

# Miljöeffekter av kolinlagrande jordbruk

En litteraturöversikt

Veera Naukkarinen, BSAG 2022



Miljöeffekter av kolinlagrande jordbruk  
– En litteraturöversikt

Veera Naukkarinen  
BSAG 2022

Den här rapporten är en översättning av LIFE Carbon Farming Scheme-projektets rapport  
"Impacts of carbon farming practices on biodiversity, nutrient leaching and climate – summary of the literature.  
Report from activity A4 of the LIFE CarbonFarmingScheme project."

# INTEGRERING AV KOLINLAGRANDE ODLINGSMETODER I PRODUKTIVT JORDBRUK

Bindningen av kol (C) i jordbruksmark är en av de viktigaste metoderna för att avlägsna koldioxid från atmosfären och lagra det i markecosystemen (Paustian et al. 2019). Nyckeln till att öka kolhalten i mineraljordarna ligger i odlingsmetoderna, såsom förbättrad växtföljd, odling av botten- och fånggrödor, odling av fleråriga vall- och baljväxter, skogsjordbruk, kvarlämnande av växtrester på åkern, ingen eller reducerad bearbetning, organiska gödselmedel, spridning av biokol och andra jordförbättringsmedel samt utveckling av betespraxis (Paustian et al. 2019, Almaraz et al. 2021). I denna litteraturöversikt avses med termen "kolinlagrande jordbruk" det holistiska förhållningssätt enligt målsättningarna för regenerativt jordbruk, där man vid sidan av matproduktionen stärker ekosystemet och ökar markens kollager (Hagelberg et al. 2020).

## Mångfalden är nyckeln

En mångsidig växtföljd med fleråriga grödor samt botten- och fånggrödor är ett effektivt sätt att öka assimilationen och utnyttja tidsperioder som annars är improduktiva för att öka kolbindningen och förbättra jordhälsan (King och Blesh 2018). Att förlänga tiden när marken är växttäckt och öka växtmångfalden är viktigt även för marksvamparna (Hannula och Morriën 2022), som vi vet spelar en viktig roll i kolcirkulationen (Hannula och Morriën 2022, Yang et al. 2022). Diversifierade växtsamhällen med olika slags rotsystem främjar såväl markens biologiska mångfald som svamparnas biomassa. Mångfalden av markorganismer binder kol, ökar mängden organiskt material i marken och ökar också skördarna (Zhang et al. 2021, Hannula och Morriën 2022).

Huvudprincipen för att höja kolhalten i marken är att öka odlingen av fleråriga grödor och hålla ett permanent växttäckte på åkern (King och

Blesh 2018). För matproduktionen behövs dock även ettåriga grödor. Ett möjligt sätt att öka markens kollager är att välja och utveckla växtsorter som ökar kolflödet till marken antingen genom en större rotbiomassa eller genom en större rotyta. Även om rotsystemet spelar en nyckelroll för inlagringen av organiskt kol i marken, är effekten av ett större rotsystem på långtidslagringen av kol inte uppenbar (Jansson et al. 2021). Till exempel visade ett nioårigt fältförsök i Michigan, USA, att rödhirs (*Panicum virgatum* L.) som användes som jordförbättringsgröda lagrade en betydligt mindre mängd organiskt kol i marken jämfört med ett växtsamhälle som utvecklats naturligt på samma område, även om rödhirsens rotsystem var avsevärt större (Kravchenko et al. 2019). Det är således inte självklart att grödor med större rotbiomassa är vägen till effektivare kolinlagring (Jansson et al. 2021). Ur kolbindningens perspektiv rekommenderas djuprotade grödor, men också en blandning av grödor med möjligast varierande rotdjup och rotstruktur på samma åker (Hannula och Morriën 2022).

Ett långliggande vallförsök i Jena, Tyskland, har visat att högre växtartsrikedom ökar halten organiskt kol i marken via positiva effekter på rotbiomassan, den mikrobiella tillväxten och kolhalten i den mikrobiella biomassan (Prommer et al. 2019). Artmångfaldens positiva effekt på kolbindningen konstaterades även vid ett 22-årigt försök där vallproduktionen återupptogs på övergiven jordbruksmark i Minnesota, USA (Yang et al. 2019). En metaanalys av McDaniel et al. (2013) visade vikten av en mångsidig växtföljd för kolbindningen: de kunde konstatera att kolet i marken ökade med 3,6 procent när en eller flera grödor lades till en monokultur, och med 8,5 procent när växtföljden inkluderade en botten- och fånggröda. Mångfalden av odlingsgrödor fungerar alltså som ett medel för kolinlagrande jordbruk.

# DET KOLINLAGRANDE JORDBRUKETS NYTTA FÖR NATURENS MÅNGFALD BEROR PÅ VÄXTFÖLJDEN

## Kolinlagrande jordbruk och naturens mångfald går hand i hand

I sammandragen från flera undersökningar konstateras att många kolinlagrande odlingsmetoder (tabell 1) antingen har positiv (Liu et al. 2016, Udawatta et al. 2019, Kim et al. 2020, Puissant et al. 2021, Hannula och Morriën 2022) eller neutral (Torralba et al. 2016, Puissant et al. 2021) inverkan på markens mikrobiella mångfald. Beträffande de kolinlagrande odlingsmetodernas inverkan på växt- och djurarternas mångfald ovan jord finns det mindre forskningsdata. Ett undantag är skogsjordbruk, som har visat sig ha ett flertal positiva effekter på den biologiska mångfalden som helhet (Torralba et al. 2016).

Hög växtdiversitet är fördelaktig för naturens mångfald. Inkludering av botten- och fånggrödor, i synnerhet i form av artrika blandningar, i växtföljden kan främja den funktionella mångfalden i jordbrukets ekosystem (Finney och Kaye 2016).

