CARBON ACTION

BSAG®
Baltic Sea Action Group

Kolguide

översikt över kolet i marken och grunderna i kolbindande jordbruk

Jussi Heinonsalo (red.)

Innehållsförteckning

1. Förord

2. Inledning

2.1 Klimatsmart jordbruk

2.2 Kolet i marken och dess inverkan på jordmånen

2.3 Metoder för att fastställa storleken på och förändringarna i markens kollager

2.4 Viktiga processer i anslutning till kolets kretslopp i marken

3. Markens kollager i jordbruket

3.1 Grunderna för beräkningen av kolbalansen på gårdarna

3.2 Faktorer som påverkar förändringen av kollagret i jordbruket

3.3 Odlingsmetodernas inverkan på förändringen av kollagret

3.4 Jordförbättringsmedel

3.5 Torvåkrarna: hur hålla kvar kolet där det redan finns?

3.6 Agroekologisk symbios

4. Kolodling och försök i praktiken

4.1 Olika slags Carbon Action-odlare

4.2 Förebilder ute i världen

4.3 Forskningsexempel

5. Kolmarknaden och de ekonomiska styrmedlen

6. Utmaningar och möjligheter med en ökad kolbindning

7. Till slut

Termer och definitioner

Källförteckning

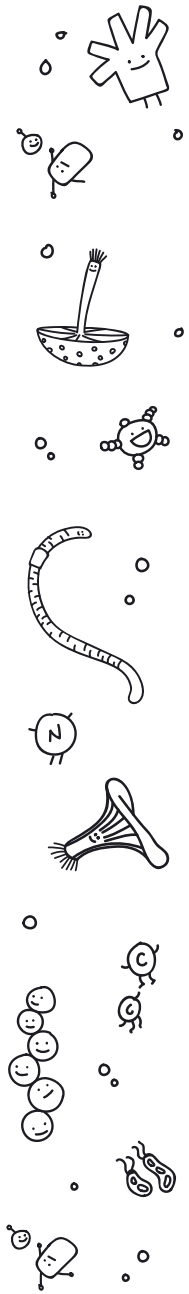
Kolguide
- Översikt över kolet i marken och grunderna i kolbindande jordbruk

Jussi Heinonsalo (red.)

Översättning: Mats Norrholm

1 upplagan

2020 aDigi Oy Digipaino
Helsingfors



1. Förord

Denna guide riktar sig till alla som är intresserade av kolbindningen i jordbruksmarken. Guiden tar upp grundläggande frågor om kolet i jordmånen, kollagren, processerna och mätningsmetoderna samt vad som påverkar lagringen av kol och hur den kan främjas. Forskningen och processförståelsen gällande hur kollagren i marken förändras är ännu otillräcklig. Effekterna av många av de processer vi känner till har ännu inte undersökts i verkliga odlingsförhållanden. Forskarsamhället arbetar nu på bred front för att försöka förstå hur kollagren i åkermarkerna fungerar. En hel del vet vi ändå redan, och många av kolbindningens huvudprinciper förstår vi redan tillräckligt väl för att kunna vidta åtgärder som leder i rätt riktning.

Vi som har sammanställt den här guiden är tillsammans med er läsare resenärer på samma tåg, som hela tiden rör sig framåt. I morgon vet vi igen någonting nytt, som vi ännu i går inte hade en aning om. Denna guide kommer också att ges ut i nya och uppdaterade upplagor. Därför är vi också synnerligen tacksamma för all respons som kan föra forskningen och kunskapen om kollagren i marken framåt.

Givande lässtunder!

Kolguidens författare:

Heimsch Laura, doktorand, Meteorologiska institutet - LHeim
Heinonsalo Jussi, universitetsforskare, Helsingfors universitet och Meteorologiska institutet - JHei
Helenius Juha, professor, Ruralia-institutet, Helsingfors universitet - JHel
Huusko Karoliina, forskardoktor, Helsingfors universitet - KH
Höijer Laura, innehållsdirektör, Baltic Sea Action Group - LHö
Joona Juuso, doktorand, Helsingfors universitet - JJ
Kanerva Sanna, universitetslektor, Helsingfors universitet - SK
Karhu Kristiina, biträdande professor, Helsingfors universitet - KKa
Kekkonen Hanna, forskare, Naturresursinstitutet - HK
Koppelmäki Kari, doktorand, Helsingfors universitet - KKo
Kulmala Liisa, äldre forskare, Meteorologiska institutet - LK
Lötjönen Sanna, doktorand, Helsingfors universitet -SL
Mattila Tuomas, specialforskare, Finlands miljöcentral - TM
Ollikainen Markku, professor, Helsingfors universitet - MO
Peltokangas Kenneth, doktorand, Helsingfors universitet - KP
Regina Kristiina, forskningsprofessor, Naturresursinstitutet - KR
Soinne Helena, specialforskare, Naturresursinstitutet - HS
Wikström Ulrika, planerare, Baltic Sea Action Group - UW
Viskari Toni, äldre forskare, Meteorologiska institutet - TV

2. Inledning

Jordklotet påfrestas hårt av de miljöförändringar som har orsakats av mänskligheten, såsom minskningen av naturens biologiska mångfald, kemikaliseringen av miljön samt klimatuppvärmningen. Halterna av växthusgaser i atmosfären, där koldioxid (CO_2) är den viktigaste, har stigit avsevärt under de senaste 50 åren.

Vid Mauna Loa i Hawaii har man mätt bakgrundshalten av koldioxid i atmosfären sedan 1950-talet, och under mätningshistorien har halten stigit från 315 ppm (miljondelar) till över 400 ppm. Stigningen visar inga tecken på att avta. Även om ökningen i användningen av stenkol har stannat upp och produktionen av förnybar energi ökar, stiger fortfarande konsumtionen av olja och naturgas. År 2017 frigjordes 34 gigaton koldioxid från fossila bränslen till atmosfären. Från förändringarna i markanvändningen frigjordes 5 gigaton. Haven utgjorde en kolsänka som tog upp 9 gigaton och biosfären, dit växtligheten och marken hör, tog upp 12 gigaton. Cirka 17 gigaton koldioxid blev 2017 kvar i atmosfären till följd av mänsklig verksamhet (The Global Carbon Project, Global Carbon Budget 2018, www.globalcarbonproject.org). Koldioxiden som kontinuerligt hamnar i atmosfären och de övriga faktorerna som påverkar växthuseffekten gör att jordklotets temperatur stiger, vilket får miljömässiga, sociala och ekonomiska konsekvenser.

Det råder inga tvivel om att utsläppen från fossila bränslen måste minskas för att klimatuppvärmningen ska kunna fås under kontroll. Förutom att minska utsläppen är det viktigt att samtidigt upprätthålla och öka kolsänkorna globalt sett. I kampen mot klimatförändringen spelar ökningen av kolsänkor i jord- och skogsbruket en central roll, tack vare de stora markarealerna och det stora kollagret.

I denna guide fokuserar vi på jordbruksmarken och den inverkan som åtgärderna inom jordbruket har på förändringarna av kollagren. Metoderna som rör skogarna och skogsbruket tas inte upp här.

Marken utgör ett stort kollager. Man uppskattar att 1 500–2 400 gigaton kol lagras i skiktet som sträcker sig till 1–2 meters djup. Det är cirka tre gånger mer än den totala kolmängden i hela atmosfären. Det är också cirka 300–500 gånger de kolutsläpp som årligen orsakas av fossila bränslen. Redan en liten förändring i kollagren i marken har alltså stor betydelse för CO_2-halten i atmosfären. Det har var utgångspunkten för det så kallade fyra promille-initiativet, som Frankrike presenterade vid klimatmötet i Paris 2015. Genom att kollagren i åkermarken ökas med fyra promille årligen kan en betydande del av tilläggskolet från användningen av fossila bränslen bindas från atmosfären.

Jordbruksmarken är ständigt objekt för aktiv mänsklig verksamhet. Det här gör det möjligt att snabbt ta i bruk odlingsmetoder som ökar kollagren i marken på stora områden. Många odlingsmetoder leder dock till att åkermarken förlorar sina kollager. Mängden kol som försvinner från åkern genom nedbrytning och med biomassan överstiger den mängd som tillförs åkermarken via grödornas tillväxt och växtresterna.

För att kunna vända den globala, och även finländska, utvecklingen tillbaka mot kolbindning måste vi förstå hur kolet fungerar i marken. Det förutsätter användning av odlingsmetoder som främjar kolbindningen och utvecklande av nya odlingssätt, men även anpassning av den kolbindande verksamheten till det kommersiella jordbrukets ramar. En mer omfattande verifiering av kollagret är också nödvändig.

Även om guiden fokuserar på kolet är det uppenbart att jordbrukets praxis, processerna i marken och odlingens totala miljökonsekvenser utgör en komplicerad helhet. Ingen del av denna helhet kan granskas helt separat. Odlingsverksamheten måste som helhet betraktad stå på en hållbar grund. Utöver kollagringen måste man beakta växtproduktionens krav, näringsavrinningen, naturens biologiska mångfald och ett flertal andra faktorer som påverkar helheten.

(JHei)

2.1. Klimatsmart jordbruk

Av de globala utsläppen av växthusgaser härstammar 10–14 procent från jordbruksproduktionen och 37 procent från marken (Paustian m.fl. 2016). Genom bättre odlingspraxis kan vi minska utsläppen och öka mängden kol som inlagras i marken. En högre mullhalt ger mångsidigare markorganismer, minskar erosionen, avrinningen och belastningen på vattendragen samt förbättrar markens förmåga att klara av extrema klimatförhållanden. Samtidigt ökar också möjligheterna att förbättra markens produktivitet. Att binda mer kol i åkermarken är ett av de förmånligaste och mest fördelaktiga sätten att avlägsna koldioxid från atmosfären.

Keith Paustian och hans medarbetare presenterade 2016 i sin artikel ”Klimatsmarta jordar” olika metoder att för öka mängden kol i åkermarken.

Metoderna kan indelas i följande huvudfaktorer:

1) utnyttjande av växter med djupgående rötter, så att rotmassa och rotsekret också hamnar i de djupare markskikten där kolets kretslopp är långsammare
2) mångsidig växtföljd som garanterar ett stort kolflöde till marken
3) kvarlämnande av en större mängd växtbiomassa i marken
4) användning av botten- och fånggrödor för att åkern ska ha assimilerande växtlighet så länge som möjligt och kolflödet till marken ska vara stort

Användning av jordförbättringsmedel för att öka kollagren i marken är också ett beaktansvärt alternativ. Varje jordförbättringsmedel måste då bedömas utgående från materialets hela livscykel och dess miljöpåverkningar. Vi vet ännu rätt lite om de mekanismer som avgör hur länge kolet stannar kvar i marken. Såväl i Finland som internationellt forskar man därför nu aktivt kring temperaturkänsligheten när det gäller nedbrytningen av långvariga kollager i de djupa markskikten samt kring kolmängden som hamnar i marken från de döda mikrobernas biomassa.

Främjandet av ett klimatsmart jordbruk kräver simultana åtgärder på många fronter. Jordbrukspraxis måste utvecklas och undersökas, så att man hittar de bästa och mest funktionella odlingssätten som förutom kollagringen även garanterar tillräckliga skördenivåer. Forskningens uppgift är också att utreda och förbättra metoderna för påvisande och noggrann bestämning av den långvariga kolinlagringen i marken.

De ekonomiska och politiska stöden och styrningen bör gynna en klimatsmart jordbruksverksamhet, så att kolinlagringen i marken blir en del av ett lönsamt jordbruksföretagande. För att de här målsättningarna ska uppfyllas krävs det att man vid utvecklandet

av jordbrukspraxis förutom kollagringen även beaktar odlingens alla klimat- och miljöpåverkningar, såsom de övriga växthusgasutsläppen, belastningen på vattendrag, konsumtionen av gödselmedel och energi samt de använda materialens alla livscykelverkningar (Bild 1).

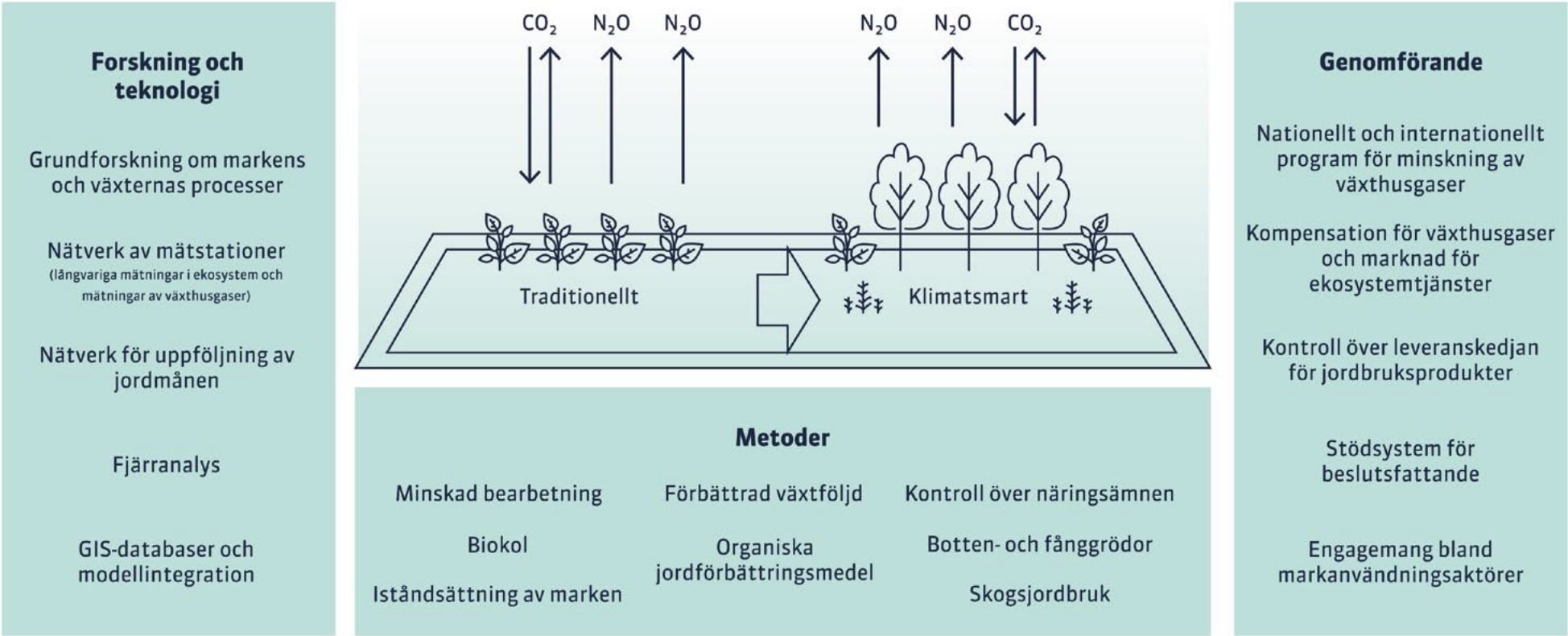


Bild 1. Olika delområden av klimatsmart jordbruk. Klimatsmart jordbruk grundar sig på vetenskapligt verifierad kunskap som tillämpas i det praktiska jordbruket. Genomförandet av de praktiska åtgärderna kan främjas med samhälleliga styrmedel, vilket gör det möjligt att uppnå mer omfattande lösningar såväl nationellt som internationellt för att stävja klimatförändringen (ursprunglig bild Paustian et al. 2016 Nature).

Den förändrade markanvändningens inverkan på kollagren i marken

Odlingsmarkerna har under seklernas lopp röjts från de naturliga ekosystemen för att användas i jordbruket. Jordbruksidkandet (bearbetning, gödsling, torrläggning, bärgande av skörd etc.) har med tiden minskat på kollagren i åkermarken. Enligt en internationell metaanalys har markanvändningen en betydande inverkan på kollagrets storlek (Guo and Gifford, 2002). När skog röjs till åker minskar kollagret med över 40 procent från det ursprungliga (bild 2).

Den största kolförlusten sker enligt forskningen under de första tio åren. Förändring från skog till betesmark minskar inte på kollagret, utan kan till och med öka på det. När odlingsjordar ändras till naturligt tillstånd, gallringsskog eller betesmark ökar kollagret på motsvarande sätt med 18–53 procent (bild 2). Kollagret ökar och återställs alltså långsamt till den naturliga nivå som bestäms av växtligheten och klimatet. Förändringstakten, de relativa förändringarna i kollagret och de exakta kolmängderna varierar från fall till fall, men den förändrade markanvändningens inverkan och förändringsriktningen är vi mycket väl medvetna om.

Målsättningarna för kolbindningen på åkernivå bör sättas i relation till de här storskaliga förändringarna och markanvändningens inverkan. Förändringarna i markanvändningen är således av synnerligen stor betydelse för att de nationella målsättningarna för kolbindningen ska kunna uppnås. För att mängden kol i åkermarken ska kunna ökas är det viktigt att försöka hitta och etablera odlingssätt som binder mer kol i marken än vad som släpps ut. Ny teknologi för till exempel bearbetnings- och såmaskinerna har möjliggjort en betydande minskning av jordbearbetningen och en ökning av åkrarnas växttäcke. Det här är viktigt för vi ska kunna bryta den utveckling som gör att kolet försvinner från odlingsjordarna till atmosfären. Först när kolförlusten från marken har stoppats kan vi börja sträva efter att öka kolinlagringen.

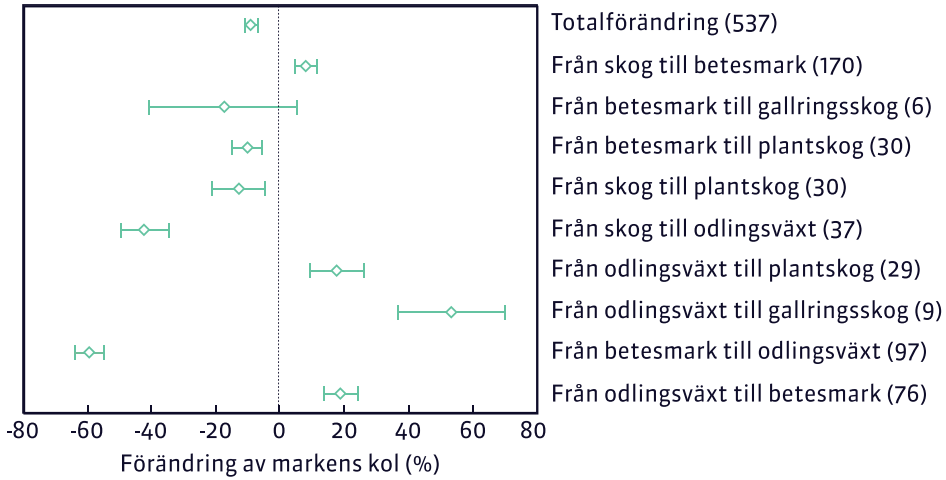


Bild 2. Värden från en internationell metaanalys av den förändrade markanvändningens inverkan på mängden kol i marken (ursprunglig bild Guo and Gifford 2002 Global Change Biology).

(JHei)

2.2. Kolet i marken och dess inverkan på jordmånen

Organiskt kol

Med organiskt material i marken avser man organogent material, dvs. dött material från växter, mikrober och djur, som förekommer i marken som föreningar i olika stadier av nedbrytning. Organiskt kol är i sin tur kol som är bundet till det organogena materialet som en viktig komponent, och som utgör cirka hälften av den organogena materialets massa. Förutom kol innehåller det organiska materialet också många andra grundämnen, såsom syre, väte och kväve. Kolet blir ursprungligen en del av det organogena materialet via växternas fotosyntes, där växterna vid assimilationen binder kol från koldioxiden i atmosfären och använder det som beståndsdel i kolhydrater.

Beträffade molekylstorlek, struktur och kemiska egenskaper är det organiska materialet i marken mycket heterogent. Det kan förutom som en del av markens fasta material även förekomma upplöst i markvattnet. Det organiska materialet är på grund av sin heterogena karaktär synnerligen svårt att undersöka och klassificera. Klassificeringen görs ofta på basis av materialets nedbrytningshastighet. Ytterligheterna på den här glidande skalan är **labilt** organiskt material, som bryts ned snabbt på några månader eller år, samt **stabilt** organiskt material, som är synnerligen hållbart och kan bevaras i marken upp till hundratals år.

Det organiska materialet får en stabil form när föreningar och mikrobiellt material i olika stadier av nedbrytning reagerar med mineralerna i marken. De kemiska bindningarna mellan det organiska materialet och mineralerna samt markens aggregatstruktur skyddar det organiska materialet från nedbrytning. Det organiska materialets hållbarhet mot nedbrytning är alltså inte enbart en egenskap hos materialet självt, utan framför allt en följd av interaktionen med mineralerna i marken. Om vi vill öka kollagret i marken spelar det stabila materialet en central roll. Kolet i aggregaten och på mineralernas ytor bevaras länge i marken, såvida förhållandena i jordmånen inte ändras avsevärt. Den totala mängden organiskt material, och således också organiskt kol, i marken bestäms långt av klimatet, kvaliteten på mineralerna i marken, mängden av och kvaliteten på växtmaterial som hamnar i marken samt av markanvändningen.

Kolmängden ökar tack vare att dött växtmaterial, växtsekret, animaliskt avfall och organisk gödsel hamnar i marken. På samma gång försvinner kol ur marken när det organiska materialet nedbryts samt via erosion och avrinning. Skillnaden mellan det kol som tillförs och det som försvinner avgör på vilken nivå markens kolhalt hamnar.

Internationellt sett är halten organiskt kol i marken mycket varierande, men allmänt taget gynnas kolinlagringen i marken av ett svalt och fuktigt klimat samt av finfördelade mineraler. I Finland är halten organiskt kol i marken förhållandevis hög, även i mineraljordarna. På de nordliga breddgraderna har vi också rikligt med organogena, organiska jordar som mull- och torvjordar. I torvjordar är halten organiskt material över 40 procent, och även i mulljordar över 20 procent.

(SK)

Humus eller organiskt material?

Termen humus har historiskt sett använts i många olika betydelser, och betydelsen har också varierat mycket mellan olika vetenskapsfält. I synnerhet när det gäller åker- och skogsmark har humus betecknat jordmaterial med synnerligen varierande kemiska egenskaper eller ekologiska roller. Med humus avses i allmänhet det stabila organiska materialet i marken, som kan observeras med sinnena främst tack vare markens mörk- eller rödbruna färg.

Termen humus har inte omfattat identifierbara växtrester och animaliskt material, såsom stallgödsel som spridits på åkern. När växtresterna och stallgödseln bryts ned främjar de dock bildandet av humus, och de humusföreningar som bildas till följd av en lång nedbrytningsprocess har ansetts få en hållbarare kemisk struktur än övriga växtbaserade och animaliska föreningar.

Tack vare den hållbara kemiska strukturen har humusens funktionella roll i marken varit att stöda markstrukturen och de därtill hörande egenskaperna, såsom aggregatstabiliteten, vattengenomsläppligheten och förmågan att hålla kvar vatten och näringsämnen. Humusens roll som näringskälla har däremot ansetts vara av mindre betydelse, i synnerhet i jämförelse med färskt organogent material.

