahkete orgaaniliste osakeste teke, mis ei säilita süsinikku pikema aja jooksul [34].

Põllumajandusmulla selline majandamine, mille eesmärgiks on suurendada bioloogilist mitmekesisust ja mullaelustiku arvukust maa all, toob kaasa orgaanilise aine kogunemise, mis säilitab süsinikku nii lühikeseks kui ka pikaks ajaks. Mõlemat liiki orgaanilist ainet on vaja ökosüsteemi nõuetekohaseks toimimiseks, toitainete säilitamiseks ja ringluseks ning toiduainete tootmiseks.

## **SÜSINIKU SIDUMINE - KUIDAS SEE TOIMIB**

### **1. FOTOSÜNTEES**

Fotosünteesi käigus muundavad taimed süsinikdioksiidi (gaas) suhkruks (süsivesikute molekulideks).

### **2. TOITAINETE VAHETUS**

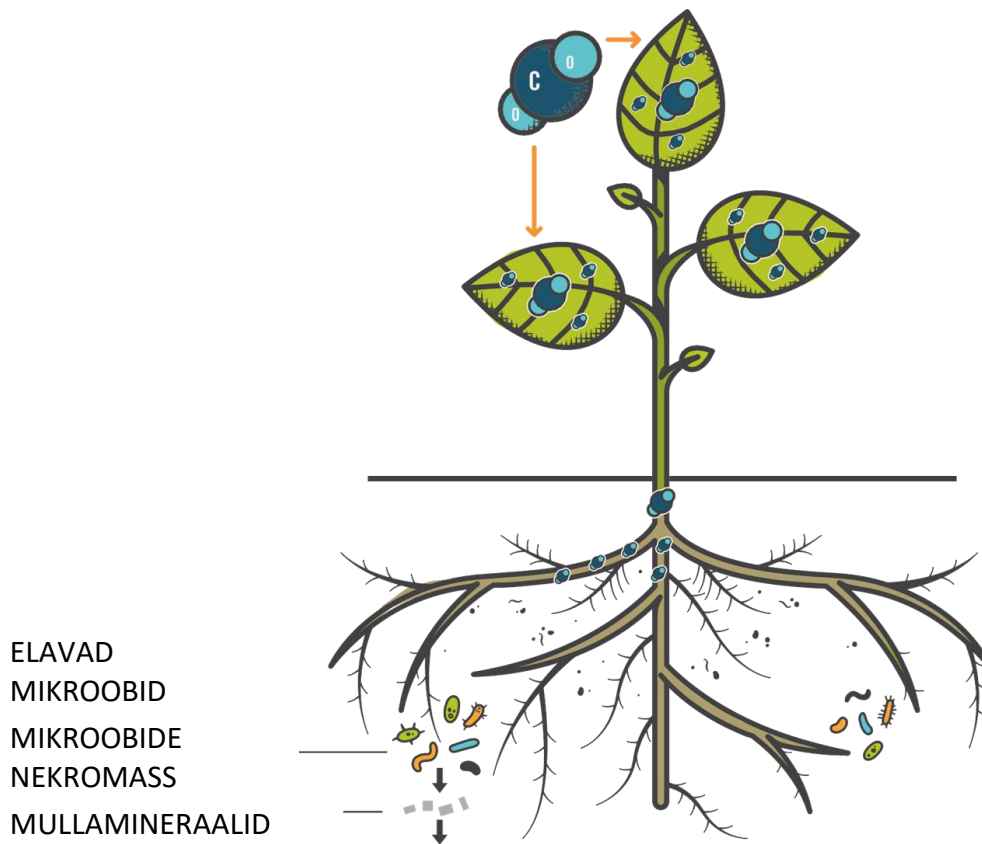
Taimedest saadav süsinik satub mulda taimejäänuste või juureeritistena. Mulla mikroorganismid (seened ja bakterid) elutsevad koos taimejuurtega ja lagundavad neid orgaanilisi ühendeid. Lagundamise käigus vabanevad toitained (lämmastik, fosfor, väävel jne), mis toetavad taime kasvu.

### 3. SÜSINIKU SIDUMINE

Mikroobide nekromassi (surnud mikroobide biomassi) võib ladustada orgaanilistes-mineraalsetes ühendites või mikroagregaatides. See füüsiliselt kaitstud stabiilne süsinik on enamasti mikroobse päritoluga.

### 4. TASAKAALU TAASTAMINE

Mikroorganismide arvu suurendamine mullas aitab taastada süsiniku tasakaalu, mis toob kaasa tervema mulla, tervislikuma toidu ja tervema planeedi.



### LÄMMASTIK

Süsinik ei ringle üksi. Põllumajandussüsteemis kasutatava lämmastiku tüüp on seotud selle süsteemi süsiniku salvestamise võimega. Pikaajalised uuringud näitavad, et taimede väetamine kompostide või sõnnikuga suurendab süsiniku säilitamist mullas, samas kui sünteetiliste väetiste kasutamine toob kaasa mulla süsinikusisalduse vähenemise või samaks jäämise [37,38]. Orgaanilised lämmastikuallikad toetavad süsiniku sidumist mullas, sest nad

toidavad süsiniku säilitamise eest vastutavaid mikroobe. Sünteetilised lämmastikuallikad soodustavad selliste bakterite domineerimist, mis muudavad ammoniaagi kiiresti nitraadiks, mis mullast kergesti kaob [39-41].

### **Kui kompost asendab sünteetilist lämmastikku, kasvatavad taimed rohkem oma juurestikku.**

Väetiste lämmastikukao vähendamine on väga oluline. Vähem kui pool igal aastal kasutatavast 109 miljonist tonnist fossiilkütustel põhinevast lämmastikväetisest jõuab põllukultuuridesse, ülejäänud osa kas leostub põhjavette, tekitades merre surnud tsoone, või kaob dilämmastikoksiidi, tugeva kasvuhoonegaasina [42]. Lisaks sellele moodustab lämmastikväetiste tööstuslik tootmine otseselt kaks kuni kolm protsenti kõigist ülemaailmsetest kasvuhoonegaaside heitkogustest ning põllumajanduslike muldade hapestumine sünteetilise lämmastiku tõttu annab veel kaks kuni kolm protsenti heitkogustest [43].

Kui kompost asendab sünteetilist lämmastikku, kasvatavad taimed rohkem juurestikku, sidudes sellega rohkem õhust pärit süsinikku [44]. On leitud, et liblikõielised kultuurid on mulla orgaanilise süsiniku säilitamisel kaks korda tõhusamad kui lämmastikuga väetamine [45]. Mitmekümneaastases põldkatses, kus võrreldi mulla süsiniku sidumist ja väetamist, parandas orgaaniline väetamine võrreldes keemilise väetamisega oluliselt mulla orgaanilise süsiniku säilitamise võimet [46]. Nisu ja maisi viljelemise katses põhjustas orgaaniline kompost pikaajalise süsiniku talletamise määra 0,38 tonni süsinikku hektari kohta aastas, võrreldes 0,23 tonniga tööstusliku väetise puhul [47]. Pärast 34 aastat Rodale'i instituudi põllumajandussüsteemide katset, oli maheviljeluse sõnnikuga väetamise süsteemis mulla orgaanilise süsiniku sisaldus 18-21% suurem kui tavasüsteemis [48]. Selles pikaajalises katses oli mulla süsiniku sidumise määr kõige suurem esimese 15 aasta jooksul [17].

Taastavad süsteemid saavad pakkuda lämmastikku, mis on vajalik süsiniku sidumiseks mullas, kui põllumajandusettevõtte külvikorda lisatakse lämmastikku siduvad liblikõielised ja/või puud, mis muudavad sünteetilise lämmastikväetamise mittevajalikuks. Taastavates süsteemides kattekultuuride/jhaljasväetiskultuuride, söödakultuuride või müügikultuuridena kasvatatavad liblikõielised töötavad koos mügarbakteritega, et siduda atmosfäärist lämmastikku, mis toidab taimi ja mikroorganisme. Selline lämmastiku sidumine toetab



süsiniku säilitamist, vähendades samal ajal lämmastiku kadu ja keskkonnakahju, mis kaasneb sünteetilise väetamisega [49]. Ektomükoriisaseened, mis on kõige enam seotud puudega, töötavad koos bakteritega, et kontrollida kättesaadava lämmastiku kogust, hoides mullaelustikku tasakaalus, mis vähendab mulla hingamise kaudu vabaneva süsiniku hulka ja suurendab süsiniku säilitamist mullas [50-52]. Põllumajandustootjad saavad õhulämmastiku sidumist soodustada liblikõieliste või puittaimede lämmastikku siduvate mügarbakterite või ektomükoriisaseentega.

