

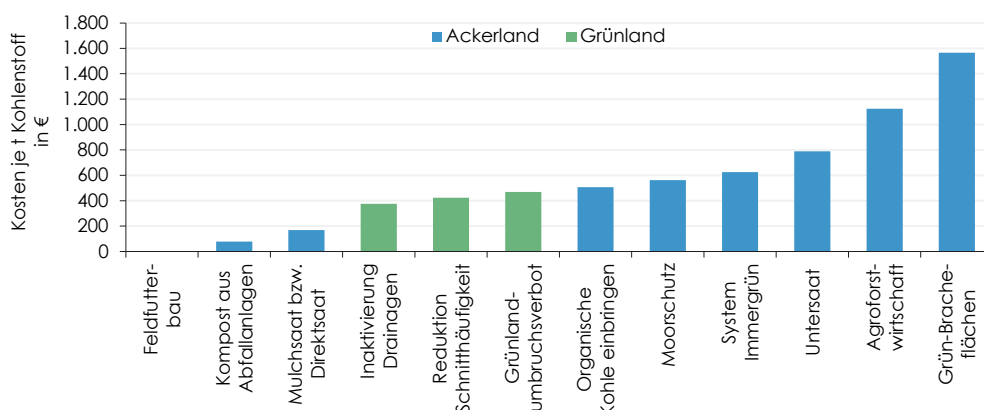
Kohlenstoffsequestrierung in Österreichs Acker- und Grünlandböden

Bedeutung und ökonomische Effekte ausgewählter Maßnahmen

Ina Meyer, Franz Sinabell, Gerhard Streicher (WIFO), Heide Spiegel (AGES), Andreas Bohner (HBLFA Raumberg-Gumpenstein)

- Für die Einhaltung der Pariser Klimaziele sind neben der Dekarbonisierung der Energiesysteme aller Voraussicht nach Maßnahmen zur Abscheidung und Speicherung (Sequestrierung) von Kohlenstoff aus der Atmosphäre erforderlich.
- Die einzelwirtschaftlichen Kosten ausgewählter Sequestrierungsmaßnahmen in Österreichs Acker- und Grünlandböden reichen von 0 € je ha und Jahr im Feldfutterbau bis zu 450 € je ha und Jahr bei der Nichtnutzung von Moorböden als Ackerflächen.
- Die Landwirtschaft hat in einem für Österreich spezifizierten Szenario der Kohlenstoffsequestrierung mit negativen Wertschöpfungseffekten zu rechnen. Andere Sektoren gewinnen durch geänderte Vorleistungsstrukturen an Wertschöpfung. In Summe ergibt sich ein leichter Zuwachs von rund 100 Mio. € p. a.
- Neben einer gewissen Abschwächung der Erderwärmung bieten Maßnahmen der Kohlenstoffspeicherung in Böden Vorteile für die Anpassung an den Klimawandel und die Ernährungssicherheit.
- Hinsichtlich des Bodenkohlenstoffgehalts sowie der Potenziale und Co-Benefits einer zusätzlichen Kohlenstoffspeicherung in Böden besteht nach wie vor Forschungsbedarf.

Grenzkosten der Kohlenstoffanreicherung in Acker- und Grünlandböden



"Eine grundlegende Annahme ist, dass sich die Kohlenstoffsequestrierung im Boden allmählich verlangsamt und eine Sättigung erreicht wird, wenn eine SCS-Maßnahme zumindest zehn Jahre lang kontinuierlich angewendet wird. Die Weiterführung der Praktik ist nötig, um einen Abbau des angereicherten Kohlenstoffs zu verhindern."

In den letzten etwa 25 Jahren wurden bereits viele Maßnahmen mit Relevanz für die Kohlenstoffsequestrierung, wie z. B. Begrünungen, Mulch- und Direktsaat, angewendet – u. a. im Rahmen des österreichischen Agrarumweltprogramms ÖPUL (Q: WIFO-Darstellung).

Kohlenstoffsequestrierung in Österreichs Acker- und Grünlandböden

Bedeutung und ökonomische Effekte ausgewählter Maßnahmen

Ina Meyer, Franz Sinabell, Gerhard Streicher (WIFO), Heide Spiegel (AGES), Andreas Bohner (HBLFA Raumberg-Gumpenstein)

Kohlenstoffsequestrierung in Österreichs Acker- und Grünlandböden. Bedeutung und ökonomische Effekte ausgewählter Maßnahmen

Die Pariser Klimaziele sind nach Berechnungen mit globalen Klimamodellen nur durch negative Emissionen, also durch Entnahme eines Teils des ausgestoßenen CO₂ aus der Atmosphäre und Speicherung zu erreichen. Maßnahmen zur Kohlenstoffbindung in Böden (Soil Carbon Sequestration – SCS) durch Humusaufbau in Ackerland und Grünland sind Teil der internationalen Kohlenstoff-Agenda, etwa im Rahmen der "4-per-mille"-Initiative. Sie tragen zugleich zur Anpassung an den Klimawandel und zur Ernährungssicherheit bei und weisen somit wichtige Zusatznutzen (Co-Benefits) auf. Der vorliegende Beitrag entwirft ein "4-per-mille"-Szenario für Österreich und schätzt die einzel- und gesamtwirtschaftlichen Effekte ausgewählter SCS-Maßnahmen. Die einzelwirtschaftlichen Kosten reichen von 0 € je ha und Jahr im Feldfutterbau bis zu 450 € je ha und Jahr bei der Nichtnutzung von Moorböden als Ackerflächen. Die gesamtwirtschaftlichen Effekte sind leicht positiv und belaufen sich auf 100 Mio. € p. a. SCS-Maßnahmen verursachen den einzelnen Landwirt:innen in der Regel zusätzliche Kosten, während die Vorteile oftmals nicht monetärer Natur sind. Daher sollte die Umstellung auf eine klimaschonende und resiliente Landwirtschaft durch agrarpolitische Programme und finanzielle Anreize, wie sie aus dem Österreichischen Programm für umweltgerechte Landwirtschaft (ÖPUL) bekannt sind, begleitet werden.

JEL-Codes: Q15, Q54, Q57 • **Keywords:** Kohlenstoffsequestrierung in Böden, negative Emissionen, Klimaschutz, Klimawandelanpassung, Transformation der Landwirtschaft, ökonomische Effekte von SCS

Der vorliegende Beitrag beruht auf der Studie "Carbon Sequestration in Austrian Soils – CASAS" von Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Umweltbundesamt und WIFO. Die Studie wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds und im Rahmen des "Austrian Climate Research Programme" gefördert.

Begutachtung: Katharina Falkner (WIFO) • **Wissenschaftliche Assistenz:** Susanne Markytan (susanne.markytan@wifo.ac.at), Dietmar Weinberger (dietmar.weinberger@wifo.ac.at) • Abgeschlossen am 13. 3. 2023

Kontakt: Ina Meyer (ina.meyer@wifo.ac.at), Franz Sinabell (franz.sinabell@wifo.ac.at), Gerhard Streicher (gerhard.streicher@wifo.ac.at), Heide Spiegel (adelheid.spiegel@ages.at), Andreas Bohner (andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at)

Carbon Sequestration in Austria's Arable and Grassland Soils. Importance and Economic Effects of Selected Measures

According to calculations with global climate models, the Paris climate targets can only be achieved with negative emissions, i.e., by removing part of the emitted CO₂ from the atmosphere and storing it. Measures for soil carbon sequestration (SCS) by building up humus in arable land and grassland are part of the international carbon agenda, e.g. under the "4-per-mille" initiative. They simultaneously contribute to climate change adaptation and food security, and thus have important co-benefits. This paper specifies a "4-per-mille" scenario for Austria and estimates the microeconomic and macroeconomic effects of selected SCS measures. The microeconomic costs range from 0 € per ha and year in field fodder production to 450 € per ha and year in non-use of peat soils as arable land. The macroeconomic effects are slightly positive and amount to 100 million € p.a. SCS measures usually impose additional costs on individual farmers, while the benefits and co-benefits with the measures are often of non-monetary type. Therefore, the conversion to climate-friendly and resilient agriculture should be accompanied by agricultural policy programmes and financial incentives, as they are known from the Austrian Agri-environmental Programme (ÖPUL).