När det gäller mångfaldseffekten av ingen eller reducerad bearbetning är resultaten varierande. Till exempel visade en granskning av tyska data att markorganismerna reagerade olika på jordbearbetningen. Hos daggmaskarna ökade artmångfalden när bearbetningen minskade, medan mångfalden av hoppstjärtar och kvalster å andra sidan minskade vid övergång till reducerad bearbetning (van Capelle et al. 2012).

Vissa kolinlagrande odlingsmetoder kan ha motsatta effekter för olika organismgrupper. Till exempel rapporterar Morris (2021) att regenerativt bete (adaptivt rotationsbete med hög djurtäthet, korta betesperioder och långa viloperioder för betet) ökar den mikrobiella aktiviteten i marken och ofta ger en rikare jordbiota, men att vissa växt- och djursamhällen reagerar inkonsekvent med ökad, minskad eller neutral mångfald. Regenerativt bete är således inte alltid till nytta för

naturens mångfald, men kan anpassas för att ge mer heterogena livsmiljöer som är lämpliga för ett bredare spektrum av biota. I landskapet kan detta uppnås genom att man omväxlande planerar in intensivt och extensivt betade skiften. Djurtätheten samt varaktigheten och tidpunkten för betet kan anpassas för att uppnå det önskade spektret av livsmiljöer (Morris 2021).

Inom skogsjordbruket integreras ofta matproduktionen framgångsrikt med bevarandet av naturens mångfald (Rolo et al. 2020). Åtskilliga studier har visat positiva effekter av både trädjordbruk och betesskogsbruk på växter, djur och markens mikrobiella mångfald (Tsonkova et al. 2012, Varah et al. 2013, Moreno et al. 2015, Plieninger et al. 2015, Gibbs et al. 2016, Oldén et al. 2016, Torralba et al. 2016, Udawatta et al. 2019). Skogsjordbruk kan främja naturens mångfald på många sätt, inklusive att skapa livsmiljöer, skapa ekologiska korridorer mellan livsmiljöer och erbjuda ett alternativt sätt att främja naturens mångfald genom jordbruk (Udawatta et al. 2019).

På gårdsnivå bidrar alla de olika livsmiljöerna till att främja naturens mångfald. Naturens mångfald är alltså vid sidan av åkerkosystemen även beroende av andra livsmiljöer, såsom kantzonerna (Moreno et al. 2015). Åkerrenarna tillhandahåller ekosystemtjänster genom att erbjuda en livsmiljö för nyttiga insekter, som sköter pollineringen och den naturliga regleringen av skadegörare (Cole et al. 2020). I synnerhet vid intensivt odlade åkrar kan blommande åkerrenar vara ett stöd för utrotningshotade humlearter (Marja et al. 2018). Dessutom har häckar längs åkrarna visat sig gynna såväl naturens mångfald (Heath et al. 2017, Vanneste et al. 2020) som markens kolinlagring (Biffi et al. 2022). Med små åkerskiften och odlingsmetoder som ökar naturens mångfald kan man öka förekomsten av naturliga fiender och minska beroendet av kemiskt växtskydd (Redlich et al. 2021).

Tabell 1. De kolinlagrande odlingsmetodernas inverkan på naturens mångfald, vattenkvaliteten och utsläppen av kväveoxidul, dvs. lustgas (N<sub>2</sub>O). Siffrorna i varje cell refererar till de undersökningar som anges nedanför tabellen.

Metod	Mångfald			Vattenkvalitet			N <sub>2</sub> O		
	+	0	-	+	0	-	+	0	-
Ingen/minimal bearbetning	+	0	-	+		-			-
	3	12	3	1		15			8, 17, 18
Täckodling/ kvarlämnande av växtrester	+			+		-			-
	14			11		1			7
Fånggrödor/ gröngödsling	+	0		+	0		+		
	12, 13, 14, 19	19		1, 8, 9, 11, 15, 19	19		17, 19		
Skogsjordbruk	+			+			+	0	
	4, 5, 6			6, 8			17, 19	8, 10	
Organisk gödsel/ jordförbättrings- medel	+			+			+		-
	2, 12, 14			1			8		21
Biokol				+			+		
				8			8, 17, 18		
Fleråriga vallar	+			+		-	+		
	19			19		19	19		
Adaptivt rotationsbete	+	0	-				+		
	20	20, 22	20				23		

## KÄLLOR

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

# FUNGERANDE VATTENHUSHÅLLNING PÅ ÅKERN ÄR GRUNDEN FÖR KOLINLAGRANDE JORDBRUK

För en ökad inlagring av kol i marken krävs en effektiv tillväxt, vilket i sin tur kräver gynnsamma fuktförhållanden för grödorna. Såväl för torra som för våta förhållanden begränsar tillväxten, vilket har en direkt inverkan på kolflödet till marken (Heinonsalo, red., 2020). God vattengenomsläpplighet är en förutsättning för kolinlagrande jordbruk på mineraljordar. Häftiga regn och torka förutspås bli vanligare till följd av klimatförändringen, och en kontrollerad och tillräckligt grund dränering kan underlätta anpassningen av odlingen till klimatet (Castellano et al. 2019).

När åkerns dränering är i skick kan kolinlagrande jordbruk ha en positiv inverkan på markens vattenhushållning. Ett ökat växttäckte med antingen fleråriga vallar, botten- och fånggrödor (Hyvönen et al. 2020) eller skogsjordbruk (Tsonkova et al. 2012, Torralba et al. 2016) främjar erosionskontrollen och markens vattenhållningsförmåga. En ökning av halten organiskt material i marken förbättrar aggregatstabiliteten, vilket minskar vattenerosionen. Det organiska materialets inverkan på markens vattenhållningskapacitet begränsas dock av det faktum att ökningarna av det organiska materialet ofta främst koncentreras till ytjorden snarare än fördelas i hela markprofilen (Murphy 2015).

