



BONARES

BonaRes Series 2020/1 | DOI: 10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H

WIESMEIER, M., MAYER, S., PAUL, C., HELMING, K., DON, A.,
FRANKO, U., STEFFENS, M., KÖGEL-KNABNER, I.

CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen

Boden als nachhaltige Ressource
für die Bioökonomie - BonaRes
ist eine Fördermaßnahme des
Bundesministeriums für Bildung
und Forschung (BMBF).

www.bonares.de

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**



BONARES

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Impressum

Herausgeber: BonaRes-Zentrum für Bodenforschung
c/o Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ
Department Bodensystemforschung
Theodor-Lieser-Str. 4 | 06120 Halle (Saale)
Tel: (+49) 345 558 5226 | E-Mail: info@bonares.de
www.bonares.de

Titel	CO ₂ -Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen
Autoren	<p>Wiesmeier, Martin – Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, Freising, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising</p> <p>Mayer, Stefanie – Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, Freising</p> <p>Paul, Carsten – Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg</p> <p>Helming, Katharina – Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg</p> <p>Don, Axel – Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig</p> <p>Franko, Uwe – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Halle</p> <p>Steffens, Markus – Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, Frick (Schweiz)</p> <p>Kögel-Knabner, Ingrid – Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, Freising</p>
Correspondence	martin.wiesmeier@lfl.bayern.de
Datum	März 2020
Kurzfassung	<p>Agrarböden besitzen durch den Aufbau von organischer Bodensubstanz (Humus), die zu etwa 58% aus Kohlenstoff (C_{org}) besteht, ein großes Potential zur Kohlenstoffbindung. Positive Anstrengungen im Humusmanagement könnten daher einen wesentlichen Beitrag für den Klimaschutz leisten. Für Landwirtinnen und Landwirte stellen so genannte CO₂-Zertifikate für den Aufbau von C_{org} („Humuszertifikate“) einen zusätzlichen Anreiz dar, humusfördernde Bewirtschaftungsmaßnahmen umzusetzen. Diese CO₂-Zertifikate werden von privatwirtschaftlichen Initiativen und Unternehmen im Bereich des freiwilligen CO₂-Markts vergeben. Insbesondere im Bereich der Landwirtschaft wächst im deutschsprachigen Raum derzeit der Zertifikatehandel für den Aufbau von C_{org} in Agrarböden. Um zum Klimaschutz beizutragen, müssen bei der Vergabe von Zertifikaten bestimmte Kriterien eingehalten werden. Wissenschaftliche Mindeststandards wurden dabei in der Praxis bislang jedoch wenig berücksichtigt. In dieser Studie werden Empfehlungen hinsichtlich der Erfassung von C_{org} (Probenahme, Analytik, Vorratsberechnung), eine Bewertung von Maßnahmen zum C_{org}-Aufbau, sowie Hinweise zu generellen Einschränkungen hinsichtlich des Klimaschutzes über CO₂-Zertifikate gegeben.</p> <p>CO₂-Zertifikate können einen positiven Anstoß geben, damit sich Landwirte verstärkt mit einer nachhaltigen Bewirtschaftung und Humusversorgung ihrer Böden auseinandersetzen. Da Humus die zentrale Steuergröße für viele Funktionen des Bodens und nicht zuletzt der Bodenfruchtbarkeit darstellt, ist jede Anstrengung für mehr Humus sinnvoll. Landwirtinnen und Landwirte, die sich für Humusaufbau interessieren, sollten daher hinsichtlich standort- und betriebsspezifischer Optionen zum Aufbau von C_{org} umfassend unterstützt und beraten werden.</p>

Stichworte

Humus, Klimawandel, Kohlenstoffsequestrierung, organische Düngung, Zwischenfrüchte, Biokohle, reduzierte Bodenbearbeitung, Landnutzungsänderungen, Agroforstwirtschaft

Danksagung

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung dieser Arbeit im Rahmen der Förderinitiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie“ (BonaRes, Modul B, Phase 2: BonaRes – Zentrum für Bodenforschung, Förderkennzeichen 031B0511)

Lizenz

Diese Arbeit unterliegt den Bestimmungen der Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) - Lizenz. Um sich die Lizenzbestimmungen anzuschauen, besuchen Sie creativecommons.org.

CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen

Martin Wiesmeier (1,2), Stefanie Mayer (1), Carsten Paul (3), Katharina Helming (3), Axel Don (4), Uwe Franko (5), Markus Steffens (6), Ingrid Kögel-Knabner (1)

- (1) Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, Freising
 - (2) Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising
 - (3) Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg
 - (4) Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig
 - (5) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Halle
 - (6) Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, Frick (Schweiz)
-

1. Hintergrund

Die Europäische Union hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Neben einer Reduktion vermeidbarer Emissionen von Treibhausgasen (THG) sind dafür auch CO₂-Senken notwendig, um nicht vermeidbare THG-Emissionen zu kompensieren. Neben technischen CO₂-Senken spielen insbesondere die biologischen CO₂-Senkenpotentiale von Ozeanen, Pflanzen und Böden eine zentrale Rolle. Böden besitzen in Form ihrer Vorräte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) ein beträchtliches Potential zur Kohlenstoffbindung. In Böden ist global mindestens doppelt so viel C_{org} gespeichert wie in Form von CO₂ in der Atmosphäre enthalten ist (Scharlemann et al., 2014). Über den Aufbau organischer Bodensubstanz (Humus), die zu etwa 58 % aus Kohlenstoff besteht, könnten Böden eine wesentliche Rolle beim Klimaschutz spielen.

Um die Bedeutung von Böden als globale Kohlenstoffsenken zu stärken, wurde bei der Weltklimakonferenz in Paris 2015 die „4 per 1000“-Initiative gestartet (www.4p1000.org). Dabei handelt es sich um ein freiwilliges Netzwerk zur Förderung von Humusaufbau basierend auf der Annahme, dass bei einem jährlichen Anstieg der globalen C_{org}-Vorräte um 0,4 % die anthropogen bedingte Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre begrenzt werden könnte.

Um Humusaufbau in der Praxis umzusetzen, müssen Anreizsysteme geschaffen werden, die den Humusaufbau für Landwirte¹ attraktiv machen. Dazu zählen CO₂-Zertifikate für den Aufbau von C_{org} („Humuszertifikate“). Diese CO₂-Zertifikate sind nicht Bestandteil des

¹ Um den Lesefluss nicht zu beeinträchtigen wird hier und im folgenden Text zwar nur die männliche Form genannt, stets aber die weibliche und andere Formen gleichermaßen mitgemeint.

Europäischen Emissionshandels (EU-ETS), sondern werden von privatwirtschaftlichen Initiativen und Firmen im Bereich des freiwilligen CO₂-Markts vergeben. Insbesondere im Bereich der Landwirtschaft existieren im deutschsprachigen Raum zahlreiche Unternehmen, die CO₂-Zertifikate für den Aufbau von C_{org} in landwirtschaftlich genutzten Böden vergeben. Allerdings wurden dabei wissenschaftliche Mindeststandards bislang wenig berücksichtigt.

Im Folgenden werden nach einem Überblick über Grundlagen der Kohlenstoffbindung in Böden daher Empfehlungen hinsichtlich der Erfassung von C_{org} (Probenahme, Analytik, Vorratsberechnung), eine Bewertung von Maßnahmen zum C_{org}-Aufbau, sowie Hinweise zu generellen Einschränkungen hinsichtlich des Klimaschutzes über CO₂-Zertifikate gegeben.

2. Grundlagen der Kohlenstoffbindung in Böden

Unter C_{org} versteht man die Gesamtheit des organischen Kohlenstoffs, der in der toten organischen Bodensubstanz gebunden ist. Die organische Substanz kann dabei in vielen verschiedenen Formen und Abbaugraden im Boden zugleich vorliegen, zum Beispiel entweder frisch in Form von Ernterückständen oder als mikrobiell umgewandelte Bestandteile. Die organische Substanz dient als Nährstoff- und Energiequelle für Bodenorganismen und wird dabei sukzessive von ihnen abgebaut und verstoffwechselt. Der C_{org} wird dabei von den Organismen entweder in neue Biomasse eingebaut oder unter CO₂-Freisetzung veratmet.