## **SEENED**

Seente ja bakterite suhtarv on ökoloogiliselt oluline nii süsiniku säilitamise kui ka üldise põllumajandussüsteemi jätkusuutlikkuse seisukohalt [53-55]. Suurema seente ja bakterite suhtarvuga muldadele on iseloomulik tõhusam süsiniku kasutamine [53]. Mulla süsiniku sidumise seisukohalt olulised kasulikud mullaseened jagunevad kaks rühma: lagundajad - saprotroofsed seened - ja juurtega seotud seened ehk mükoriisaseened [56]. Taimede arvukuse, taimede mitmekesisuse [57] ja orgaanilise väetise allikate [58-60] suurenemine suurendab seente biomassi ning seente ja bakterite suhtarvu.

### **Paljude taimeliikide kasv ja ellujäämine sõltub otseselt nendest seentest.**

Üheksakümmend protsenti kõigist taimedest elab sümbioosis mükoriisaseentega [35]. Need seened on eriti olulised süsiniku sidumiseks mullas. Mükoriisaseened saavad märkimisväärse osa taime maa-alusest süsinikust, mis on nende ainus energiaallikas, vastutasuks annavad nad kuni 80% taimele vajalikust lämmastikust ja fosforist [61]. Mükoriisaseened pakuvad mullale ja taimedele ka muid olulisi hüvesid, näiteks vastupidavust põua ja stressi suhtes [62-65]. Nende seente kasvust ja ellujäämisest sõltuvad otseselt nii paljud taimeliigid, et teadlased on väitnud, et "sümbioosi roll globaalses toitaineringluses on märkimisväärne" [61,66].

Mükoriisaseened eritavad valku, mida nimetatakse glomaliiniks; see konkreetne seene-juure partnerlus ja glomaliin on suures osas vastutavad püsivate ja stabiilsete mullaagregaatide loomise eest, mis takistavad mulla süsinikku lendumast süsihappegaasina [67,68]. See esialgne lühemaajaline stabiliseerumine annab aega orgaanilise aine sidemete loomiseks

metallide ja mineraalidega, mille tulemusena tekkinud orgaanilis-mineraalsed või orgaanilis-metallilised kompleksid võivad püsida mullas aastatuhandeid [26,34].

Kuna mükoriisaseened vajavad ellujäämiseks „juurepartnerit“, soodustavad mulla süsiniku pikaajalist stabiliseerimist põllumajandusviisid, mis hõlmavad mitmeaastaseid kultuure, puude istutamist põlluservadesse, vähendatud mullaharimist ja sügava narmasjuurestikuga taimi [57,67,69,70]. Pikaajalistes katsetes, kus võrreldakse mahepõllumajanduslikke ja tavapõllumajanduslikke süsteeme, on leitud, et mükoriisaseente tase on mahepõllumajanduslikes süsteemides kõrgem [71-73], mis on arvatavasti tingitud pikemate külvikordade ning kattekultuuride ja haljasväetiste kasutamisega seotud suuremast taimede mitmekesisusest. Paljutõotavat mõju on näidanud ka mulla nakatamine seentega, eriti juhul, kui sage või sügav mullaharimine on hävitanud kohaliku populatsiooni [22,74].

Mükoriisaseeni saab põllumajandusettevõttesse tuua inokulantidega, mida saab hõlpsasti kohapeal valmistada [74,75] ning see võib olla strateegiaks, mis kiirendab süsiniku sidumist ja degradeerunud muldade taastumist.

## **MAAPEALNE BIOLOOGILINE MITMEKESISUS**

Bioloogilise mitmekesisuse rohkus maapinnal toob kaasa parema mulla tervise ja süsiniku sidumise maa all [25,76].

Elu puudumine maapinnal - paljas muld - takistab fotosünteesi ja soodustab erosiooni. Mulla erosioon tuule ja vihma tõttu vähendab põllumajanduse tootlikkust ja kaotab igasuguse lootuse muuta põllumajandus kliimaprobleemist kliimalahenduseks.

Teine märk halvasti kavandatud süsteemist on monokultuur - üks põllukultuur, mis katab suurt maastikku. Monokultuurid ja lihtsustatud külvikorrad nõuavad keemilisi vahendeid umbrohu, putukate ja haiguste vastu ning mullaviljakuse tagamiseks. Need sisendid hävitavad mulla elustikku ja suurendavad süsiniku kadu mullast.

Üldiselt soodustavad mahepõllumajanduse põhimõtetel toimivad süsteemid bioloogilist mitmekesisust. Hiljutised uuringud, milles võrreldi üle 60 tava- ja mahepõllumajanduslikes süsteemides kasvatatud põllukultuuri kogu maailmas, leidsid, et mahepõllumajanduslikud süsteemid soodustavad oluliselt suuremat bioloogilist mitmekesisust nii arvukuse kui ka liigirikkuse poolest [77,78]. Iga põllumajandusettevõtte, olenemata sellest, kas see on

sertifitseeritud mahepõllumajanduslikuks või mitte, võib võtta mahepõllumajanduslike mudelite eeskujul kasutusele terve rea tavasid, mis taastavad mullaelustikku, keskendudes bioloogilisele mitmekesisusele nii maa peal kui ka maa all.

## **MITMEKESISTADA PÕLLUKULTUURIDE KASVATAMIST**

Ainult üheksa põllukultuuri moodustavad peaaegu 70% kogu maailma põllumajanduslikust maakasutusest: suhkruroog, mais, riis, nisu, kartul, sojauba, õlipalm, suhkrupeet ja maniokk [79]. Neid põllukultuure kasvatatakse sageli monokultuuridena või lühikestes külvikordades, näiteks maisi ja sojaoa külvikordades. Ainult ühe või kahe põllukultuuri kasvatamine muudab põllumajandusettevõtte vastuvõtlikuks kahjurite puhangutele või äärmuslikele ilmastikuoludele, mis muutuvad kliimakriisi tõttu üha tavalisemaks. Bioloogilise mitmekesisuse suurendamine maa peal, kasvatades mitmekesiseid põllukultuure külvikorras, kattekultuure, ribakultuure, vahekultuure, mitmerindelise viljelemise ning põllukultuuride ja kariloomade integreerimist, suurendab vastupanuvõimet sellistele šokkidele ja aitab samal ajal siduda süsinikku mullas.

### **Kultuuridega kaetus on võrdselt olulised nii suurte kui ka väikeste süsteemide puhul.**

Kui muuta mustkesaga monokultuur ilma mustkesata eri kultuuridega viljavahelduseks suurenevad mulla bioloogiline mitmekesisus ja süsiniku sidumine [30,80,81]. Näiteks leiti, et nisu ja mustkesa vaheldumise asendamine nisu ja päevalille või nisu ja kaunvilja vaheldumisega suurendab märkimisväärselt mulla orgaanilise süsiniku varusid [80] ja isegi pidev odra kasvatamine suurendas mulla süsinikuvarusid rohkem kui kaks korda võrreldes odra ja mustkesa süsteemiga [82]. Külvatud heintaimede integreerimine kattekultuuridena, elava multšina või külvikorrakultuurina suurendab mulla süsiniku sisaldust tänu nende mitmeaastaste taimede sügavale narmasjuurestikule [80,83].

Nii tõhustatud müügikultuuride külvikord kui ka kattekultuuride kasutuselevõtt toovad kaasa selle, et muld on pidevalt kaetud, mis suurendab mulla mikroobide biomassi ja mulla süsiniku sisaldust, tagades bakteritele ja seentele kättesaadava energia ja juurestiku [81,84,85].