1. Kohlenstoffsequestrierung in Böden

Der Kohlenstoffsequestrierung in Böden kommt eine wichtige Funktion bei der Eindämmung des Klimawandels zu.

Mit der Einigung auf das Pariser Klimaschutzabkommen wurde ein internationaler Konsens erzielt, Anstrengungen zu unternehmen, den globalen Temperaturanstieg auf +1,5°C bzw. auf höchstens +2°C gegenüber dem

vorindustriellen Niveau zu begrenzen (United Nations, 2015). Um dies zu erreichen, ist ein rascher Verzicht auf fossile Energieträger in weltweiten Energiesystemen erforderlich, mit

dem Ziel, Netto-Null-CO₂-Emissionen¹⁾ bis zur Mitte des Jahrhunderts zu erreichen (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Wie globale Klimamodelle zeigen, wird die Erderwärmung nur durch negative Emissionen, d. h. durch Entnahme eines Teils des ausgestoßenen CO₂ aus der Atmosphäre, im angestrebten Temperaturfenster zu halten sein (IPCC, 2022; Erlach et al., 2022; Fuss et al., 2018). Zusätzlich zur unerlässlichen Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch Energieeffizienzmaßnahmen und eine Transformation der Energiesysteme in Richtung erneuerbarer Energieträger sind daher Technologien und Maßnahmen zur Abscheidung und Speicherung (Sequestrierung) von Kohlenstoff aus der Atmosphäre erforderlich. Hierzu zählen u. a. Verfahren zur direkten Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff ("direct air carbon capture and storage"), Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung ("bioenergy with carbon capture and storage"), Aufforstung sowie Maßnahmen zur Kohlenstoffbindung in Böden (Soil Carbon Sequestration – SCS) durch Humusaufbau in Ackerland, Grünland und Wäldern (Erlach et al., 2022; Fuss et al., 2018). Die dauerhafte Festlegung von Kohlenstoff in langlebigen Holzbauten ist ebenfalls eine Option (vgl. Sinabell & Streicher, 2021).

Während die technischen Verfahren hohe Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie in Anlagen erfordern und teilweise viel Energie verbrauchen, benötigt die Aufnahme von CO₂ über Pflanzen durch Aufforstung in der Regel sehr viel Fläche. Das kann zu Landnutzungskonflikten führen (Erlach et al., 2022). Die Kohlenstoffsequestrierung in bereits bewirtschafteten Acker- und Grünlandböden weist demgegenüber wichtige Vorteile auf, wenngleich das Mitigationspotenzial pro Flächeneinheit relativ gering ist. Je nach Maßnahmenmix hat sie vernachlässigbare Auswirkungen auf die Landnutzung, da sie in vielen Fällen ohne Änderung der Flächennutzung auf bewirtschafteten Böden praktiziert werden kann. Maßnahmen der Kohlenstoffsequestrierung in Böden sind zudem einigen Studien zufolge vergleichsweise günstig. Fallweise werden negative Sequestrierungskosten erwartet, womit auch Charakteristika einer "no-regret"-Strategie vorliegen (Fuss et al., 2018; Sykes et al., 2020). Zudem spielen SCS-Maßnahmen eine wichtige Rolle in der Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel; sie erhöhen die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) von Agrarökosystemen und tragen zur Ernährungssicherheit bei (Amelung

et al., 2020). SCS-Maßnahmen können daher auch als ein integraler Bestandteil der von internationalen Organisationen geforderten Wiederherstellung von degradierten Böden und Ökosystemen betrachtet werden (Díaz et al., 2019; United Nations Environmental Programme, 2022).

Es wird bereits seit einiger Zeit argumentiert, dass die Kohlenstoffbindung in Böden einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann (Lal, 2004). So sind Böden Teil der internationalen Kohlenstoff-Agenda für die Abschwächung und die Anpassung an den Klimawandel geworden, etwa in Form der "4-per-mille"-Initiative (Amelung et al., 2020). Diese Initiative wurde durch Frankreich angestoßen und auf der Pariser Klimakonferenz (COP21) der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) am 1. Dezember 2015 ins Leben gerufen. Sie hat zum Ziel, den weltweiten Bestand an organischer Substanz in den obersten 0,3 m bis 0,4 m aller Nichtpermafrostböden um 0,4% pro Jahr zu steigern, um den Ausstoß von Treibhausgasen aus anthropogenen Quellen teilweise auszugleichen (Minasny et al., 2017; Rumpel et al., 2018).

Das Verständnis der Möglichkeiten und Bedingungen der permanenten Kohlenstoffsequestrierung und damit der Senkenfunktion der Böden ist noch unvollständig (Tiefenbacher et al., 2021; Bruni et al., 2022; Lal 2022). Die Bodenart, die oberirdische Vegetation, das Klima und die Geschwindigkeit, mit der die Bodenorganismen den Kohlenstoff verwerten, beeinflussen sämtlich die Sequestrierungsrate. Die Vielfalt der landwirtschaftlichen Praktiken und Umweltbedingungen stellt daher eine Herausforderung für die agrarpolitische Konzeption und Umsetzung von SCS-Maßnahmen dar. Regionale Strategien zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs müssen lokale Bodentypen, klimatische Bedingungen, das Tempo des Klimawandels und sozioökonomischer Kontexte berücksichtigen. Zudem müssen die gewählten Maßnahmen unter Einsatz von Technologie (Stichprobenkontrollen oder Fernerkundung) regelmäßig überprüft und evaluiert werden.

Der vorliegende Beitrag schätzt die mit einem ausgewählten SCS-Maßnahmen-szenario für Österreich verbundenen einzelwirtschaftlichen Kosten und gesamtwirtschaftlichen Effekte, gibt einen Überblick über den damit verbundenen Zusatznutzen und leitet Handlungsempfehlungen für die Politik ab.

Böden sind u. a. mit der "4-per-mille"-Initiative, die den Bestand organischer Substanz um 0,4% pro Jahr erhöhen will, zum Gegenstand der internationalen Kohlenstoff-Agenda geworden.

¹⁾ Die Nettoemissionen sind die Differenz der in die Atmosphäre gelangenden Treibhausgasemissionen und

der Menge an Treibhausgasen, die der Atmosphäre entzogen werden.

2. Maßnahmen und Potenziale der Kohlenstoffsequestrierung in Österreichs Acker- und Grünlandböden

In den letzten etwa 25 Jahren wurden im Rahmen des ÖPUL bereits relevante SCS-Maßnahmen angewendet. In den behandelten Böden dürfte sich bereits ein Fließgleichgewicht im organischen Kohlenstoff- bzw. Humusgehalt eingestellt haben.