Nya forskningsresultat har dock ifrågasatt humusens unika struktur och egenskaper. Den rådande uppfattningen lyfter fram tanken om interaktionsförhållandet mellan mineraler och organogent material. De finaste jordfraktionerna, såsom ler, spelar en synnerligen viktig roll för ansamlingen av organogent material i marken.

Humus ses inte heller längre som ett ämne som kan definieras separat och hittas i olika omgivningar. I stället anser man att markens organogena material består av ett kontinuum av föreningar i olika stadier av nedbrytning. Detta kontinuums sammansättning avgörs av kvaliteten och den kemiska karaktären på de föreningar som bildas av växtligheten och organismerna (bl.a. mikrober, markdjur).

Termen humus bör därför undvikas, eller åtminstone bör betydelsen definieras noga vid användningen. Det är bättre att helt enkelt tala om organiskt material i marken, vilket omfattar allt organogent material som är i nära interaktion med jordmaterialet. Härifrån kan man vid behov avskilja organiskt material med klart avvikande sammansättning eller funktion, såsom växt- och djurrester på markytan och föreningar med klart avvikande beteende, såsom biokol.

(KP)

Det organiska materialets inverkan på jordmånen

Det organiska materialets andel av markens totalmassa är i mineraljordar ofta rätt så liten, endast några procent. Trots sin ringa andel är det av väsentlig betydelse för markens produktionsförmåga, eftersom det organiska materialet har inverkan på många av markens kemiska, fysikaliska och biologiska egenskaper.

Det lätt nedbrytbara eller labila materialet upprätthåller livet i marken. Det utgör näring för många olika markorganismer, som bryter ned det organiska materialet och frigör de näringsämnen

som bundits till det för att på nytt användas av växterna. Ett aktivt organismliv är också till nytta för markstrukturen, eftersom till exempel slemmet som mikroberna producerar gör jordaggregaten stabilare och minskar markens erosionsrisk. En god aggregatstruktur påverkar dessutom markens gas- och vattenhushållning på ett gynnsamt sätt.

Det stabila organiska materialet fungerar å sin sida som reaktionsyta i marken. Tack vare sin negativa laddning kan det hålla kvar markens näringskatjoner i en användbar form för växterna så länge markens pH-värde är tillräckligt högt. Det fungerar som en buffert mot försurning av marken genom att binda de vätejoner, alltså protoner, som finns i markvattnet. Det ökar också konkurrensen mellan anjonerna om adsorptionsplatser på mineralmaterialets ytor, och förbättrar på så vis tillgängligheten av näringsämnen i anjonform, såsom fosfor, för växterna. Det organiska materialet kan dessutom binda skadliga metaller, såsom lösligt aluminium som förekommer i sura jordar, i en form som är mindre skadlig för växterna. Som beståndsdel i jordaggregaten gör det stabila organiska materialet aggregaten starkare, men ger också flexibilitet i aggregatstrukturen och gör aggregaten stabilare till exempel under långvariga våta förhållanden.

Organiskt material som är fullständigt torrt har hydrofobiska eller vattenavstötande egenskaper, vilket gör att till exempel en torr gammal vall i likhet med ytan på en torr mineraljord inte suger upp och släpper igenom kraftigt regn. Det tar tid innan torrt organiskt material blir fuktigt. Som fuktigt kan det organiska materialet å andra sidan absorbera stora mängder vatten, vilket gör att det torkar upp långsamt. I praktiken innebär det här att en hög halt av organiskt material ökar markens vattenhållande förmåga och minskar torkkänsligheten. Under torra somrar växer det därför bättre på mull- och torvjordar än på mineraljordar.

(SK)

Oorganiskt kol

Med oorganiskt kol i marken avses kol som förekommer som beståndsdel i ett karbonatmineral. I den finländska berggrunden är karbonatmineraler sällsynta. Därför förekommer oorganiskt kol inte heller naturligt i vår jordmån, vars mineralmaterial härstammar från berggrunden. Oorganiskt kol hamnar dock i marken med kalkningsmedel som kalcit och dolomit, men mängderna är ytterst små i förhållande till den mängd organiskt kol som finns i marken. När karbonaterna neutraliserar markens surhet försvinner karbonatkolet dessutom relativt snabbt ur marken som koldioxid, och mängden oorganiskt kol i marken ökar därför inte till följd av kalkningen. I Finland är den totala kolhalten i marken i praktiken densamma som halten organiskt kol, eftersom halten oorganiskt kol är obefintlig.

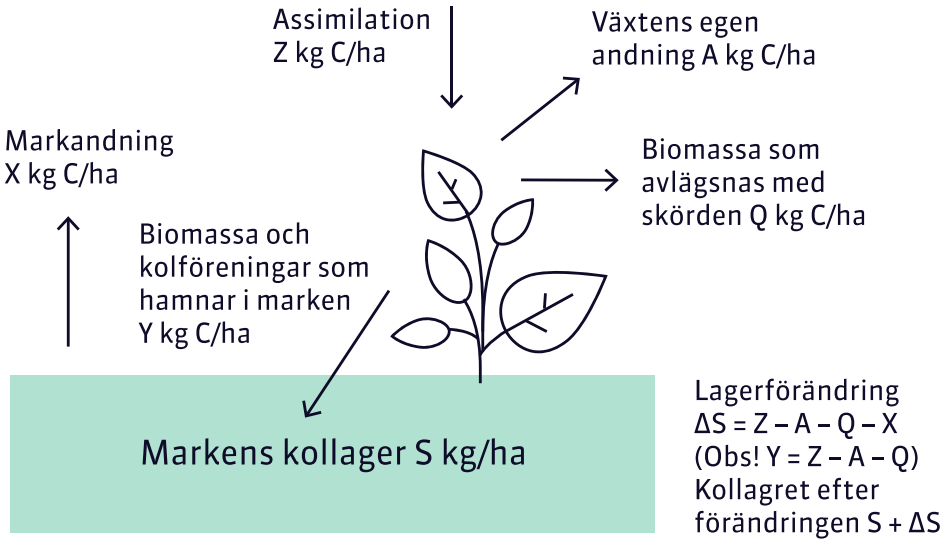
(SK)

2.3 Metoder för att fastställa storleken på och förändringarna i markens kollager

Begrepp för förändringar i kollagret

Vid bedömningen av kollagret och förändringarna i det ställs vi inför termer som biomassa, lager, kolsänka eller kolbindning, fotosyntes (assimilation), kolutsläpp eller kolkälla. Det här gäller såväl för marken som för hela ekosystem – oberoende av om det gäller skogs-, åker- eller något annat ekosystem. När vi bedömer förändringen i kollagret är det viktigt att också beakta tidsspannet för observationen, som kan variera från ett år till hundratals år. Vid bedömningen av hur olika förändringar i markanvändningen eller olika skogsskötselalternativ har påverkat kollagrets storlek är valet av tidsspann för observationen mycket viktigt och avgörande med tanke på slutsatserna.

Inom jordbruket är också observationer från korta tidsspann användbara. Odlingen är åtgärdsorienterad och även de årliga åtgärderna kan ha stor inverkan på kolflödet till marken. Å andra sidan sker förändringarna i lagret långsamt också på åkrarna. I bild 3 presenteras de centrala begreppen för förändringarna i kollagret samt deras betydelse.



Förändringen av markens kollager ΔS ('kolsänka', 'kolbindning i marken') = total assimilation Z – växternas egen andning A – kol som avlägsnas med skörden Q – markandning X (nedbrytningen av organiskt material i marken).

Obs! Om förändringen är negativ försvinner kol från marken, och marken är då en kolkälla. Tidssteget för fastställande av kolbalansen i modellerna är ofta ett år.
Obs2! Nettoassimilationen (total assimilation – växtens egen andning), markandningen och skörden är lättare att mäta än kolflödet till marken.

Bild 3. Beräkningsprincip för förändringen av markens kollager

(JHei)

Jordprover

Kollagret i marken kan bestämmas genom jordprovtagning och mätning av provets kolinnehåll. Med tanke på bedömningen av kollagrets storlek är det avgörande hur representativt provet är för det område man vill undersöka. En representativ och randomiserad provtagning är en förutsättning för en tillförlitlig bestämning av kollagret. En stor mängd prover ökar självfallet bedömningens noggrannhet. När ett stort antal prover tas ökar noggrannheten på bedömningen kraftigt åtminstone för de första tio proverna (Mäkipää m.fl. 2008). Mäkipää m.fl. (2008) utredde hur ett ökat antal jordprover ökar noggrannhet i bedömningen. Enligt deras undersökning förbättras noggrannheten avsevärt efter de första proverna, medan tilläggsproverna efter 10–20 prover förbättrar noggrannheten i avtagande mån.

Antalet prover samt kostnaderna för och nyttan av analyserna kräver därför noggrann planering. Av praktiska orsaker, och för att jämna ut de naturliga variationerna inom ett åkerskifte, bildas ett prov som skickas för analys av ett stort antal mindre delprover. Analysresultatet ger då en bättre beskrivning av den genomsnittliga situationen på området. Dagens teknik för precisionsodling utnyttjar variationerna i markens egenskaper, och dessa bör då också kunna mätas i tillräckligt stor utsträckning. Digitaliseringen öppnar nya möjligheter för monitorering av åkerns egenskaper, och kompletterar den arbetsdryga mätningen som baserar sig på analys av jordprover. Vid bedömningen av den totala kolmängden bör man komma ihåg att informationen om halten organiskt kol inte är tillräcklig. För att kunna bestämma den totala kolmängden behöver man även känna till provets torra skrymdensitet.

Förutom provtagningstätheten måste man vid bedömningen av kollagret beakta kolets djupfördelning för att kunna mäta den spatiala variationen. Kollagret är ofta störst i bearbetningsskiktet. Beroende på jordarten, växternas rotdjup samt odlings- och markanvändningshistorien kan kolmängden vara betydande också under bearbetningsskiktet. I normala fall tas jordproverna för markkarteringsanalyser i bearbetningsskiktet. Vid noggrannare undersökningar är det viktigt att bestämma kollagret också i de djupare markskikten.

(JHei)

Kemiska analyser

Den totala mängden organiskt kol i jordmånen kan bestämmas genom att kolhalten i provet mäts med en apparat som är framtagen för ändamålet. Vid bestämningen av kol (och kväve) bränns provet vid hög temperatur, varvid hela den organiska kolmängden i provet frigörs. Kolet oxideras till koldioxid, och mängden kan mätas exakt. Bestämningen kan göras på prover av vilket material som helst. Eventuellt oorganiskt kol (karbonater) som finns i provet fastställs inte vid den här typen av analys, utan måste mätas separat. Bestämningen av karbonatkol baserar sig på att kolet frigörs från CO_3^{2-}-formen med hjälp av syra, varefter mängden koldioxid som bildas bestäms. I de finländska sura jordarna är karbonatkolets andel av totalkolet inte signifikant, men i neutrala eller basiska miljöer kan det oorganiska kolets andel vara stor. Vid kalkning hamnar karbonatkol i åkermarken, men kolet frigörs sedan så småningom tillbaka till atmosfären medan kalcium blir kvar i marken.

Vid jordmånsanalyserna görs ofta även en bestämning av det organiska materialet genom så kallad glödgningsförlust. Provet bränns och halten organiskt material, som vanligtvis uppges i procent, är den massa som försvunnit vid förbränningen i förhållande till hela provets torrvikt. Med hjälp av mängden organiskt material kan man också relativt noggrant bedöma kolmängden i provet. En grov uppskattning av mängden organiskt material kan också göras med sinnena, på samma sätt som man vanligtvis bestämmer mullhalten vid en markkarteringsanalys.

Bedömningen av den totala kolmängden är tekniskt sett enkel och exakt. Ofta berättar dock den totala kolmängden inte tillräckligt mycket om kolet i marken. Vi behöver noggrannare information om i vilken form kolet finns i marken. Med tanke på till exempel kolets stabilitet och varaktighet är det viktigt att veta om kolet är i kemiskt lätt eller svårare nedbrytbar form, om det är hårt bundet till ytan på markens mineralpartiklar, i vilket markskikt kolet finns etc.

Rikligt med tilläggsinformation om analyserna av det organiska kolet i marken finns till exempel i boken Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (2015, Academic Press), avsnittet 'Methods för Studying Soil Organic Matter' (skrivet av Claire Chenu, Cornelia Rumpel och Johannes Lehmann).

(JHei)

Gasutbyte och dess mätmetoder

När växterna assimilerar binds koldioxid i ekosystemen och frigörs tillbaka till atmosfären när växterna andas och när dött organiskt material nedbryts i marken.

Förutom koldioxid är metan en viktig växthusgas. Metan bildas under syrefria förhållanden i marken av mikrober – metanogener - som producerar metan. Mikroberna som använder metan i marken – metanotroferna – kan i sin tur använda det för sin egen ämnesomsättning. Därför är syrefri mark ofta en metankälla, medan syrerik mark är en metansänka som binder metan från atmosfären. Momentana förändringar i åkerns, dvs. växternas och markens, kollager kan bedömas genom att man mäter flödena av koldioxid och metan mellan åkern och atmosfären.

Med **virvelkovariansmetoden** (eng. Eddy covariance) jämförs halterna av växthusgaser i luften mellan stigande och sjunkande vindar. Såväl den vertikala vindhastigheten som halterna av växthusgaser mäts då med mycket täta intervaller, typiskt med en frekvens på minst tio hertz. Om till exempel koldioxidhalten i genomsnitt är högre när vinden rör sig uppåt än när den rör sig nedåt är åkern en koldioxidkälla. Om koldioxidhalten däremot är lägre när luften stiger uppåt är åkern en kolsänka. Data från de täta mätningarna behandlas ofta som en genomsnittlig bedömning av bindningen/frigörandet av kol under en halv timme. Metoden lämpar sig för stora, enhetliga och flacka områden. Tekniken förutsätter en tillräcklig vindhastighet. Vid lugnt väder är mätningen inte tillförlitlig, vilket är den största kända bristen med metoden.

Med **kammarmetoden** innesluts föremålet för undersökningen i en kammare, där man mäter hur halterna av gaser utvecklas. Utifrån dessa kan man beräkna hur stor sänka eller källa föremålet är för tillfället. För bedömning av den momentana förändringen i växternas och markens kollager placeras en låg krage på åkerns yta, som ofta

hålls på plats under flera månader eller år. Vid mätningstillfället placeras en kammare ovanpå kragen, och halterna i luften inne i kammaren mäts vanligtvis under några minuters tid.

Om till exempel koldioxidhalten i den genomskinliga kammaren stiger, är den aktuella platsen för tillfället en kolkälla. Om gashalten sjunker är platsen för tillfället en kolsänka. Genom att upprepa mätningen i olika slags miljöförhållanden kan man hitta samband mellan gasutbyteshastigheten och förhållandena samt utveckla modeller för att uppskatta kolets momentana bindning och frigörande även när inga mätningar har gjorts. För modelleringen är det ofta ändamålsenligt att undersöka miljösambanden för växternas assimilation samt för mikrobernas och växternas koldioxidutsläpp separat.

Kammarmätningsmetoden används allmänt och lämpar sig särskilt för små arealer i varierande terräng och för jämförelse mellan olika behandlingar, som till exempel gödslingsmängdens inverkan på flödena av växthusgaser. Kamrarna kan vara manuella och flyttas av människor eller helt automatiserade. De kända nackdelarna med kammarmetoden är att den under mätningens gång kan förändra till exempel objektets ljus-, temperatur- och fuktighetsförhållanden.

Inkubationsförsöken följer kammarmätningens principer. I dessa innesluts jordprovet i ett kärl, och utvecklingen av växthusgasernas halter i kärlet följs. Solvita-markrespirationstestet motsvarar ett inkubationsförsök, eftersom man också där följer med gasbildningen i ett slutet kärl. I testet bedöms koldioxidhalten med hjälp av en indikatorfärg.

(LK)

Bedömning av kollagret med hjälp av modeller

Modelleringen av organiskt kol i marken tjänar flera syften. I grund och botten representerar modellerna vår bästa förståelse av de olika processerna och faktorerna som avgör tillståndet för det objekt vi intresserar oss för, som exempelvis kolhalten i marken. Genom att jämföra modellresultat med mätningar kan vi testa vår förståelse av vad som egentligen sker i naturen, och hur väl vi lyckas förutse olika tillstånd utan stöd av observationer.

Mätningen av organiskt kol i marken är arbetsdryg och resurskrävande, vilket naturligtvis begränsar mätningarnas antal. Kolhalterna i jordmånen kan också variera avsevärt, även över korta avstånd. Modellerna har därför en viktig praktisk funktion vid undersökningen av organiskt kol i marken. De möjliggör en bedömning av kolhalterna på vidsträckta områden. Med hjälp av modellerna kan vi dessutom, baserat på den nuvarande vetenskapliga förståelsen, bedöma hur det organiska kolet i marken reagerar på klimatförändringar och markbearbetning.

Modellerna är naturligtvis inte felfria. En delorsak till detta är att det alltid finns brister i vår förståelse, vilket även avspeglas i de modeller vi skapar. Dessutom kräver i synnerhet modeller som är avsedda för omfattande bruk ett visst mått av förenklingar och rätlinjighet, för att beräkningstiderna ska vara måttliga och för att de använda ekvationerna överhuvudtaget ska kunna lösas.

En central utmaning är dock att de noggranna mätningarna är begränsade. För att vi ska kunna lita på modellerna måste deras utgångslägen och modellparametrar bestämmas med hjälp av observationer. Utvecklingen av modellerna stöder sig därför

fortfarande på goda mätningar. För verifieringen av modellerna behövs data, och datainsamlingen underlättas av de nya monitoreringsmetoderna som utnyttjar satelliter och drönare.

Biomassan ovan jord kan bestämmas genom bildanalys utan provtagning. Detta möjliggör en skiftesvis bedömning av kolflödet till marken, när man vet vilken del av växtligheten som förs bort med skörden. Med hjälp av växtarternas typiska förhållanden mellan skott och rötter kan man uppskatta rotbiomassan och kolflödet via rotsystemet utan jordprovtagning och arbetskrävande rotmätningar.

(TV)

2.4. Viktiga processer i anslutning till kolets kretslopp i marken

Effektiviteten i mikrobernas kolanvändning (CUE)

Effektiviteten i mikrobernas kolanvändning bestäms enligt den andel av kolet som tagits upp av mikroberna som används för uppbyggnaden av deras egen biomassa (Bild 4). Resten andas de ut som koldioxid. Ett effektivare utnyttjande av kolet innebär lägre koldioxidutsläpp från marken och större mängd kol som binds i den mikrobiella biomassan, vilket slutligen när mikroberna dör kan bindas till mineralerna i marken och bli en del av det långvariga kollagret i marken.

Teoretiskt sett förbättras effektiviteten i mikrobernas kolanvändning när deras kvävetillgång ökar. Mikroberna behöver då inte använda kol för att tillverka sådana enzymer som frigör kväve genom nedbrytning av komplexa organiska föreningar. Det här har att göra med det så kallade primingfenomenet.

I vissa undersökningar i Mellaneuropa har mikrobernas kolanvändning konstaterats vara 1,3–1,5 gånger effektivare på kvävegödslade vallrutor jämfört med på ogödslade (Spohn et al. 2016, Poeplau et al. 2019). Enligt vissa undersökningar används kolet effektivare i en svampdominerad mikroflora än i en bakteriedominerad. Om mineralkvävegödslingen minskar mängden svampar och mykorrhiza i marken kan det alltså också försämra effektiviteten i kolanvändningen. Inga jämförande undersökningar av hur mineralkväve och organiskt kväve (t.ex. olika kretsloppsgödselmedel) påverkar effektiviteten i mikrobernas kolanvändning har ännu gjorts. Dessutom har ytterst få undersökningar gjorts i nordliga förhållanden.

De nya resultaten (Poeplau et al. 2019) pekar ändå på att kolmängderna i marken inte kan modelleras enbart på basis av kolflödet. Mikrobernas anabolism har också en betydande inverkan (anabolism = process där mikroberna omvandlar enklare beståndsdelar till mer komplexa föreningar som beståndsdelar för sina celler). En effektivare kolanvändning i mikrofloran kan på lång sikt också leda till ett större kollager i marken. Hur mycket av den döda mikrobiella biomassan som blir kvar i marken permanent beror dock också på de övriga faktorerna som kontrollerar stabiliseringen av kol i marken. Dit hör bland annat markens mineralsammansättning, partikelstorleksfördelningen och aggregatbildningen.

Tillförande av organiska material i marken kan också påverka hur

effektivt mikroberna använder kolet. Enligt en undersökning förbättrade till exempel en liten tillsats av biokol (1–5 % av markens torrvikt) effektiviteten i mikrobernas kolanvändning. Detta antogs bero på en förbättrad syretillgång för mikroberna (Jiang et al. 2016). Tillförande av biokol i stora mängder (10 % av markens torrvikt) har däremot konstaterats försämra effektiviteten i mikrobernas kolanvändning. Detta beror sannolikt på en höjning av kol/kvävekvoten i marken och en minskad kvävetillgång för mikroberna. En orsak kan också vara att biokolet genom att hålla kvar kväve på sin yta minskar kvävetillgången för mikroberna (Cheng et al. 2017).

Effektiviteten i mikrobernas kolanvändning beror även på abiotiska miljöfaktorer, såsom markens fuktförhållanden och pH-värde. Effekten av att tillföra olika slags organiska material kan vara svår att förutse, eftersom faktorerna som påverkar mikrobernas funktion kan variera stort mellan olika marker. Den betydelse som effektiviteten i mikrobernas kolanvändning har för bildandet av kollager har i vilket fall som helst nu accepterats. Forskningen kommer säkert inom en nära framtid att producera också praktiskt tillämpbar information om hur man genom behandling av jordbruksmarken kan påverka effektiviteten (Kallenbach et al. 2019). Exempelvis kan en tidsmässig och kvalitativ variation i kolflödet till marken genom en mångsidig växtföljd bidra till att upprätthålla en rik mikroflora som använder kolet effektivt.

Det behövs mer grundforskning i ämnet innan man kan ge några praktiska rekommendationer för hur effektiviteten i mikrobernas kolanvändning kan manipuleras. För närvarande är osäkerhetsfaktorerna så pass många att man inte exakt kan förutse hur en förändring i behandlingen av en viss jordbruksmark påverkar effektiviteten.