Kattekultuuridega mitmekesistamine on süsiniku sidumisel tõhusam kui künnivaba harimine. Brasiilias 30 aastat kestnud maisi kattekultuuride kasvatamise katses oli liblikõieliste kattekultuuride mõju mulla süsinikuvarudele suurem kui künnivaba harimise mõju [86]. Samuti ei mõjutanud Rodale'i instituudi põllumajandussüsteemide katses mulla süsiniku sisalduse erinevusi mullaharimise intensiivsus, kuid mahepõllumajandussüsteemide ja tavasüsteemide vahel olid märkimisväärsed erinevused [87]. Mulla orgaanilise süsiniku (SOC), mikroobse biomassi süsiniku (MBC), aktiivsüsi (PoxC) ja veest ekstraheeritava süsiniku (WEC) sisaldused olid Rodale'i maheviljeluse sõnniku süsteemis suuremad kui tavasüsteemis, samas kui SOC ja MBC olid maheviljeluse liblikõielistega süsteemis suuremad kui tavasüsteemis. Mõlemad mahepõllumajanduslikud süsteemid hõlmavad mitmekesiseid kattekultuure ja haljasväetisi, kusjuures sõnnikuga süsteem sisaldab täiendavate sisenditena mitmeaastast heintaimede segu ja kompostitud sõnnikut. Tavasüsteem on maisi ja sojaoa külvikord, milles kasutatakse tavalisi keemilisi sisendeid ilma kattekultuurideta. Pärast tavasüsteemi kümme aastat kestnud künnivaba harimist oli seal mulla orgaanilise süsiniku sisaldus kõigi katses olnud kuue põllumajandussüsteemi võrdluses kõige madalam, sh madalam ka künniga tavasüsteemist. See näitab, et künnivaba harimine üksi, ilma kattekultuuride ja mitmekesiste põllukultuuride kasutamiseta, ei seo süsinikku. Künnita põlluharimine piirab mulla süsiniku kadu ja mulla degradeerumist, kuid ei seo süsinikku. Ülemaailmsete uuringute metaanalüüsis leiti, et kattekultuurid on süsiniku sidumiseks peaaegu sama tõhusad kui põllumaa metsastamine, vähendades samal ajal ka toitainete leostumist, tuule- ja veerosiooni ning kahjurisurvet [16]. Kattekultuurid on võrdselt olulised nii suurte kui ka väikeste süsteemide puhul. Kattekultuurid ja haljasväetised on taastava troopilise põllumajanduse oluline komponent, kus väikeste põllumajandusettevõtete maisipõhised viljelussüsteemid, kuhu on lisatud liblikõielisi kultuure, võivad siduda peaaegu kuus tonni süsinikku hektari kohta aastas [21]. Oluline on, et "selle süsiniku sidumine on tasuta kõrvalsaadus, mis kahekordistab ja kolmekordistab nende [väiketalunike] põllumajandusliku saagikuse" [21].

## MUTLŠ JA KOMPOST

Mitmesugused põllukultuurid mängivad samuti olulist rolli süsiniku sidumisel mullas, kui nende taime- ja juurejäänused jäetakse mulda, mitte ei eemaldata ega põletata [81,88-90]. Taimejäänused toidavad mulla elustikku, ehitades keerulisemaid biokeemilisi struktuure, mis on mulla orgaanilise aine moodustamise eelkäijad [34,77]. Taimejäänuste eemaldamine, olgu selleks siis müügiks minev põhikultuur või kattekultuur, on muutunud tavaliseks biokütuse tootmise tõttu, kuid see praktika vähendab mulla orgaanilist ainet [91]. Põllukultuuride jäänuste säilitamine mullas takistab erosiooni, pärsib umbrohtude kasvu, tasakaalustab mulla temperatuuri, vähendab aurustumist, annab orgaanilist ainet, mida vihmaussid ringlusse viivad, ja kaitseb mulda äärmuslike ilmastikuolude eest.

### **Komposti kasutamisest saadav kasu võib avalduda kiiresti.**

Lisaks taimejäänuste säilitamisele põllul, suurendab taimejäänustest ja/või sõnnikust valmistatud kompost mulla bioloogilist mitmekesisust ja mikroobide biomassi, mis parandavad mulla struktuuri, toitainete ringlust ja haiguste tõrjet [18,92-96]. Kompost on väga tõhus mulla süsiniku ehitamisel nii mikroobide toitmise kui ka otsese orgaaniliste ja mineraalsete ühendite moodustamise kaudu [96]. Kompostist saadav kasu võib tekkida kiiresti: juba pärast ühekordset taimse komposti kasutamist võivad mulla orgaanilise süsiniku sisaldus ja agregaatide stabiilsus järgnevatel aastatel suureneda võrreldes mullaga, kus komposti ei kasutatud [97,98].

Kümneaastases katses sidusid piimakarjafarmi kompostitud sõnnikuga väetatud põllud rohkem kui kaks tonni süsinikku hektari kohta aastas, samal ajal kui võrdluseks kasutatud põllumajandussüsteemi põllud kaotasid süsinikku [18].

Kasutades vaid väikestes kogustes taimepõhist seenterikast komposti, võib saavutada märkimisväärse süsiniku sidumise ja mulla tervise paranemise [22,99,100]. Näiteks suurendas ühekordne komposti kasutamine rohumaade muldades mulla süsiniku sisaldust labiilsetes ja füüsiliselt kaitstud kogumites järgnevatel aastate jooksul [100]. Kompostimine vähendab ka prügilatesse jõudvate jäätmete koguseid, aidates kaasa kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamisele, suurendades samal ajal mullaviljakust [101].

Kompostile, eriti kompostitud sõnnikule tuginemine süsiniku sidumise edendamiseks põllumaal võib siiski olla keeruline selle piiratud varude ning transpordi majanduslike ja keskkonnakulude tõttu [101,102]. See on eriti oluline piiratud ressursidega väikepõllumajanduses, kui kariloomad puuduvad [21]. Lisaks sellele on väljastpoolt põllumajandusettevõtet pärinevate ja märkimisväärsete vahemaade taha transporditavate süsinikusisendite puhul raske omistada süsiniku sidumise väärtust, kui võtta arvesse nende kogu elutsükli. Seetõttu tuleks edendada põllumajandusettevõtte sisese ja kohaliku jäätmevoo kompostimist, mis taaskasutab toitaineid loomulikul teel. Näiteks sõnniku ja põllukultuuride jäänuste lisamine integreeritud taimekasvatus- ja loomakasvatussüsteemidesse seob süsinikku, parandab mullafunktsioone ja leevendab erosiooni [103-105]. Põllumajandustootjad saavad valida sobivaid mullaparandajaid mitmesuguste kohapeal kättesaadavate multšide ja kompostide hulgast, et toetada mullaelustikku ja mulla orgaanilist ainet viisil, mis lisab süsteemi süsinikku, mitte ei jaota seda ümber.

## **MULLAHARIMISE VÄHENDAMINE**

Kündmine mõjutab selgelt mullaelustikku - lõhub mulla agregate, hävitab seeneniidistikke, suurendab vee aurustumist, kiirendab orgaanilise aine lagunemist ning võib põhjustada tuule- ja veerosiooni. Küntud, taimestikuta ja erodeeritud mullad võimaldavad varem stabiilse mulla süsiniku vabanemist kasvuhoonegaasina [106,107].

Üleminek tavapäraselt sügavalt künnilt vähendatud mullaharimisele parandab mulla struktuuri, vähendab süsinikdioksiidi heitkoguseid ja aitab kaasa mulla orgaanilise süsiniku sisalduse suurenemisele [108,109].

**Üha enam on tõendeid selle kohta, et tavapärane künnita harimine üksi ei seo süsinikku.**

Taastavate tavade koosmõju olulisust rõhutavad paljud erinevad teadustulemused, mida teadlased on katsetes saanud. Üha enam on tõendeid selle kohta, et tavapärane künnivaba meetod üksi ei seo süsinikku, vaid peab olema osa süsteemsest lähenemisviisist, eriti kui arvestada kogu mullaprofiili, mitte ainult mulla pindmist kihti [110]. Näiteks pärast seitset aastat võrdluskatset tavaviljeluse maisipõldude vähendatud ja tavapärase mullaharimise vahel, oli vähendatud mullaharimise süsteemi puhul suurem süsinikdioksiidi ja

dilämmastikoksiidi heitkogus [111]. Rohkem kui 30 uuringu ülevaates ei leitud, et mulla orgaanilise süsiniku aastane varu erineks küntud ja kündmata alade vahel [16]; ning katses, kus tavaviljelussüsteemides katsetati säilitavat mullaharimist koos kattekultuuridega ei leitud mulla süsiniku sidumise potentsiaali aspektist, et vähendatud mullaharimine oleks suurendanud mulla süsinikuvaru [112].