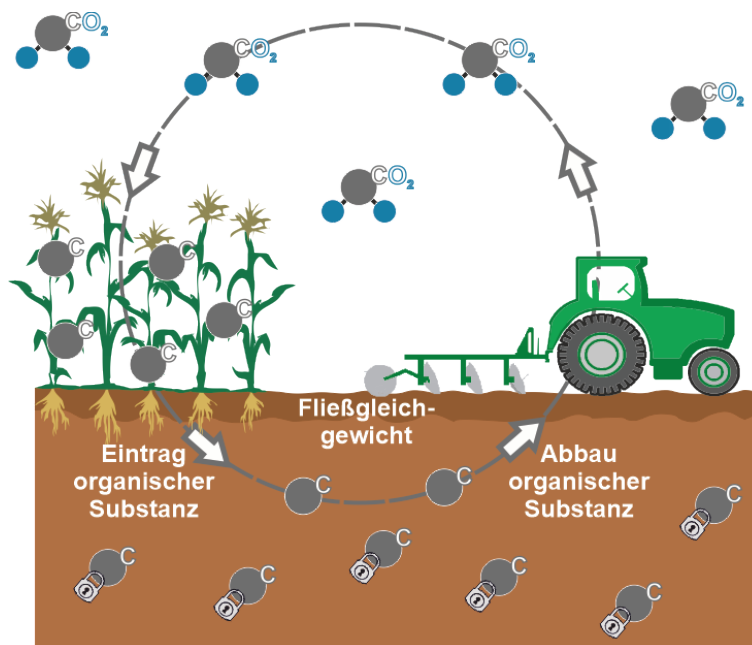


Abbildung 1: Unter konstanten Klima- und Bewirtschaftungsbedingungen nähert sich der C_{org}-Vorrat im Boden langfristig einem Fließgleichgewicht aus Eintrag (z.B. Ernterückstände, organische Dünger) und Abbau der organischen Substanz an.

Verschiedene Mechanismen führen dazu, dass C_{org} im Boden kurzfristig oder langfristig vor dem Abbau geschützt wird. Dazu gehören

- 1) der Einschluss in Bodenaggregaten und damit eine räumliche Trennung von Zersetzern und organischer Substanz,
- 2) die Stabilisierung durch Bindung an Tonminerale oder Eisenoxide, sowie
- 3) die bevorzugte Verstoffwechslung von leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen im Gegensatz zu schwerer abbaubaren aromatischen Verbindungen wie z.B. Holzkohle (Rekalzitranz) (von Lützow et al., 2006).

Unter konstanten Umweltbedingungen nähert sich der C_{org} -Vorrat langfristig einem Fließgleichgewicht aus Eintrag (z. B. Biomasse aus Ernterückständen, Wurzelreste, organische Düngung) und Abbau der organischen Substanz im Boden an (Abbildung 1). Dieses Fließgleichgewicht kann durch unterschiedliche Maßnahmen und Prozesse, etwa durch Änderungen der Bewirtschaftung oder des Klimas, verändert werden.

Um klimawirksam mehr C_{org} im Boden zu speichern, muss nicht nur der vorhandene C_{org} erhalten werden, sondern zusätzlich aus der Atmosphäre mehr Kohlenstoff durch Humusaufbau im Boden gebunden werden (sogenannte Sequestrierung) (Chenu et al., 2019; Olson, 2013). Erst eine zusätzliche langfristige Festlegung von CO_2 aus der Atmosphäre im Boden kann CO_2 -Emissionen ausgleichen und damit einen positiven Effekt auf das Klima haben. Dieser Prozess ist explizit flächengebunden, d.h. bei einer Umverteilung von C_{org} z.B. durch den Transfer organischer Dünger oder C_{org} -reicher Sedimente von externen Flächen, handelt es sich nicht um eine zusätzliche Sequestrierung von C (Olson, 2013).