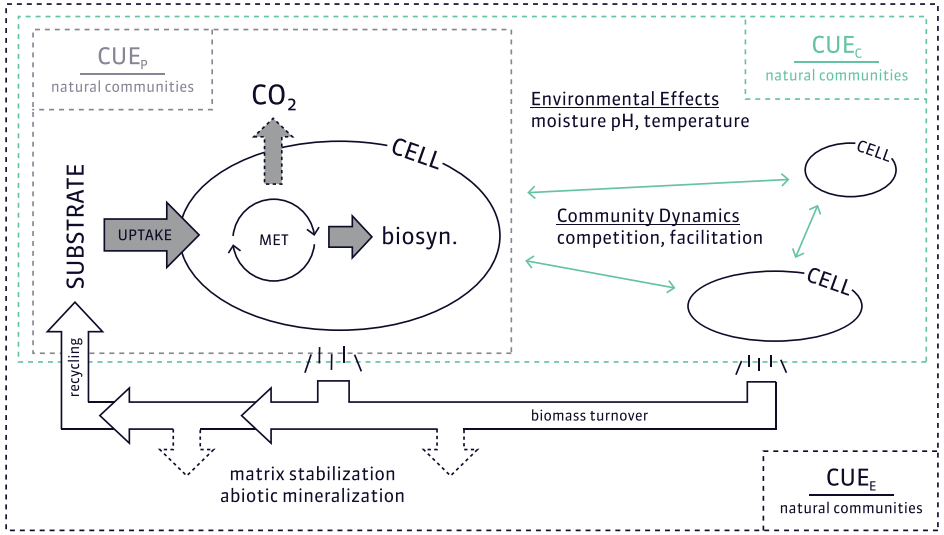


Bild 4. Effektiviteten i mikrobernas kolanvändning bestäms enligt den andel av kolet som tagits upp av mikroberna som används för uppbyggnaden av deras egen biomassa. (Geyer, K.M. et al. 2016.)

(KKa)

Priming

Priming innebär att lättillgängligt kol som hamnar i marken, såsom enkla sockerarter, stimulerar nedbrytningsprocessen i marken. Fenomenen baserar sig på att de lättillgängliga kolföreningarna är direkt användbara för mikroberna. Mikroberna får då möjlighet att producera energiekonomiskt ”dyra” enzymer. Med hjälp av dessa får mikroberna energi för en ökad nedbrytning.

Priming förekommer i synnerhet i miljöer där mikroberna har svårigheter att få tillräcklig energi från de lättåtkomliga kolföreningarna, men där näringsämnen förekommer i sådan form att det krävs en nedbrytningsprocess för att de ska frigöras. Fenomenet framkommer speciellt tydligt i skogsmarker, där miniminäringsämnet kväve är hårt bundet till det organiska materialet och kräver nedbrytning för att frigöras.

I vissa situationer kan tilläggskolet också hämma nedbrytningsprocessen i marken, och då talar man om negativ priming. Det här kan hända när markmikrobernas verksamhet, i stället för att begränsas av näringsämnena, begränsas av kolföreningarna själva. I det fallet leder en ökad koltillförsel till ökad konkurrens om näringsämnen, vilket gör markens övriga mikrobverksamhet och nedbrytningen av organiskt material långsammare. Växternas tillväxt kan också tillfälligt försämras till följd av mikrobernas konkurrens om näringsämnen. Ökad nedbrytning som orsakas av kolföreningar som hamnar i marken via rotsystemet kallas rhizosfärpriming (rhizosphere priming effect, RPE). Ökad nedbrytning tack vare kol som hamnar i marken, förbättrad tillväxt tack vare att näringsämnen frigörs samt mängden kol som stabiliseras av mikroberna utgör motsatta krafter, vilkas balans påverkar om mängden kol i marken ökar eller inte.

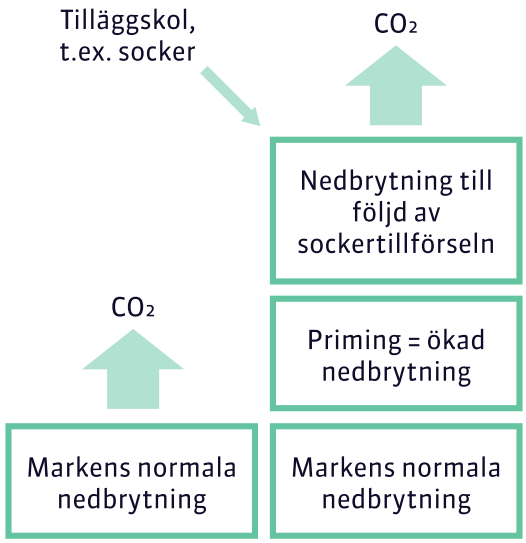


Bild 5. Exempel på (positiv) priming, där tillförseln av socker i marken ökar nedbrytningen i marken. Staplarnas höjd beskriver koldioxidutsläppets (CO2) storlek i de olika processerna.

(JHei)

Mikrobiell kolpump

Under de senaste åren har man i forskningen om kollager framfört en ny teori om uppkomsten av permanent kol i marken. Förutom att mer svårnedbrytbara föreningar blir kvar i marken när växtmaterialet bryts ned, är enligt den nya teorin en stor del av de långvariga och permanenta kolföreningarna i marken rester av mikrobernas egen biomassa.

Effektiviteten i mikrobernas kolanvändning påverkar deras förmåga att producera egen biomassa per energienhet. Enligt teorin hamnar

den här biomassan i marken i ett senare skede, med en annan kemisk sammansättning än det ursprungliga nedbrytbara växtmaterialet.

De mikrobiella nedbrytningsprodukterna, alltså de ämnen som mikroberna utsöndrar, har också visat sig påverka markens aggregatstruktur. Teorin om en mikrobiell kolpump undersöks aktivt runtom i världen. Den nya forskningsinformationen ger oss ytterligare bevisunderlag för teorins sanningshalt och betydelse.

Till vänster på bilden nedbryts dött växtmaterial med hjälp av enzymer som produceras av mikroberna till antingen koldioxid eller näring för mikroberna. Den del som inte bryts ned hamnar i marken som permanent organiskt material. Till höger på bilden omformar den mikrobiella kolpumpen (MCP) en del av den mikrobiella biomassan till att ingå i markens permanenta kollager. Hur stor del av det kol som mikroberna använder som hamnar i deras egen biomassa och blir permanent kol i marken beror på effektiviteten i mikrobernas kolanvändning. Omfattningen på den så kallade primingeffekten som mikroberna orsakar i marken (se föregående stycke) avgör balansen och i vilken riktning kollagret i marken ändras.

(JHei)

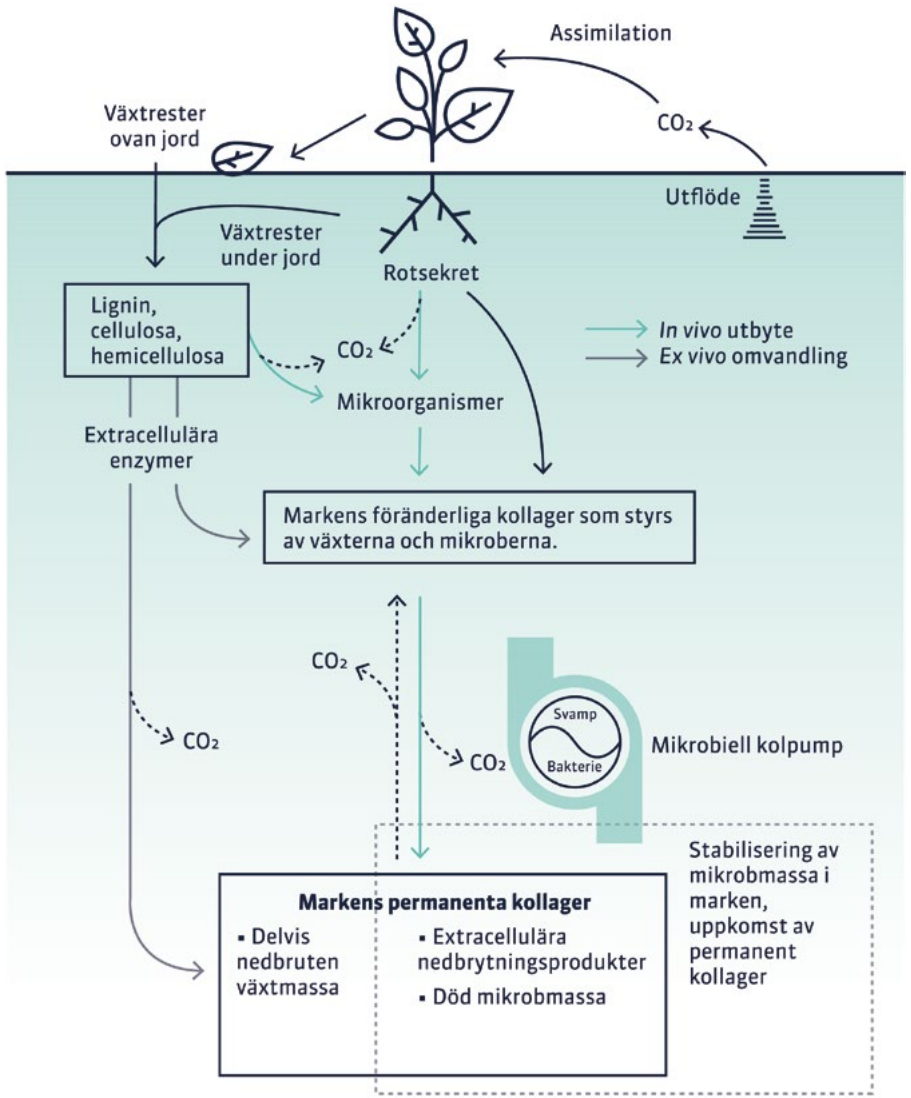


Bild 6. Mikrobiell kolpump.

Kolmättnad i marken

I ett odlingssystem, där egenskaperna utgörs av ett visst klimat, jordarten och odlingsmetoderna, når halten av organiskt kol i marken ett jämviktsläge (steady state, equilibrium) inom en tidsperiod på mellan några decennier och ett århundrade (Smith 2004; West & Six 2007). Halten av organiskt kol i marken följer lagen om avtagande meravkastning. Ju mer kol som (kumulativt) tillförs i marken, desto mindre andel av det tillförda kolet binds alltså i marken. Ju längre ifrån jämviktsläget systemet är, desto mer kol binds eller frigörs per tidsenhet. I ett jämviktsläge förändras inte kollagret. Kolflödet till marken motsvarar då utsläppet.

När man jämför kolbindningsförmågan för olika odlingssystem genom att öka mängden tillfört kol, kan kollagret i marken förändras antingen så att det växer linjärt, alltså lika mycket för varje tillförd enhet, eller icke-linjärt, så att tillväxten minskar eller ökar för varje tillförd enhet. Om responsen är linjär är markens kolbindningskapacitet obegränsad. Om responsen däremot är icke-linjär är markens kolbindningskapacitet begränsad. Marken blir då mättad med kol efter en viss årlig ökning av tillförseln. Detta kallas för mättnad. I ett mättat system leder en ökad tillförsel av kol inte längre till en ökning av kollagret.

Jämviktsnivån är alltid en egenskap för systemet, i det här fallet det specifika odlingssystemet. Nivån kan påverkas genom förändringar i odlingspraxis, som påverkar kolflödet till systemet eller nedbrytningen av organiskt material. Exempelvis kan reducerad jordbearbetning minska nedbrytningen av organiskt material i marken.

En del av det tillförda kolet får en mycket skyddad form i markens lermineraler. När mineralytorna är fyllda är marken kolmättad. Kollagret kan växa också efter det här, men det tillförda kolet nedbryts snabbare än tidigare och kollagret är känsligare för snabba sänkningar.

Kolmättnad uppstår ofta i markens ytskikt, där tillflödet av kol är som kraftigast. Således kan man öka kollagret genom att rikta kolflödet till de djupare omättade markskikten, till exempel med hjälp av djupt rotade växter. Ytskiktet i en kolmättad mark skulle också kunna spädas ut genom bearbetning med kolfattig alvjord. Detta stör dock mikroorganismernas verksamhet, vilket under vissa förhållanden kan ha en negativ helhetseffekt på jordhälsan och kolbindningen i marken.

Organiskt kol hålls kvar i marken med hjälp av tre huvudmekanismer: kemiskt genom att bilda föreningar med mineraler, fysikaliskt genom att ta skydd i lermineralerna samt biokemiskt genom att mikroberna bildar långkedjade kolföreningar och mikrobiell biomassa (Six et al. 2002). I lermineralerna är kolet skyddat från nedbrytning och dessa föreningar bildar stabila aggregat. Lerjordarna kan därför lagra mer kol än de grova mineraljordarna.

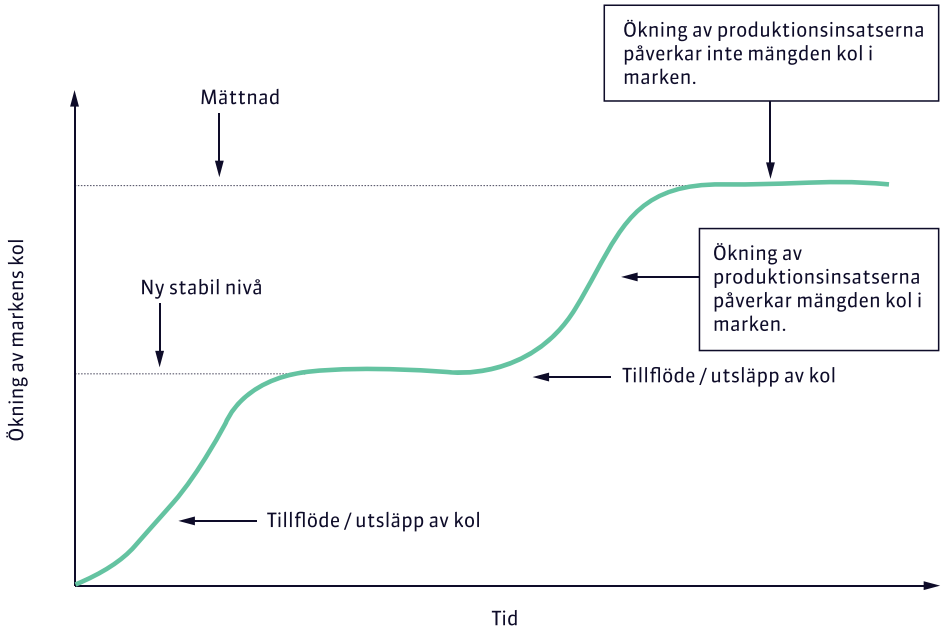


Bild 7: West, T.O. & Six, J. (2007): Climatic Change, vol. 80:25–41 DOI 10.1007/s10584-006-9173-

(JJ)

3. Markens kollager i jordbruket

Jordbruksmarkerna utgör betydande kollager. För att upprätthålla dem behövs kunskap samt vilja att gå in på djupet, göra det som krävs och även ta ansvar för det som sker i framtiden. Det finns alltså skäl att försöka hitta och dela med sig av goda lösningar.

3.1. Grunderna för beräkningen av kolbalansen på gårdarna

Ökningen av kollagret kan ses som en enkel balansräkning eller ”baljmodell” (Bild 8). Om mer kol tillförs marken än vad som försvinner därifrån ökar lagret. Om vi antar att nedbrytningshastigheten står i direkt relation till kollagrets storlek kan modellen beskrivas med följande ekvation:

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

där dC/dt = momentan förändring av kollagret C
C = kollagrets storlek
Cin = tillflöde av kol
k = kollagrets nedbrytningshastighet

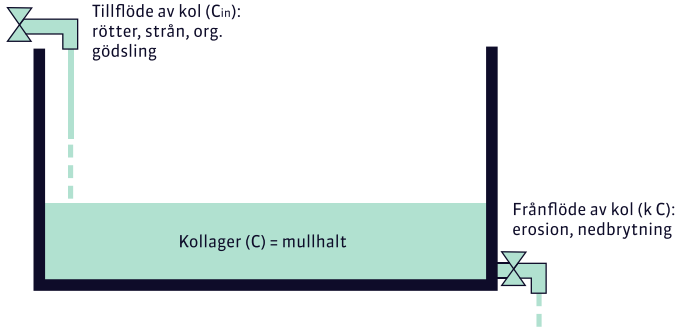


Bild 8. En enkel ”baljmodell” av förändringarna i kollagret: den momentana lagerförändringen utgörs av skillnaden mellan tillflödet och frånflödet av kol.

Förändringen kan granskas över olika tidsperioder. I vissa simuleringsmodeller (t.ex. Daycent) är granskningsintervallet en dag, och man kan då noggrant beakta hur växtförhållandena, fukthalten och temperaturen inverkar på nedbrytningen och kolflödet till marken. I modellen som presenteras i bild 8 är granskningsperioden längre, upp till flera år. Om vi antar att tillflödet av kol i genomsnitt är det samma och nedbrytningshastigheten inte förändras, kan vi modellera olika situationer i kollagret (Bild 9).

Om granskningen görs i kolenheter bör mullhalten i marken omvandlas till kol. Om mullhalten är 4 % och 58 % av det organiska materialet är kol är markens kolhalt 2,3 % C. Om vi granskar ett 20 cm tjockt matjordslager på ett hektars område har det en volym på 2 000 m3. Detta bör ännu omvandlas till vikt. Om markens skrymdensitet är 1,3 kg/l väger ett hektar 2 600 ton, varav kolinnehållet är 2,3 % eller 59,8 t C/ha. En årlig nedbrytning på 1 % motsvarar då 598 kg C/ha. Om tillflödet av kol är mindre än detta sjunker mullhalten efter hand tills nedbrytningen motsvarar inflödet.

Kollagrets storlek för respektive tillflöde kan beräknas med formel 1, när förändringen sätts till noll:

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

Exempelvis kan ett tillflöde på 300 kg C/ha med en nedbrytningshastighet på 1 % upprätthålla ett kollager på 0,3 t C/ha: 0,01 = 30 t C/ha. Om nedbrytningshastigheten halveras eller tillflödet fördubblas, fördubblas också det kollager som kan upprätthållas. Om

nedbrytningen motsvarar tillflödet säger man att systemet befinner sig i ett dynamiskt jämviktsläge (steady state).

När tillflödet eller nedbrytningen förändras uppnår systemet inte omedelbart ett jämviktsläge. Förändringen kan ta flera decennier (Bild 9). När markens kolbalans är positiv och kollagret ökar fungerar åkern som kolsänka. När åkern har uppnått ett nytt jämviktsläge mellan tillflödet och nedbrytningen upphör kolinlagringen.

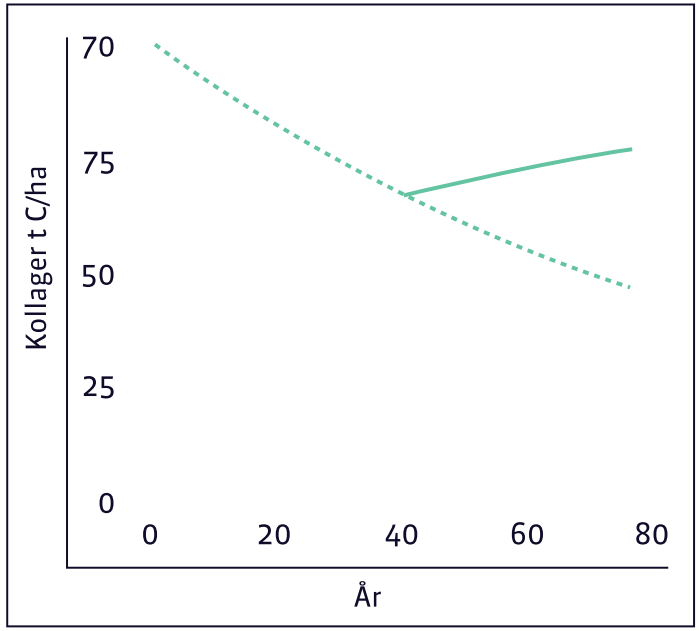


Bild 9. Fiktiv situation där tillflödet till en början är mycket mindre än nedbrytningen (1 % per år), men ökas vid år 40 till två gånger nedbrytningen.

Modellen med en balja är egentligen för enkel. En bättre bild av situationen får vi genom att anta att vattnet leds till baljan via en förvärmare, som får en del av den inkommande vattenmängden att avdunsta (Bild 10). Överfört på situationen i marken beskriver ”förvärmaren” en snabb nedbrytning (d) av det tillförda organiska materialet. Beroende på det organiska materialets kvalitet och förhållandena i marken bryts 20–80 % av det tillförda materialet ned mycket snabbt (inom 1–4 år), och kolet som det innehåller återgår till atmosfären. Den del som nedbryts långsamt kallas av hävd ”humifierad”, och olika ämnens humifieringskoefficient är därför = 1 – d. Växtresterna ovan jord har en låg humifieringskoefficient på cirka 20 %, rötter och rotsekret cirka 40 %, stallgödsel cirka 35 %, kompost cirka 40 % och biokol cirka 80 % av den ursprungliga tillförda mängden (se avsnitt 3.2.).

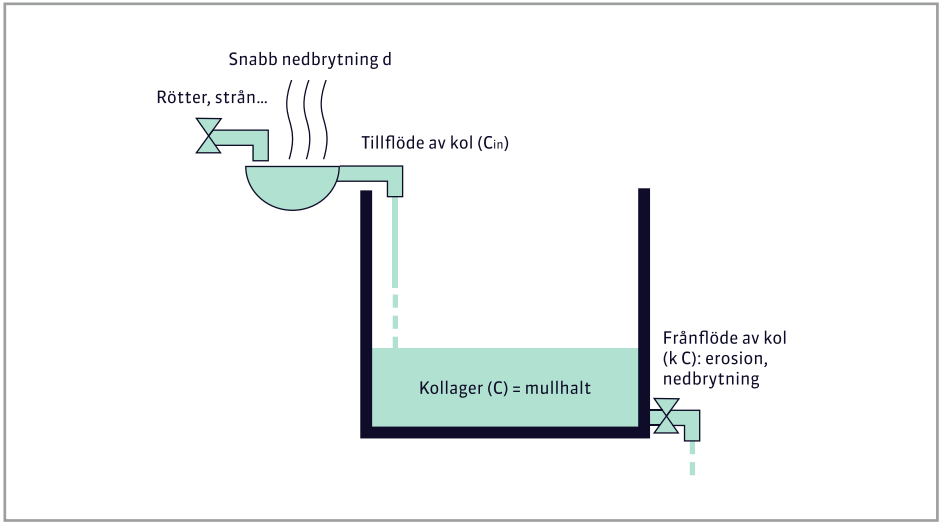


Bild 10. Modell med två baljor

Modellen med två baljor tar i beaktande att endaste en liten del av det organiska materialet som tillförs marken blir långsamt nedbrytbart organiskt material. Resten nedbryts snabbt. Flödet till den långsamt nedbrytbara delen kan då beräknas enligt formel (2):

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

där Y = bärgad skörd (som kol)

Ea,b = koefficienterna för växtlighetens biomassa ovan jord (a) och under jord (b), dvs. hur mycket växtrester ovan jord, rötter och rotsekret som bildas av en viss enhet bärgad skörd

da,b,m = den snabbt nedbrytbara andel av det organiska materialet ovan jord (a), under jord (b) och som tillförts via gödslingen (m).

m = kol som tillförts via gödslingen

Tabell 1. Koefficienter för beräkning av mängden växtrester samt rötter och rotsekret för olika växter utgående från den bärgade skörden enligt inventeringen av växthusgaser. När den bärgade skördemängden multipliceras med koefficienterna i tabellen får man en uppskattning av mängden växtrester, rötter och rotsekret. Avvikande från inventeringen av växthusgaser har koefficienterna redan justerats enligt torr skörd (14 % fukthalt), förutom för vallen där man använder torrsubstansskörden.