Auf Basis umfangreicher Literaturrecherchen sowie Expert:innenwissen und Beprobungen durch die jeweiligen Fachinstitutionen wurden die für Österreich bestgeeigneten Maßnahmen für die Kohlenstoffspeicherung in Böden herausgearbeitet.

2.1 Ackerland

Für Ackerböden werden folgende Bewirtschaftungsmaßnahmen vorgeschlagen, um den organischen Kohlenstoff im Boden zu erhalten bzw. den Kohlenstoffvorrat zu erhöhen.

- Die Sicherstellung einer möglichst ganzjährigen pflanzlichen Bodenbedeckung, einschließlich
 - standortangepasster Fruchtfolgen,
 - Feldfutterbau,
 - Grünbrache, Zwischenfrüchte, Begrünungen, Untersaaten sowie des
 - Belassens von Ernterückständen am Feld,
- reduzierte Bodenbearbeitung,
- die Aufbringung organischen Materials (z. B. Kompost aus Abfällen, Biokohle),
- Agroforstwirtschaft (Anlage von Hecken) sowie
- der Moorschutz. Dazu werden Böden mit hohem organischem Kohlenstoffgehalt (Moorböden) aus der Produktion genommen bzw. wieder vernässt.

In den letzten etwa 25 Jahren wurden bereits viele Maßnahmen mit Relevanz für die Kohlenstoffsequestrierung angewendet, wie z. B. Begrünungen, Mulch- und Direktsaat, u. a. im Rahmen des Österreichischen Programms für umweltgerechte Landwirtschaft (ÖPUL). Dadurch dürfte sich in den behandelten Böden bereits ein Fließgleichgewicht im organischen Kohlenstoff- bzw. Humusgehalt eingestellt haben. Daher ist mit denselben Maßnahmen zwar ein Aufrechterhalten des Humusgehalts, aber keine weitere relevante Steigerung möglich. Eine weitere Humusanreicherung ist nur durch umfangreiche Änderungen der Bewirtschaftung erzielbar, z. B. durch Ausweitung des Feldfutterbaus von Klee gras und Luzerne, mehr Begrünungen, Direktsaat, Untersaaten, die Ausbringung von Kompost aus Abfallanlagen und eine generelle Vermeidung von Schwarzbrachen. Eine substanzielle Erhöhung des Kohlenstoffvorrats im Boden durch Aufbringung von Biokohle ist durch ihren hohen Preis und die eingeschränkte Verfügbarkeit limitiert (Mikula et al., 2020). Das zusätzliche Pflanzen von Bäumen oder Sträuchern auf Ackerflächen (Agroforstwirtschaft einschließlich der Anlage von Mehrnutzungshecken und Streuobstwiesen) birgt neben der Kohlenstoffsequestrierung noch viele andere Vorteile (Ableidinger et al., 2020), z. B. den Schutz vor Winderosion, die Verbesserung

der Bodenstruktur (und damit der Durchlüftung und des Wasserspeichervermögens) sowie die Steigerung der Biodiversität (siehe dazu Kapitel 4).

Ein gutes Management von Moorböden ist eine wichtige Option für den Klimaschutz. Durch die Anhebung des Wasserspiegels wird der Abbau organischen Kohlenstoffs verhindert bzw. verlangsamt, was dazu führt, dass der Boden, anstatt CO₂ freizusetzen, als Kohlenstoffspeicher fungiert (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 2022). Daher zählt diese Maßnahme strenggenommen zu den Vermeidungsmaßnahmen. Eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung ist dann allerdings nur mehr eingeschränkt möglich.

Obwohl im "4-per-mille"-Ziel nur der Oberboden betrachtet wird, spielen in Ackerböden auch der Unterboden und seine Durchwurzelung – in Abhängigkeit vom Standort (Boden, Klima) – eine wichtige Rolle hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung. Die Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung auf die Kohlenstoffvorräte sind nicht nur im Oberboden sondern auch in tieferen Bodenschichten sichtbar. Alle Maßnahmen müssen dauerhaft über viele Jahre, wenn nicht Jahrzehnte, aufrecht bleiben, um zum Klimaschutz bzw. zur Anpassung an den Klimawandel beizutragen. Wird etwa Ackerland in Grünland umgewandelt, dann beginnt die Anreicherung von Kohlenstoff im Boden. Mit einer Rückumwandlung in Ackerland wird der aufgebaute Vorrat in kurzer Zeit in die Atmosphäre freigesetzt.

2.2 Dauergrünland

Im Dauergrünland sind folgende Maßnahmen zum Erhalt oder zur nachhaltigen Erhöhung der Humusvorräte im Boden wichtig:

- Keine Umwandlung von Dauergrünland in Wechselgrünland oder Ackerland (Verzicht auf Grünlandumbruch),
- Aufrechterhaltung einer mittleren Bewirtschaftungsintensität (zwei bis vier Nutzungen pro Jahr, regelmäßige Düngung mit Mist oder Stallmistkompost), keine weitere Nutzungsintensivierung,
- boden- und vegetationschonendes Weidemanagement (Vermeidung einer langjährigen Überbeweidung),
- Förderung der Bodendurchwurzelung (insbesondere der Tiefendurchwurzelung) durch Vermeidung von Bodenverdichtung, Bodenstrukturen und Übernutzung der Grünlandflächen,
- jährliche entzugsorientierte Düngung mit Wirtschaftsdüngern, insbesondere Mist oder Stallmistkompost,

- Erhöhung des Deckungsgrades von Tiefwurzeln im Pflanzenbestand durch Nachsaat,
- Förderung des Bodenlebens (insbesondere der tiefgrabenenden, anezischen Regenwurmarten) durch eine die Biodiversität steigernde und bodenschonende Grünlandbewirtschaftung,
- Erhaltung des Grundwasserstandes in nicht entwässerten hydromorphen Böden bzw. Anhebung des Grundwasserstandes in entwässerten hydromorphen Böden (keine Entwässerung von intakten Niedermooren bzw. Wiedervernässung von entwässerten Niedermooren; keine Neuanlage von Drainageeinrichtungen bzw. Beseitigung oder Inaktivierung bereits bestehender Drainagen),
- Förderung von Tierhaltungssystemen mit Mist und Einstreumaterial aus lokalen oder regionalen Streuwiesen, sowie
- Gülleseparierung und Ausbringung der Feststofffraktion auf Grünlandflächen.

Im Dauergrünland sind humuserhaltende und die Humusqualität verbessernde Maßnahmen wichtiger als humussteigernde, weil eine nachhaltige Erhöhung des Humusvorrats nur sehr langsam und in einem geringen Ausmaß möglich ist. Zudem ist der positive Effekt von humussteigernden Maßnahmen auf Ertrag, Futterqualität und

Ertragssicherheit in typischen Dauergrünlandböden in der Regel gering. In solchen Böden kann eine nachhaltige Steigerung der Bodenfruchtbarkeit vor allem durch Maßnahmen zur Verbesserung der Humusqualität (Optimierung des Verhältnisses von Kohlenstoff zu Stickstoff im Oberboden) und zur Beschleunigung des jährlichen Humusumsatzes im Boden erzielt werden.