## EFFEKTEN AV KOLINLAGRANDE JORDBRUK PÅ VATTENKVALITETEN AVGÖRS AV MARKENS OCH VÄXTERNAS FÖRMÅGA ATT HÅLLA KVAR OCH ANVÄNDA NÄRINGSÄMNINGEN

### Kolinlagrande jordbruk kan bidra till att minska kväveurlakningen

Den övergripande effekten av kolinlagrande jordbruk på vattenkvaliteten är positiv. De kolinlagrande odlingsmetoderna har i flera undersökningar visat sig minska urlakningen av kväve (N) (Quemada et al. 2013, Olin et al. 2015, Abdalla et al. 2019, Hyvönen et al. 2020, Almaraz et al. 2021) med undantag för viss forskning som påvisar en ökad urlakning när växtrester lämnas kvar på åkern (Olin et al. 2015) och vid bearbetningsfri odling (Abdalla et al. 2019).

Enligt en metaanalys av Almaraz et al. (2021) var nettoeffekten av kolinlagrande odlingsmetoder på kvävecykeln positiv. Effekterna är mycket varierande och beror till exempel på odlingsgrödan. Den regionala variationen är också stor. För att öka markens kollager krävs en tillräcklig mängd tillgängligt kväve. Införandet av kolinlag-

rande odlingsmetoder kan minska kväveförlusterna och behovet av kvävegödsel. I vissa fall kan ytterligare kvävetillförsel behövas för att upprätthålla kolbindningen, vilket också kan resultera i ökade kväveförluster. Genom att kombinera olika kolinlagrande odlingsmetoder (skogsjordbruk, biokol, organiska jordförbättringsmedel, botten- och fånggrödor, bearbetningsfri odling) kan man minska kväveurlakningen och kväveutsläppen samtidigt som skördenivån bibehålls (Almaraz et al. 2021).

Urlakningen av nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) sker mestadels när ingenting växer på åkern. Botten- och fånggrödor som odlas mellan skördegrödorna kan främja bindningen av kväveöverskottet och minska urlakningen (Almaraz et al. 2021). I synnerhet användningen av gräsväxter som fånggröda verkar minska kväveurlakningen (Quemada et al. 2013, Valkama et al. 2015).

## Löslig fosfor utgör en risk för vattendragen

Även om ett långvarigt växttäckte på åkern minskar erosionen och belastningen av partikelbunden fosfor (P) på vattendragen, ökar det också halten löslig fosfor i vattendragen. Långvarig bearbetningsfri odling och växttäckte ökar skiktningen av fosfor i ytjorden, vilket i sin tur ökar risken för urlakning av löslig fosfor (Hyvönen et

al. 2020). Trots den ökade belastningen av löslig fosfor har Hyvönen et al. (2020) konstaterat att åkrar med växttäckte utgjorde en betydligt mindre total risk för vattendragen jämfört med vårsädsåkrar som plöjts under föregående höst. Det behövs dock mer forskning om den risk som löslig fosfor utgör i olika odlingsystem och växtföljder.

## UTÖVER KOLDIOXIDEN MÅSTE ÄVEN ANDRA VÄXTHUSGASER BEAKTAS

### Risken för utsläpp av kväveoxidul beror på odlingsmetoderna

Jordbruksjordarna är en betydande källa för kväveoxidul, dvs. lustgas ( $N_2O$ ), som är en kraftfull växthusgas. Om utsläppen av  $N_2O$  inte tas i beaktande kan möjligheterna att dämpa klimatförändringarna genom kolinlagrande jordbruk överskattas. Vissa metoder, som tillförsel av biokol i marken, kan till och med minska  $N_2O$ -utsläppen (Zhang et al. 2020, Almaraz et al. 2021, Guenet et al. 2021). Ingen eller reducerad bearbetning (Huang et al. 2018, Almaraz et al. 2021, Guenet et al. 2021), organisk gödsling (Charles et al. 2017, Zhou et al. 2017) och kvarlämnande av växtrester på åkern (Zhao et al. 2020) är å sin sida sådana kolinlagrande odlingsmetoder där den potentiella risken för ökade  $N_2O$ -utsläpp bör beaktas.

När jorden inte bearbetas samlas mer fukt i marken och luftväxlingen minskar. Detta ökar aktiviteten hos de anaeroba markmikroberna, vilket leder till ökade  $N_2O$ -utsläpp (Huang et al. 2018). Bearbetningsfri odling har visat sig öka  $N_2O$ -utsläppen från dåligt luftade jordar med låg vattengenomsläpplighet, medan effekten är mindre på bättre luftade jordar (Rochette 2008). En metaanalys av Mei et al. (2018) visar att ingen eller minimal jordbearbetning orsakar en betydande ökning av  $N_2O$ -utsläppen i tropiskt och varmt tempererat klimat, men inte i svalt tempererat klimat.

Användning av organiska gödselmedel kan öka utsläppen av  $N_2O$ . Jämfört med mineralisk kvävegödsling konstaterade Zhou et al. (2017) en markant ökning av  $N_2O$ -utsläppen med 1,83 procent, uttryckt som  $N_2O$ -emissionsfaktor, vid spridning av rågödsel. Spridning av förbehandlad gödsel ökade dock inte  $N_2O$ -utsläppen nämnvärt. Charles et al. (2017) visade på ökade utsläpp när organisk gödsel användes i kombination med mineralgödsel, medan Xia et al. (2020) återigen inte konstaterade någon skillnad i nettoutsläppen av  $N_2O$  mellan spridning av stallgödsel, kvarlämnande av växtrester och användning av mineralgödsel. Placering av stallgödsel i marken, vilket starkt rekommenderas för att minska avdunstningen av ammoniak ( $NH_3$ ), verkar öka  $N_2O$ -utsläppen (Zhou et al. 2017). Effekterna av spridning av organisk gödsel är också plats specifika och beroende till exempel på jordart och åkerns dräneringssituation (Charles et al. 2017, Zhou et al. 2017). Effektiva sätt att minska  $N_2O$ -utsläppen är bland annat att gödsla enligt grödornas behov, använda botten- och fånggrödor och reglera betesintensiteten (Montes et al. 2013)