	Växtrester ovan jord	Rotsystem	Rotsekret
Vårsäd	0,76	0,29	0,11
Höstsäd	1,29	0,38	0,16
Ärt	0,86	0,34	0,14
Våroljeväxter	1,71	0,52	0,21
Potatis	0,18	0,08	0,03
Sockerbeta	0,11	0,06	0,03
Hövall (torrvikt)	0,19	konstant 1,15 t/ha/år	konstant 1,65 t/ha/år
Ensilagevall (torrvikt)	0,19	konstant 1,15 t/ha/år	konstant 1,65 t/ha/år

Också med en enkel kolmodell kan man gestalta olika situationer. Mullhalten i de finländska åkerjordarna har enligt uppföljningarna under 1970–2000-talet varit i medeltal 6 % (Heikkinen m.fl. 2013). Om 1 % nedbryts behövs ett tillflöde på 900 kg C/ha/år för att kollagret ska upprätthållas. En genomsnittlig kornskörd (3,5 t/ha) lämnar kvar 2,7 t/ha växtrester ovan jord och 1,4 t/ha under jord. Växtresterna antas innehålla 45 % kol, och tillflödet av kol är då 45 % x (20 % x 2,7 t/ha + 40 % x 1,4 t/ha) = 498 kg C/ha eller cirka 500 kg C/ha. Eftersom tillflödet är mindre än nedbrytningen minskar kollagret. Utgående från skillnaden är minskningen cirka 900 kg C/ha/år – 500 kg C/ha/år = 400 kg C/ha/år.

I medeltal minskar kolhalten långsammare eftersom alla åkrar i Finland inte har en monokultur av korn, och en del av åkrarna också gödslas med organisk gödsel. Kalkylen kan också göras åt andra hållet, genom att man beräknar hur stor mullhalt som kan upprätthållas med kolflödet från kornskörden. 500 kg C/ha/år: 1 % nedbrytning = 50 t C/ha = 3,3 % mullhalt. Uttryckt på ett sätt som är mer bekant för odlarna, i mullhaltsklasser, sänker en monokultur av korn så småningom mullhalten från mullrik (6–12 % glödgningsförlust) till gränsen mellan mullfattig och mullhaltig (3 % glödgningsförlust). För att åkern ska hållas mullrik krävs en genomsnittlig skördenivå på 6,5 t/ha eller kompletterande organisk gödsling med 500 kg C/ha/år.

I kalkylen ovan beaktades inte erosionen. Erosionen varierar från skifte till skifte. På skiften med låg erosionsrisk är den under 1 t/ha, och där erosionsrisken är hög kan den röra sig i klassen 10–20 t/ha/år. Med en hög erosionsnivå på 10 t/ha och en mullhalt på 6 procent blir mängden kol som försvinner från åkern 10 000 kg/ha/år x 6 % x 58 % = 350 kg C/ha/år. Det som i praktiken försvinner med erosionen är fin ytjord där mullhalten kan vara mångfaldigt högre än medeltalet, och förlusten kan därför vara ännu större. För att kunna bevara och öka kollagret där erosionen är betydande måste man först få den under kontroll. Obs! 10 t/ha motsvarar en årlig förtunning av matjordslagret på mindre än en millimeter. En sådan minskning är synnerligen svår att notera med blotta ögat från år till år.

Erosionsriskerna och tillflödet av kol kan åtgärdas med fånggrödor. Om en lyckad fånggröda ger en torrsubstansskörd på 2 t/ha ovan jord kan den ge ungefär lika mycket i form av rotsystem och rotsekretet. Kolflödet från fånggrödan till marken blir då (2 t/ha x 20 % + 2 t/ha x 40 %) x 0,45 t C/t = 540 kg C/ha. En lyckad årlig fånggröda räcker till för att hålla mullhalten mullrik också på åkrar med vårsädsodling.

På vallåkrarna tänker man sig att kolflödet till marken är betydligt större än på spannmålsåkrarna. Enligt standardkoefficienterna i inventeringen av växthusgaser lämnar en torrsubstansskörd på 6 t/ha kvar 1,14 t/ha växtrester ovan jord samt 2,8 t/ha/år rötter och rotsekret. Med beaktande av nedbrytningen och kolhalten är tillflödet cirka 600 kg C/ha/år. Om vallen slås med kort stubb (liten mängd växtrester) och rotsystemet är klent (förhållandet mellan rotsystemet och skörden ovan jord är under 1) minskar kolhalterna också på vallåkrar, vilket också resultaten från långtidsuppföljningen visar (Heikkinen m.fl. 2013).

Variationen mellan vallarna är dock betydande, och värdena från inventeringen av växthusgaser är inte representativa för alla situationer. I många internationella undersökningar har man fått förhållandet mellan rotsystem och växlighet ovan jord till över 1,5, vilket betyder att en skörd på 6 t/ha ger ett rotsystem på 9 t/ha, rotsekret på 3,7 t/ha och ett tillflöde (med samma antagande för mängden växtrester ovan jord) på cirka 2 400 kg C/ha/år, om rotsystemet förnyas årligen. Kalkylen åskådliggör variationen i vallarnas kolbindning och betydelsen av rottillväxten på vallarna. Det största kolflödet från vallarna fås när växtbiomassan används som gröngödsling. Då slås växtligheten ovan jord, och för de ettåriga gröngödslingsvallarnas del blir även rotsystemet årligen en del av kolflödet till marken. Om gröngödslingen tillför 2 000 kg långsamt lösligt kol per hektar i marken kan detta på en mullrik åker upprätthålla kollagret under 2–3 år av vårsädsodling.

Hittills har vi talat om mineraljordar. Organogena jordar kan ha en mullhalt på 20–40 %, eller till och med mer. Med samma

nedbrytningshastighet på 1 % är frånflödet då 3 000–6 000 kg C/ha/år, vilket väl motsvarar de värden som använts för kolförlusten från torvjordar i inventeringen av växthusgaser. Att upprätthålla kollagret med växtresterna skulle kräva en spannmålsskörd på cirka 22–44 t/ha. I organogena jordar är det alltså omöjligt att upprätthålla kollagret genom att öka tillflödet, och i kolodlingen lönar det sig därför att fokusera på åtgärder som stävjar nedbrytningen av kollagret. Metoder för detta är bland annat höjning av grundvattennivån samt att hålla marken växttäckt och sval.

Det enkla beräkningssättet ovan har många begränsningar. Det är svårt att uppskatta de olika faktorerna, och den internationella forskningen är inte direkt applicerbar på finländska förhållanden. Dessutom reduceras hela den komplicerade markekologin till två nedbrytningskoefficienter. I verkligheten har till exempel de olika ryggradslösa djuren en viktig roll i nedbrytningen av växtrester och försnabbar nedbrytningen avsevärt. Jordarten har också stor inverkan på nedbrytningen och inlagringen av kol (lerhalt och aggregatstruktur). Den förenklade modellen klargör ändå storleksklasserna och sambandet mellan de olika faktorerna, och de senare avsnitten leder oss fram till metoder för att påverka nedbrytningshastigheten eller tillflödet av kol.

(TM)

3.2. Faktorer som påverkar förändringen av kollagret i jordbruket

Odlingsmetoderna och mängden producerad biomassa spelar en central roll för om kollagret i åkerjorden minskar eller ökar. Odlingsmetodernas inverkan behandlas närmare i följande avsnitt, och nedan beskrivs faktorerna som påverkar utvecklingen i huvuddrag.

Växtarter och växtsorter

Valet av växtarter och växtsorter påverkar kollagrets storlek såväl direkt som indirekt. Vissa växtarter är krävande att odla och ger upphov till en särskilt kraftig belastning på marken. Exempelvis har det konstaterats att långvarig potatisodling lätt kan leda till att det organiska materialet i marken minskar, medan vallodling däremot förbättrar jordhälsan och upprätthåller eller ökar kollagret. Centrala faktorer är arternas förhållanden mellan skott och rötter och biomassans kemiska sammansättning, som påverkar nedbrytningshastigheten och beständigheten hos kolet som flödar till marken. Utöver själva odlingsväxten är de sekundära grödornas (botten- och fånggrödornas) egenskaper betydelsefulla för kolbindningen i marken.

Växtresterna som uppstår via rotbiomassan och rotmikroberna fördelas bättre och jämnare i jordprofilen om också djupt rotade växter ingår i beståndet. En mångfald av växtarter har visat sig öka också markmikrobernas mångfald. Detta leder i sin tur till en förbättrad aggregatstruktur och uppkomst av permanenta kolföreningar. Samodling av flera sorter av samma art har också visat sig öka mångfalden i marken och ge positiva följdeffekter.

(JHei)

Gödsling

Sambandet mellan gödslingen och kollagret i marken är tudelat. För det första är en tillräcklig och balanserad gödsling enligt växternas behov en grundförutsättning för att odlingsväxten ska producera en önskad skörd av god kvalitet och utnyttja växtpotentialen under växtperioden. Biomassan består till cirka 40 procent av kol (av torrsubstansen). Varje kilogram växtmaterial kräver huvud- och mikronäringsämnen i rätt proportion, till exempel fosfor 3–4 mg/kg beroende på växtarten. Olika slags näringsbrister hämmar tillväxten och minskar därigenom mängden koldioxid som binds från atmosfären. Gödslingen har således stor betydelse för hur mycket organiskt material som totalt sett hamnar i åkerjorden.

För det andra har gödslingen en stor inverkan på markens mikrobiologi. De nyttiga mikroberna som samverkar med växterna, och i synnerhet de som lever i symbios (såsom glomeromycota eller arbuskulär mykorrhiza, AM), är till störst nytta när växten inte får tillräckligt med näring. Mikroberna kan främja växternas näringsupptag och får i gengäld kolföreningar som energikälla av växterna. Exempelvis mykorrhizasvamparna är kända för sin förmåga att förbättra växtens fosforupptag.

En överdimensionerad gödsling minskar eller eliminerar helt mikrobernas interaktiva betydelse och minskar mängden kol som mikroberna får av växterna samt nyttomikrobernas biomassa. En noggrant dimensionerad gödsling gynnar däremot såväl växterna som de mikrober som fokuserar på nedbrytningen. Bägge gynnas av att näringen är lättillgänglig. De näringsämnen som växterna inte kommer åt eller hinner utnyttja främjar alltså nedbrytningsprocessen och frigörandet av kol tillbaka till atmosfären. Med tanke på åkerjordens kollager är det därför synnerligen viktigt att optimera gödselmängderna, undvika överstora gödselgivor och korrigera näringsbristerna särskilt i fråga om mikronäringsämnen. Knappa näringsresurser leder till en igångsättning av samma mekanismer som i naturekosystemen, där det naturliga kollagret i marken är större än i odlingsjordarna.

I Finland är jordmånen naturligt sur, men våra odlingsväxter och många nyttomikrober gynnas av förhållanden där pH-värdet är nära neutralt. Förändringar i pH-värdet påverkar också tillgången på näringsämnen, och kontrollen över markens surhet utgör därför en väsentlig del av upprätthållandet av jordhälsan och kolbindningen. Ett för högt pH-värde kan också ha en skadlig inverkan på mikrobverksamheten i marken och växternas tillväxt.

(JHei)

Växtskydd och bekämpningsmedel

Det finns förhållandevis lite forskningsinformation om bekämpningsmedlens betydelse för kollagren i marken. Som indirekta positiva verkningar kan ses en tryggad produktion av biomassa i beståndet, skördemängden, växtsundheten och kvaliteten, vilka gör att kolflödet till systemet kan bli större än från ett sjukdomsdrabbat eller ogräsdominerat bestånd.

Beroende på de aktiva substanserna kan bekämpningsmedlen också påverka markens mikrobiologi och djurliv. En del bekämpningsmedel riktar sig mot svamparna som sjukdomsalstrare, och då kan också de nyttiga svamparna i marken reagera till följd av behandlingen.

Forskningsinformationen i ämnet är knapp, men för den biologiska mångfalden och den nytta den medför är bekämpningsmedlen åtminstone inte till gagn, utan troligtvis till skada. Effekten är långt beroende av bekämpningsmedlet och hur det används.

Skyddandet av odlingsväxterna mot ogräs, växtsjukdomar och skadegörare ska enligt växtskyddslagen (lagen om växtskyddsmedel 1563/2011) och Europaparlamentets och rådets direktiv (2009/128/EG) genomföras som integrerat växtskydd i första hand med förebyggande och indirekta metoder med hjälp av bland annat en så mångsidig växtföljd som möjligt samt mekanisk och biologisk bekämpning. Vid användning av kemiska bekämpningsmedel ska behandlingen basera sig på ett bekämpningsbehov utgående från observationer och beaktande av tröskelvärden.

(JHei)

Jordart

De olika jordarternas förmåga att binda och lagra kol i åkermarken beror även på markens partikelstorleksfördelning, dvs. mängden ytor som kan hålla kvar kolet, och aggregatbildning. I åkermark är det organiska materialet till största delen bundet till mineralernas ytor eller skyddat inuti jordaggregaten. I skogsmark kan en stor del av det organiska materialet vara fritt organiskt material i partikelform, som ligger löst mellan jordpartiklarna och aggregaten. Det fria organiska materialet har låg vikt och är relativt lätt nedbrytbart till exempel till följd av en förändring i markanvändningen.

I fina åkerjordar är halten av organiskt material i medeltal högre än i åkerjordar med grövre fraktionssammansättning. Ju mer små mineralpartiklar, dvs. ler eller fin mjäla, det finns i åkerjorden, desto mer ytor finns det som binder och skyddar det organiska materialet. Bindningen till jordpartiklarnas ytor skyddar det organiska materialet från att brytas ned av mikroberna.

I lerjordar skyddar också aggregatbildningen det organiska materialet från mikrobernas nedbrytning. Aggregatbildningen skapar ett fysikaliskt hinder för mikroberna att komma åt det organiska materialet. Inuti aggregaten är också sådant organiskt material som inte är bundet till mineraler skyddat från nedbrytning. Jordbearbetningen påskyndar nedbrytningen av organiskt material, eftersom den blottlägger markstrukturen och det organiska material som skyddas av aggregaten för nedbrytarmikroberna samt tillfälligt förbättrar luftväxlingen i marken. Åkrar som bearbetats regelbundet har ofta en sämre aggregatstruktur i ytskiktet än åkrar som inte störs så ofta. En dålig aggregatstruktur ökar erosionsrisken, och tillsammans med erosionsmaterialet försvinner också det organiska material som hålls kvar på jordpartiklarnas ytor från åkrarna.

När mineralpartiklarnas ytor börjar fyllas avtar mineralernas skyddande effekt, och om syre- och fuktighetsförhållandena samt temperaturen är gynnsamma för nedbrytningen kan den tillta. Organiskt material ansamlas då inte längre i samma utsträckning i marken, eftersom mer organiskt kol än tidigare försvinner som koldioxid i luften till följd av den ökade nedbrytningen. Nedbrytningen av organiskt material behöver dock inte öka om det organiska materialet som hamnar i marken är svåråtkomligt för mikroberna, eller om syre- och fuktighetsförhållandena inte gynnar mikrobernas nedbrytning. Det kan vara svårare att öka kolmängden i åkermark som innehåller rikligt med organiskt material än i mark där

mängden organiskt material i utgångsläget är liten.

(HS)

Temperatur

Temperaturen och temperaturväxlingarna påverkar kollagret i marken på många sätt. Den viktigaste effekten hänger samman med goda växtförutsättningar. En gröda som i varma förhållanden växer bra producerar utöver skörden en stor mängd växtrester samt rötter och rotsekret, och kolflödet till marken är alltså stort. Värmetopparna under högsommaren kan dock bromsa upp tillväxten och matningen av spannmålskärnorna. Svala förhållanden kan å sin sida gynna odlingsväxternas bestockning i det vegetativa stadiet, vilket ökar skördepotentialen.

Temperaturen reglerar nedbrytningsprocessen i marken, eftersom såväl mikroberna som de enzymer de avsöndrar har optimala temperaturer där de fungerar som effektivast. I allmänhet gynnar en temperaturhöjning såväl organismerna som de reaktioner de upprätthåller. Temperaturen kan likväl också skada mikrobernas verksamhet. Sällan uppnås ändå så höga temperaturen i marken att det skulle vara direkt skadligt för mikroberna. Höga temperaturer kan dock föra med sig andra effekter som begränsar tillväxten, som till exempel torka.

Temperaturen har, förutom de tillfälliga responserna, en stor inverkan på kolsänkorna och kolkällorna på årsnivå. Om marken hålls utan växttäcke och tjälfri efter växtperioden är nedbrytningsprocesserna fortfarande aktiva trots låga temperaturer. Om den snö- och tjälfria perioden är lång, ökar den årliga tiden när nedbrytarna av organiskt material är aktiva i förhållande till tiden med aktiv assimilation och kolflöde till marken i ekosystemet. Också av den här orsaken är det synnerligen viktigt att perioden utan växttäcke på åkrarna är så kort som möjligt.

(JHei)

Fukthalt

Markens fukthalt och fuktighetsvariationer har mycket stor betydelse för nedbrytningen av kol, och därigenom för kollagrets storlek. Gynnsamma fuktighetsförhållanden för växterna är en förutsättning för god tillväxt, som främjar ökningen av kollagren. Å andra sidan är också mikroberna som bryter ned det organiska materialet som mest aktiva när marken inte är vare sig för torr eller för våt. Under mycket torra förhållanden, som när marken är helt vattenfri, sker ingen nedbrytning. Svår torka hämmar också grödornas tillväxt.

När förhållandena är för våta, som när marken är helt under vatten, avviker de mikrobiologiska processerna i marken på grund av syrebrist från de normala i aerob mark. Till följd av detta avtar nedbrytningen, men samtidigt kan till exempel metanproduktionen öka. I anaerob mark som ligger under vatten kan rötterna varken andas eller ta upp näringsämnen. Växterna gulnar och dör. Båda ytterligheterna inverkar alltså negativt på växternas tillväxt. Detta har en direkt inverkan på kolflödet till marken. För att assimilationen och tillväxten av biomassan ska fungera och ge ett rikligt kolflöde till marken, måste rötterna kunna andas och ta upp tillräckligt med

vatten.

Nedbrytningen av organiskt material i marken sker i hög grad till följd av biologiska processer och med hjälp av enzymer. Mikroberna och de övriga levande organismerna producerar enzymer och metabolismprodukter i marken, med hjälp av vilka organismerna ökar sin nedbrytning och får energi från nedbrytningsprocesserna samt frigör näringsämnen som är bundna till det organiska materialet.

Markens fukthalt har en betydande inverkan på dessa processer. De enzymer som bryter ned växtmaterial effektivare (till exempel oxidaser, oxygenaser och peroxidaser) och de organismer som producerar dessa behöver aeroba förhållanden för att fungera, eftersom syret fungerar som mottagare av elektroner i reaktionerna. Dessa så kallade oxidativa enzymer fungerar inte i anaeroba förhållanden, till exempel i vattenmättade marker.

I anaeroba förhållanden tas elektronerna i de kemiska nedbrytningsreaktionerna och mikrobernas livsprocesser emot av olika slags föreningar. Detta kan ge uppkomst till nedbrytningsprodukter som är skadliga för många organismer, såsom svavelväten.

Även uppkomsten av metan (CH_4) hör samman med markens fukthalt, eftersom anaeroba förhållanden sätter igång reaktioner där koldioxid (eller acetat) och väte bildar metan och vatten. Så kallade hydrolyserande enzymer (hydrolaser) fungerar även i anaeroba förhållanden, eftersom de till skillnad från de oxidativa enzymerna behöver vattenmolekyler för att fungera. Hydrolaserna klarar dock inte av att effektiv bryta ned de mest permanenta vegetabiliska och animaliska föreningarna.

(JHei)

Mikrobiologi

Markens mikrobiologi har stor betydelse för storleken på kollagret i marken. Som redan nämndes i det föregående stycket om fukthalten svarar de mikrobiologiska processerna i marken för nedbrytningen av organiskt material, men kan under förändrade förhållanden också ge upphov till olika slags föreningar och nedbrytningsprodukter.

Mikrobverksamheten är en förutsättning för en naturlig näringscirkulation, eftersom mikroberna vid sin nedbrytning av organiskt material även frigör näringsämnen för växterna. En del mikrober lever i nära växelverkan med växterna, vissa till och med i symbios som arbuskulär mykorrhiza eller en del kvävebindare, medan andra igen fungerar som självständiga nedbrytare av organiskt material. Markens mikroflora består av bakterier, svampar och arkeoner, och alla dessa finns såväl i växternas omgivning som bland nedbrytarna.

Mikroflorans inverkan på kollagret i marken har i första hand att göra med nedbrytningsverksamheten och de effekter som gynnar växternas tillväxt. Balansen mellan dessa faktorer har en direkt inverkan på kollagrets storlek och eventuella förändringsriktning. Mikrofloran har utöver den direkta nedbrytningseffekten även visat sig ha betydelse för de övriga processerna i marken, jordhälsan samt kollagrets storlek. Till exempel när det gäller kvävecirkulationen (frigörande av kväve från organiskt material till mineralform, förändringar mellan olika former av föreningar,

kvävebindning osv.) är mikroberna i nyckelposition. Vi vet att den arbuskulära mykorrhizan hjälper växterna att ta upp fosfor med hjälp av de organiska syror och enzymer den avsöndrar, i synnerhet när fosfortillgången är knapp och fosforn är i svårlöslig form. Utöver näringscirkulationen har en mångsidig mikroflora också visat sig korrelera positivt med förbättrad aggregatstruktur i marken. Utvecklingen påverkas dels av glykoproteinet Glomalin, som produceras av den arbuskulära mykorrhizan och direkt ökar aggregatbildningen, men vi vet också att bakterierna och markdjuren har en positiv effekt på markstrukturen.

Under de senaste åren har en ny teori presenterats enligt vilken mikrobernas egen förna, vid sidan av den växtbaserade förnan, skulle utgöra en betydande faktor vid bildandet av organiskt material i marken (Liang et al. 2017). I och med de nya forskningsresultaten finns det just nu ett stort intresse i forskarsamhället för att fördjupa sig i ökningen av mikrobernas mångfald och den nytta den medför (bl.a. aggregatstrukturen och ökningen av kollagret).

(JHei)

3.3. Odlingsmetodernas inverkan på förändringen av kollagret

Olika odlingsåtgärders inverkan på kollagret i marken har redan länge varit föremål för forskning. De längsta försöken baserar sig på Rothamsteds långliggande försök, där man undersökte bland annat gödslingens och växelbrukets inverkan på markens produktivitet. De olika försöken har gett varierande resultat, och är därför svåra att sammanfatta. I det här avsnittet försöker vi närma oss resultaten ur kolbindningsprocessens synvinkel.