Bei der Auswahl und Umsetzung von humuserhaltenden oder humussteigernden Maßnahmen müssen Zielkonflikte mit dem Naturschutz, Nebenwirkungen und zusätzliche positive Umweltwirkungen (Co-Benefits) berücksichtigt werden. Eine Nebenwirkung der Wiedervernässung von entwässerten Mooren ist die Abnahme der Tragfähigkeit des Bodens. Daraus folgen eine schlechtere Befahrbarkeit und somit erschwerte Bedingungen bei der Streuwiesenmahd sowie eine erhöhte Gefahr von Trittschäden bei Weidenutzung. Zusätzliche positive Umweltwirkungen sind etwa die Einsparung von Mineraldünger und Saatgut bei Verminderung der Nutzungsintensität im Intensivgrünland oder die Vermeidung von langen Transportwegen bei Verwendung von Einstreumaterial aus lokalen oder regionalen Streuwiesen anstelle von Stroh aus in- und ausländischen Ackerbauregionen.

3. Ökonomische Effekte einer SCS-Maßnahmenstrategie für Österreich

Angesichts des weltweit bedeutenden Potenzials der Kohlenstoffbindung in Böden für den Klimaschutz wurden auch die wirtschaftlichen Effekte einer Reihe von Maßnahmen analysiert, die die Kohlenstoffspeicherung in landwirtschaftlichen Böden verbessern können. Tang et al. (2016) vergleichen Studien zum Thema "carbon farming economics", die Maßnahmen wie Aufforstung, konservierende Bodenbearbeitung, Dauerkulturen und Fruchtfolgen in den USA, Australien, Indien, der Ukraine, südamerikanischen und tropischen Ländern untersuchen. Die Nettokosten der Änderung von Managementpraktiken zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffbestandes in der Land- und Forstwirtschaft schwanken demnach zwischen 3 \$ je t CO₂ und 130 \$ je t CO₂ (auf Dollarbasis, zu Preisen des Jahres 2012). Die Kosten sind abhängig von den bodenspezifischen SCS-Maßnahmen und -Strategien, der damit verbundenen Fähigkeit, den Bodenkohlenstoffbestand an einem bestimmten Standort zu halten bzw. zu erhöhen, sowie von den jeweiligen Politikscenarien bzw. den angenommenen politischen Anreizsystemen. Die einzelwirtschaftlichen Kosten variieren daher auf regionaler Ebene und je nach Maßnahmenart erheblich (Tang et al., 2016). Viele Studien adressieren nur einzelne Maßnahmen anstatt Maßnahmenbündel. Keine der in der Übersichtsarbeit untersuchten Studien geht auf eine mögliche Steigerung der Ernteerträge ein, die auf einer Verbesserung

des organischen Kohlenstoffgehalts im Boden beruht. Unter Berücksichtigung flexibler Reaktionen der Erträge auf den Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden können die berechneten Kosten des Klimaschutzes jedoch geringer ausfallen (siehe Kapitel 4).

Die von Tang et al. (2016) untersuchten Studien simulieren den Einsatz unterschiedlicher hypothetischer, anreizbasierter Politikinstrumente, die zur Transformation beitragen. Dazu zählen Kohlenstoffgutschriften, hektarbezogene Zahlungen oder kostenbezogene Zahlungen an die Landwirt:innen. Während Kohlenstoffgutschriften ergebnisorientiert sind und die Menge tatsächlich sequestrierter Kohlenstoffs vergüten, sind Zahlungen pro Hektar inputorientiert und richten sich nach der Fläche, mit der ein Betrieb an einem Programm zur Sequestrierung von Treibhausgasemissionen teilnimmt. Bei kostenbezogenen Zahlungen werden die Landwirt:innen auf Grundlage der Opportunitätskosten und der Umstellungskosten entschädigt.

Smith et al. (2008) berechnen das weltweite wirtschaftliche Sequestrierungspotenzial von SCS-Maßnahmen bis 2030 zu unterschiedlichen Kohlenstoffpreisen. Demnach liegt es bei einem hypothetischen Kohlenstoffpreis von 20 \$ je t CO₂-Äquivalent bei 1,5 bis 1,6 Gt CO₂-Äquivalenten pro Jahr, für 50 \$ je t CO₂-Äquivalent bei 2,5 bis 2,7 Gt CO₂-Äquivalenten pro Jahr und für 100 \$ je t CO₂-

Internationale Studien verweisen auf eine große Bandbreite von Nettokosten der Änderung von Managementpraktiken zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts in der Land- und Forstwirtschaft.

Zur Spezifikation eines "4-per-mille"-Szenarios wurden zunächst SCS-Maßnahmen ausgewählt, die im österreichischen Kontext effektiv sind, und in weiterer Folge Flächen festgelegt, auf die die Maßnahmen angewendet werden sollen.

Es wurde quantifiziert, wieviel zusätzlichen Kohlenstoff der Boden durch einzelne SCS-Maßnahmen jährlich aufnehmen kann. Weiters wurde abgeschätzt, wie groß die Flächen sind, die für Maßnahmen im Agrarbereich in Frage kommen.

Äquivalent bei 4 bis 4,3 Gt CO₂-Äquivalenten jährlich²⁾. Ein höheres wirtschaftliches Potenzial hängt wie erwartet mit höheren Kohlenstoffpreisen zusammen. Der Kohlenstoffpreis kann als Indikator für das Niveau der Klimaschutzbemühungen gedeutet werden. Die Schätzungen wiederum sind abhängig von spezifischen SCS-Techniken, dem geografischen und klimatischen Kontext sowie den Lohnkosten. Etwa ein Fünftel des wirtschaftlichen Sequestrierungspotenzials kann demnach zu negativen Kohlenstoffkosten (-20 \$ je t CO₂-Äquivalent bis -0 \$ je t CO₂-Äquivalent) lukriert werden (Fuss et al., 2018).

Die Kosten der Umsetzung von SCS-Maßnahmen werden häufig anhand von ökonomischen Modellen kalkuliert, oftmals gekoppelt mit biophysikalischen Modellen. Die ökonomischen Modelle schätzen die Kosten (bzw. Einnahmen) sowie die Zielkonflikte bzw. Opportunitätskosten, die mit dem Management der Kohlenstoffsequestrierung oder der Emissionsreduktion verbunden sind.

3.1 Ein ausgewähltes SCS-Maßnahmenbündel im österreichischen Kontext

Im Zuge der hier vorgestellten interdisziplinären Studie unter Beteiligung von Interessensvertreter:innen wurde ein "4-per-mille"-Szenario bis 2030 entwickelt, um das Potenzial der Umsetzung von SCS-Maßnahmen im österreichischen Kontext zu bestimmen. Dazu wurde zunächst eine wissenschaftsbasierte Auswahl von in Österreich effektiven SCS-Maßnahmen getroffen. Teilnehmer:innen von Stakeholder-Workshops identifizierten entsprechende Maßnahmen und schätzten weiters

die Flächen, auf denen sie zur Anwendung kommen können (Übersichten 1 und 2). Basierend auf den im Jahr 2020 im Agrarumweltprogramm ÖPUL gewährten Prämien, Auswertungen der Online-Datenbank der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen zu Deckungsbeiträgen³⁾ und eigenen Berechnungen wurden den Maßnahmen Durchschnittskosten je Hektar zugeordnet. Bei Maßnahmen, die eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung ausschließen, wurden in der Kostenkalkulation die von Eurostat veröffentlichten Pachtpreise für Österreich im Jahr 2020 unterstellt. Dies gilt für den Stopp der Ackerproduktion bzw. die Wiedervernässung von ursprünglich drainagierten Böden und das Anlegen von Windschutzhecken bzw. anderen Hecken (Agroforstmaßnahmen).