## Små metanflöden i mineraljordarna

Metan (CH<sub>4</sub>) uppstår under anaeroba förhållanden i marken. Våtmarker och risfält är betydande källor till metanutsläpp (Dutaur och Verchot 2007). Dränering kan minska metanutsläppen genom förbättrad luftväxling i marken (Castellano et al. 2019). En stor datamängd som samlats in över hela Storbritannien visade att mineraljordarna antingen är små utsläppskällor eller små sänkor för metan, och jämfört med organiska jordar är metanutsläppen ringa (Levy et al. 2012). En undersökning i borealt klimat visade

att flerårig vall fungerar som en metansänka på mineraljordar med fungerande dränering (Lind et al. 2020).

Adaptivt rotationsbete (Adaptive multi-paddock grazing, AMP) har visat sig minska metanutsläppen från marken (Shrestha et al. 2020, Gomez-Casanovas et al. 2021). Däremot kan utsläppen som orsakas av enterisk jäsnings hos idisslare vara högre under AMP, särskilt vid högre betesintensiteter. Det är fortfarande okänt om minskningen av metanutsläppen till följd av betespraxis delvis kan kompensera för de högre utsläppen från idisslarna (Gomez-Casanovas et al. 2021).

## MER FORSKNING BEHÖVS OM KOLBINDNINGENS BESTÄNDIGHET

### Uppkomsten av långvarigt kollager i marken är en komplicerad process

Frågan om beständigheten för det kol som binds i marken kommer ofta fram i samband med diskussioner om kolkompensationer (Dynarski et al. 2020). Marken är en komplex miljö med ständigt rörliga och transformerande organiska föreningar som påverkar kolets livslängd. Även om mekanismen för hur svampar kontrollerar markens kolstabilisering till dags dato är okänd (Hannula och Morriën 2022), är det allmänt accepterat att den döda biomassan från mikrober, och i synnerhet svampar, gynnar ackumuleringen av det mest beständiga organiska kolet i marken (Liang et al. 2019, Hannula och Morriën 2022). De djupare markskikten har potential att ackumulera permanent kol, men forskning om kolbindning i de djupare skikten är sällsynt (Dynarski et al. 2020).

Markens kollager ökar inte i all oändlighet. När en kolinlagrande odlingsmetod tas i bruk ökar kollagret till en början, men ökningen avtar med tiden tills systemet når ett jämviktsstillstånd. För att kolet ska hållas kvar i marken måste den kolinlagrande odlingsmetoden fortsättningsvis användas, annars frigörs det kol som lagrats i åkermarken tillbaka till atmosfären (Thamo och Panell 2016).

Tidpunkten för när kolmättnad uppnås varierar stort beroende på platsen och odlingsmetoderna, och kan inträffa inom en period från 10 och upp till 100 år (Ruseva et al. 2020). Till följd av en process som kallas primingfenomenet kan tillförsel av organiskt material till marken dessutom stimulera nedbrytningen av gammalt och teoretiskt sett permanent markkol (Dynarski et al. 2020, Liu et al. 2020). Exempelvis kan den positiva effekten av odling av botten- och fånggrödor och inkludering av fleråriga grödor minska om den ökade koltillförseln påskyndar den mikrobiella nedbrytningen (Dynarski et al. 2020). Klimatuppvärmningen komplicerar markens koldynamik ytterligare, vilket kan resultera i negativa konsekvenser för markens kollager och minskningen av koldioxidhalten i atmosfären (Chen et al. 2020).

I bruktagningen av kolinlagrande odlingsmetoder borde inte få leda till kolläckage (eng. carbon leakage), som innebär att utsläppen av växthusgaser flyttas någon annanstans till följd av en sträng klimatpolitik. Läckaget kan delas in i två typer: indirekt läckage, vilket innebär att de åtgärder som ökar kolbindningen leder till åtgärder som ökar utsläppen på andra håll, och direkt läckage, vilket innebär att utsläppen härrör från de kolbindande åtgärderna (Thamo och Panell 2016). Risken för klimatpolitiskt relaterat kolläckage inom jordbrukssektorn är underforskad (Arvanitopoulos et al. 2021).



## Mångfalden ökar resiliensen hos jordbrukets ekosystem

Jordbruksnaturens mångfald utgör, som det redan konstaterats i denna rapport, en väsentlig del av det kolinlagrande jordbruket. Mångfalden kan ge jordbrukarna en naturlig försäkring mot fluktuationer i produktionen till följd av miljö- och marknadsförhållanden (Baumgärtner och Guaas 2007, Augeraud-Véron et al. 2019). Tryggandet av en större artmångfald och återställandet av den funktionella mångfalden i jordbrukslandskapen producerar ekosystemtjänster,

såsom pollinering, översvämningskydd och bekämpning av skadegörare, som i sin tur minskar variationerna i jordbrukets produktivitet (Gangatharan och Neri 2012, Augeraud-Véron et al. 2019). Mångfalden kan också förbättra markens bördighetsresiliens genom minskad vind- och vattenerosion. Ett växttäckande minskar i allmänhet erosionsproblemen oavsett mångfalden, men en kultur med flera arter ger med större sannolikhet ett skydd för åkern året runt (Gangatharan och Neri 2012).