Kolbindningen är summan av två konkurrerande processer: tillflödet av kol som ökar mullhalten i marken och nedbrytningen som minskar den. För att kol ska inlagras i marken måste vi antingen öka kolflödet till marken och stabiliseringen av kolet eller bromsa nedbrytningsprocessen. För det första kan vi öka kolflödet till marken genom att odla mer växter på ett visst område (totalbiomassa, inklusive rötter och rotsekret) eller genom att tillföra kol utifrån. För det andra kan vi främja stabiliseringen av kolet genom att förändra markens mikroflora så att den omvandlar kolföreningarna till en mer skyddad form (mer svampar i mikrofloran) eller genom att förbättra aggregatbildningen och aggregatstabiliteten. För det tredje kan vi bromsa nedbrytningen genom att påverka markens fukthalt, temperatur och syresituation.

I tabell 2 nedan presenterar vi ett antal åtgärder och en bedömning av deras effekt på förändringen av kollagret i marken enligt en fyrstegsskala: - skadlig effekt, + lindrigt positiv effekt, ++ måttligt positiv effekt och +++ starkt positiv effekt.

		Kolflödet till marken						Skydd		Fördröjning av nedbrytningen			
	Åtgärd	**Effektivare assimilation**	**Längre assimila-tionstid**	**Rotsyste-mets storlek**	**Rotsyste-mets djup**	**Rotsekret**	**Externt kolflöde till marken**	**Förändring i mikrofloran**	**Aggregat-stabilitet**	**Avkylning**	**Fuktighet**	**Syre**	**Grund-vatten**
Gödsling och växtskydd	Kväve- och fosforgödsling	+++		+		-		-					
	Kompletterings- och spårämnesgödsling	++		+	+	+							
	Organisk gödsling	++					+	+	+				
	Organiska jordförbättringsmedel						+++	+++	++				
	Integrerat växtskydd (IPM)	+						++					
Växter	Sorter	++	++	+++	+++	+++							
	Fånggrödor	+	+++	++	++	++		+++	+++	+++	++		
	Vallblandningar	++	++	++	++	++		++	++				
	Samodling	+	+	++	++	++		+	+	+			
	Skogsjordbruk												
Markstruktur	Effektiverad torrläggning	++	++	++	++	+		++	+	-	-	-	-
	Reglerbar dränering								-	+	+	++	+++
	Grund bearbetning: halmen på ytan							++	++	++		+	
	Direktsådd				-			++	+++	++	++	+	
	Djupluckring			+++	+++							-	
Betesgång och vallar	Kort betesperiod, lång vila	+++	+++	+++	+++	+++	+	++	++	++	++		
	Vallarnas stubbhöjd	++	++	++	++	++				+	+		

Tabell 2.

En enskild åtgärd kan ha såväl positiva som negativa effekter. Tilläggsgödsling ökar exempelvis assimilationen under växtperioden och kan öka rottillväxten. Den har dock negativa effekter för mängden rotsekret samt för mikrofloran i marken. På samma vis kan till exempel en djupluckring av marken öka rötternas djup och mängd, men hämtar samtidigt mer syre till de djupare markskikten och påskyndar nedbrytningen.

Åtgärdernas effekt på skiftesnivå är beroende av hur de samverkar med processerna i marken och av processernas utgångsläge på skiftet. En effektiverad torrläggning av marken kan till exempel leda till ett ökat kollager, om man genom torrläggningen kan öka assimilationen, rotsystemet och mikrofloran mer än vad nedbrytningen ökar till följd av syre-, vatten- och temperaturhushållningen. Vid bedömningen och genomförandet av olika åtgärder finns det skäl att fästa vikt vid såväl vilken åtgärd som genomförs som på vilket sätt åtgärden genomförs.

Med tanke på ökningen av kollagret kan gödslingen indelas i lösligt kväve och fosfor, gödsling med mikronäringsämnen samt tillförande av organiskt material. Från det organiska materialet frigörs näringsämnen långsamt, och det har dessutom andra positiva effekter för tillväxten och rotsystemet.

Gödsling med lösligt kväve och fosfor utgående från växtens konstaterade behov ökar assimilationen och kolflödet till marken. Om gödslingen överskrider växtens omedelbara behov kan näringsämnena försnabba nedbrytningen av organiskt material och störa mikrobernas, såsom mykorrhizans, verksamhet. Brister på mikronäringsämnen kan ofta vara faktorer som begränsar växternas tillväxt, och genom att korrigera dessa kan man effektivera assimilationen, rottillväxten och rotsekretionen. Organisk gödsling tillför också organiskt material i marken, och majoriteten av näringsämnena är i långsamt löslig form.

Beståndets assimilation kan maximeras med en möjligast stor bladyta och ett kontinuerligt, levande växttäcke. Med ettåriga grödor uppnås den största bladytan med blandbestånd, som kan innehålla flera skördeväxter samtidigt, och bottengrödor som lämnas kvar att assimilera efter skörden. Ett permanent växttäcke förverkligas väl med höstsådda grödor, som också de kan odlas som blandbestånd med olika skördeväxter eller partnerväxter. Fleråriga grödor ger automatiskt ett växttäcke året om. Assimilationen kan också maximeras med vallblandningar med flera (minst 7) arter. På skiftes- och landskapsnivå kan växtlighetens mångfald kompletteras med träd- och buskalléer och kantbuskage, som också effektiverar inlagringen av kol i marken.

Jordbearbetningen har många effekter på förändringarna av kollagren i marken. Jordbearbetning genom plöjning ökar till exempel marktemperaturen kraftigt, torkar upp marken och tillför rikligt med syre, och alla dessa faktorer ökar nedbrytningen i marken. Reducerad bearbetning luckrar upp marken till ett mindre djup och lämnar kvar växtresterna på ytan, vilket minskar markens uppvärmning och tillförseln av extra syre. Samtidigt störs marken mindre, vilket förbättrar aggregatstabiliteten, och växtresterna på ytan ger föda åt svampar och maskar. En risk med reducerad bearbetning är dock att bearbetningen blir för kraftig (t.ex. med tallrikskultivator), vilket söndrar aggregaten.

Bearbetningen är som minst vid direktsådd där marken inte bearbetas alls och sådden utförs med en maskin som stör marken så lite som möjligt, dvs. med så smala och vassa så- och gödselbillar som möjligt. På det här sättet bromsas nedbrytningen i marken upp, och växtresterna hålls kvar på markytan. Den största nyttan av direktsådden får man när den kompletteras med fånggrödor och växtföljd (conservation agriculture = fånggrödor + växelbruk + minimerad bearbetning).

Åkerns dräneringssituation styr nedbrytningen. Ökad dränering värmer upp marken och tillför syre, vilket påskyndar nedbrytningen. På samma gång möjliggör en god dränering ett större och djupare rotsystem, vilket ökar kolflödet till marken. Den förbättrade dräneringens och markstrukturens totaleffekt för mullhalten beror på om den försnabbade nedbrytningens effekt är större än det ökade kolflödets effekt. Ökningen av kolflödet till marken hänger samman med skördemängden, rotsystemets omfattning och syresituationen i marken.

I vallodlingen är många faktorer rätt med tanke på kolbindningen:

åkern är växttäckt och störningen är liten. Med vallskötsel kan kolbindningen effektiveras, bara man ser till att vallväxterna efter slåttern eller betesgången har tillräckligt med bladyta för en fortsatt assimilation, underhåll av rotsystemet och snabb återväxt. Om vallbeståndet skördas med en högre stubbhöjd (ca 10–15 cm) än normalt (under 5 cm) hålls också markytan svalare och fuktigare, vilket påverkar mikrofloran och bromsar nedbrytningen. Betesgång kan dessutom ge tilläggsnytta genom att kol och mikrober återförs till marken med spillningen just före vallens återväxt. De bästa resultaten med tanke på kolbindningen har uppnåtts vid betesrotation där betesperioden är kort (2–5 dagar) och viloperioden är lång (40–180 dagar).

(JJ ja TM)

3.4. Jordförbättringsmedel

Användning av organisk gödsel och jordförbättringsmedel är det snabbaste sättet att tillföra kol i marken. När målet är att öka mängden organiskt material i marken, är det för de organiska jordförbättringsmedlens del avgörande hur mycket material som kan tillföras i marken. Detta begränsas av näringsämnena. Det finns antingen för mycket näring i förhållande till begränsningarna eller för lite ur växtodlingens perspektiv.

I bästa fall är det organiska jordförbättringsmedlets innehåll av näringsämnen och kol i balans så att mängden till och med kan vara mycket stor (upp till hundratals kubikmeter per hektar), vilket kan ge betydande effekt redan efter en enda spridning. För att tillföra en betydande mängd organiskt material krävs dock oftast upprepade spridningar, i kombination med en mångsidig växtföljd och reducerad bearbetning. För att få ut största möjliga nytta bör man känna till produkternas egenskaper väl, så att de inte orsakar skador för odlingsväxterna. Det väsentliga är att användningen passas in i rätt skede av växtföljden och växtperioden samt att kompletteringsgödsling görs efter behov.

De organiska jordförbättringsmedlens effekt på den biologiska aktiviteten i marken

Tillförsel av organiskt material ger näring åt markens mikroorganismer samt ökar deras aktivitet och mängd. Effekten är beroende av det organiska materialets kvalitet: dess kol/kväve-kvot (C/N) och nedbrytbarhet. Gränsen har ansetts ligga vid relationstalet 25, där produkter med högre C/N än så är jordförbättringsmedel och produkter med lägre är gödselmedel.

Kvävet i jordförbättringsmedlen är ofta i huvudsak bundet till det organiska materialet i långsamt löslig form. Om kvävenivån är mycket låg kan nedbrytningen av det organiska materialet också leda till att kväve från omgivningen hålls kvar i mikrobmassan. Om det finns mer kväve än vad som förbrukas för nedbrytningen av den tillförda massan är detta genast tillgängligt för växterna, känsligt för urlakning eller tillgängligt för mikroberna för nedbrytning av det organiska material som redan finns i marken.

Materialets egenskaper påverkas också av kolets kvalitet. Färskt onedbrutet eller lite nedbrutet material bryts snabbt ned av mikroberna, till och med inom några månader, och näringsämnena frigörs. Långt nedbrutet eller komposterat material bryts ned

långsamt av svamparna. I ligninhaltiga material, såsom halm, vass och trämaterial, är den långsamt nedbrytbara andelen hög.

De organiska jordförbättringsmedlen, i synnerhet aerobiskt komposterad massa, innehåller i sig själva rikligt med mikrober som överförs till åkerjordens mikroflora. Den här egenskapen kan man utnyttja genom att ympa in några tiotal eller hundratal kilo kompost av hög kvalitet per hektar. På det här sättet kan man också öka markens suppressivitet, dvs. förmågan att förhindra växtsjukdomar.

Arterna och svamp/bakterie-förhållandet i markens mikroflora varierar mycket beroende på förhållanden och odlingssystem. Generellt sett är bakterierna dominerande i ett system med rikligt med lösliga näringsämnen och bearbetning, medan tillförsel av organiskt material, näringsämnen i organisk form, permanent växttäcke och minimibearbetning i sin tur gynnar svamparna som är viktiga för växternas näringsförsörjning.

Biokolet avviker från övriga jordförbättringsmedel

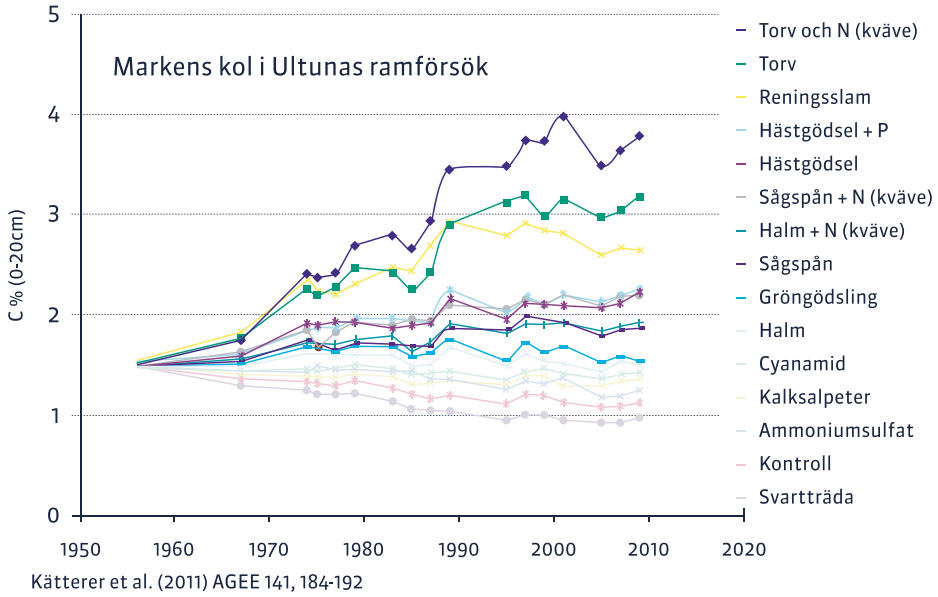
Biokol är kol som bildas av biomassa genom pyrolys i syrefri eller syrefattig miljö. Biokolet är mycket beständigt för nedbrytning och kan bevaras i marken i hundratals eller upp till tusentals år. Biokolet har en stor specifik yta och är mycket poröst, vilket gör att det kan hålla kvar vatten och näringsämnen. Det erbjuder boplatser för mikroberna. Biokol kan också ingå som komponent i organisk gödsel eller jordförbättringsmedel, och minskar då risken för urlakning och avdunstning av näringsämnen.

Biokolet ökar på ett effektivt sätt kollagret i marken och kan förbättra markens fysikaliska och kemiska egenskaper i synnerhet i grova jordar. Det ger dock ingen näring åt mikroorganismerna, trots att det erbjuder dem livsutrymme. Biokolets egenskaper kan vara mycket varierande beroende på av vilket material och under vilka pyrolysförhållanden det har producerats. I synnerhet temperaturen vid pyrolysen har stor inverkan på slutproduktens egenskaper.

Forskningsresultaten stöder praktiken

Försök som studerar organiska material har länge gjorts vid Sveriges lantbruksuniversitet i Ultuna i Uppsala. Resultaten visar att långsamt nedbrytbart organiskt material, såsom torv och rötrester, höjer halten av organiskt kol i marken betydligt (1–2 procentenheter under ca 50 års tid).

Även tillförsel av halm, stallgödsel och sågspån har konstaterats höja markens kolhalt. Enbart mineralgödsling har lett till en sänkt kolhalt. (Bild 11.)



Kätterer et al. (2011) AGEE 141, 184-192

Bild 11. Effekten olika slag av organiska material och mineralgödselmedel haft på markens kolhalt i ett långliggande försök i Sverige.

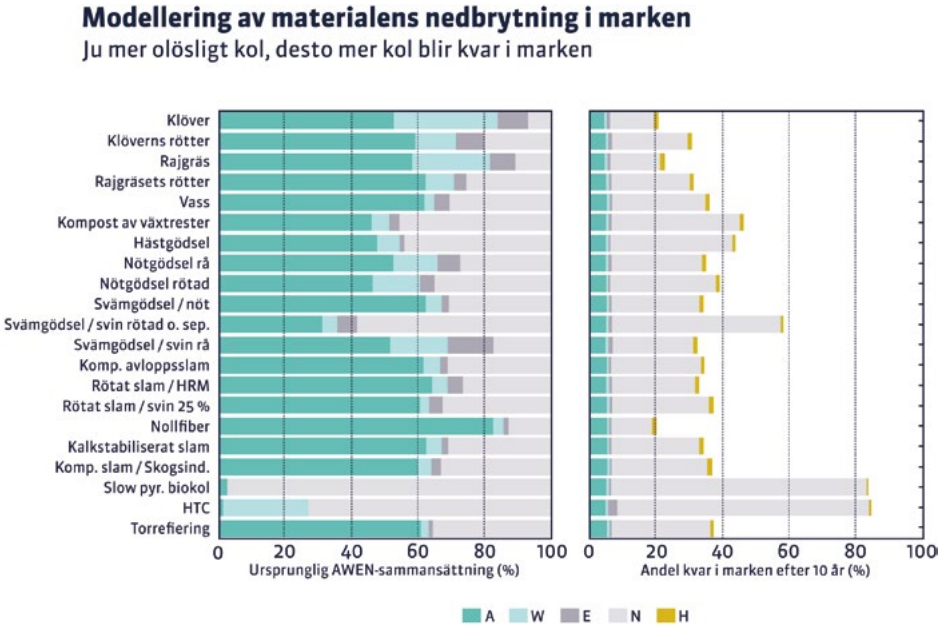


Bild 12. Analyserade och modellerade resultat för beständigheten av kolet i organiska material i marken enligt Naturresursinstitutets projekt MAHTAVA. Vänstra bilden: materialets kemiska sammansättning fördelad på syralöslig (A), vattenlöslig (W), etanollöslig (E) och icke löslig andel (N). Högra bilden: andel som finns kvar 10 år efter tillförseln i marken enligt Yasso-modellen. (H=humus.)

I Finland har man inom Naturresursinstitutets projekt MAHTAVA genom laboratorieundersökningar analyserat och modellerat nedbrytningen av kolet i olika slags organiska gödselmedel och jordförbättringsmedel. På basis av resultaten är biokolet i en klass för sig. Av det totala kolinnehållet blir över 80 procent kvar i marken på lång sikt (10 år). Därefter följer långt nedbrutna material, såsom svämgödsel och rötrester, samt produkter som innehåller långsamt nedbrytbart material, såsom hästgödsel och kompost, av vilka ca 40 procent av det totala kolinnehållet blir kvar i marken på lång sikt.

Av nya material som jordförbättringsfiber eller biokol finns ännu inga långvariga försöksresultat, men såväl de pågående fältförsöken som de praktiska erfarenheterna visar att de är effektiva för ökningen av kollagret i marken.

(JJ)

3.5. Torvåkrarna: hur hålla kvar kolet där det redan finns?

Beroende på betraktaren kan kärråkrarna framstå antingen som näringsrika odlingsjordar eller som våta, frostkänsliga och sura marker. Egenskaperna hos ett uppodlat kärr beror mycket långt på hur kärret har uppkommit. Man kan knappast hitta två torvåkrar med exakt likadana egenskaper. Erfarenheterna från odlingen av torvmarker kan således vara väldigt varierande. Beslutet att dika ut ett kärr till åkermark kan ha fötts ur till exempel ett behov av spridningsareal för stallgödsel eller liten tillgång på mineraljordar i närområdet.

Innan man röjer ett kärr till åker finns det orsak att fundera över de långsiktiga klimateffekterna i verksamheten. För mineraljordarnas del fokuserar diskussionen om kolet och kolbindningen i marken ofta på hur kollagret kan ökas, medan frågeställningen för torvjordarnas del är något annorlunda: torvjordarna innehåller nog rikligt med kol, men problemet är hur vi ska hindra det från att rymma upp i atmosfären.

Ett kärr i naturtillstånd kan på grund av metanutsläppen vissa år vara en måttlig utsläppskälla för växthusgaser. I det långa loppet är det ändå i regel en kolsänka, vilket torvansamlingen i kärren ger oss ett tydligt bevis på. Torv är organiskt material som bildats under lång tid från växtmassa som avlagrats under vatten, och som vid uppkomsten håller kvar rikligt med vegetabiliskt kol samt kväve.

Utsläppen uppkommer när torvmassan som tidigare lagrats under vatten efter utdikningen kommer i kontakt med luft, och då börjar brytas ned. Föreställ dig till exempel en burk med saltgurka: i vätskan hålls gurkorna länge konserverade, men när vätskan avlägsnas börjar gurkorna snart visa tecken på naturlig nedbrytning.

En torvåker som uppodlats från ett kärr krymper med tiden ihop. Till en början beror det på att vattnet avlägsnas, men senare sjunker ytan som en konkret följd av att torven bryts ned. Till följd av nedbrytningen frigörs det bundna kolet antingen som gasformiga föreningar, såsom koldioxid (CO_2), eller urlakas som upplösta joner.

De mikrobiologiska processerna och nedbrytningen av torven påskyndas vid sidan av torrläggningen också av jordbearbetnings- och odlingsåtgärder, såsom kalkning och plöjning. Största delen av de årliga utsläppen från torvjordarna kommer från nedbrytningen av just yttorven, som till följd av bearbetningen ofta är luftigare än de djupare skikten. Utöver koldioxiden ger torvmarkerna årligen också upphov till betydande utsläpp av kväveoxidul (N_2O), som är en mångfalt kraftigare växthusgas än koldioxiden.

Klimathållbara odlingssätt på torvjordar

Ur klimatpolitisk synvinkel kan torvåkrarna också ses som en outnyttjad möjlighet till effektiv minskning av utsläppen. Åtgärderna för att minska utsläppen kan ge mångdubbelt större effekt per hektar jämfört med mineraljordarna, och varje åtgärd kan därför redan på små arealer minska gårdens koldioxidavtryck avsevärt.

Stävjandet av utsläppen från torvjordarna kräver att odlaren vet hur åkeranvändningen optimeras. Sökandet efter klimathållbara odlingsmetoder som lämpar sig för den egna gårdens torvjordar kan innebära kompromisser mellan de ekonomiska, odlingstekniska

och utsläppsmässiga målsättningarna. Vissa lösningar, såsom återställande, kan självfallet betyda förluster av jordbruksstöd enligt den nuvarande stödpolitiken eller höjande av odlingsintensiteten på något annat skifte. Å andra sidan kan ett beslut om återställande eller beskogning bespara odlaren kostnader för förnyad dikning. De klimathållbara odlingsåtgärderna på torvjordar kan grovt indelas i tre klasser: nedbrytningsstävjande åtgärder samt aktiva och förebyggande åtgärder för att minska utsläppen.

Odlingsmetoder som stävjar nedbrytningen av torv

Torvlagrets tjocklek är i nyckelposition med tanke på de utsläppsreducerande åtgärdernas varaktighet. Åtgärderna bör därför övervägas utgående från torvlagrets tjocklek på åkerskiftet. De långvarigaste effekterna uppnås i tjocka torvjordar, där det organiska materialet som är utsatt för nedbrytning räcker för flera årtionden.

Det effektivaste sättet att minska utsläppen från torvjordarna är att höja grundvattennivån till exempel genom reglerad dränering. Varje centimeter som sparas under vatten är betydelsefull eftersom cirka en centimeter av torvlagret nedbryts årligen, vilket för koldioxidens del ger en utsläppseffekt på 20–30 t CO_2/ha/år och för kväveoxidulens del 4–6 t CO_2-ekv/ha/år. Det lönar sig också att höja vattennivån delvis, eftersom det skikt som finns under torvlagret ofta inte har så goda odlingsegenskaper. På samma gång kan man undvika kostnaderna för förnyad dikning.