Im nächsten Schritt wurde quantifiziert, wieviel zusätzlichen Kohlenstoff der Boden durch die einzelnen Praktiken aufnehmen kann. Im Fall des Ackerlands liegt die jährlich festlegbare Kohlenstoffmenge annahmemaß zwischen 128 kg je ha und Jahr (Untersaat und "System Immergrün") und 800 kg je ha und Jahr (Einbringung von Biokohle ins Ackerland, Nichtnutzung von Moorböden als Ackerflächen).

Eine grundlegende Annahme ist, dass sich die Kohlenstoffsequestrierung im Boden allmählich verlangsamt und eine Sättigung erreicht wird, wenn eine SCS-Maßnahme zumindest zehn Jahre lang kontinuierlich angewendet wird. Die Weiterführung der Praktik ist nötig, um einen Abbau des angereicherten Kohlenstoffs zu verhindern.

Übersicht 1: Maßnahmenübersicht Ackerland

	Geschätzte Fläche insgesamt	Jährliche Kosten	Erwartete Festlegung von Kohlenstoff
	ha	In € je ha	In t in 10 Jahren
Mulchsaat bzw. Direktsaat	25.000	60	89.000
Untersaat (Kürbis, Soja, Bohne, Sonnenblume)	23.960	101	30.669
System Immergrün	33.803	142	43.268
Grün-Bracheflächen (überwiegend Biodiversitätsflächen)	50.548	80	161.754
Feldfutterbau (Grünfütterpflanzen)	54.536	0	174.515
Aufbringung von Kompost aus Abfallanlagen	5.500	50	35.420
Einbringung von Biokohle	2.380	406	19.040
Agroforstwirtschaft (Anlage von Hecken)	200	450	800
Böden mit hohem organischem Kohlenstoffgehalt (Moorböden) aus der Produktion nehmen bzw. wieder vernässen	300	450	2.400
Insgesamt (ohne Agroforstwirtschaft)	196.027		556.066

Q: CASAS-Annahmen und -Berechnungen.

²⁾ Die Brandbreiten geben die Potenziale für die vier SRES-Szenarios (Special Report on Emissions Scenarios B1, A1b, B2, A2) an. Das biophysikalisch mögliche

Sequestrierungspotenzial liegt darüber bei etwa 5,5 bis 6 Gt CO₂-Äquivalente pro Jahr.

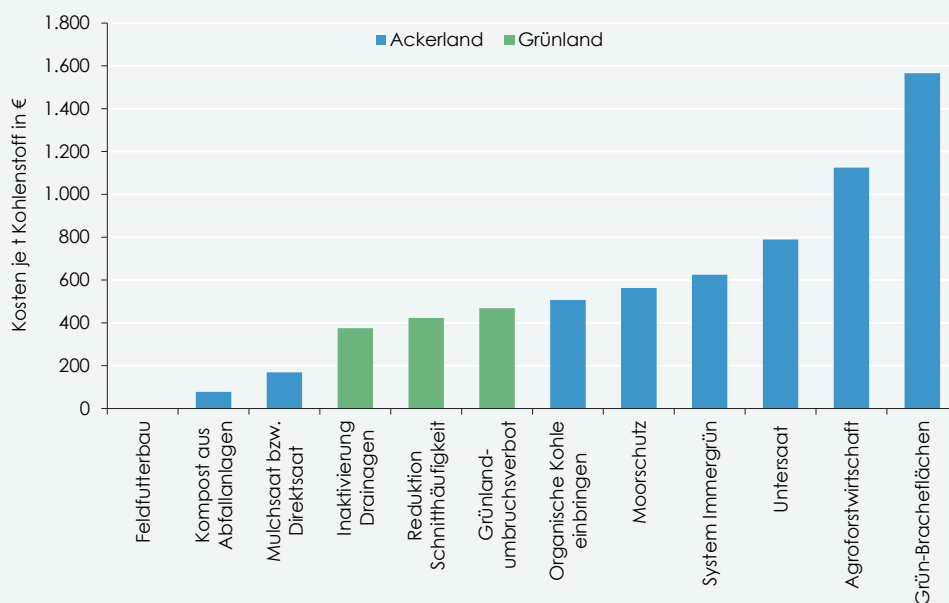
³⁾ Siehe <https://idb.agrarforschung.at> (abgerufen am 2. 2. 2023).

Übersicht 2: Maßnahmenübersicht Grünland

	Fläche (normiert)	Erwartete Festlegung von Kohlenstoff	
	ha	In kg je ha pro Jahr	In t in 10 Jahren
Drainagierte Flächen nicht mehr entwässern	1.000	800	8.000
Moorflächen wieder vernässen	1.000	800	8.000
Grünlandumbruchverbot	1.000	0	0
Extensivierung (z. B. Schnitthäufigkeit von 6 auf 4 Schnitte pro Jahr reduzieren oder Weidenutzung verringern)	1.000	120	1.200

Q: CASAS-Annahmen und -Berechnungen.

Abbildung 1: Grenzkosten der Kohlenstoffanreicherung in Acker- und Grünlandböden



Q: WIFO-Darstellung.

In Bezug auf das Grünland war es nicht möglich, zu einer Abschätzung der relevanten Fläche zu gelangen. Daher wurden die Angaben auf 1.000 ha normiert (Übersicht 2). Für die Wiedervernässung drainagierter Grünlandflächen und die Einstellung der Nutzung von Moorflächen wurde jeweils ein Aufbau von 800 kg Kohlenstoff je ha und Jahr angenommen. Werden Wiesen seltener gemäht (z. B. statt sechsmal nur viermal jährlich), so können 120 kg Kohlenstoff pro ha und Jahr festgelegt werden.

3.2 Einzelwirtschaftliche Vermeidungskosten

Auf der Basis der im vorigen Kapitel vorgestellten Schätzungen ist es möglich, die jährlichen Kosten verschiedener SCS-Maßnahmen ihrer Wirksamkeit gegenüberzustellen. Die einzelwirtschaftlichen Kosten reichen von 0 € je ha und Jahr im Feldfutterbau bis 450 € je ha und Jahr, wenn darauf verzichtet wird, Böden mit hohem organischem Kohlenstoffgehalt (z. B. Moorböden) als Ackerflächen zu nutzen. Die im Feldfutterbau

eingesetzten Kulturen bilden kräftige Wurzelsysteme aus, was vorteilhaft für die Festlegung von Kohlenstoff ist. Viele tierhaltende Betriebe betreiben Feldfutterbau aus Gründen der Rentabilität, um Futterkosten zu sparen. Es wurden daher keine Zusatzkosten für diese Praxis angesetzt. Hohe Kosten wurden dagegen für die kohlenstoffaufbauenden Methoden von Agroforstmaßnahmen (Hecken) unterstellt. Hierbei wurden die einmaligen Kosten für die Pflanzung mit 3.500 € je ha und die Opportunitätskosten mit 450 € je ha und Jahr angesetzt. Agroforstanlagen haben freilich zahlreiche Vorteile für Natur und Umwelt, die über die Anreicherung von Kohlenstoff im Boden hinausgehen. Dieser Zusatznutzen wurde in der vorliegenden Analyse nicht bewertet. Um diesem Sachverhalt aber zumindest annähernd Rechnung zu tragen, wurden nur die Opportunitätskosten in der Berechnung berücksichtigt. Die durchschnittlichen Kosten der verschiedenen Praktiken und die erwartete Festlegung von Kohlenstoff im Boden sind in den Übersichten 1 und 2 ausgewiesen. Wie

Die einzelwirtschaftlichen Kosten der SCS-Maßnahmen reichen von 0 € je ha und Jahr im Feldfutterbau bis zu 450 € je ha und Jahr bei der Nichtnutzung von Moorböden als Ackerflächen.