## SLUTSATSER

Det är svårt att dra en allmängiltig slutsats om vilka kolinlagrande odlingsmetoder som är bäst ur alla aspekter av ekologisk hållbarhet. Odlingsmetoderna bör alltid tillämpas med hänsyn till de lokala förhållandena på regional, gårds- och skiftesnivå.

Forskningsrönen visar att kolinlagrande jordbruk baserat på enstaka åtgärder inte är det mest effektiva sättet att uppnå klimatförändringsreducerande effekter. Snarare är det inom jordbruket alltid fråga om en holistisk gårds- och växtföljdshantering, som påverkar produktionens totala effekt i relation till minskning av växthusgasutsläpp, naturens mångfald och vattenkvalitet.

Kolbindningen och upprätthållandet av kollagret kräver aktiv markvård. För att vara ett gångbart och hållbart alternativ för avlägsnande av koldioxid från atmosfären behöver de kolinlagrande odlingsmetoderna också integreras i det produktiva jordbruket.

# KÄLLOR

Abdalla, Mohamed & Hastings, Astley & Cheng, Kun & Yue, Qian & Chadwick, Dave & Espenberg, Mikk & Truu, Jaak & Rees, Bob & Smith, Pete. (2019). **A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity.**

Global Change Biology. 25. 10.1111/gcb.14644.

Almaraz, Maya & Wong, Michelle & Geoghegan, Emily & Houlton, Benjamin. (2021).

**A review of carbon farming impacts on nitrogen cycling, retention, and loss.**

Annals of the New York Academy of Sciences. 1505. 10.1111/nyas.14690.

Arvanitopoulos, Theodoros & Garsous, Grégoire & Agnolucci, Paolo. (2021).

**Carbon Leakage and Agriculture: A Literature Review on Emissions Mitigation Policies.**

OECD Food, Agriculture and Fisheries Working Papers, No. 169. 10.1787/9247f1e7-en.

Augeraud-Véron, Emmanuelle & Fabbri, Giorgio & Schubert, Katheline. (2019).

**The Value of Biodiversity as an Insurance Device.**

American Journal of Agricultural Economics. 101. 10.1093/ajae/aaz002.

Barré, Kévin & Le Viol, Isabelle & Julliard, Romain & Kerbiriou, Christian. (2018).

**Weed control method drives conservation tillage efficiency on farmland breeding birds.**

Agriculture Ecosystems & Environment. 256. 74-81. 10.1016/j.agee.2018.01.004.

Baumgärtner, Stefan & Quaas, Martin. (2007).

**Agro-Biodiversity as Natural Insurance and the Development of Financial Insurance Markets.**

SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.1013549.

Biffi, Sofia & Chapman, Pippa & Grayson, Richard & Ziv, Guy. (2022).

**Soil carbon sequestration potential of planting hedgerows in agricultural landscapes.**

Journal of Environmental Management. 307. 10.1016/j.jenvman.2022.114484.

Castellano, Michael & Archontoulis, Sotirios & Helmers, Matthew & Poffenbarger, Hanna & Six, J. (2019).

**Sustainable intensification of agricultural drainage.**

Nature Sustainability. 2. 914-921. 10.1038/s41893-019-0393-0.

Charles, Anaïs & Rochette, Philippe & Whalen, Joann & Angers, Denis & Chantigny, Martin & Bertrand, Normand. (2017). **Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis.**

Agriculture, Ecosystems & Environment. 236. 88-98. 10.1016/j.agee.2016.11.021.

Chen, Ji & Elsgaard, Lars & van Groenigen, Kees Jan & Olesen, Jørgen & Liang, Zhi & Jiang, Yu & Lærke, Poul & Zhang, Yuefang & Luo, Yiqi & Hungate, Bruce & Sinsabaugh, Robert & Jørgensen, Uffe. (2020).

**Soil carbon loss with warming: New evidence from carbon-degrading enzymes.**

Global Change Biology. 26. 1944-1952. 10.1111/gcb.14986.

Cole, Lorna & Stockan, Jenni & Helliwell, Rachel. (2020).

**Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: A review.** Agriculture, Ecosystems &

Environment. 296. 106891. 10.1016/j.agee.2020.106891.

Dutaur, Laure & Verchot, Louis. (2007). **A global inventory of the soil CH<sub>4</sub> sink.**

Global Biogeochemical Cycles - GLOBAL BIOGEOCHEM CYCLE. 21. 10.1029/2006GB002734.

Dynarski, Katherine & Bossio, Deborah & Scow, Kate. (2020).

**Dynamic Stability of Soil Carbon: Reassessing the "Permanence" of Soil Carbon Sequestration.**

Frontiers in Environmental Science. 8. 514701. 10.3389/fenvs.2020.514701.

Finney, Denise & Kaye, Jason. (2016).

**Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system.**

Journal of Applied Ecology. 54. 10.1111/1365-2664.12765.

Gangatharan, R. & Neri, Davide. (2012). **Can Biodiversity improve Soil Fertility Resilience in Agroecosystems?**

New Medit. 11. 11-18.

Gibbs, Sophie & Koblents, Hanita & Coleman, Brent & Gordon, Andrew & Thevathasan, Naresh & Williams, Peter. (2016). **Avian diversity in a temperate tree-based intercropping system from inception to now.**

Agroforestry Systems. 90. 10.1007/s10457-016-9901-7.

Gomez-Casanovas, Nuria & Blanc-Betes, Elena & Moore, Caitlin & Bernacchi, Carl & Kantola, I. & DeLucia, Evan. (2021). **A review of transformative strategies for climate mitigation by grasslands.**

Science of The Total Environment. 799. 149466. 10.1016/j.scitotenv.2021.149466.

Guenet, Bertrand & Gabrielle, Benoît & Chenu, Claire & Arrouays, Dominique & Balesdent, Jerome & Bernoux, Martial & Bruni, Elisa & Caliman, Jean-Pierre & Cardinael, Rémi & Chen, Songchao & Ciais, Philippe & Desbois, Dominique & Fouché, Julien & Frank, Stefan & Hénault, Catherine & Lugato, Emanuele & Naipal, Victoria & Nesme, Thomas & Obersteiner, Michael & Zhou, Feng. (2021).