Künnivabad süsteemid suudavad kõige paremini mulla orgaanilise süsiniku kao kasvuks pöörata, kui need on üheks osaks süsteemsest taastamise lähenemisviisist, mis hõlmab ka kattekultuuride kasvatamist, tõhustatud külvikordi ja sünteetiliste sisendite vähendamist või nende kasutamise lõpetamist [90, 91]. Mulla seisund paraneb, kui künnivaba tavatoomine asendatakse mahepõllumajandusmeetoditega, kuigi mahesüsteemides kasutatakse mõningast mullaharimist [113]. Mulla süsiniku- ja lämmastiksisaldus olid suuremad pärast üheksat aastat mahepõllumajanduslikus süsteemis, kus kasutati vähendatud mullaharimist, võrreldes kolme tavaviljeluse künnivaba süsteemiga, millest kahes kasutati kattekultuure [113]. Kui ka mulla süsiniksisaldus künnivabas tavasüsteemis suureneb, võib selle kasu ära nullida sünteetilisest lämmastikväetisest tulenev suurem dilämmastikoksiidi heide [114,115].

Minimeeritud maaharimisega taastavad mahesüsteemid sõltuvad umbrohu allasurumisel tugevast kattekultuurist [116]. Koos mahepõllumajandusliku majandamise üldiste eelistega on minimeeritud maaharimisega mahepõllumajandus suurendanud mulla orgaanilise süsiniku sisaldust kahe aasta jooksul 9% ja kuue aasta jooksul enam kui 20% [116,117].

Hiljutises ülevaates minimeeritud maaharimise kohta mahepõllumajandussüsteemides leiti, et mulla pööramine ainult madalal sügavusel toob kaasa oluliselt suurema süsiniku varu, ja kuigi umbrohtude arvukus suurenes, ei mõjutanud see tingimata saagikust [118].

## **KARJATAMISE KORRALDAMINE**

Taastav karjatamine ühendab intensiivsete karjatamissüsteemide süsiniku sidumise potentsiaali ning püsirohumaade ja metsade suure looduslikku süsiniku talletamise võime [5,25,104,119].

Karjamaad moodustavad üle 70% maailma põllumajandusmaast (põllumaad on 1,4 miljardit hektarit, heina- ja karjamaid on 3,3 miljardit hektarit) [79]. Seega võivad karjamaad pakkuda taastava põllumajanduse kaudu kõige suuremat potentsiaali süsiniku sidumiseks, kui neid

hästi majandada, selliselt, et muld, mis on tohutu süsiniku talletamise võimega, taastuks. Lisaks on sellel ka muid eeliseid nii ökosüsteemile, karjale kui ka karjapidajale.

**Kariloomad ise ei ole probleem, vaid see, kuidas me oleme otsustanud karja kasvatada, põhjustab probleeme.**

Loomakasvatus on aga üha enam "maata" [79]. Isegi sellistes kohtades, mis olid varem tuntud rohusöödatootmise poolest, nagu Brasiilia ja Argentiina, muudetakse varem ulatuslikult karjamaadeks olnud raadatud maad tavasoja aluseks maaks, et sööta kitsastes oludes peetavaid kariloomi [120]. Sellised tavaloomakasvatussüsteemid annavad hinnanguliselt 7-18% kasvuhoonegaaside heitkogustest kogu maailmas [23].

Kuid kariloomad ise ei ole probleemiks, vaid see, kuidas me oleme otsustanud kariloomi kasvatada, põhjustab probleeme. Veiseliha tootmisest tulenevate kasvuhoonegaaside heitkoguste tase sõltub sellest, millist tüüpi karjatamissüsteemi kasutatakse [23,122] või karjatamise puudumisest. Läbimõeldud karjatamise korral võivad mäletsejad kariloomad suurendada süsiniku sidumist mulda, mis enam kui tasakaalustab loomade endi kasvuhoonegaaside heitkoguseid, ning toetada ja parandada teisi olulisi ökosüsteemi teenuseid [121, 122].

Taastav karjatamine on üldmõiste, mis hõlmab mitmeid intensiivse karjatamise vorme, nagu adaptiivne portsjonkarjatamine (AMP), terviklik karjatamise juhtimine ja intensiivne portsjonkarjatamine.

Kuigi neil süsteemidel on erinevusi, on nende ühisosa mäletsejate (suure loomkoormusega) sagedane ja planeeritud liigutamine ühelt karjamaalt teisele, mille puhul tehakse otsuseid karja suuruse ja olemasoleva sööda omaduste alusel. Oluline on see, et karja hästi juhitud liigutamine võimaldab söödakultuuridel taastuda karjatamise vaheaegadel (Teague'i intervjuu), jäljendades suuri mäletsejate karju looduses. See võimaldab mulla orgaanilise süsiniku sisalduse suurenemist selliste loomkoormuste juures, mida tavapärase pikemaajalise karjatamise puhul peetakse mulla tervisele kahjulikuks [122, 123].

Taastavat karjatamist võib kasutada ka integreeritud taimekasvatus- ja loomakasvatussüsteemides. Karjatamise hoolikas juhtimine on siinjuures mulla orgaanilise süsiniku suurendamiseks kriitilise tähtsusega. Brasiilia teadlased leidsid üheksa aastat kestnud uuringus kattedekultuuride karjatamise kohta, et mõõduka ja kerge



karjatamisintensiivsuse korral on mulla orgaanilise süsiniku ja lämmastiku varud suuremad kui karjatamata või suure intensiivsusega karjatamise korral [124]. Sarnaseid järeldusi intensiivsuse kohta on teinud ka teised teadlased, kes uurisid integreeritud taime- ja loomakasvatussüsteeme [105,125,126]. Portsjonkarjatamise lisamine põllukülvikorras olevatele maadele võib lisaks süsiniku sidumise suurenemisele anda ka mitmeid muid eeliseid, sealhulgas suurendada mulla glükosidaasi aktiivsust, kättesaadavat kaltsiumi, magneesiumi, lämmastikku, mulla pH-d ja süsiniku ja lämmastiku suhet [127].

### **Samuti on teadlased leidnud, et taastavates süsteemides on veiste metaaniheide väiksem.**

Lisaks karjatamiskoormuse juhtimisele seovad mitmekesisemad ja liblikõielisi sisaldavad karjamaasegud paremini süsinikku kui vähem mitmekesise taimikuga karjamaad [128]. Teadlased on leidnud, et taastavates süsteemides on veiste metaani heitkogus väiksem, mis võib olla tingitud rohumaade suuremast liigilisest mitmekesisusest nendes süsteemides [121]. Üldiselt on karjakasvatuse muutmisel suur potentsiaal põllumajanduses kliimakriisi leevendada, ületades isegi metsade raadamise vähendamisest või põllukultuuride tootmisviisidest saadava mõju [129].

## **SÜSTEEMI KEERUKUS**

Taastav põllumajandus on teadmispõhine, süsteemne lähenemisviis, mis lähtub ökoloogilisest mõtteviisist. See ei ole lihtsalt taandatav mõnele praktikale, vaid lähtub põhimõtetest ja tulemustest. Isegi mahesüsteemides, kus kasvatatakse samu põllukultuure ja kasutatakse sama mullaharimist, on majandamisvalikutel, näiteks kattekultuuride tüübil ja kasutussagedusel ning komposti kasutamisel, pikaajaliselt erinev mõju mulla tervisele [85]. Teadlased, kes uurisid peaaegu kahekümne aasta jooksul üheksat erinevat köögiviljakasvatussüsteemi, millest mõned olid mahepõllumajanduslikud ja mõned tavapõllumajanduslikud, leidsid, et ainult üks neist - mahepõllumajanduslik maisi ja tomati kasvatuse koos kattekultuuride ja sõnnikuga - suurendas mulla orgaanilise süsiniku sisaldust kogu mullaprofiili ulatuses [102].

Mulla süsiniku sidumise potentsiaal ja määr igas põllumajandussüsteemis sõltub paljudest koostoimivatest teguritest [85,130,131], sealhulgas olemasolevast ja ajaloolisest mulla

orgaanilise süsiniku sisaldusest, kliimast ja maastikust ning kasvuperioodi pikkusest (vt lisafaktorite kohta allpool **Süsiniku sidumise faktorid**).