Abbildung 1 zeigt, ist es in Österreich zum Teil sehr teuer, durch zusätzliche Maßnahmen Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden anzureichern.

3.3 Gesamtwirtschaftliche Effekte

Mit dem Modell ADAGIO wurde berechnet, wie sich SCS-Maßnahmen im Ackerbau auf die heimische Gesamtwirtschaft auswirken. ADAGIO eignet sich dazu in besonderer Weise, weil es die einzelnen Sektoren, darunter die Land- und Forstwirtschaft, explizit modelliert (vgl. dazu Sinabell & Streicher, 2021).

Durch die Umsetzung von SCS-Maßnahmen im Ackerbau entstehen zwei Arten von Kosten: Erstens werden weniger Agrargüter erzeugt und zweitens werden zusätzliche Vorleistungen bezogen (vor allem Maschinenleistungen und Biokohle). Daher sinkt die Produktion in der Landwirtschaft, da Anbauflächen für andere Zwecke verwendet werden. Die von anderen Sektoren bezogenen Vorleistungen erzeugen dort eine zusätzliche Nachfrage (mehr Maschinen sind nötig, zu ihrer Unterbringung müssen Gebäude errichtet werden usw.). Das Modell bildet den Produktionsrückgang bei Agrargütern (-81 Mio. € pro Jahr) ebenso ab wie die veränderten Nachfragebedingungen (-57 Mio. € p. a. an Vorleistungen der chemischen Industrie, +63 Mio. € p. a. an Aufwand für Energie und Reparaturen, +170 Mio. € p. a. an Abschreibungen). Es werden dabei die folgenden Effekte unterschieden (Abbildung 2):

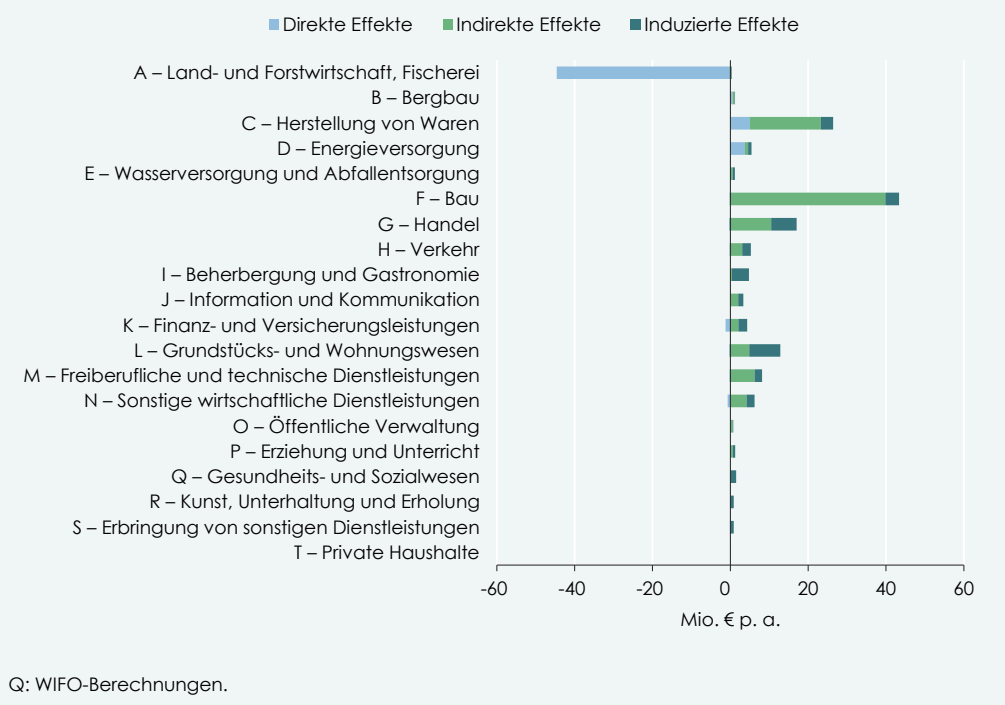
- Direkte Effekte haben ihren Ursprung im Agrarsektor selbst. Sie beschreiben die Veränderungen im Agrarsektor im Simulationslauf im Vergleich zum Basisszenario.
- Indirekte Effekte zeigen die Auswirkungen von Veränderungen im Agrarsektor auf die "übrige Volkswirtschaft", wobei sowohl vor- als auch nachgelagerte Sektoren, also Vorwärts- und Rückwärtsverflechtungen berücksichtigt werden: Die Veränderungen im Niveau und in der Struktur des Einsatzes von Vorleistungen wirken sich direkt auf andere Sektoren aus (z. B. die chemische Industrie) – dies sind die vorgelagerten Effekte (Rückwärtsverflechtungen). Die nachgelagerten Effekte (Vorwärtsverflechtungen) betreffen hingegen jene Sektoren, die Agrargüter beziehen. Zusammen mit den direkten Effekten bilden die indirekten Effekte die sogenannten "Typ1-Effekte".

- Im Gegensatz zu den ersten beiden, ausschließlich produktionsorientierten Effekten, die sich nur entlang der Wertschöpfungskette auf andere Sektoren auswirken, ergeben sich die induzierten Effekte aus Veränderungen der Wertschöpfung: Wenn sich die wirtschaftliche Aktivität verändert, verändern sich auch Löhne, Gewinne und Steuern, und damit die Endnachfrage: Höhere Löhne führen zu höherem Konsum, niedrigere Löhne zu geringerem Konsum. Veränderungen der Gewinne verändern die Einkommen der Kapitaleigner (und die Investitionen im Falle einbehaltener Gewinne), die ebenfalls zum Konsum beitragen. Ein Anstieg der Steuereinnahmen kann zu steigenden Staatsausgaben (bei konstantem Haushaltsdefizit) oder zu einem niedrigeren Haushaltsdefizit (bei konstanten Staatsausgaben) führen. Die vorliegenden Simulationen unterstellen ein konstantes öffentliches Defizit. Alle induzierten Effekte stellen Multiplikatoreffekte ("Typ2-Effekte") dar: Sie wirken über die Wertschöpfung und verstärken die ursprünglichen (direkten und indirekten) Effekte.

Die Ergebnisse der Modellrechnung (Abbildung 2) zeigen, wie sich die unterstellten SCS-Maßnahmen im Ackerbau auf die österreichische Volkswirtschaft, die Wertschöpfung im Sektor Landwirtschaft und auf Sektoren auswirken, die Vorleistungen bereitstellen. Die Typ1-Effekte, die die Vorleistungsverflechtungen abbilden, sind insgesamt negativ. Da sich allerdings die Vorleistungsstruktur verändert (weniger chemische Erzeugnisse, höherer Energieverbrauch, verstärkte Instandhaltung), ergeben sich in einigen Sektoren positive Wertschöpfungseffekte. Die SCS-Maßnahmen lösen zudem zusätzliche Investitionen aus; werden diese Typ2-Effekte berücksichtigt, so ist der Gesamteffekt bereits positiv. Werden in die Typ2-Effekte zusätzlich die Konsumausgaben einbezogen, so erhöht dies den positiven Saldo. Innerhalb der Land- und Forstwirtschaft bleibt der Wertschöpfungseffekt allerdings negativ. Die anderen Wirtschaftsbereiche können ihre Wertschöpfung dagegen sämtlich etwas steigern. In Summe ergibt sich damit ein leicht expansives Ergebnis von rund 100 Mio. € p. a. an zusätzlicher Wertschöpfung. Die Wirkung auf die sektorale Beschäftigung entspricht im Wesentlichen den Wertschöpfungseffekten, hängt aber auch von der sektoralen Produktivität ab.