Även i tunnare torvjordar lönar det sig att satsa på att stävja nedbrytningen av den befintliga torven. Det alternativ som påskyndar nedbrytningen mest är odling av ettåriga grödor utan bottengrödor samt höstplöjning, vilket lämnar markytan bar och luftig under en lång period. Ett växttäcke minskar såväl utsläppen som urlakningen av näringsämnen. På torvjordar är odling av fleråriga grödor ett bättre alternativ än ettåriga. En övergång från ettåriga odlingsväxter till långvariga vallodling minskar exempelvis redan den årliga utsläppsbelastningen med en tredjedel. Om det utöver vallodlingen också är möjligt att höja grundvattennivån kan utsläppen minska till hälften jämfört med ettåriga grödor.

Om möjligt lönar det sig att flytta gårdens vallproduktion från mineraljordar till organogena jordar, och på motsvarande sätt flytta de ettåriga grödor som odlas på torvjordar till mineraljordar. Om vallodling inte är möjlig med tanke på gårdens produktionsinriktning, kan utsläppsbelastningen från torvjordarna vid odling av ettåriga grödor minskas något genom användning av bottengrödor, vårplöjning, direktsådd eller reducerad bearbetning. Reducerad bearbetning kan dock ge effekt i form av ett ökat ogrästryck samt påverka inpassningen av odlingsarbetena på våren.

Aktiva minskningsåtgärder

Ett kapitel för sig är de underproduktiva organogena torvjordarna. För mineraljordarnas del är en tillfällig extensifiering, till exempel i form av träda, ett sätt att förbättra markens bördighet. På torvåkrarna förbättrar en extensifiering sällan produktionen, och åkrarna höjer gårdens utsläppsbelastning genom sin blotta existens. I det fallet bör man i första hand i stället för att idka en underproduktiv odling uppnå en utsläppsminskning genom att, beroende på torvlagrets tjocklek, överväga till exempel beskogning,

återställande eller våtmarksodling där man odlar växtarter som trivs i fuktiga förhållande, som exempelvis energiskog av salix. En underproduktiv, extensivt odlad torvåker ger genom sin blotta existens upphov till en enorm årlig utsläppsbelastning, trots att den inte klarar av att producera en skörd som duger till livsmedel eller foder.

Förebyggande

Det bästa sättet att undvika utsläpp från torvjordarna är i princip att undvika att röja torvjordar till åkermark. På gårdar som växer eller behöver tilläggsareal finns det orsak att överväga alternativen innan man röjer en torvåker. Kan åkerröjningen undvikas genom ägoregleringar, genom att köpa eller arrendera mineraljordar, eller har gården mineraljordar som kan bli åkermark i stället för kärret? Om uppodling av torvmark är det enda alternativet att skaffa tilläggsareal, bör torvåkern odlas och produkterna utnyttjas så intensivt som möjligt för att de produktvisa utsläppen ska hållas möjligast låga.

(HK ja KR)

Undvik röjning

- Ägoreglering
- Åkerbyten
- Utveckling av stallgödselhanteringen

Ta dåliga åkrar ur produktion

- Beskogning
- Återställning

Minska nedbrytningen av torv på de åkrar som blir kvar i odling

- Växttäcke (vårplöjning, höstsådd, bottengrödor eller flytt av vallar från mineraljord till torvjord)
- Reducerad bearbetning
- Höjning av grundvattennivån

Bild 13. Klimathållbara odlingsmetoder på torvåkrar

3.6 Agroekologinen symbioosi

Konceptet ”Industriell ekologi” in i livsmedelskedjan

Jordbruket är utgångspunkten och basen för livsmedelskedjan. Även om utsläppen av växthusgaser liksom de övriga miljöverkningarna under matens livscykel till största delen kommer från jordbruket, är det både möjligt och förnuftigt att minska utsläppen i samarbete med de andra aktörerna i kedjan. Idén med Industriell ekologi är att avfall eller spillvärme från ett företag kan bli råvara eller energikälla för ett annat. Enligt idén är det ekoeffektivt och lönsamt för de här företagen att fungera fysiskt nära varandra i så kallad ekoindustriell symbios. När de ekoindustriella symbioserna tillämpas i livsmedelskedjan får vi agroekologiska symbioser.

En pilot för agroekologisk symbios har utvecklats i Palopuro i Hyvinge. Man talar on Palopuros agroekologiska symbios eller Palopurosymbiosen (fi. ”Palopuron symbioosi”). Företagen som ingår är ett jordbruk, en trädgård, en äggproducent och ett bageri. Symbiosen började byggas upp 2015. Målsättningen var till en början att öka självförsörjningen på energi. När energiproduktionen började bli betydande anslöt sig även ett energibolag till symbiosen. Slutresultatet är en symbios av matproduktion, livsmedelsförädling och bioenergiproduktion, som producerar mat och energi utöver de egna behoven samt återvinner näringsämnena.

Eftersom produktion och konsumtion av livsmedel är en uråldrig bioekonomi är det naturligt och eftersträvansvärt för livsmedelssektorn att vara energisjälvförsörjande just genom produktion av egen bioenergi. När man jämför den fossila ekonomin med det hållbara produktionssättet med självförsörjning av kväve som föregick och kommer efter den, och på vilket de agroekologiska symbioserna byggs upp, ger det senare trots energiproduktionen – eller i själva verket tack vare energiproduktionen – en större produktion av mat per hektar åker.

Odling som är självförsörjande på kväve beskrevs av A.I. Virtanen redan 1943. En hållbar kvävehushållning baserar sig på biologisk kvävebindning med hjälp av klövervallar. I den agroekologiska symbiosen plöjs gröngödslingsvallen med all sin energi och sina näringsämnen inte ned i åkern, utan skörden bärgas till symbiosens biogasanläggning. I Palopurosymbiosen ingår en torrötningsanläggning för 3 000 ton råvara. Näringen återförs till åkerskiftena först i form av rötrester. Inga näringsämnen ”plockas bort” på vägen, endast bioenergi i form av biogas. Resultatet blir en betydande energiskörd. Palopurosymbiosen producerar årligen 280 000 m3 biometan räknat enligt normaltryck. Energiinnehållet är 2 800 MWh per år. Den egna energianvändningen i symbiosens företag är 1 650 MWh, så nästan hälften av totalproduktionen kan gå till försäljning.

Palopurosymbiosens produktion av bioenergi ersätter en användning av cirka 70 000 liter lätt brännolja årligen i jordbruket och bageriet. Detta ger en utsläppsminskning på 240 koldioxidton per år. Om – och när – det fossila bränslet ersätts av biogas också i traktorerna och bageriets distributionsbilar, och resten av biogasen säljs som motorbränsle för annan trafik, ökar minskningen av koldioxidutsläpp till 770 ton per år. Palopurosymbiosen använder ca 400 hektar åker, så den potentiella utsläppsminskningen jämfört med utgångsläget med fossila bränslen är cirka 2 t CO2/ha.

Återvinningen av näringsämnen i form av gödsling med rötrester minskar utsläppen av växthusgaser under hela livscykeln med 60 procent jämfört med gängse produktionssätt, från cirka 500 kg koldioxid per hektar åker till ca 200 kg per hektar. På Palopurosymbiosens åkerareal betyder det här 120 ton mindre koldioxidutsläpp jämfört med gängse produktionssätt.

Den tredje klimatfördelen jämfört med gängse produktionssätt är den organiska gödseln, alltså rötresterna, samt det kol som binds i marken och ökar mullhalten till följd av den andel klövervall, cirka 25 procent av åkerarealen i växtföljden, som krävs för produktionen av den organiska gödseln. Detta har inte mätts i Palopurosymbiosen, men redan utgående från en möjligast försiktig uppskattning kan man genom det här produktionssättet stoppa den genomsnittliga uppmätta kolförlusten från mineraljordar i Finland, som är ca 220 kg C/ha. Den motsvarande utsläppsminskningen är 0,8 t CO2 på årsnivå

per hektar. För Palopuros åkerareal på ca 400 ha betyder det här en årlig utsläppsminskning på minst 320 t koldioxid. Mer troligt är att produktionssättet som baserar sig på vall till biogas och gödsling med rötrester inte bara stoppar kolförlusten, utan också ökar kollagret i marken. Om vallväxtföljden och den organiska gödslingen med rötrester dessutom minskar utsläppen av dikväveoxid från marken blir den positiva klimateffekten ännu större.

En hopräkning av alla de uppskattade utsläppsminskningarna ovan ger för Palopuros agroekologiska symbios av jordbruk, livsmedelsförädling och energiproduktion en summa på 1 200 ton CO_2 per år. Fördelat på den använda åkerarealen är minskningen cirka 3 ton CO_2 per hektar åker. Omräknat i kol är minskningen ca 800 kg C/ha/år. Symbiosen producerar alltså så här mycket mindre utsläpp räknat i koldioxid än vad som uppstår av gängse jordbruk och brödkedja.

Förutom klimatnyttan är det också viktigt att beakta hur modellen inverkar på primärproduktionens ställning i matsystemet. I en agroekologisk symbios är gårdsbruken närmare konsumenten och en del av matförädlingen, i stället för att som sin enda uppgift producera råvara för matfabrikerna. Det här gör det lättare för odlarna att omfatta modellen och underlättar en vidarekopiering av den.

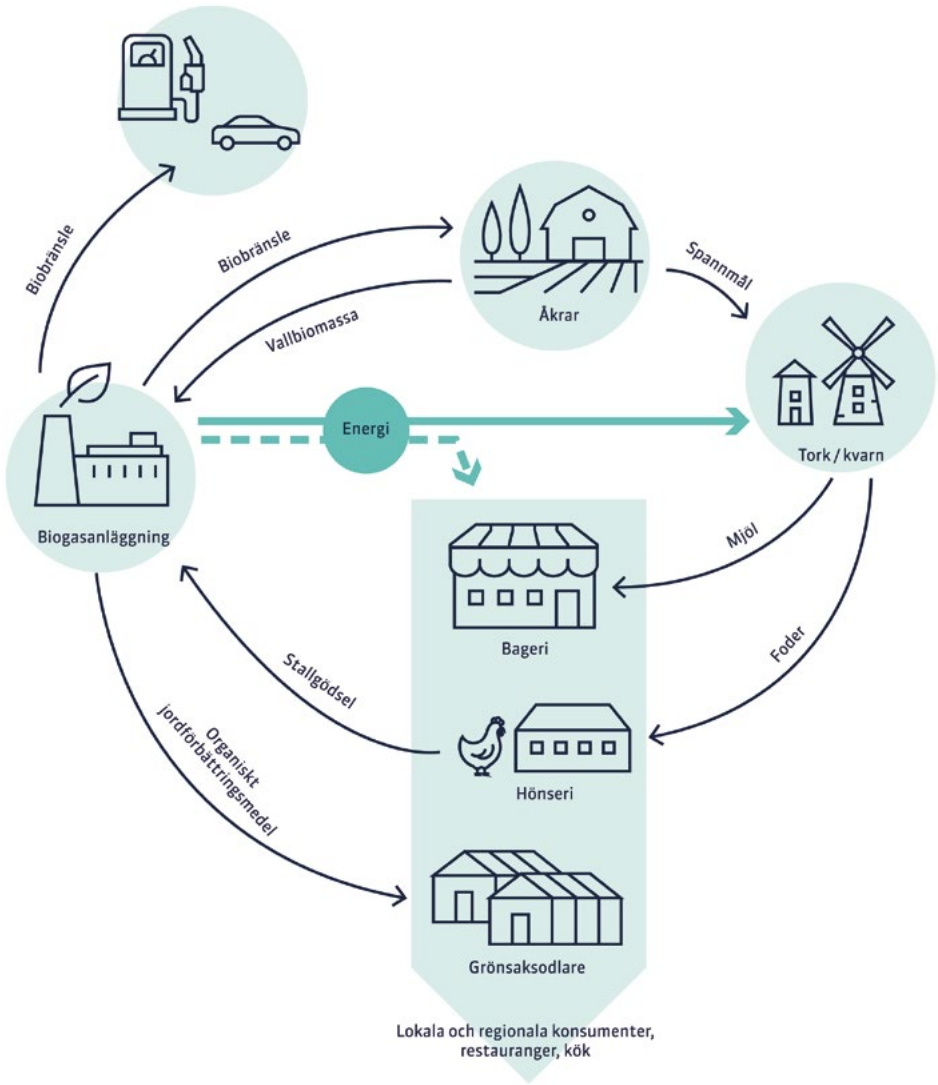


Bild 14. Agroekologisk symbios (bild: NivosOy)

3. Markens kollager i jordbruket

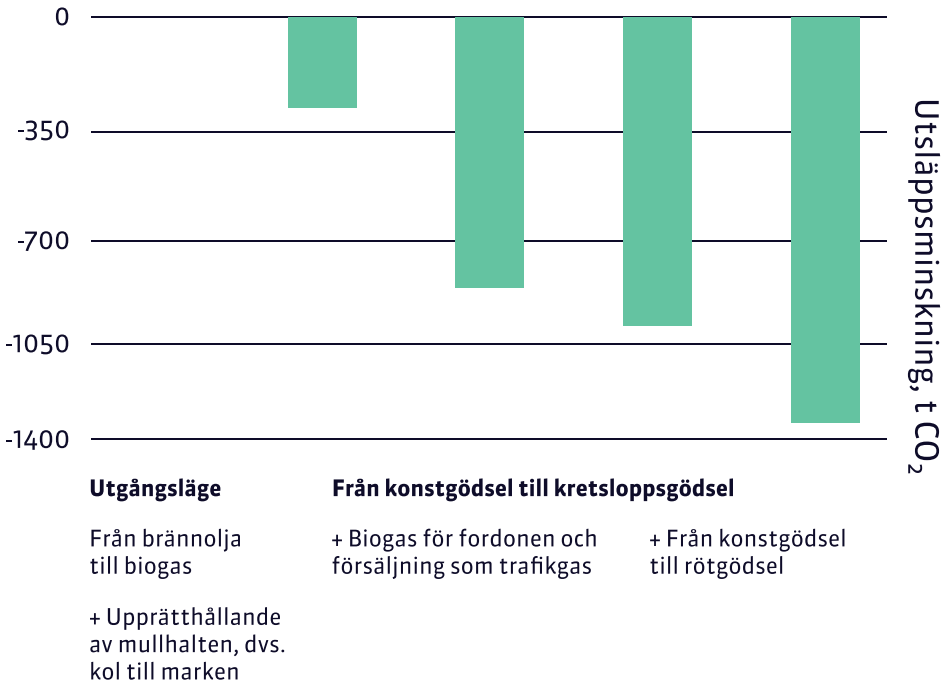


Bild 15. Utsläppsminskningar som uppnåtts med hjälp av agroekologisk symbios inom företagssamarbetet i Palopuro räknat i ton koldioxid. I kalkylen ingår förutom jordbruket också utsläppsminskningarna i bageriföretaget som vidareförädlar spannmålen till bröd. Inom Palopurosymbiosen odlas ca 400 ha åker. De beräknade minskningarna i koldioxid per hektar är 2,7 t/ha. Det här kan jämföras med de genomsnittliga utsläppen i det finländska jordbruket, som med den stora andelen torvjordar inräknad är 2,8 t/ha. Om hela åkerarealen skulle odlas enligt växtföljden brödsäd-vall till biogas skulle symbiosen årligen kunna producera ca 2 500 kg bröd/ha. Vid gängse produktion av råg- eller vetebröd motsvarar utsläppen under hela livscykeln ca 1,5 kg koldioxid per kilogram bröd, vilket inkluderar odlingens andel på ca 40 %. Utsläppen från produktionen av ett brödkilo kan enligt Palopuromodellen minskas med ca 70 %.

(JHel ja KK)

4. Kolodling och försök i praktiken

Stora förändringar kräver forskning och utredningar samt försök och fördjupning i frågorna. Vi lär oss av våra misstag, och under arbetets gång hittar vi nya metoder att lösa problemen. Arbetet görs tillsammans. Målsättningen är betydelsefull och motiverande. En hållbar matproduktion är nyckeln till framtiden.

4.1. Olika slags Carbon Action-odlare

I odlarsamarbetet på Carbon Action-plattformen (www.carbonaction.org) deltar hundra frivilliga kolodlare, som har sökt sig till samarbetet tack vare den egna motivationen. Odlarna studerar under de kommande åren processerna och metoderna för kolinlagring i små grupper med stöd av sina odlarkolleger, rådgivare och forskare. Målsättningen är att odlingen av alla gårdens åker- och betesområden ska bli kolinlagrande.

Gårdarna har som sitt första steg mot kolodling valt ut ett försöksskifte och tagit jordprover från skiftet. Försöksskiftet på minst tre hektar har indelats i en kontrolldel och en försöksdel. Skiftet studeras under fem år, och resultaten utvärderas med hjälp av jordprover. I jordproverna analyseras bland annat mängden kol som har bundits i försöksskiftets försöks- och kontrolldelar.

På försöksskiftena görs under hela försöksperioden observationer av bland annat skördemängd, odlingsåtgärder, väderleksförhållanden och odlingsväxter. Carbon Action-kolodlarna för noggrant bok över åtgärderna och observationerna på sitt försöksskifte, och dessa kombineras sedan med resultaten av jordproverna.

På kontrolldelen bedrivs odlingen på samma sätt som tidigare.

På försöksdelen tillämpas en eller flera odlingsåtgärder i avsikt att förbättra kolbindningen och jordhälsan, såsom reducerad bearbetning, ökad assimilation med hjälp av växttäcke, art- och sortval med sikte på förlängd växtperiod och högre skördar samt mångsidigare urval av odlingsväxter och växtföljd. Lämpliga åtgärder har valts utgående från gårdens produktionsinriktning och dess behov.

Bland de 100 kolgårdarna har 32 valts ut för en noggrannare granskning där man mer ingående undersöker metoder för att försnabba kolinlagringen i marken, bland annat med hjälp av jordprover som tas från en meters djup. På åkerskiften på 20 av gårdarna anläggs dessutom försök för noggrannare undersökning av kolflödet och kollagren.

Exempel på Carbon Action-kolgårdar

Kolgårdarna representerar ett mångsidigt urval av olika produktionsinriktningar inom växt- och husdjursproduktionen, med såväl konventionell som ekologisk produktion. Genom undersökningarna som görs på försöksskiftena producerar gårdarna värdefull och nyttig information om metoderna för kolbindning i praktisk odling. Bland Carbon Action-kolgårdarna finns till exempel Pertti Pasuris gård i Juupajoki, Siri Taalas och Jani Pekkolas gård i Hauho, Laura Heimschs gård i Esbo, Heikki Salomaas gård i Orivesi, Antti Lähdes gård i Joutseno samt Perttu Peräläs gård i Laihela.

På **Pertti Pasuris** gård i Juupajoki strävar man efter kolneutralitet och tar sikte på framtiden. Också den blivande unga husbonden på gården inser kolbindningens betydelse. Gården är specialiserad

på uppfödning av Highlandtjurar, som går på bete året om och är anpassade för anspråkslösa förhållanden. Enligt Pasuri lämpar sig hans produktionsinriktning väl för att testa praxis i kolodlingen, eftersom deltagandet i kolpilotprojektet inte krävde några stora ändringar i produktionen.

Kolodlingsåtgärderna som testas på gården är en breddning av vallväxtsortimentet till åtta olika arter samt upprätthållande av jordhälsan. Det rika urvalet av vallväxter främjar kolbindningen eftersom de olika arternas bästa tillväxtskeden infaller under olika förhållanden och i olika skeden av växtsäsongen. På det här sättet försöker man maximera assimilationen under växtsäsongen.

Siri Taalas och **Jani Pekkola** föder på sin gård i Hauho upp får och odlar spannmål, bondböna och vall på cirka 100 hektar. Odlingen sköts med minimibearbetning, och odlarna intresserar sig för kolbindning och miljövänlig odling i övrigt. Därför väcktes också intresset för Carbon Action, och gården beslöt sig för att delta i odlarsamarbetet.

Av kolodlingsåtgärderna valde de att testa ett större och mångsidigare arturval i vallodlingen. På kontrolldelen av gårdens försöksskifte inom kolpilotprojektet växer totalt tre arter och på försöksdelen nio arter av vallväxter. Den här praxisen passade väl in i den befintliga vallproduktionen. På basis av forskningsresultat kan man vänta sig att den artrikare blandningen binder mer kol än blandningen med färre arter. Med tanke på kolbindningen i vallproduktionen är det också viktigt att beståndet inte skördas med för låg stubbhöjd.

Utöver kolbindningen ser man på gården också vallproduktionen och betesgången som nyttiga och viktiga på många andra sätt. Bland annat upprätthåller och förbättrar de jordhälsan samt inverkar positivt på naturens mångfald. Samtidigt förbättras också anpassningen till olikartade, också extrema, förhållanden. Taalas och Pekkola ser därför kolodlingen som en större fråga än enbart en klimatfråga och inser att den också kan ge produktionsmässiga fördelar.

Laura Heimsch, som odlar gården **PieniKylä** i Esbo, ser kolbindningen i jordbruksmarken som en positiv sak på många sätt. Förutom att stävja klimatförändringen förbättrar kolbindningen också markens välmående. Enligt Heimsch gagnar en mångsidig och välmående mark såväl miljön och odlaren som konsumenten, eftersom kvaliteten på skörden av odlingsväxterna förbättras och markens produktivitet är garanterad också i framtiden. PieniKylä deltar i Carbon Action eftersom det enligt odlaren är viktigt att få vetenskaplig information om kolbindningen i praktiken. På gården PieniKylä har mångfalden och skötseln av marken från första början varit viktiga utgångspunkter för hela odlingen. Som åtgärder på försöksskiftet i pilotprojektet har gården valt ett rikligt och mångsidigt växttäcke, gynnande av djupt rotade växtarter, reducerad bearbetning samt gödsling med kompost. Gården testar alltså ett flertal kolodlingsåtgärder på samma gång.

Heikki Salomaa i Orivesi verkar som företagare på mjölkgården **Kotaniemi**. På åkrarna odlas också vallfoder åt korna. Salomaa är intresserad av produktionens miljöverkningar, och har noterat att miljövänlig praxis också är fördelaktig med tanke på produktionen. Gården har redan innan man gick med i kolpilotprojektet använt mångsidiga vallblandningar och tillämpat välfungerande praxis från den ekologiska produktionen i sin konventionella produktion. Som

exempel på en sådan nämner Salomaa spridning av torrgödseln från kornas kalla lösdrift på åkrarna. Han berättar att gödseln är ett bra jordförbättringsmedel, som på många sätt upprätthåller och förbättrar markens skick.

Salomaa är nöjd med de kunskaper han har fått via Carbon Action-utbildningen om hur olika slags odlingspraxis påverkar produktionen, marken och kolbindningen på en nötgård. Som kolodlingspraxis som testas på hans försöksskifte väljs troligtvis metoder för att förlänga vallens växtperiod. Genom att förlänga växtperioden kan man öka vallbeståndets assimilation. För en mjölkgård faller det sig naturligt att fokusera på just vallåkrarnas kolbindning.