Selline kompleksus tähendab, et põllumajandustootjad saavad kõige paremini luua taastavaid süsteeme, kui nad tuginevad oma konkreetse põllumajandusettevõtte kontekstis majandamisotsuseid tehes põhilistele ökoloogilistele teadmistele.

**"Ülemaailmselt on põllumajandustootjatel oht muutuda agrotööstuse passiivseteks klientideks, kus vähenev ökoloogiline kirjaoskus tähendab suuremat sõltuvust ostetud sünteetilistest sisenditest." [132]**

Pikemad ja keerulisemad külvikorrad, sealhulgas kattekultuurid/vahekultuurid, mitmeaastased taimed ja puud, tagavad selle, et elusad juured on mullas võimalikult suure osa aastast - see on taastava põllumajanduse oluline põhimõte. Väga hästi korraldatud kariloomade karjatamine, põllukultuuride jäänuste muldaviimine, põlluharimise vähendamine ja kompostide lisamine võib mulla tervist veelgi parandada.

Need sünergilised praktikad moodustavad üheskoos taastavad süsteemid, mis edendavad bioloogilist mitmekesisust nii maa peal kui ka maa all. Praktikate kogumid, mis moodustavad iga põllumajandusettevõtte jaoks sobiva süsteemi, on erinevad, kuid taastavate tavade valik on praegu piisavalt lai ja põhjendatud, nii et iga põllumajandusettevõtte saab rakendada mõningaid muudatusi majandamises, mis aitavad muuta põllumajanduse kliimakriisi probleemist hoopis osaks selle lahendusest.

### **Süsiniku sidumise faktorid**

- olemasolev ja ajalooline mulla orgaanilise süsiniku sisaldus
- kliima ja maastikuline asend
- kasvuperioodi pikkus
- mulla tüüp, huumushorisoni sügavus ja veemahutavus
- peamised müügiks kasvatatavad kultuurid või kariloomad
- kasutatavate väetiste liik ja määr
- olemasolev mulla lämmastik
- insektitsiidide, fungitsiidide ja herbitsiidide kasutamine

- kattekultuuride tüübid ja külvikord
- mullaharimise intensiivsus
- komposti kasutamise tüüp ja sagedus
- niisutuse kasutamine
- maakasutuse muutmise vältimine pärast süsiniku säilitamist ja paljud muud majandamisvalikud.

## VIIDATUD ALLIKAD:

- <sup>5</sup> Lal, R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition* 2020, 66, 1–9, doi:10.1080/00380768.2020.1718548.
- <sup>8</sup> Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 2004, 123, 1–22, doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032.
- <sup>12</sup> Oldfield, E.E.; Bradford, M.A.; Wood, S.A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *SOIL* 2019, 5, 15–32, doi:https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019.
- <sup>16</sup> Poeplau, C.; Don, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2015, 200, 33–41, doi:10.1016/j.agee.2014.10.024.
- <sup>17</sup> Drinkwater, L.E.; Wagoner, P.; Sanntonio, M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 1998, 396, 262–265.
- <sup>18</sup> Hepperly, P.; Lotter, D.; Ulsh, C.Z.; Seidel, R.; Reider, C. Compost, Manure and Synthetic Fertilizer Influences Crop Yields, Soil Properties, Nitrate Leaching and Crop Nutrient Content. *Compost Science & Utilization* 2009, 17, 117–126.
- <sup>21</sup> Bunch, R.; Berkelaar, D.; Motis, T.; Bunch, J.; Swartz, S. Restoring the Soil: How to Use Green Manure/Cover Crops to Fertilize the Soil and Overcome Droughts; ECHO Incorporated, 2019; ISBN 978-1-946263-30-8.
- <sup>22</sup> Johnson, D.; Ellington, J.; Eaton, W. Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and aglobal carbon fix. *Peer J Preprints* 2015.
- <sup>23</sup> Stanley, P.L.; Rowntree, J.E.; Beede, D.K.; DeLonge, M.S.; Hamm, M.W. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems* 2018, 162, 249–258, doi:10.1016/j.agsy.2018.02.003.
- <sup>25</sup> Hungate, B.A.; Barbier, E.B.; Ando, A.W.; Marks, S.P.; Reich, P.B.; Gestel, N. van; Tilman, D.; Knops, J.M.H.; Hooper, D.U.; Butterfield, B.J.; et al. The economic value of grassland species for carbon storage. *Science Advances* 2017, 3, e1601880, doi:10.1126/sciadv.1601880.
- <sup>26</sup> Lorenz, K.; Lal, R. Cropland Soil Carbon Dynamics. In *Recarbonization of the Biosphere*; Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von, Eds.; Springer Netherlands, 2012; pp. 303–346 ISBN 978-94-007-4158-4.
- <sup>27</sup> Lemaire, G.; Franzluebbers, A.; Carvalho, P.C. de F.; Dedieu, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 4–8, doi:10.1016/j.agee.2013.08.009.
- <sup>28</sup> Olson, K.R.; Al-Kaisi, M.M.; Lal, R.; Lowery, B. Experimental Consideration, Treatments, and Methods in Determining Soil Organic Carbon Sequestration Rates. *Soil Science Society of America Journal* 2014, 78, 348–360, doi:10.2136/sssaj2013.09.0412.
- <sup>29</sup> Pribyl, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 2010, 156, 75–83, doi:10.1016/j.geoderma.2010.02.003.
- <sup>30</sup> Lori, M.; Symnaczyk, S.; Mäder, P.; Deyn, G.D.; Gattinger, A. Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A metaanalysis and meta-regression. *PLOS ONE* 2017, 12, e0180442, doi:10.1371/journal.pone.0180442.
- <sup>31</sup> Cotrufo, M.F.; Wallenstein, M.D.; Boot, C.M.; Deneff, K.; Paul, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology* 2013, 19, 988–995, doi:10.1111/gcb.12113.

- 32 Liang, C.; Schimel, J.P.; Jastrow, J.D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology* 2017, 2, 1–6, doi:10.1038/nmicrobiol.2017.105.
- 33 Kravchenko, A.N.; Guber, A.K.; Razavi, B.S.; Koestel, J.; Quigley, M.Y.; Robertson, G.P.; Kuzyakov, Y. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. *Nat Commun* 2019, 10, 1–10, doi:10.1038/s41467-019-11057-4.
- 34 Lavallee, J.M.; Soong, J.L.; Cotrufo, M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology* 2020, 26, 261–273, doi:10.1111/gcb.14859.
- 35 Canarini, A.; Kaiser, C.; Merchant, A.; Richter, A.; Wanek, W. Root Exudation of Primary Metabolites: Mechanisms and Their Roles in Plant Responses to Environmental Stimuli. *Front. Plant Sci.* 2019, 10, doi:10.3389/fpls.2019.00157.
- 36 Kallenbach, C.M.; Wallenstein, M.D.; Schipanski, M.E.; Grandy, A.S. Managing Agroecosystems for Soil Microbial Carbon Use Efficiency: Ecological Unknowns, Potential Outcomes, and a Path Forward. *Front. Microbiol.* 2019, 10, doi:10.3389/fmicb.2019.01146.
- 37 Nafziger, E.D.; Dunker, R.E. Soil Organic Carbon Trends Over 100 Years in the Morrow Plots. *Agronomy Journal* 2011, 103, 261–267, doi:10.2134/agronj2010.0213s.
- 38 Macdonald, A.J. Rothamsted long-term experiments: Guide to the classical and other long-term experiments, datasets and sample archive; Rothamsted Research: Harpenden, UK, 2018;
- 39 Carey, C.J.; Dove, N.C.; Beman, J.M.; Hart, S.C.; Aronson, E.L. Meta-analysis reveals ammonia-oxidizing bacteria respond more strongly to nitrogen addition than ammonia-oxidizing archaea. *Soil Biology and Biochemistry* 2016, 99, 158–166, doi:10.1016/j.soilbio.2016.05.014.
- 40 Ouyang, Y.; Norton, J.M.; Stark, J.M.; Reeve, J.R.; Habteselassie, M.Y. Ammonia-oxidizing bacteria are more responsive than archaea to nitrogen source in an agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry* 2016, 96, 4–15, doi:10.1016/j.soilbio.2016.01.012.
- 41 Behnke, G.D.; Zabaloy, M.C.; Riggins, C.W.; Rodríguez-Zas, S.; Huang, L.; Villamil, M.B. Acidification in corn monocultures favors fungi, ammonia oxidizing bacteria, and nirK-denitrifier groups. *Science of The Total Environment* 2020, 720, 137514, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137514.
- 42 Peoples, M.B.; Hauggaard-Nielsen, H.; Huguenin-Elie, O.; Jensen, E.S.; Justes, E.; Williams, M. Chapter 8 - The Contributions of Legumes to Reducing the Environmental Risk of Agricultural Production. In *Agroecosystem Diversity*; Lemaire, G., Carvalho, P.C.D.F., Kronberg, S., Recous, S., Eds.; Academic Press, 2019; pp. 123–143 ISBN 978-0-12-811050-8.
- 43 Zamanian, K.; Zarebanadkouki, M.; Kuzyakov, Y. Nitrogen fertilization raises CO<sub>2</sub> efflux from inorganic carbon: A global assessment *Global Change Biology* 2018, 24, 2810–2817, doi:10.1111/gcb.14148.
- 44 Khorramdel, S.; Koocheki, A.; Nassiri Mahallati, M.; Khorasani, R.; Ghorbani, R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil and Tillage Research* 2013, 133, 25–31, doi:10.1016/j.still.2013.04.008.
- 45 Veloso, M.G.; Angers, D.A.; Tiecher, T.; Giacomini, S.; Dieckow, J.; Bayer, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2018, 268, 15–23, doi:10.1016/j.agee.2018.08.024.
- 46 Wen, Y.; Liu, W.; Deng, W.; He, X.; Yu, G. Impact of agricultural fertilization practices on organo-mineral associations in four long term field experiments: Implications for soil C sequestration. *Science of The Total Environment* 2019, 651, 591–600, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.233.