Die Landwirtschaft hat im spezifizierten "4-per-mille"-Szenario mit negativen Wertschöpfungseffekten zu rechnen. In anderen Sektoren dürfte die Wertschöpfung aufgrund geänderter Vorleistungsstrukturen zunehmen. In Summe ergibt sich ein leicht expansives Ergebnis von rund 100 Mio. € p. a.

Abbildung 2: **Auswirkung von Maßnahmen zur Kohlenstofffestlegung im Ackerbau auf die sektorale Wertschöpfung**



4. Co-Benefits von SCS-Maßnahmen

Ähnlich wie Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen erzeugen auch Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts Zusatznutzen (Co-Benefits). So verbessern sie potenziell die Bodenstruktur, die Wasserqualität und -verfügbarkeit sowie die Nährstoffversorgung der Pflanzen, während sie die Bodenerosion hemmen. SCS-Maßnahmen wirken sich zudem potenziell positiv auf die Biodiversität sowie auf die Aufrechterhaltung der Ökosystemleistungen aus, die für die landwirtschaftliche Produktivität von entscheidender Bedeutung sind (Amelung et al., 2020; Tang et al., 2016). Über den Humusaufbau kann die Bindung von Kohlenstoff maßgeblich zur Verbesserung der Bodenqualität und der Ernährungssicherheit beitragen. Der Bodenkohlenstoffgehalt ist demnach ein wichtiger Qualitätsmaßstab für die pflanzliche Produktion sowie die nationale und regionale Ernährungssicherheit (Baumgarten et al., 2021).

Neben einer gewissen Abschwächung der Erderwärmung begünstigen SCS-Maßnahmen zugleich die Anpassung landwirtschaftlicher Systeme an den Klimawandel (Amelung et al., 2020; Smith et al., 2020). Qiao et al. (2022) zeigen am Beispiel Chinas, welche entscheidende Rolle die Bodenqualität in der Landwirtschaft unter den Bedingungen des Klimawandels spielt. Demnach weisen hochwertige Böden über alle unter-

suchten Kulturarten und Umweltbedingungen hinweg eine geringere Empfindlichkeit (Vulnerabilität) der Ernteerträge gegenüber Klimaschwankungen auf als degradierte Böden – etwa höhere durchschnittliche Ernteerträge ($10,3\% \pm 6,7\%$) und eine höhere Ertragsstabilität (Verringerung der Variabilität um $15,6\% \pm 14,4\%$; Qiao et al., 2022⁴⁾). Aus der Perspektive der Ernährungssicherheit verbindet die "4-per-mille"-Initiative somit die Notwendigkeit, die Bodengesundheit zu erhalten bzw. zu verbessern, mit Möglichkeiten, den Klimawandel abzuschwächen (Amelung et al., 2020).

SCS-Maßnahmen im Bereich Acker- und Grünland bringen nicht nur zahlreiche Co-Benefits für den Erhalt der Lebensgrundlagen, Biodiversität, Wasserversorgung und Ernährungssicherheit mit sich, sondern vermeiden zugleich indirekte Landnutzungsänderungen mit potenziell negativen Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen, da sie auf bereits bewirtschafteten Böden Anwendung finden. Anders sieht es bei der Aufforstung aus, die oftmals auf Ackerland abstellt und somit Landnutzungsänderungen nach sich zieht. Bei ersteren Maßnahmen wird die Produktion dagegen nicht verlagert und es werden keine neuen Landflächen erschlossen.

Neben einer gewissen Abschwächung der Erderwärmung bieten Maßnahmen der Kohlenstoffsequestrierung in Böden zugleich Vorteile für die Anpassung an den Klimawandel und die Ernährungssicherheit.

⁴⁾ Da derartige Ergebnisse jedoch von den lokalen Boden- und Wetterbedingungen abhängen, können sie nicht verallgemeinert werden, sondern müssen

regionsspezifisch validiert werden (für Europa siehe z. B. Vonk et al., 2020).

Die Abschätzung bzw. Quantifizierung des Zusatznutzens von SCS-Maßnahmen können dazu beitragen, die gesellschaftliche Akzeptanz dieser Maßnahmen zu erhöhen und die privatwirtschaftlichen Vorteile der Sequestrierung für die Landwirt:innen herauszustreichen (Amelung et al., 2020). Ökonomische Studien, die sich auf die Kohlenstoffbewirtschaftung konzentrieren und die CO₂-Sequestrierungskosten einzelner Maßnahmen berechnen, berücksichtigen jedoch in

der Regel keine Co-Benefits, wodurch sie den Nutzen von SCS-Maßnahmen tendenziell unterschätzen. Es besteht demnach Forschungsbedarf hinsichtlich der Bewertung und Quantifizierung des bio-physikalischen Potenzials und des monetären Zusatznutzens solcher Maßnahmen. Die Einbeziehung der Co-Benefits in die Kosten- bzw. Nutzenschätzungen ergibt ein realistischeres Bild und potenziell niedrigere Kosten pro sequestrierter Tonne CO₂.

5. Fazit

Praktiken, die den Bodenkohlenstoffgehalt erhalten bzw. erhöhen, müssen durch agrarpolitische Programme flankiert werden, die den Landwirt:innen den gesellschaftlichen Mehrwert der Maßnahmen finanziell abgelden und ein umfassendes Bodenmonitoring etablieren.

Praktiken, die den Kohlenstoffgehalt in landwirtschaftlichen Böden erhalten oder erhöhen, sind zwar gut etabliert und bauen auf bewährten Managementpraktiken zur Verbesserung der Ernährungssicherheit auf. Ihre Ausweitung erfordert jedoch mehr politische Unterstützung und bessere Rahmenbedingungen.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist zu erwarten, dass Landwirt:innen nur dann SCS-Maßnahmen in ihre Produktion einbetten, wenn die Änderung der Praktiken rentabel ist. Diese Maßnahmen verursachen den einzelnen Landwirt:innen jedoch in der Regel zusätzliche Kosten, während die damit verbundenen Vorteile zwar gesamtgesellschaftlich bedeutsam, aber oftmals nicht monetär greifbar sind. Daher sollte die Umstellung auf eine klimaschonende und resiliente Landwirtschaft durch entsprechende agrarpolitische Programme und finanzielle Anreize, wie sie aus dem Agrarumweltprogramm ÖPUL bekannt sind, begleitet werden.

Neben den eingangs erwähnten Sequestrierungstechnologien stellt das Bodenkohlenstoffmanagement auf Acker- und Grünlandflächen eine weitere Option der CO₂-Sequestrierung dar. Erfahrungen aus jahrelanger Praxis legen nahe, dass ein hoher Grad an technologischer Reife erreicht wurde. Die

Überwachung und Überprüfung der Maßnahmenumsetzung ist jedoch eine Herausforderung. Nicht minder herausfordernd ist, die Wirkung der Maßnahmen quantitativ zu überprüfen. Daher wird empfohlen, vorerst inputorientierte Maßnahmen verstärkt zu nutzen und den ergebnisorientierten vorzuziehen. Fragen der Kohlenstoffsättigung in Böden und der Dauerhaftigkeit der Speicherung sind zentral für die Konzeption und die Eignung von SCS-Maßnahmen. Daher sind der Aufbau und die Pflege eines umfassenden Bodenmonitorings ebenso entscheidend wie eine langfristige Perspektive, die die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Produktion berücksichtigt.

Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Quantifizierung und Bewertung der Zielkonflikte und der Co-Benefits von SCS-Maßnahmen. Darüber hinaus wäre die Ermittlung eines umfassenden Kosten-Nutzen-Spektrums verschiedener Kombinationen von SCS-Strategien ein wesentlicher Schritt, um einer wirtschaftspolitischen Gesamtstrategie für die Etablierung langfristig wirksamer Kohlenstoffsenken näherzukommen. Für die Umsetzung einer derartigen Strategie sind nicht zuletzt zusätzliche Informationen erforderlich, etwa dazu, wie die Interessen und Einstellungen der Landwirt:innen die Einführung von SCS-Maßnahmen beeinflussen.

6. Literaturhinweise

Ableidinger, C., Erhart, E., Sandler, K., Kromp, B., & Hartl, W. (2020). *Mehrnutzungshecken*. Bio Forschung Austria. <https://www.bioforschung.at/projects/mehrnutzungshecken/>.

Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., Bol, R., Collins, C., Lal, R., Leifeld, J., Minasny, B., Pan, G., Paustian, K., Rumpel, C., Sanderman, J., van Groenigen, J. W., Mooney, S., van Wesemael, B., Wander, M., & Chabbi, A. (2020). Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*, 11(5427). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>.

Baumgarten, A., Haslmayr, H.-P., Schwarz, M., Huber, S., Weiss, P., Obersteiner, E., Aust, G., Enschlich, M., Horvath, D., Leitgeb, E., Foldal, C., Rodlauer, C., Bohner, A., Spiegel, H., & Jandl, R. (2021). Organic soil carbon in Austria – Status quo and foreseeable trends. *Geoderma*, 402. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115214>.

Bohner, A., Foldal, C. B., Jandl, R., & Spiegel, H. (2023). Humus und Humusdynamik in Dauergrünlandböden: eine Literaturübersicht. *Die Bodenkultur* (mimeo).

Bruni, E., Chenu, C., Abramoff, R. Z., Baldoni, G., Barkusky, D., Clivot, H., Huang, Y., Kätterer, T., Pikuła, D., Spiegel, H., Virto, I., & Guenet, B. (2022). Multi-modelling predictions show high uncertainty of required carbon input changes to reach a 4% target. *European Journal of Soil Science*, 73(6). <https://doi.org/10.1111/ejss.13330>.

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus – BMLRT (2022). *Moorstrategie Österreich 2030+*. <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-eu-international/europaeische-und-internationale-wasserwirtschaft/feuchtgebiete/moorstrategie-oesterreich-2030plus.html>.

- Díaz, S., Settele, J., Brondizio, E. S., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razaque, J., Reyers, B., Roy Chowdhury, R., Shin, Y. J., Visseren-Hamakers, I. J., Willis, K. J., & Zayas, C. N. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – IPBES. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- Erlach, B., Fuss, S., Geden, O., Glotzbach, U., Henning, H.-M., Pittel, K., Renn, J., Rens, S., Sauer, D. U., Schmidt, C. M., Spiecker genannt Döhmann, I., Stemmler, Ch., Stephanos, C., & Strefler, J. (2022). *Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie? "Kurz erklärt"*. Akademienprojekt "Energiesysteme der Zukunft" (ESYS). https://doi.org/10.48669/ESYS_2022-2.
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M., & Minx, J. C. (2018). Negative Emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2022). Summary for Policymakers. In Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., van Diemen, R., McCollum, D., Pathak, M., Some, S., Vyas, P., Fradera, R., Belkacemi, M., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., & Malley, J. (Hrsg.). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.
- Lal, R. (2022). Reducing carbon footprints of agriculture and food systems. *Carbon Footprints*, 1:3. <https://dx.doi.org/10.20517/cf.2022.05>.
- Mikula, K., Soja, G., Segura, C., Berg, A., & Pfeifer, C. (2020). Carbon Sequestration in Support of the "4 per 1000" Initiative Using Compost and Stable Biochar from Hazelnut Shells and Sunflower Husks. *Processes*, 8(764). <https://doi.org/10.3390/pr8070764>.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A. C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovov, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vágen, T.-G., van Wesemael, B., & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- Qiao, L., Wang, X., Smith P., Fan J., Lu, Y., Emmett, B., Li, R., Dorling, S., Chen, H., Liu, S., Benton, T. G., Wang, Y., Ma, Y., Jiang, R., Zhang, F., Piao, S., Müller, C., Yang, H., Hao, Y., Li, W., & Fan, M. (2022). Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. *Nature Climate Change*, 12(574), 574-580. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01376-8>.
- Rumpel, C., Amiraslan, F., Koutika, L.-S., Smith, P., Whitehead, D., & Wollenberg, E. (2018). Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges. *Nature*, 564(7734), 32-34. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07587-4>.
- Sinabell, F., & Streicher, G. (2021). *Holz im Bau und als Rohstoff für Kraftstoffe. Szenarien für die österreichische Volkswirtschaft*. WIFO. <https://www.wifo.ac.at/www/pubid/66985>.
- Smith, P. (2012). Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: what have we learnt in the last 20 years? *Global Change Biology*, 18(1), 35-43. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02517.x>.
- Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22, 1315-1324. <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>.
- Smith, P., Calvin, K., Nkem, J., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V., Le Hoang, A., Lwasa, S., McElwee, P., Nkonya, E., Saigusa, N., Soussana, J.-F., Taboada, M. A., Manning, F. C., Nampanzira, D., Arias-Navarro, C., Vizzari, M., House, J., Roe, S., Cowie, A., Rounsevell, M., & Arneeth, A. (2020). Which practices co-deliver food security, climate change mitigation and adaptation, and combat land degradation and desertification? *Global Change Biology*, 26(3), 1532-1575. <https://doi.org/10.1111/gcb.14878>.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492). <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>.
- Sykes, A. J., Macleod, M., Eory, V., Rees, R. M., Payen, F., Myrriotis, V., Williams, M., Sohi, S., Hillier, J., Moran, D., Manning, D. A. C., Goglio, P., Seghetta, M., Williams, A., Harris, J., Dondini, M., Walton, J., House, J., & Smith, P. (2020). Characterising the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. *Global Change Biology*, 26(3), 1085-1108. <https://doi.org/10.1111/gcb.14844>.
- Tang, K., Kragt, M. E., Hailu, A., & Ma, C. (2016). Carbon farming economics: What have we learned? *Journal of Environmental Management*, 172, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.008>.
- Tiefenbacher, A., Sandén, T., Haslmayr, H.-P., Miloczki, J., Wenzel, W., & Spiegel, H. (2021). Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis. *Agronomy*, 11(5). <https://www.mdpi.com/1092810>.
- United Nations Environmental Programme – UNEP (2022). Kunming-Montreal Global biodiversity framework, Convention on Biological Diversity, CBD/COP/15/L.25, United Nations Environmental Programme, 18 December 2022.
- United Nations (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- Vonk, W. J., van Ittersum, M. K., Reidsma, P., Zavattaro, L., Bechini, L., Guzman, G., Pronk, A., Spiegel, H., Steinmann, H. H., Ruysschaert, G., & Hijbeek, R. (2020). European survey shows poor association between soil organic matter and crop yields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 118, 325-334. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10098-2>.