Auf- und Abbau von Humus erfolgen als nichtlineare Prozesse (Chenu et al., 2019; Poeplau et al., 2011) und die Umsatzraten sind proportional zur Humusmenge. Die quantitative Beziehung zwischen Umsatzrate und Humusmenge ist standortspezifisch und beispielsweise auf leichten Böden unter wärmerem Klima höher als auf schweren Böden und niedrigeren Temperaturen. Um den C_{org} -Vorrat eines Standortes auf ein höheres Niveau anzuheben, muss die jährliche C-Zufuhr dauerhaft erhöht werden (Abbildung 2). Die Intensität der C_{org} -Akkumulation lässt dabei mit der Zeit nach, da bei erhöhtem C_{org} -Vorrat auch ein erhöhter Abbau stattfindet. Die Kurve der C_{org} -Akkumulation nähert sich schließlich einem neuen Gleichgewicht an. Damit erfolgt zu Beginn eine deutlich bessere Verwertung der Kohlenstoffzufuhr, d.h. eine schnellere C_{org} -Akkumulation als kurz vor Erreichen des neuen Gleichgewichtes (hohe Effektivität des C-Eintrags). Um die Speichergröße konstant auf dem neuen Niveau zu halten, ist daher dauerhaft ein höherer C-Eintrag erforderlich als vor Beginn

der Maßnahme. Der Zeitraum bis zur Erreichung eines neuen Fließgleichgewichts hängt vom Standort und der Bewirtschaftungsmaßnahme ab und kann stark variieren.

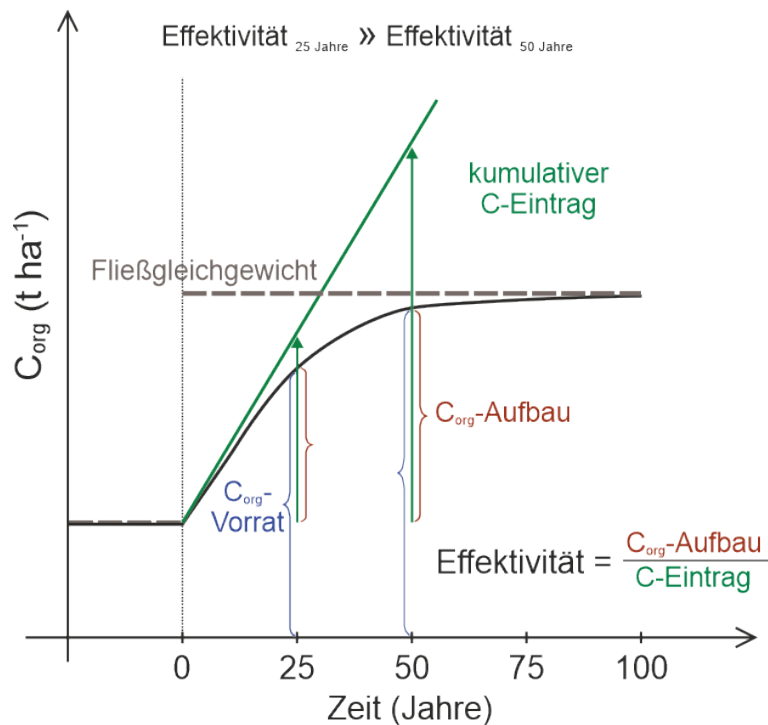


Abbildung 2: Der nicht-lineare Zusammenhang zwischen dem C-Eintrag und dem C_{org} -Aufbau führt zu stetig abnehmender Effektivität der C_{org} -Akkumulation. Die Effektivität der C-Speicherung ergibt sich aus dem Verhältnis des C_{org} -Aufbaus zum C-Eintrag.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Böden (Ausgangsgestein, Textur, Mineralogie etc.) weisen diese deutlich verschiedene C_{org} -Speicherpotentiale auf, die auch mit optimierter Bewirtschaftung nicht ausgeglichen werden können. Generell können schwere Böden mit hohen Schluff- und Tongehalten größere C_{org} -Vorräte speichern als leichte Böden.

3. Erfassung von C_{org} -Vorratsänderungen

Der hier dargestellte methodische Ansatz zur Erfassung des C_{org} -Vorrats im Boden orientiert sich im Wesentlichen an den Standards der VDLUFA zur Untersuchung von Böden (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V., 1991), der Kurzanleitung zur Bodenprobenahme, herausgegeben von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009), sowie den jeweiligen DIN Normen.