- 47 Bughio, M.A.; Wang, P.; Meng, F.; Qing, C.; Kuzyakov, Y.; Wang, X.; Junejo, S.A. Neof ormation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil. *Geoderma* 2016, 262, 12–19, doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.003.
- 48 Lorenz, K.; Omondi, E.; Lal, R. Deep soil organic carbon and total nitrogen after 34 years under conventional and organic management practices at the Rodale Institute Farming Systems Trial Under Review 2020.
- 49 Jensen, E.S.; Peoples, M.B.; Boddey, R.M.; Gresshoff, P.M.; Hauggaard-Nielsen, H.; J.R. Alves, B.; Morrison, M.J. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2012, 32, 329–364, doi:10.1007/s13593-011-0056-7.
- 50 Averill, C.; Turner, B.L.; Finzi, A.C. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature* 2014, 505, 543–545, doi:10.1038/nature12901.
- 51 Averill, C.; Hawkes, C.V. Ectomycorrhizal fungi slow soil carbon cycling. *Ecology Letters* 2016, 19, 937–947, doi:10.1111/ele.12631.
- 52 Tatsumi, C.; Taniguchi, T.; Du, S.; Yamanaka, N.; Tateno, R. Soil nitrogen cycling is determined by the competition between mycorrhiza and ammonia-oxidizing prokaryotes. *Ecology* 2020, 101, e02963, doi:10.1002/ecy.2963.
- 53 Six, J.; Frey, S.D.; Thiet, R.K.; Batten, K.M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 2006, 70, 555–569, doi:10.2136/sssaj2004.0347.
- 54 de Vries, F.T.; Thébault, E.; Liiri, M.; Birkhofer, K.; Tsiafouli, M.A.; Bjørnlund, L.; Jørgensen, H.B.; Brady, M.V.; Christensen, S.; Rüter, P.C. de; et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *PNAS* 2013, 110, 14296–14301, doi:10.1073/pnas.1305198110.
- 55 Malik, A.A.; Chowdhury, S.; Schlager, V.; Oliver, A.; Puissant, J.; Vazquez, P.G.M.; Jehmlich, N.; von Bergen, M.; Griffiths, R.I.; Gleixner, G. Soil Fungal:Bacterial Ratios Are Linked to Altered Carbon Cycling. *Front. Microbiol.* 2016, 7, doi:10.3389/fmicb.2016.01247.
- 56 *Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage*; Johnson, N.C., Gehring, C., Jansa, J., Eds.; Elsevier, 2016; ISBN 978-0-12-804383-7.
- 57 Eisenhauer, N.; Lanoue, A.; Strecker, T.; Scheu, S.; Steinauer, K.; Thakur, M.P.; Mommer, L. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific Reports* 2017, 7, 44641, doi:10.1038/srep44641.
- 58 Ngosong, C.; Jarosch, M.; Raupp, J.; Neumann, E.; Ruess, L. The impact of farming practice on soil microorganisms and arbuscular mycorrhizal fungi: Crop type versus long-term mineral and organic fertilization. *Applied Soil Ecology* 2010, 46, 134–142, doi:10.1016/j.apsoil.2010.07.004.
- 59 Heijboer, A.; ten Berge, H.F.M.; de Rüter, P.C.; Jørgensen, H.B.; Kowalchuk, G.A.; Bloem, J. Plant biomass, soil microbial community structure and nitrogen cycling under different organic amendment regimes; a <sup>15</sup>N tracer-based approach. *Applied Soil Ecology* 2016, 107, 251–260, doi:10.1016/j.apsoil.2016.06.009.
- 60 Chen, Y.; Hu, N.; Zhang, Q.; Lou, Y.; Li, Z.; Tang, Z.; Kuzyakov, Y.; Wang, Y. Impacts of green manure amendment on detritus micro-food web in a double-rice cropping system. *Applied Soil Ecology* 2019, 138, 32–36, doi:10.1016/j.apsoil.2019.02.013.
- 61 van der Heijden, M.G.A.; Martin, F.M.; Selosse, M.-A.; Sanders, I.R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytol* 2015, 205, 1406–1423, doi:10.1111/nph.13288.
- 62 Allen, M.F. Mycorrhizal Fungi: Highways for Water and Nutrients in Arid Soils. *Vadose Zone Journal* 2007, 6, 291–297, doi:10.2136/vzj2006.0068.
- 63 Wilson, G.W.; Rice, C.W.; Rillig, M.C.; Springer, A.; Hartnett, D.C. Soil aggregation and carbon

- sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecology Letters* 2009, 12, 452–461.
- <sup>64</sup> Rillig, M.C.; Mardatin, N.F.; Leifheit, E.F.; Antunes, P.M. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry* 2010, 42, 1189–1191.
- <sup>65</sup> Smith, S.E.; Facelli, E.; Pope, S.; Andrew Smith, F. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant Soil* 2010, 326, 3–20, doi:10.1007/s11104-009-9981-5.
- <sup>66</sup> Clemmensen, K.E.; Bahr, A.; Ovaskainen, O.; Dahlberg, A.; Ekblad, A.; Wallander, H.; Stenlid, J.; Finlay, R.D.; Wardle, D.A.; Lindahl, B.D. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science* 2013, 339, 1615–1618, doi:10.1126/science.1231923.
- <sup>67</sup> Kell, D.B. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Ann Bot* 2011, 108, 407–418, doi:10.1093/aob/mcr175.
- <sup>68</sup> Heitkamp, F.; Jacobs, A.; Jungkunst, H.F.; Heinze, S.; Wendland, M.; Kuzyakov, Y. Processes of Soil Carbon Dynamics and Ecosystem Carbon Cycling in a Changing World. In *Recarbonization of the Biosphere*; Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von, Eds.; Springer Netherlands, 2012; pp. 395–428 ISBN 978-94-007-4158-4.
- <sup>69</sup> Oades, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 1984, 76, 319–337, doi:10.1007/BF02205590.
- <sup>70</sup> Piccolo, A. The Nature of Soil Organic Matter and Innovative Soil Managements to Fight Global Changes and Maintain Agricultural Productivity. In *Carbon Sequestration in Agricultural Soils*; Piccolo, A., Ed.; Springer Berlin Heidelberg, 2012; pp. 1–19 ISBN 978-3-642-23384-5.
- <sup>71</sup> Douds, D.D.; Janke, R.; Peters, S. VAM fungus spore populations and colonization of roots of maize and soybean under conventional and low-input sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems, & Environment* 1993, 43, 325–335.
- <sup>72</sup> Hepperly, P.; Seidel, R.; Hanson, J.; Douds, D.D. Organic farming enhances soil carbon and its benefits, CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- <sup>73</sup> Oehl, F.; Mäder, P.; Dubois, D.; Ineichen, K.; Boller, T.; Wiemken, A. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* 2004, 138, 574–583.
- <sup>74</sup> Douds, D.D.; Nagahashi, G.; Shenk, J.E. Frequent cultivation prior to planting to prevent weed competition results in an opportunity for the use of arbuscular mycorrhizal fungus inoculum. *Renewable Agriculture and Food Systems* 2012, 27, 251–255, doi:10.1017/S1742170511000391.
- <sup>75</sup> Douds Jr., D.D.; Nagahashi, G.; Hepperly, P.R. On-farm production of inoculum of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and assessment of diluents of compost for inoculum production. *Bioresource Technology* 2010, 101, 2326–2330, doi:10.1016/j.biortech.2009.11.071.
- <sup>76</sup> Lange, M.; Eisenhauer, N.; Sierra, C.A.; Bessler, H.; Engels, C.; Griffiths, R.I.; Mellado-Vázquez, P.G.; Malik, A.A.; Roy, J.; Scheu, S.; et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications* 2015, 6, 6707, doi:10.1038/ncomms7707.
- <sup>77</sup> Smith, O.M.; Cohen, A.L.; Reganold, J.P.; Jones, M.S.; Orpet, R.J.; Taylor, J.M.; Thurman, J.H.; Cornell, K.A.; Olsson, R.L.; Ge, Y.; et al. Landscape context affects the sustainability of organic farming systems. *PNAS* 2020, 117, 2870–2878, doi:10.1073/pnas.1906909117.
- <sup>78</sup> Wickramasinghe, L.P.; Harris, S.; Jones, G.; Vaughan Jennings, N. Abundance and species richness of nocturnal insects on organic and conventional farms: effects of agricultural intensification on bat foraging. *Conservation Biology* 2004, 18, 1283–1292.