**Can N<sub>2</sub>O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage?**

Global Change Biology. 27. 237-256. 10.1111/gcb.15342.

Hagelberg, E., Wikström, U., Joona, J. & Mattila, T. (2020).

**Regenerative agriculture: the new direction of food production.**

Baltic Sea Action Group.

Hannula, Silja & Morriën, Elly. (2022). **Will fungi solve the carbon dilemma?**

Geoderma. 413. 115767. 10.1016/j.geoderma.2022.115767.

Heath, Sacha & Soykan, Candan & Velas, Karen & Kelsey, Rodd & Kross, Sara. (2017). **A bustle in the hedgerow: Woody field margins boost on farm avian diversity and abundance in an intensive agricultural landscape.**

Biological Conservation. 212. 153-161. 10.1016/j.biocon.2017.05.031.

Heinonsalo, J. (eds.), Heimsch, L., Helenius, J., Huusko, M. K., Höijer, L., Joona, J. M., Kanerva, S., Karhu, K., Kekkonen, H. R., Koppelmäki, K., Kulmala, L., Lötjönen, S., Mattila, T. J., Ollikainen, M., Peltokangas, K., Regina, K., Soenne, H., Wikström, U & Viskari, T. (2020.)

**Hiiliopas : Katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin.**

1 toim , Carbon Action & Baltic Sea Action Group , Kaarina.

Huang, Yawen & Ren, Wei & Wang, Lixin & Hui, Dafeng & Grove, John & Yang, Xiaojuan & Tao, Bo & Goff, Ben.

(2018). **Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis.**

Agriculture, Ecosystems and Environment. 268. 144-153. 10.1016/j.agee.2018.09.002.

Hyvönen, Terho & Heliölä, Janne & Koikkalainen, Kauko & Kuussaari, Mikko & Lemola, Riitta & Miettinen, Antti & Rankinen, Katri & Lång, Kristiina & Turtola, Eila. (2020).

**Maatalouden ympäristötoimenpiteiden ympäristö- ja kustannustehokkuus (MYTTEHO): Loppuraportti.**

Report number: Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 12/2020. Affiliation: Natural Resources Institute Finland (Luke).

Jansson, Christer & Faiola, Ceila & Wingler, Astrid & Zhu, Xin-Guang & Kravchenko, Alexandra & Graaff, Marie-Anne & Ogden, Aaron & Handakumbura, Pubudu, & Werner, Christiane & Beckles, Diane. (2021).

**Crops for Carbon Farming.**

Frontiers in Plant Science. 10.3389/fpls.2021.636709.

Kim, Dong Gill & Kirschbaum, Miko & Beedy, Tracy. (2016). **Carbon sequestration and net emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies.**

Agriculture, Ecosystems & Environment. 226. 65-78. 10.1016/j.agee.2016.04.011.

- Kim, Nakian & Zabaloy, María & Guan, Kaiyu & Villamil, María. (2020). **Do cover crops benefit soil microbiome?** A meta-analysis of current research. *Soil Biology and Biochemistry*. 142. 107701. 10.1016/j.soilbio.2019.107701.
- King, A.E. and Blesh, J. (2018), **Crop rotations for increased soil carbon: perenniality as a guiding principle.** *Ecol Appl*, 28: 249-261. <https://doi.org/10.1002/eap.1648>
- Kravchenko, A. N., Guber, A. K., Razavi, B. S., Koestel, J., Quigley, M. Y., Robertson, G. P., et al. (2019). **Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization.** (vol 10, 3121, 2019). *Nat. Commun.* 10:12000.
- Levy, Peter & Burden, Annette & Cooper, Mark & Dinsmore, Kerry & Drewer, Julia & Evans, Chris & Fowler, David & Gaiawyn, Jenny & Gray, Alan & Jones, Stephanie & Jones, Timothy & Mcnamara, Niall & Mills, Robert & Ostle, Nicholas & Sheppard, Lucy & Skiba, U. & Sowerby, Alwyn & Ward, Sue & Zieliński, Piotr. (2012). **Methane emissions from soils: Synthesis and analysis of a large UK data set.** *Global Change Biology*. 18. 1657 - 1669. 10.1111/j.1365-2486.2011.02616.x.
- Liang, Chao & Amelung, Wulf & Lehmann, Johannes & Kaestner, Matthias. (2019). **Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter.** *Global Change Biology*. 25. 10.1111/gcb.14781.
- Lin, Brenda & Macfadyen, Sarina & Renwick, Anna & Cunningham, Saul & Schellhorn, Nancy. (2013). **Maximizing the Environmental Benefits of Carbon Farming through Ecosystem Service Delivery.** *BioScience*. 63. 793-803. 10.1525/bio.2013.63.10.6.
- Lind, Saara & Virkajärvi, Perttu & Hyvönen, Niina & Maljanen, Marja & Kivimäenpää, Minna & Jokinen, Simo & Antikainen, Sanna & Latva, Mira & Rätty, Mari & Martikainen, Pertti & Shurpali, Narasinha. (2020). **Carbon dioxide and methane exchange of a perennial grassland on a boreal mineral soil.** *Boreal Environment Research*. 25. 1-17.
- Liu, Ting & Chen, Xiaoyun & Hu, Feng & Ran, Wei & Shen, Qirong & Li, Huixin & Whalen, Joann. (2016). **Carbon-rich organic fertilizers to increase soil biodiversity: Evidence from a meta-analysis of nematode communities.** *Agriculture Ecosystems & Environment*. 232. 199-207. 10.1016/j.agee.2016.07.015.
- Liu, Xiao-Jun Allen & Finley, Brianna & Mau, Rebecca & Schwartz, Egbert & Dijkstra, Paul & Bowker, Matthew & Hungate, Bruce. (2020). **The soil priming effect: Consistent across ecosystems, elusive mechanisms.** *Soil Biology and Biochemistry*. 107617. 10.1016/j.soilbio.2019.107617.
- Marja, Riho & Viik, Eneli & Mänd, Marika & Phillips, James & Klein, Alexandra & Batary, Peter. (2018). **Crop rotation and agri-environment schemes determine bumblebee communities via flower resources.** *Journal of Applied Ecology*. 55. 10.1111/1365-2664.13119.
- Mcdaniel, Marshall & Tiemann, L. & Grandy, Stuart. (2013). **Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis.** *Ecological Applications*. 24. 10.1890/13-0616.1.
- McDonald, Sarah & Lawrence, Rachel & Kendall, Liam & Rader, Romina. (2019). **Ecological, biophysical and production effects of incorporating rest into grazing regimes: A global meta-analysis.** *Journal of Applied Ecology*. 56. 10.1111/1365-2664.13496.
- Mei, Kun & Wang, Zhenfeng & Huang, Hong & Zhang, Chi & Shang, Xu & Dahlgren, Randy & Zhang, Minghua & Xia, Fang. (2018). **Stimulation of N<sub>2</sub>O emission by conservation tillage management in agricultural lands: A meta-analysis.** *Soil and Tillage Research*. 182. 86-93. 10.1016/j.still.2018.05.006.