Agrologstuderande **Antti Lähde** odlar råg, vete, kummin samt rybs och raps på sin växtodlingsgård i Joutseno, samtidigt som han håller på att slutföra sina studier. Beaktansvärt med gårdens odlingspraxis är att man ända sedan 2002 använt sig av reducerad bearbetning och direktsådd. Man har alltså redan länge undvikit att störa den naturliga verksamheten i marken med för mycket bearbetning. Markens välmående och dess positiva effekter för produktionen och miljön var också det som fick Lähde att gå med i Carbon Action-odlarsamarbetet. Han hoppas att kolodlingen ska bidra till att stävja klimatförändringen. Klimatförändringen och de övriga miljöproblemen är ändå inte de enda orsakerna för honom att gå in för kolodling. Lähde vet att odlingsåtgärderna som hör till kolodlingen också förbättrar åkrarnas jordhälsa. Det är viktigt att också förstå vilka möjligheter åtgärderna ger att utveckla och förbättra gårdens produktion och lönsamhet.

På försöksskiftet på Lähdes gård har man sått råg. Försöksdelen och kontrolldelen skiljer sig från varandra i fråga om de vallblandningar som har såtts in i rågen. På försöksdelen har man förutom rågen sått en vallblandning med åtta olika arter. På kontrolldelen innehåller vallblandningen bara två arter. Vallbeståndet fortsätter att assimilera och växa efter att rågen har slutat växa och skörden har bärgats. I det här fallet borde en vall med många arter binda kolet bättre än en vall med få arter.

I Laihela deltar **Perttu Perälä** som driver **Naskali** gård i Carbon Action-odlarsamarbetet. Han är intresserad av jordhälsan och produktiviteten på sina åkrar. Perälä känner till vilka positiva effekter en högre mullhalt och större mikrobaktivitet på åkrarna har för produktionen, och tror att kolodlingsåtgärderna är till nytta för såväl miljön som produktionen. Enligt honom förbättrar en ökad mullhalt åkerns odlingsegenskaper på alla sätt. Det här kan till exempel märkas i form av minskade bruksmängder av dyra produktionsinsatser i framtiden. På lång sikt har åtgärderna alltså också en gynnsam effekt på lönsamheten i produktionen. Av Carbon Action-odlarsamarbetet förväntar sig Perälä kunskaper och erfarenheter av hur kolodlingspraxisen fungerar i praktiken. På undersökningsskiftet på hans gård odlas under det första året korn, och under de följande åren andra odlingsväxter enligt åkerns växtföljd.

På kontrolldelen odlas grödorna enligt tidigare praxis på gården, och på försöksdelen sås rajgräs som fånggröda utöver huvudgrödan. Rajgräset, som växer under odlingsgrödan på försöksdelen, fortsätter att växa långt efter att odlingsväxten har skördats. Syftet med denna kolodlingspraxis är alltså att öka den årliga assimilationen på åkern. Fånggrödan utnyttjar växtsäsongen efter att odlingsgrödan har slutat växa, och upprätthåller på så vis ett levande växttäcke under längre tid än den egentliga odlingsgrödan.

Under sommaren 2019 intervjuades en del av kolgårdarna. Intervjuerna gav en uttömmande bild av odlarnas motiv och orsaker till att delta i projektet, samt av deras erfarenheter efter att ha deltagit i kolodlingsutbildningen och efter att genomförandet av kolodlingsåtgärderna på gårdarnas försöksskiften och den övriga verksamheten som riktas till odlarna har inletts.

Bland de främsta motiven för verkligt många av odlarna fanns en vilja att förbättra de egna åkrarnas jordhälsa och därigenom uppnå viktiga produktionsmässiga fördelar. På samma gång hoppades odlarna kunna öka kolhalten i sina åkrar på lång sikt, för att produktionen också ska få betydelse för stävjandet av klimatförändringen. På det här sättet vill man också skapa positiv synlighet för det finländska jordbruket och ge det ökad uppskattning bland konsumenterna. Samtidigt handlar det om att utveckla gårdens produktion så att den anpassar sig till klimatförändringens effekter och de övriga framtidsutmaningarna.

Många odlare har exempelvis noterat de problem som i synnerhet de senaste årens torra och våta perioder samt åkermarkens dåliga jordhälsa har medfört i produktionen. Därför är odlarna nu verkligen villiga att arbeta för att förbättra jordhälsan på sina åkrar. Odlarnas samarbetsvilja och motivation är synnerligen viktiga faktorer i Carbon Action-arbetet. Läs närmare: https://carbonaction.org/carbon-actionin-uudet-tutkimukset-kaynnistyneet-viljelijat-kiinnostuneina-mukana/

(LHö ja UW)

4.2. Förebilder ute i världen

Exempel på kolodling och ökning av det organiska kollagret i jordbruksmarken finns bland annat i USA, Australien, Nordsjöregionen, Afrika och Frankrike. Ute i världen verkar flera ideella organisationer och grupper som på vetenskaplig grund utvecklar kolodlingspraxis, främjar ibruktagningen av dem i jordbruket, utbildar odlare i kolodling och ökar kännedomen om kolodlingen genom information. Hit hör bland annat de amerikanska organisationerna Green America och Kiss the Ground, Green Collar-organisationen i Australien samt det amerikanska Carbon Cycle Institute som samlar ett flertal olika organisationer. Det är också värt att följa 4/1000-initiativets webbplats och nyhetsbrev, där initiativets sekretariat effektivt sammanfattar det arbete som görs runtom i världen.

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/

Vi kan dessutom se exempel på hur jordbruket medverkar i kolutsläppshandeln med hjälp av kolodling (Carbon Farmers of Australia) samt på projekt som testar och främjar kolodlingen på gårdarna (The Marin Carbon Project och Interreg North Sea Region Carbon Farming). Andra exempel är bland annat Carbon Farmer som tillämpar kolodlingspraxis för odling i stor skala på småbruk i Afrika, webbtjänsten COMET-farm som beräknar gårdarnas koldioxidavtryck, ett omfattande initiativ för återställande av markens skick för att stävja klimatförändringen (Soil Carbon

Initiative) samt ett projekt för samordning av forskning och information om kolbindningen (CIRCASA). De viktigaste pågående initiativen och projekten för kolodling i EU diskuterades i Bryssel hösten 2019 (se sammandrag: 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

Praktiska exempel på kolodling och testning finns åtminstone i Australien (Carbon Farmers of Australia), USA (The Marin Carbon Project och Kiss The Ground) samt i Nordsjöregionen (Interreg North Sea Region Carbon Farming).

Carbon Farmers of Australia är en regional rådgivningsorganisation för kolhandel som verkar i Australien. Den hjälper jordbrukare och markägare att komma med i kolhandeln och förtjäna kolkompensation för olika slags kolodlingspraxis. Det finns fem åtgärder som berättigar till kolkompensation på gårdarna, varav två har en koppling till kolbindningen.

Det ena alternativet är att odla träd- och buskarter som är endemiska för området på jordbruksmarken. Träden och buskarna binder kol i biomassan ovan jord samt i sina stora rotsystem, och genom det här kan odlaren förtjäna kolkompensation. Kolbindningen beräknas med hjälp av en räknare som har tagits fram av förvaltningen i Australien.

Den andra möjligheten att förtjäna kolkompensation på basis av kolbindningen som tillämpas i Australien har att göra med kolbindningen och kolinlagringen i jordbruksmark. Tillsvidare tillämpas detta endast för betessystem, men ett system för odlingsmarker är under utveckling. När det gäller betesmarkerna ska odlaren ha permanent betesmark eller betesmark som omvandlas till permanent.

För att förtjäna kolkompensation ska man ta i bruk minst en ny praxis för kolbindning på kolodlingsbetet. Till dessa hör exempelvis omvandling av odlingsmark till betesmark, ändring av arturvalet på betet från ettåriga grödor till fleråriga, justering av betesgången för att undvika överbetning eller övergång från mineralgödsel till organisk gödsel.

Jordprover tas för att fastställa mängden organiskt kol i marken innan kolodlingen inleds. Senare tar man nya jordprover för att jämföra halterna av organiskt kol med de första proverna och bedöma hur väl kolbindningen har lyckats.

The Marin Carbon Project strävar efter att öka kolbindningen i marken på betes-, odlings- och skogsmarker med hjälp av tillämpad forskning, testning och praxis. Målsättningen med projektet, som fungerar på Marin Countys område i Kalifornien, är att utveckla ett kopierbart kolbindningsprogram för jordbruket. Programmet innefattar fältarbete bland odlarna, teknisk infrastruktur och ekonomiskt stöd.

Projektet inleddes 2013 och tre pilotgårdar togs med i projektet. Den första åtgärden som genomfördes på gårdarna var spridning av kompost på vissa odlingsmarker. Därefter utarbetade man gårdsvisa

kolodlingsplaner. Metoderna som ingår är bland annat spridning av kompost på åkrarna, ändring av betesgången till betescirkulation samt anläggning av skyddszoner.

Senare har fler odlare tagits med i programmet. Målsättningen är att öka antalet kolodlingsgårdar i programmet till 20 gårdar före utgången av 2020. Den beräknade kolbindningspotentialen för dessa gårdar är 124 ton koldioxid under en tjugoårsperiod.

Kiss the Ground-initiativet lyfter fram markfrågor inom fyra olika program. Ett av programmen fokuserar på jordbruksmarken och främjandet av regenerativ odling. Initiativet finansierar odlarutbildning och jordprovtagning som stöder odlarnas och gårdarnas övergång till regenerativ odling.

Odlarna utbildas till att gå in för bland annat odling som minskar markbearbetningen, användning av bottengrödor samt anpassad betesgång. Utöver utbildningen får odlarna som deltar i programmet åkerkonsultering av sakkunniga samt kostnadsfria jordprover under programmets första och tredje år.

Projektet **North Sea Region Carbon Farming** inleddes i Nordsjöregionen hösten 2018. I det treåriga projektet deltar sju aktörer från staterna i Nordsjöregionen. Målsättningen är att förbättra jordbruksmarkens skick och samtidigt stävja klimatförändringen, och på så sätt skapa nytta för både odlarna och samhället som helhet. Avsikten är att hämta in nya tekniska perspektiv i jordbruket och skapa nya affärsmodeller.

Projektets målsättning är att uppmuntra odlarna till kolbindning samt att öka kännedomen om kolbindningens centrala roll för att öka jordbrukets miljövänlighet i Nordsjöregionen. Bland kolodlingspraxis som räknas upp på projektets webbplats finns bland annat sådd av fånggrödor efter odlingsgrödorna, växelbruk, skogsjordbruk, reducerad bearbetning eller bearbetningsfri odling samt anläggning av permanenta vallar.

(LHö ja UW)

4.3. Forskningsexempel

Gasutbytesmätningar i Qvidja 2018

Meteorologiska institutet mäter kontinuerligt koldioxidströmmarna mellan färskfodervallen och atmosfären med virvelkovariansmetoden på Qvidja gård i Pargas, Egentliga Finland (bild 16). Mätningarna inleddes i maj 2018 och pågår fortsättningsvis. Metoden mäter nettoutbytet, dvs. skillnaden mellan den koldioxid som frigörs och växternas assimilation.

De negativa mätvärdena i bild 17 berättar att vallväxternas assimilation har varit kraftigare än växternas andning och nedbrytningen av organiskt material i marken. En sådan situation är typisk mitt på dagen under sommaren. De positiva värdena berättar å sin sida att frigörandet av koldioxid har varit större än assimilationen, dvs. kol har frigjorts från åkern till atmosfären. En sådan situation är typisk nattetid eller när växternas assimilation annars är liten, till exempel i samband med slåtter eller dåligt väder. Genom att summera de momentana resultaten kan man undersöka om åkerekosystemet har varit en kolkälla eller en kolsänka under till

exempel ett års tid.
Åkern slogs två gånger under sommaren, i juni och september, och skördades dessutom med slåtterkross en gång i augusti.

Bild 16. Utrustning för virvelkovariansmätning på Qvidjas vall. Bild: Laura Heimsch

Melassgödsel spreds på åkern i mitten av juli och i slutet av augusti. Vid slåtterkrossningen lämnades 15 cm stubb, och den inverkade därför inte nämnvärt på kolbindningen. De övriga åtgärderna minskade å sin sida kolbindningen i marken.

Vid slåtter avlägsnas största delen av den assimilerande bladytan, och därför minskar också kolbindningen genast efter slåttern. I juni 2018 försvårades vallens återhämtning efter slåttern dessutom av torka. Åkern var då under en tid en kolkälla. Melasspridningen ökade markorganismernas andning i åkern, vilket ökar frigörandet av koldioxid till atmosfären. Detta syns som en ökning av nettoutbytet efter båda spridningarna.

Torkan var som svårast i juli-augusti, och då försämrades också växternas assimilationsförmåga. När regnen blev allmännare i slutet av augusti började vallen växa bättre och kolbindningen blev effektivare. Till följd av de relativt höga temperaturerna kunde en betydande kolbindning noteras ännu i november. Som helhet betraktad var åkern 2018 en kolsänka. Den band alltså mera kol än vad som frigjordes, när man också beaktar det kol som avlägsnades vid slåttern och det som tillfördes med melassen.

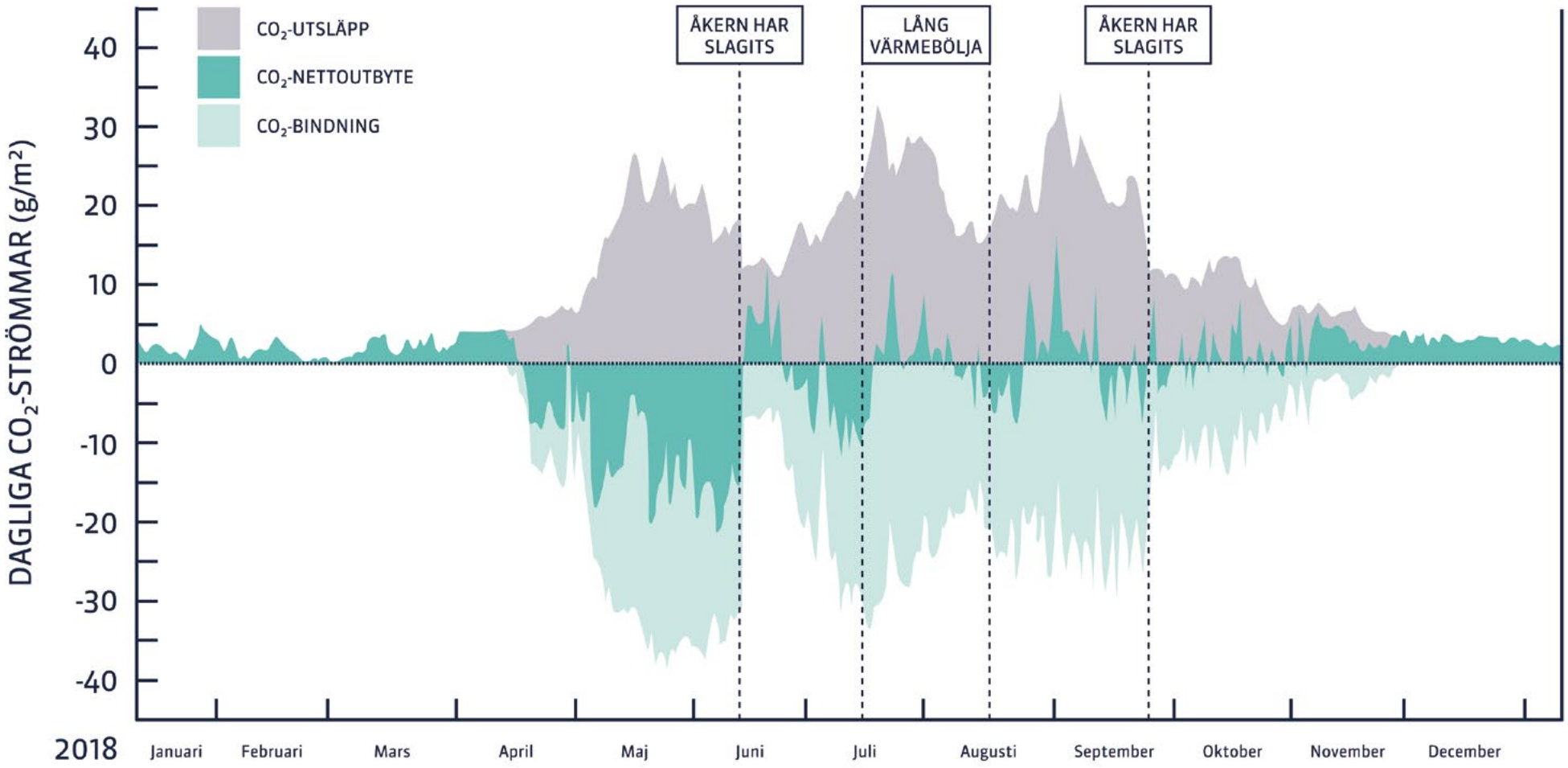


Bild 17. Vallens dagliga kolbalans bestämd genom virvelkovariansmätningar på Qvidja gård i Pargas 2018.

(LHeim ja LK)

Undersökning av mikrobernas verksamhet och effekter i kolets kretslopp i Qvidja 2018

Forskare från Helsingfors universitet undersökte effekten av fyra jordförbättringsmedel på havrens rotsystem och markens mikrobiologi, aggregatstrukturen och kol/kväve-kvoten (C/N) på en havreåker på Qvidja gård i Pargas. Försöksytan upprätthålls av Soilfood Oy och anlades 2016, då också jordförbättringsmedlen spreds för första gången.

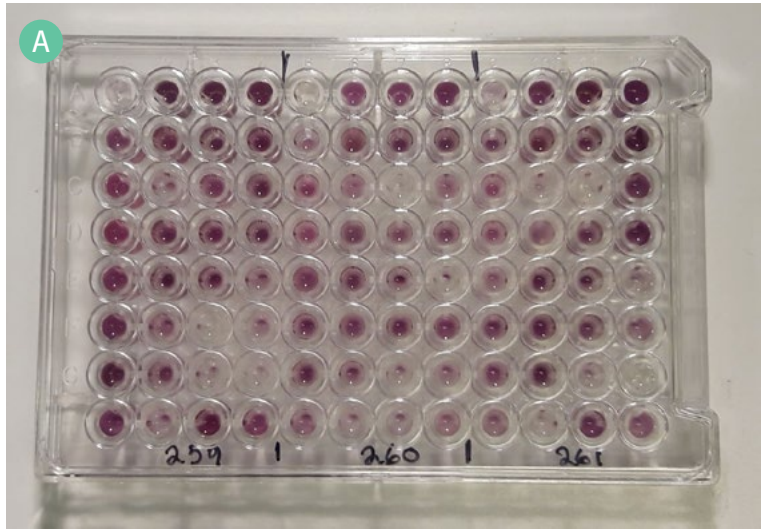
Mikroberna spelar en viktig roll i kolets kretslopp. De bryter till exempel ned organiskt kol och binder det möjligen också i en mer bestående form. Mikrobernas nedbrytande verksamhet är nödvändig för näringscykeln Det kan också finnas ett samband mellan mikrobernas verksamhet, grödornas tillväxt och markens aggregatstruktur. Med jordförbättringsmedel strävar man efter att förbättra markstrukturen och jordhälsan. Ännu vet man dock inte exakt hur de påverkar mikroberna i marken och rotsystemet.

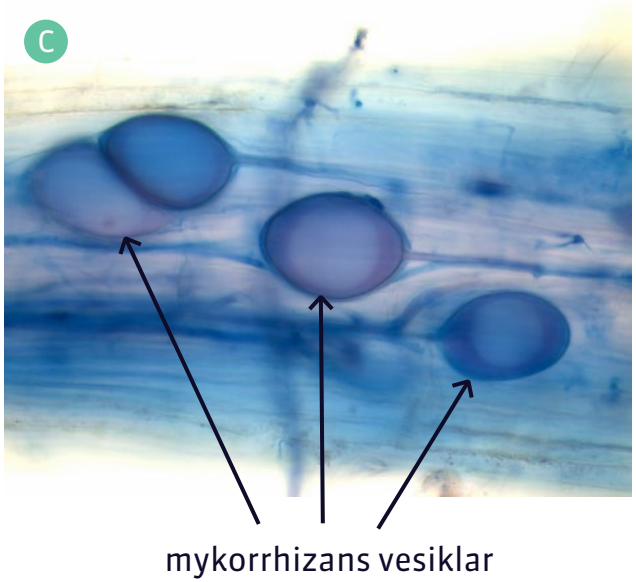
Under sommaren 2018 togs prover från marken sex gånger, och från havrens rötter tre gånger. För att proverna inte skulle blandas sinsemellan placerades proverna i egna, rena påsar. Dessutom rengjordes och steriliserades provtagningsredskapen mellan varje försöksruta. Mätningarna som gällde mikrobernas verksamhet gjordes mestadels på färsk jord, genast när jorden hade silats. Innan dess förvarades jordproverna svalt (+ 4 grader), för att den mikrobiologiska verksamheten skulle sakta av. Bestämningen av mikrofloran på basis av mikrobernas DNA förutsätter att jord- och rotproverna fryses in så snabbt som möjligt efter provtagningen, vilket man också gjorde.

Mikrobernas verksamhet mättes i marken genom markandningen och de extracellulära enzymernas aktivitet. Dessutom bestämdes profiler för mikrofloran i jordproverna på basis av olika kolföreningars användningspotential med hjälp av Biolog Ecoplate-plattor (bild 18A). Mikrobförekomsten mättes i jordproverna genom bestämning av deras totalbiomassa med kloroformfumigations-extraktionsmetoden samt genom mikroskopering av rotproverna.

Inför mikroskoperingen tvättades först rötterna (bild 18B), varefter de färgades för att svampstrukturerna i rötterna skulle kunna urskiljas (bild 18C). För att få så noggrann information som möjligt gjorde man också bestämningar av mikrofloran i jord- och rotproverna genom att isolera provernas totala DNA och därefter undersöka förekomsten av mikrob-DNA i detta med hjälp av Illumina Miseq-sekvensering.

Eftersom organismsamhällena i allmänhet förändras när den oorganiska eller organiska omgivningen förändras, ville man koppla informationen om mikroberna till de fysikaliska och kemiska förändringar som skedde i åkermarken vid tillförseln av jordförbättringsmedlen. Som mätare för dessa användes i undersökningen bestämningar av markens aggregatstruktur, fukthalt, mullhalt, pH och kol/kväve-kvot som gjordes på försöks- och kontrollrutor som behandlades med olika jordförbättringsmedel. Utöver mikrobiologin undersöktes även havrens biomassa och skörd. Modelleringen av de biologiska, kemiska och fysikaliska sambanden är ännu inte slutförd.