- 79 FAO The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture; Bélanger, J., Pilling, D. (eds ), Eds.; FAO: Rome, Italy, 2019; ISBN 978-92-5-131270-4.
- 81 Wang, Q.; Li, Y.; Alva, A. Cover Crops in Mono- and Biculture for Accumulation of Biomass and Soil Organic Carbon. *Journal of Sustainable Agriculture* 2012, 36, 423–439, doi:10.1080/10440046.2011.627991.
- 82 Álvaro-Fuentes, J.; Paustian, K. Potential soil carbon sequestration in a semiarid Mediterranean agroecosystem under climate change: Quantifying management and climate effects. *Plant Soil* 2011, 338, 261–272, doi:10.1007/s11104-010-0304-7.
- 83 Conant, R.T.; Paustian, K.; Elliott, E.T. GRASSLAND MANAGEMENT AND CONVERSION INTO GRASSLAND: EFFECTS ON SOIL CARBON. *Ecological Applications* 2001, 11, 343–355, doi:10.1890/1051-0761(2001)011[0343:GMACIG]2.0.CO;2.
- 84 Pandey, C.B.; Begum, M. The effect of a perennial cover crop on net soil N mineralization and microbial biomass carbon in coconut plantations in the humid tropics. *Soil Use and Management* 2010, 26, 158–166, doi:10.1111/j.1475-2743.2010.00272.x.
- 85 Brennan, E.B.; Acosta-Martinez, V. Cover cropping frequency is the main driver of soil microbial changes during six years of organic vegetable production. *Soil Biology and Biochemistry* 2017, 109, 188–204, doi:10.1016/j.soilbio.2017.01.014.
- 86 Veloso, M.G.; Cecagno, D.; Bayer, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. *Soil and Tillage Research* 2019, 190, 139–146, doi:10.1016/j.still.2019.03.003.
- 87 Littrell, J.; Jagadamma, S.; Omondi, E.; Xu, S.; Saha, D.; Lee J. Long-term organic Management combined with conservation tillage forenhanced soil organic carbon organic accumulation and aggregation Under Review 2020.
- 88 Govaerts, B.; Mezzalama, M.; Unno, Y.; Sayre, K.D.; Luna-Guido, M.; Vanherck, K.; Dendooven, L.; Deckers, J. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. *Applied Soil Ecology* 2007, 37, 18–30.
- 89 Brown, S.; Cotton, M. Changes in Soil Properties and Carbon Sequestration Potential as a Result of Compost or Mulch Application: Results of On-farm Sampling; University Of Washington, 2008;
- 90 de Moraes Sá, J.C.; Séguy, L.; Tivet, F.; Lal, R.; Bouzinac, S.; Borszowskei, P.R.; Briedis, C.; dos Santos, J.B.; da Cruz Hartman, D.; Bertoloni, C.G.; et al. Carbon Depletion by Plowing and Its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro- Ecoregions in Brazil. *Land Degradation & Development* 2013, n/a–n/a, doi:10.1002/ldr.2218.
- 91 Blanco-Canqui, H. Crop Residue Removal for Bioenergy Reduces Soil Carbon Pools: How Can We Offset Carbon Losses? *Bioenerg. Res.* 2013, 6, 358–371, doi:10.1007/s12155-012-9221-3.
- 92 Lal, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 2004, 304, 1623–1627, doi:10.2307/3837021.
- 93 Ingham, E. How the soil food web and compost increase soil organic matter content. In *Proceedings of the Organics-Solutions to Climate Change*; Sydney, 2006; p. 13.
- 94 Hartmann, M.; Frey, B.; Mayer, J.; Mäder, P.; Widmer, F. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* 2015, 9, 1177-1194.
- 95 Treonis, A.M.; Austin, E.E.; Buyer, J.S.; Maul, J.E.; Spicer, L.; Zasada, I.A. Effects of organic amendments and tillage on soil microorganisms and microfauna. *Applied Soil Ecology* 2010, 46, 103-110.
- 96 Fronning, B.E.; Thelen, K.D.; Min, D.-H. Use of Manure, Compost, and Cover Crops to Supplement Crop Residue Carbon in Corn Stover Removed Cropping Systems. *Agronomy Journal* 2008, 100, 1703–1710, doi:10.2134/agronj2008.0052.
- 97 Porter, G.A.; Bradbury, W.B.; Sisson, J.A.; Opena, G.B.; McBurnie, J.C. Soil Management and Supplemental Irrigation Effects on Potato: I. Soil Properties, Tuber Yield, and Quality. *Agronomy*