Montes, F & Meinen, Robert & Dell, C & Rotz, C.A. & Hristov, A & Oh, Joonpyo & Waghorn, G & Gerber, Pierre J. & Henderson, Benjamin & Makkar, Harinder & Dijkstra, Jan. (2013).

**SPECIAL TOPICS -- Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II.**

**A review of manure management mitigation options.**

Journal of animal science. 91. 5070-5094. 10.2527/jas.2013-6584.

Moreno, Gerardo & Gonzalez-Bornay, Guillermo & Pulido, Fernando & López-Díaz, María Lourdes & Bertomeu, Manuel & Juárez, Enrique & Díaz, Mario. (2015). **Exploring the causes of high biodiversity of Iberian dehesas: the importance of wood pastures and marginal habitats.**

Agroforestry Systems. 90. 10.1007/s10457-015-9817-7.

Morris, Craig. (2021). **How Biodiversity-Friendly Is Regenerative Grazing?**

Frontiers in Ecology and Evolution. 23. 9:816374.. 10.3389/fevo.2021.816374.

Murphy, B.W. (2015).

**Impact of soil organic matter on soil properties – a review with emphasis on Australian soils.**

Soil Research 53, 605 - 635. Soil Research. 53. 605 - 635. 10.1071/SR14246.

Oldén, Anna & Raatikainen, Kaisa & Tervonen, Kaisa & Halme, Panu. (2016).

**Grazing and soil pH are biodiversity drivers of vascular plants and bryophytes in boreal wood-pastures.**

Agriculture, Ecosystems & Environment. 222. 171-184. 10.1016/j.agee.2016.02.018.

Olin, S., Lindeskog, M., Pugh, T. A. M., Schurgers, G., Wårlind, D., Mishurov, M., Zaehle, S., Stocker, B. D., Smith, B., and Arneeth, A. (2015). **Soil carbon management in large-scale Earth system modelling: implications for crop yields and nitrogen leaching.**

Earth Syst. Dynam., 6, 745–768.

Paustian, Keith & Larson, Eric & Kent, Jeffrey & Marx, Ernie & Swan, Amy. (2019).

**Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy.**

Frontiers in Climate. 1. 10.3389/fclim.2019.00008.

Plieninger, Tobias & Hartel, Tibor & Martín-López, Berta & Beaufoy, Guy & Bergmeier, Erwin & Kirby, Keith & Montero, María & Moreno, Gerardo & Oteros-Rozas, Elisa & Van Uytvanck, Jan. (2015).

**Wood-pastures of Europe: Geographic coverage, social-ecological values, conservation management, and policy implications.**

Biological Conservation. 190. 70-79. 10.1016/j.biocon.2015.05.014.

Prommer, Judith & Walker, Tom & Wanek, Wolfgang & Braun, Judith & Zezula, David & Hu, Yuntao & Hofhansl, Florian & Richter, Andreas. (2019).

**Increased microbial growth, biomass and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity.**

Global Change Biology. 26. 10.1111/gcb.14777.

Puissant, Jérémy & Villenave, Cécile & Chauvin, Camille & Plassard, Claude & Blanchart, Eric & Trap, Jean & Blanchart, Eric. (2021).

**Quantification of the global impact of agricultural practices on soil nematodes: A meta-analysis.**

Soil Biology and Biochemistry. 10.1016/j.soilbio.2021.108383.

Quemada, M. & Baranski, Marcin & Lange, M.N.J. & Vallejo, A. & Cooper, Julia. (2013). **Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield.**

Agriculture, Ecosystems & Environment. 174. 1–10. 10.1016/j.agee.2013.04.018.