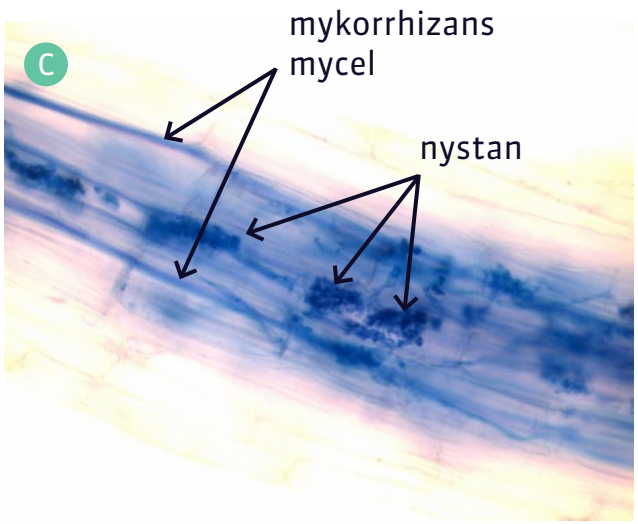


Bild 18. A) Pipetterad Biolog Ecoplate-platta, B) Tvättade havrerötter, C) På bilden syns färgade havrerötter, där mykorrhizasvamparnas strukturer framträder i mikroskop.

Bild 18A och 18B: Karoliina Huusko.
Bild 18C: Anna-Reetta Salonen.

5. Kolmarknaden och de ekonomiska styrmedlen

Ett fullskaligt utnyttjande av möjligheterna att öka kollagret i jordbruksmarkerna förutsätter omfattande, långsiktigt och systematiskt införande av klimatsmart jordbruksverksamhet på gårdarna. För att jordbruksverksamhet som långsiktigt lagrar kol i marken ska bli allmän och ekonomiskt lönsam krävs incitament samt stöd och styrning från samhällets sida.

Ett alternativ är att inkludera jordbruket i en frivillig kolhandel och skapa en marknadsplats som godkänner kolsänkor från jordbrukets markanvändning. En kolmarknad uppstår när aktörerna köper utsläppsminskningar eller kolsänkekrediter för att kompensera sina utsläpp, antingen frivilligt eller förpliktade till det av klimatpolitiken.

Centrala begrepp när man talar om kolhandel är utsläppsenhet, utsläppsrätt, utsläppsminskningskredit och kolsänkekredit.

En **utsläppsenhet** innebär ett utsläpp eller en utsläppsminskning av växthusgaser motsvarande ett ton koldioxidekvivalenter (1 t C02-ekv.).

En **utsläppsrätt** är i sin tur en rätt som beviljats av myndigheterna till utsläpp som motsvarar en utsläppsenhet.

Med **utsläppstak** begränsas den totala mängden utsläppsrätter.

Utsläppsminskningskredit och **kolsänkekredit** är ersättningar som betalas enligt en bestämd standard för utsläppsminskning eller ökning av kollagret motsvarande en utsläppsenhet. Ersättningen förtjänas genom att man producerar en utsläppsminskning eller ökar kolsänkan och säljer minskningen eller sänkan till en annan aktör för kompensation av dennes utsläpp.

För jordbrukets del utgör kollagret i jordbruksmarken det kollager som kan ökas, alltså den eftersträvade kolsänkan. Jordbruksföretagens förtjänstmöjligheter på kolmarknaden ligger därför i försäljningen av kolsänkeenheter. Reduktions- och kolsänkeenheterna som är föremål för handel ska vara additionella, vilket innebär att de inte skulle ha producerats i den normala verksamheten utan kolhandel. Additionaliteten bestäms utgående från en baslinje som beskriver den normala verksamheten. Med baslinje avses när det gäller utsläpp en viss utsläppsmängd vid en viss tidpunkt enligt den normala utvecklingen. Försäljningsdugliga reduktionsenheter kan förtjänas genom att utsläppen minskas under den godkända baslinjen, dvs. genom produktion av en additionell utsläppsminskning.

Enligt samma logik fungerar baslinjen för ett visst kollager som ökas, dvs. en kolsänka. Baslinjen, alltså kollagrets storlek och dess förväntade normala utveckling, fastställs och godkänns på en viss nivå. Kolsänkeenheter för försäljning kan produceras genom att det aktuella kollagret ökas över den uppskattade baslinjen. I ökningen av kollagret beaktar man således först den så kallade normala kolsänkan som skulle uppstå i vilket fall som helst, och den kolsänka som produceras utöver denna utgör den egentliga additionella kolsänkan.

Utsläppsminskningkrediterna är en enklare ersättningsmodell än kolsänkekrediterna, och därför också lättare att föra ut på kolmarknaden. Utsläppsminskningarna kan snabbt fås till stånd och deras effekt är entydig och bestående, eftersom mängden utsläpp av växthusgaser i atmosfären minskar med en viss utsläppsenhet.

Utmaningarna när det gäller kolsänkeenheter är osäkerheten gällande additionaliteten och varaktigheten samt fördröjningen i bildandet av en kolsänka. Osäkerheten gällande additionaliteten hänger samman med svårigheterna att fastställa en baslinje, exempelvis på grund av jordartsvariationer i jordbruksmarkerna och andra mycket lokala faktorer. Till de additionella kolsänkornas varaktighet hör också frågan om avtalens längd vid försäljningen av kolsänkeenheter, dvs. hur länge man antar att den additionella kolsänkan lagrar den aktuella kolmängden utan att den frigörs tillbaka till atmosfären.

För att åstadkomma klimatmässigt varaktiga kolsänkekrediter krävs bland annat en trovärdig beräkningsmetod för fastställandet av baslinjen och ett mätsystem för att konstatera det bundna och inlagrade kolets mängd, dvs. den åstadkomna additionella kolsänkans storlek och varaktighet. Allt detta måste dessutom vara transparent och verifierbart.

Utmaningarna vid skapandet av kolsänkekrediter ger under kolsänkeenhetens produktionsprocess också upphov till transaktionskostnader, dvs. kostnader som är oundvikliga för processen, men som ändå inte har att göra med den egentliga produktionen av kolsänkeenheterna, utan med hur man får ut dem som ersättningsdugliga på kolmarknaden. Produktionen av marknadsdugliga kolsänkeenheter kan därför leda till att priset på kolsänkeenheterna blir så högt, att de per kolenhet inte är fördelaktiga i jämförelse med produktionen av utsläppsminskningar. I det fallet finns det ingen efterfrågan för de producerade kolsänkeenheterna på kolmarknaden.

Ett centralt problem för kolsänkekrediterna med tanke på kolsänkornas verkliga syfte, dvs. stävjandet av klimatförändringen, är fenomenet med kolläckage som uppstår när ökade kolsänkor som ersätts på ett ställe orsakar en minskning av kolsänkorna någon annanstans. Detta problem uppstår om den ökade verksamheten i samband med produktionen av kolsänkor medför ökade produktionskostnader, sänker utbudet och höjer priset på de jordbruksprodukter som marknadsförs. Utbudet av samma produkter kan då öka någon annanstans. Kolläckaget uppstår om det ökade utbudet produceras med produktionsmetoder som är problematiska för klimatet, till exempel sådana som frigör kollagret i jordbruksmarken.

Jordbruksmarkernas potential som kolsänkor är erkänd, och produktionen av kolsänkeenheter för kolmarknaden kan således i framtiden vara möjlig också inom jordbruket. De ovannämnda utmaningarna fördröjer ändå uppkomsten av en sådan marknadsplats och igångsättningen av en kolhandel som beaktar jordbrukets kolsänkor.

(MO ja SL)

6. Utmaningar och möjligheter med en ökad kolbindning

Utmaningar

Bindandet av kol i permanent form i marken är en målsättning som är behäftad med många slags utmaningar. Den största utmaningen är att passa ihop olika målsättningar, verksamhetssätt och förhållanden så att jordbrukets huvuduppgift, produktionen av skörd och mat, kan skötas effektivt utan att marken lider.

Naturen har lyckats optimera maximeringen av kollagren i marken. För att människan ska klara av samma sak, och samtidigt odla marken, måste odlaren och hela jordbruksgemenskapen veta och förstå vilka åtgärder som gynnar kolbindningen och vilka som gör störst skada. Bristen på vetenskaplig information är en av de största utmaningarna när det gäller att öka kolbindningen. Mycket av den goda praxisen bygger på erfarenheter och forskningsinformation. När det gäller långtidseffekter och olika slags sameffekter behöver vi mer information.

En särskilt stor utmaning är att utreda och fastställa mängden och andelen av så kallat permanent kol i marken. En del av kolet i marken återförs ju mycket snabbt till atmosfären som koldioxid, och målsättningen för kolbindningen är i synnerhet att skapa ett bestående och långvarigt kollager i marken. Arbetet för att utveckla tillförlitliga mätare och bestämningsmetoder är därför av största vikt. Mer information och visshet om hur olika slags praxis fungerar på just den egna gården skulle sänka tröskeln för att ta i bruk nya metoder.

Ekonomin är en utmaning för sig. Åtgärder som medför ökade kostnader, osäkerhet eller risk för skördeminskning kan utgöra ett hinder för att inleda kolbindande odling. Olika slags incitament och stödformer, också kolhandel inom jordbruket, skulle påskynda ökningen av den kolbindande odlingen.

Tidsfaktorn

Förändringarna i kollagret i marken sker långsamt, och kollagren är svåra att mäta så exakt att små förändringar skulle vara enkla att upptäcka. På grund av de naturliga variationerna kan omfattande, statistiskt betydelsefulla förändringar ses först efter flera och upp till tiotals år.

Vid ökningen av kollagret tvingas man vanligen förlita sig på indirekta indikatorer och god praxis. Det är viktigt att nya odlingsmetoder testas för att vi så småningom ska få såväl användarerfarenheter som forskningsinformation. I det här arbetet är de aktiva kolodlarna i en avgörande position.

Med hjälp av jordmånsmodeller försöker man bedöma olika odlingsmetoders effekt på kollagret i marken också på kort sikt, och olika räknare för att bestämma kollagret i marken är under utveckling också i Finland.

Möjligheter

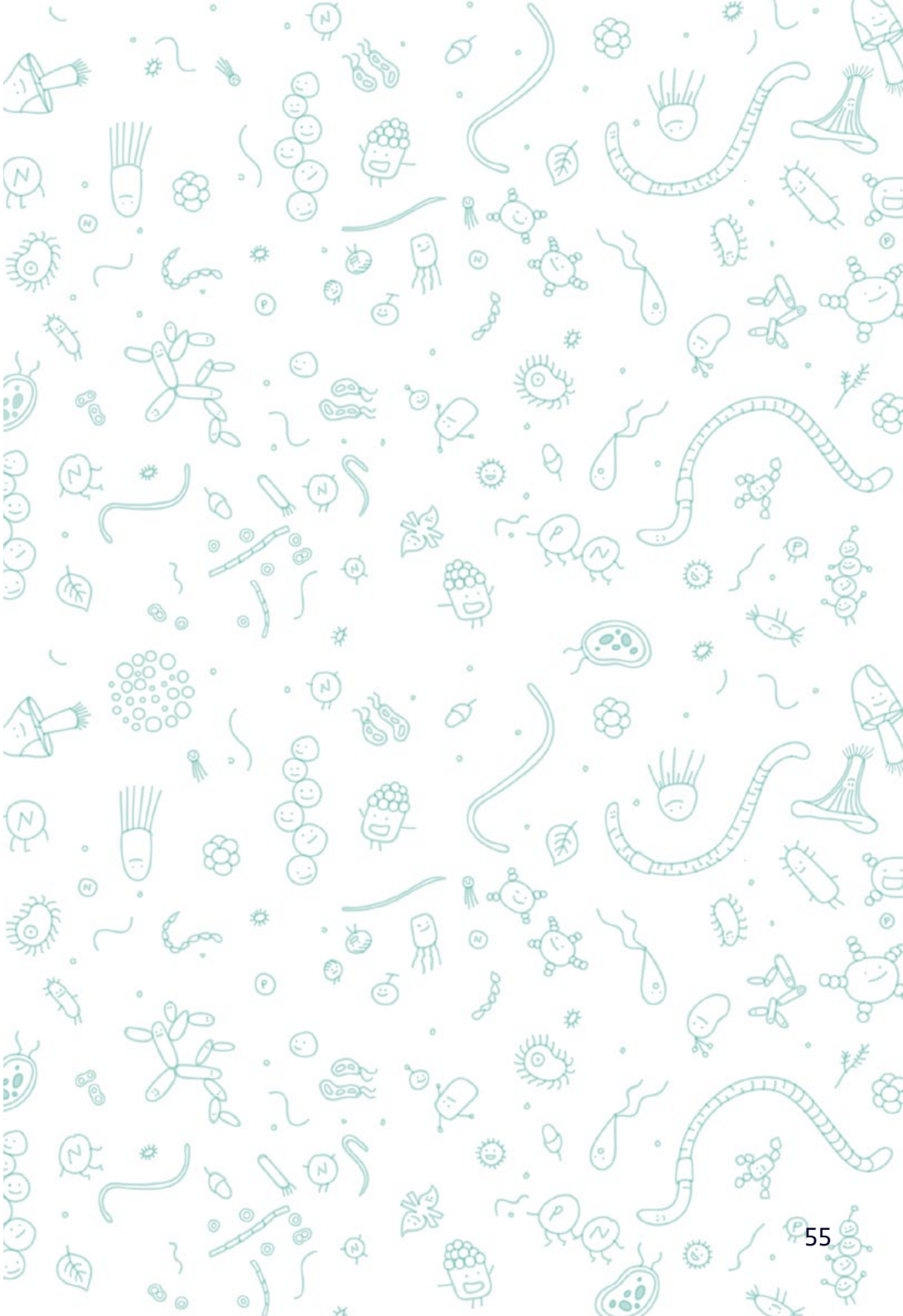
Trots utmaningarna och de långsamma förändringarna vet vi redan tillräckligt mycket om vilka odlingsmetoder som förbättrar kollagret i marken och leder utvecklingen i rätt riktning. Vi vet också att en ökning av kollagret i marken förbättrar markens mullhalt, och därigenom odlingsbarheten.

Kolodlingen utgör således inget hinder för en effektiv och produktiv odling. En mullrik åker i gott skick är på många sätt motståndskraftigare mot störningar och undantagstillstånd, såsom torka, än en motsvarande mullfattig åker i dåligt skick. Jordhälsan får ännu större betydelse i framtiden, eftersom man förutspår att de extrema väderfenomenen kommer att öka.

Kolodlingen är såväl nationellt som internationellt en av de mest lovande metoderna för att hindra klimatförändringens fortskridande genom att avlägsna kol från atmosfären. När klimatförändringen framskrider kommer kolbindningens betydelse att öka, och man kommer sannolikt att betala stöd för praxis som gynnar kolodlingen eller på något sätt integrera den i jordbrukets miljöersättningssystem.

Handel med kolenheter, på samma sätt som industrins utsläppshandel, är kanske framtidens sätt att ersätta odlaren för verksamhet som binder kol. Forskningen strävar efter att skapa så noggranna och tillförlitliga system för bestämning och mätning av kol, att också jordbruket i framtiden kunde delta i handeln med kolenheter.

(JHei)

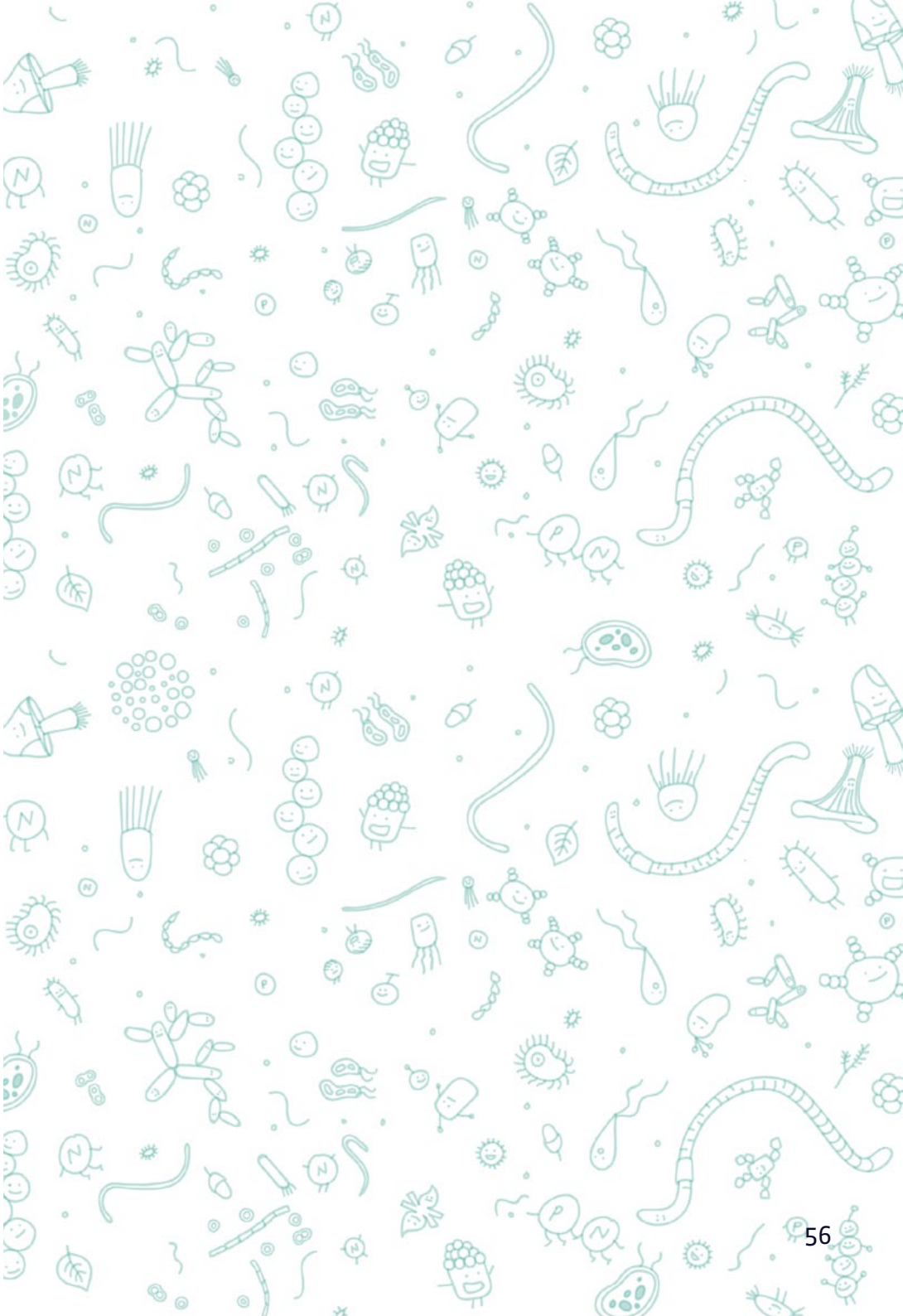


7. Till slut

Denna guide har kommit till i samarbete mellan många forskare. Tack till alla medverkande! Guiden behandlar kolet och jordbruket ur många olika perspektiv. Mycket finns också kvar att behandla.

Såväl i Finland som internationellt forskar man nu mycket aktivt kring kolbindningen i åkermarken, och det kommer hela tiden ny information. Förändringsprocesserna är å andra sidan långsamma, och de första resultaten kan inte alltid direkt tillämpas i praktiken. Eftersom det hela tiden produceras ny information är avsikten att också uppdatera den här guiden regelbundet. Redaktionen hoppas därför få in respons, nya observationer och forskningsresultat också från odlare och övriga som läser guiden, så att vi kan göra nästa version av den ännu bättre.

Tillsammans kan vi göra mycket för kolbindningen!



Termer och definitioner

Biomassa = Den totala massan av organismer inom ett visst område. Växtbiomassa är till exempel massan av all växtlighet inom ett visst område.

C = Kol, den kemiska beteckningen för kol.

CO_2 = Koldioxid. Oorganisk förening av kol och syre. Ett av utgångsmaterialen för assimilationen eller fotosyntesreaktionen och en av slutprodukterna av andningen eller respirationsreaktionen. Växthusgas som ökar strålningsdrivningen i atmosfären.

CH_4 =Metan. Oorganisk förening av kol och väte. Slutprodukt av rötning, dvs. nedbrytning av organiskt material i syrefri (anaerob) miljö. Växthusgas som ökar strålningsdrivningen i atmosfären, med 25 gånger högre växthusgaseffekt och 5 gånger kortare livstid än koldioxid.

SOC = Soil organic carbon, dvs. markens organiska kol, kol som ingår i det organiska materialet i marken.

Organiskt kol = Kol som ingår i det organiska materialet (material av organogent ursprung).

Organiskt material = Material av organogent ursprung. Material av vegetabiliskt eller animaliskt ursprung samt dess beståndsdelar och nedbrytningsprodukter.

Organogent material (material av organogent ursprung) = Organiskt material. Material av vegetabiliskt eller animaliskt ursprung samt dess beståndsdelar och nedbrytningsprodukter.

Mullhalt = Halten av organiskt material i åkermarken, enligt vilken mineraljordarna klassificeras som mullfattiga (organiskt material under 3 %), mullhaltiga (3–6 %), mullrika (6–12 %) och mycket mullrika (12–20 %).

Kolflöde till marken = Tillförsel av kol i marken. Kolflödet till marken kommer till exempel från det kol som finns i rotsystem och växtrester samt olika slags organiska gödsel- och jordförbättringsmedel.

Kollager = Ekosystem eller den del av ett ekosystem som har förmåga att binda eller frigöra kol. Världshaven är jordklotets största kollager. Landekosystemens största kollager är marken. I Finland utgör skogarna viktiga kollager, men också i skogarna är kollagret större i marken än i växtligheten.

Kolbindning = Process där kol från atmosfären lagras i permanent form i marken och kollagret i marken ökar. Kollagret kan ökas till exempel genom ett ökat kolflöde till marken (t.ex. organiska gödselmedel och ett kontinuerligt växttäcke som binder kol från luften och matar ned det i marken) och genom en minskad mineralisering av organiskt material (t.ex. reducerad bearbetning).

Kolsänka = Ekosystem eller den del av ett ekosystem där processerna binder kol från atmosfären i ett kollager som bildas av det organiska materialet. Jfr. kolkälla.

Kolkälla = Ekosystem eller den del av ett ekosystem där processerna ökar kollagret i atmosfären. Jfr. kolsänka.

Källförteckning

Artjoki, A. (2019): Hiilipolut tutuiksi. Maito ja me, facktidning för Valios ägarföretagare/01–2019, 50–51.

Baltic Sea Action Group: Carbon Action. https://carbonaction.org/viljelijat/. Läst 10.5.2019.

Carbon Farmers of Australia (2018): Carbon Farming, Available Methods. https://carbonfarmersofaustralia.com.au/carbon-farming/available-methods/. Läst 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 effiiciency: 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 analysis. Global Change Biology, Volume 8, 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. Läst 10.5.2019.

Interreg North Sea Region: Carbon Farming. https://northsearegion.eu/carbon-farming/. Läst 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 through a farmer training scholarship fund. https://kisstheground.com/farmland/. Läst 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/. Läst 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. Läst 13.5.2019.

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

CARBON ACTION
SVENSKFINLAND