- Journal 1999, 91, 416, doi:10.2134/agronj1999.00021962009100030010x.
- 98 Chirinda, N.; Olesen, J.E.; Porter, J.R.; Schjøning, P. Soil properties, crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2010, 139, 584–594, doi:10.1016/j.agee.2010.10.001.
- 99 Ryals, R.; Silver, W.L. Effects of organic matter amendments on net primary productivity and greenhouse gas emissions in annual grasslands. *Ecological Applications* 2013, 23, 46–59, doi:10.1890/12-0620.1.
- 100 Ryals, R.; Kaiser, M.; Torn, M.S.; Berhe, A.A.; Silver, W.L. Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry* 2014, 68, 52–61, doi:10.1016/j.soilbio.2013.09.011.
- 101 Harrison, B.P.; Chopra, E.; Ryals, R.; Campbell, J.E. Quantifying the Farmland Application of Compost to Help Meet California’s Organic Waste Diversion Law. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 4545–4553, doi:10.1021/acs.est.9b05377.
- 102 Tautges, N.E.; Chiartas, J.L.; Gaudin, A.C.M.; O’Geen, A.T.; Herrera, I.; Scow, K.M. Deep soil inventories reveal that impacts of cover crops and compost on soil carbon sequestration differ in surface and subsurface soils. *Global Change Biology* 2019, 25, 3753–3766, doi:10.1111/gcb.14762.
- 103 Franzluebbers, A.J.; Lemaire, G.; de Faccio Carvalho, P.C.; Sulc, R.M.; Dedieu, B. Toward agricultural sustainability through integrated crop-livestock systems: Environmental outcomes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 1–3, doi:10.1016/j.agee.2014.04.028.
- 104 Soussana, J.-F.; Lemaire, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 9–17, doi:10.1016/j.agee.2013.10.012.
- 105 Carvalho, P.C. de F.; Peterson, C.A.; Nunes, P.A. de A.; Martins, A.P.; de Souza Filho, W.; Bertolazi, V.T.; Kunrath, T.R.; de Moraes, A.; Anghinoni, I. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *J Anim Sci* 2018, 96, 3513–3525, doi:10.1093/jas/sky085.
- 106 Lal, R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 2003, 29, 437–450, doi:10.1016/S0160-4120(02)00192-7.
- 107 Montgomery, D.R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2007, 104, 13268.
- 108 Abdalla, M.; Osborne, B.; Lanigan, G.; Forristal, D.; Williams, M.; Smith, P.; Jones, M.B. Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use and Management* 2013, 29, 199–209, doi:10.1111/sum.12030.
- 109 Sekaran, U.; Sagar, K.L.; Denardin, L.G.D.O.; Singh, J.; Singh, N.; Abagandura, G.O.; Kumar, S.; Farmaha, B.S.; Bly, A.; Martins, A.P. Responses of soil biochemical properties and microbial community structure to short and long-term no-till systems. *European Journal of Soil Science* 2020, n/a, doi:10.1111/ejss.12924.
- 110 Powlson, D.S.; Stirling, C.M.; Jat, M.L.; Gerard, B.G.; Palm, C.A.; Sanchez, P.A.; Cassman, K.G. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 2014, 4, 678–683, doi:10.1038/nclimate2292.
- 111 Lognoul, M.; Theodorakopoulos, N.; Hiel, M.-P.; Regaert, D.; Broux, F.; Heinesch, B.; Bodson, B.; Vandenberg, M.; Aubinet, M. Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N<sub>2</sub>O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements. *Soil and Tillage Research* 2017, 167, 80–89, doi:10.1016/j.still.2016.11.008.
- 112 Camarotto, C.; Piccoli, I.; Ferro, N.D.; Polese, R.; Chiarini, F.; Furlan, L.; Morari, F. Have we reached the turning point? Looking for evidence of SOC increase under conservation agriculture and cover crop practices. *European Journal of Soil*

- Science 2020, n/a, doi:10.1111/ejss.12953.
- 113 Teasdale, J.R.; Coffman, C.B.; Mangum, R.W. Potential Long-Term Benefits of No-Tillage and Organic Cropping Systems for Grain Production and Soil Improvement. *Agronomy Journal* 2007, 99, 1297–1301.
- 114 Stöckle, C.; Higgins, S.; Kemanian, A.; Nelson, R.; Huggins, D.; Marcos, J.; Collins, H. Carbon storage and nitrous oxide emissions of cropping systems in eastern Washington: A simulation study. *Journal of Soil and Water Conservation* 2012, 67, 365–377, doi:10.2489/jswc.67.5.365.
- 115 Skinner, C.; Gattinger, A.; Muller, A.; Mäder, P.; Fließbach, A.; Stolze, M.; Ruser, R.; Niggli, U. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management — A global meta-analysis. *Science of The Total Environment* 2014, 468–469, 553–563, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.08.098.
- 116 Carr, P.; Gramig, G.; Liebig, M. Impacts of Organic Zero Tillage Systems on Crops, Weeds, and Soil Quality. *Sustainability* 2013, 5, 3172–3201, doi:10.3390/su5073172.
- 117 Gadermaier, F.; Berner, A.; Fließbach, A.; Friedel, J.K.; Mäder, P. Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. *Renewable Agriculture and Food Systems* 2011, 27, 68–80, doi:10.1017/S1742170510000554.
- 118 Cooper, J.; Baranski, M.; Stewart, G.; Nobel-de Lange, M.; Bàrberi, P.; Fließbach, A.; Peigné, J.; Berner, A.; Brock, C.; Casagrande, M.; et al. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 2016, 36, 22, doi:10.1007/s13593-016-0354-1.
- 119 Ramachandran Nair, P.K.; Nair, V.D.; Mohan Kumar, B.; Showalter, J.M. Chapter Five - Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In *Advances in Agronomy*; Sparks, D.L., Ed.; Academic Press, 2010; Vol. 108, pp. 237–307.
- 120 Sy, V.D.; Herold, M.; Achard, F.; Beuchle, R.; Clevers, J.G.P.W.; Lindquist, E.; Verchot, L. Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South America. *Environ. Res. Lett.* 2015, 10, 124004, doi:10.1088/1748-9326/10/12/124004.
- 121 Rowntree, J.E.; Ryals, R.; DeLonge, M.S.; Teague, W.R.; Chiavegato, M.B.; Byck, P.; Wang, T.; Xu, S. Potential mitigation of midwest grass-finished beef production emissions with soil carbon sequestration in the United States of America. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society* 2016, 4, 31–38.
- 122 Teague, W.R.; Apfelbaum, S.; Lal, R.; Kreuter, U.P.; Rowntree, J.; Davies, C.A.; Conser, R.; Rasmussen, M.; Hatfield, J.; Wang, T.; et al. The role of ruminants in reducing agriculture's carbon footprint in North America. *Journal of Soil and Water Conservation* 2016, 71, 156–164, doi:10.2489/jswc.71.2.156.
- 123 Bork, E.W.; Raatz, L.L.; Carlyle, C.N.; Hewins, D.B.; Thompson, K.A. Soil carbon increases with long-term cattle stocking in northern temperate grasslands. *Soil Use and Management* 2020, 36, 387–399, doi:10.1111/sum.12580.
- 124 Assmann, J.M.; Anghinoni, I.; Martins, A.P.; Costa, S.E.V.G. de A.; Cecagno, D.; Carlos, F.S.; Carvalho, P.C. de F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 52–59, doi:10.1016/j.agee.2013.12.003.
- 125 Ribeiro, R.H.; Ibarra, M.A.; Besen, M.R.; Bayer, C.; Piva, J.T. Managing grazing intensity to reduce the global warming potential in integrated crop–livestock systems under no-till agriculture. *European Journal of Soil Science* n/a, doi:10.1111/ejss.12904.
- 126 Silva, F.D. da; Amado, T.J.C.; Ferreira, A.O.; Assmann, J.M.; Anghinoni, I.; Carvalho, P.C. de F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2014, 190, 60–69, doi:10.1016/j.agee.2013.12.005.

- 127 Galindo, F.S.; Delate, K.; Heins, B.; Phillips, H.; Smith, A.; Pagliari, P.H. Cropping System and Rotational Grazing Effects on Soil Fertility and Enzymatic Activity in an Integrated Organic Crop-Livestock System. *Agronomy* 2020, 10, 803, doi:10.3390/agronomy10060803.
- 128 Sollenberger, L.E.; Kohmann, M.M.; Dubeux, J.C.B.; Silveira, M.L. Grassland Management Affects Delivery of Regulating and Supporting Ecosystem Services. *Crop Science* 2019, 59, 441–459, doi:10.2135/cropsci2018.09.0594.
- 129 De Pinto, A.; Li, M.; Haruna, A.; Hyman, G.G.; Martinez, M.A.L.; Creamer, B.; Kwon, H.-Y.; Garcia, J.B.V.; Tapasco, J.; Martinez, J.D. Low Emission Development Strategies in Agriculture. An Agriculture, Forestry, and Other Land Uses (AFOLU) Perspective. *World Development* 2016, 87, 180–203, doi:10.1016/j.worlddev.2016.06.013.
- 130 Lal, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* 2018, 24, 3285–3301, doi:10.1111/gcb.14054.
- 131 Kassam, A.; Friedrich, T.; Derpsch, R. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 2019, 76, 29–51, doi:10.1080/00207233.2018.1494927.
- 132 Wyckhuys, K.A.G.; Heong, K.L.; Sanchez-Bayo, F.; Bianchi, F.J.J.A.; Lundgren, J.G.; Bentley, J.W. Ecological illiteracy can deepen farmers' pesticide dependency. *Environ. Res. Lett.* 2019, 14, 093004, doi:10.1088/1748-9326/ab34c9.

Tõlge: Mahepõllumajanduse Koostöökogu

Materjali tõlkimist toetas Euroopa Maaelu Arengu Põllumajandusfond (EAFRD)

„Teadmussiirde programm põllumajanduse, toidu ja maamajanduse valdkonnas“ raames.



Euroopa Maaelu Arengu  
Põllumajandusfond:  
Euroopa investeeringud  
maapiirkondadesse