Redlich, S, Martin, EA, Steffan-Dewenter, I. **Sustainable landscape, soil and crop management practices enhance biodiversity and yield in conventional cereal systems.**

J Appl Ecol. 2021; 58: 507– 517. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13821>

- Rochette, Philippe. (2008). **No-till only increase N<sub>2</sub>O emissions in poorly-aerated soils.** Soil and Tillage Research. 101. 97-100. 10.1016/j.still.2008.07.011.
- Rolo, Victor & Hartel, Tibor & Berg, Staffan & Crous-Duran, J. & Franca, Antonello & Mirck, Jaconette & Palma, Joao & Pantera, Anastasia & Paulo, Joana & Pulido, Fernando & Seddaiu, Gioavanna & Thenail, Claudine & Varga, Anna & Viaud, Valérie & Burgess, Paul & Moreno, Gerardo. (2020). **Challenges and innovations for improving the sustainability of European agroforestry systems of high nature and cultural value: stakeholder perspectives.** Sustainability Science. 15. 10.1007/s11625-020-00826-6.
- Ruseva, Tatyana & Hedrick, Jamie & Marland, Gregg & Tovar, Henning & Sabou, Carina & Besombes, Elia. (2020). **Rethinking standards of permanence for terrestrial and coastal carbon: implications for governance and sustainability.** Current Opinion in Environmental Sustainability. 45. 69-77. 10.1016/j.cosust.2020.09.009.
- Shrestha, Bharat M. & Bork, Edward & Chang, Scott & Carlyle, Cameron & Ma, Zilong & Döbert, Timm & Kaliaskar, Dauren & Boyce, Mark. (2020). **Adaptive Multi-Paddock Grazing Lowers Soil Greenhouse Gas Emission Potential by Altering Extracellular Enzyme Activity.** Agronomy. 10. 1781. 10.3390/agronomy10111781.
- Thamo, Tas & Pannell, David. (2016). **Challenges in developing effective policy for soil carbon sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence.** Climate Policy. 16. 973–992. 10.1080/14693062.2015.1075372.
- Torralba, Mario & Fagerholm, Nora & Burgess, Paul & Moreno, Gerardo & Plieninger, Tobias. (2016). **Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis.** Agriculture, Ecosystems & Environment. 230. 150-161. 10.1016/j.agee.2016.06.002.
- Tsonkova, P., Böhm, C., Quinkenstein, A. et al. **Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: a review.** Agroforest Syst 85, 133–152 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9494-8>
- Udawatta, Ranjith & Rankoth, Lalith & Jose, Shibu. (2019). **Agroforestry and Biodiversity.** Sustainability. 11. 2879. 10.3390/su11102879.
- Valkama, Elena & Lemola, Riitta & Känkänen, Hannu & Turtola, Eila. (2015). **Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries.** Agriculture Ecosystems & Environment. 203. 93-101. 10.1016/j.agee.2015.01.023.
- van Capelle, Christine & Schrader, Stefan & Brunotte, Joachim. (2012). **Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data.** European Journal of Soil Biology. 50. 165–181. 10.1016/j.ejsobi.2012.02.005.
- Vanneste, Thomas & Van Den Berge, Sanne & Riské, Enya & Brunet, Jörg & Decocq, Guillaume & Diekmann, Martin & Graae, Bente & Hedwall, Per-Ola & Lenoir, Jonathan & Liira, Jaan & Lindmo, Sigrid & Litza, Kathrin & Naaf, Tobias & Orczewska, Anna & Wulf, Monika & Verheyen, Kris & Frenne, Pieter. (2020). **Hedging against biodiversity loss: Forest herbs' performance in hedgerows across temperate Europe.** Journal of Vegetation Science. 31. 10.1111/jvs.12917.
- Varah, Alexa & Jones, H. & Smith, Jo & Potts, Simon. (2013). **Enhanced biodiversity and pollination in UK agroforestry systems.** Journal of the science of food and agriculture. 93. 10.1002/jsfa.6148.
- Xia, Fang & Mei, Kun & Xu, Yan & Zhang, Chi & Dahlgren, Randy & Zhang, Minghua. (2020). **Response of N<sub>2</sub>O emission to manure application in field trials of agricultural soils across the globe.** Science of The Total Environment. 733. 139390. 10.1016/j.scitotenv.2020.139390.

Yang, Y., Tilman, D., Furey, G. et al.

**Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity.**

Nat Commun 10, 718 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>

Yang, Yali & Xie, Hongtu & Mao, Zhun & Bao, Xuelian & He, Hongbo & Zhang, Xudong & Liang, Chao. (2022).

**Fungi determine increased soil organic carbon more than bacteria through their necromass inputs in conservation tillage croplands.**

Soil Biology and Biochemistry. 167. 108587. [10.1016/j.soilbio.2022.108587](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108587).

Zhang, Qi & Xiao, Jing & Xue, Jianhui & Zhang, Lang. (2020). **Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-Analysis.**

Sustainability. 12. 3436. [10.3390/su12083436](https://doi.org/10.3390/su12083436).

Zhang, Kaile & Maltais-Landry, Gabriel & Liao, Hui-Ling. (2021).

**How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations.**

Soil Biology and Biochemistry. 156. 108219. [10.1016/j.soilbio.2021.108219](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108219).

Zhao, Xin & Liu, Bingyang & Liu, Shengli & Qi, Jianying & Xing, Wang & pu, Chao & Li, Shuai-Shuai & Zhang, Xiong-Zhi & Yang, Xiao-Guang & Lal, Rattan & Chen, Fu & Zhang, Hailin. (2020).

**Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis.**

Land Degradation and Development. 31. [10.1002/ldr.3492](https://doi.org/10.1002/ldr.3492).

Zhou, Minghua & Zhu, Bo & Wang, Shijie & Zhu, Xinyu & Vereecken, Harry & Brüggemann, Nicolas. (2017).

**Stimulation of N<sub>2</sub>O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis.**

Global change biology. 23. [10.1111/gcb.13648](https://doi.org/10.1111/gcb.13648).



## Miljöeffekter av kolinlagrande jordbruk – En litteraturöversikt

Veera Naukkarinen  
BSAG 2022

Den här rapporten är en översättning av LIFE Carbon Farming Scheme-projektets rapport "Impacts of carbon farming practices on biodiversity, nutrient leaching and climate – summary of the literature. Report from activity A4 of the LIFE CarbonFarmingScheme project."



Delfinansierat av  
EU:s LIFE-program