Hinweise zur Probenahme

Für eine quantitative Bestimmung von C_{org} -Vorräten (Einheit kg m^{-2} bzw. t ha^{-1}), erfolgt zunächst eine repräsentative Beprobung der Fläche und im Anschluss eine Messung des C_{org} -Gehalts sowie eine Bestimmung der Lagerungsdichte (Trockenrohdichte) im Labor.

Da im Rahmen von CO_2 -Zertifikaten die C_{org} -Veränderungen für einzelne, einheitlich bewirtschaftete Schläge bestimmt werden, ist die Beprobung ebenfalls für jeden Schlag vorzunehmen. Dabei sollte eine repräsentative Mischprobe aus mindestens 15 über den Schlag verteilten Einstichen pro Hektar genommen werden (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V., 1991). Die Mischprobe hat den Vorteil, dass die Analyse kostengünstiger ist als mehrere Einzelproben und sie dennoch die Heterogenität der C_{org} -Gehalte auf dem Schlag berücksichtigt. Die Heterogenität der C_{org} -Gehalte auf dem Schlag kann jedoch mit dieser Methode nicht quantifiziert werden (z.B. anhand der statistischen Standardabweichung).

Die Probenahme sollte entweder im Frühjahr (in Ackerböden am besten in Winterungen) vor einer Bodenbearbeitung und Düngung bei bearbeitbarem Boden oder im Herbst erfolgen. Bei bereits erfolgter Bodenbearbeitung oder Düngung ist unbedingt ein großer zeitlicher Abstand (mindestens 6 Wochen) einzuhalten, da sonst die Ergebnisse der Bestimmung der Lagerungsdichte und der C_{org} -Gehalte verfälscht werden.

Die Beprobungstiefe sollte sich in Ackerböden an der Bodenbearbeitungstiefe orientieren (in der Regel 20-30 cm), als standardisierte Beprobungstiefe bieten sich 25 cm an. Diese Tiefe muss auch bei einer Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitungssysteme mit verringerten Bearbeitungstiefen eingehalten werden, da es ansonsten zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse kommen kann. Die Probe ist entweder sofort zur Analyse dem Labor zu überstellen oder unverzüglich an der Luft ($\leq 60^\circ\text{C}$) zu trocknen.

Um Veränderungen im C_{org} -Vorrat des Bodens erfassen zu können, sind Wiederholungsbeprobungen erforderlich. Da es auch auf Schlagebene eine hohe räumliche Variabilität von C_{org} geben kann, müssen möglichst exakt die Punkte der initialen Probenahme bei möglichst identischen Feldbedingungen (insbesondere Bodenfeuchte) wiederbeprobt werden. Eine genaue Dokumentation der Probenahme in einem Protokoll ist daher empfehlenswert. Da sich Veränderungen im C_{org} -Vorrat jedoch nur langsam einstellen, wird eine Wiederbeprobung frühestens nach 3 bis 5 Jahren als sinnvoll erachtet.

Bestimmung von C_{org} , Lagerungsdichte und Skelettanteil

Der C_{org} -Gehalt (Masse-% oder $mg\ g^{-1}$) der Probe wird am Feinboden (<2 mm Partikelgröße nach Siebung) bestimmt. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Gesamt-C (C_{tot}) und dem Carbonatgehalt (C_{anorg}) des Feinbodens. (Gleichung 1):

$$C_{org} = C_{tot} - C_{anorg} \quad (\text{Gleichung 1}).$$

Der Gesamt-C wird hierfür mittels Verbrennung bei bis zu 1.500 °C in CN-Analysegeräten bestimmt (DIN EN 15936:2012-11, Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung). Der Carbonatgehalt wird gasvolumetrisch bestimmt (DIN EN ISO 10693:2014-06, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren (ISO 10693:1995)).

Die Bestimmung der Lagerungsdichte (siehe Gleichung 2) erfolgt üblicherweise als ungestörte Probe mittels Stechzylindern (DIN EN ISO 11272:2017-07, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte). Aber auch andere Probenahmegeräte mit bekanntem Volumen sind geeignet, sofern damit intakte, ungestörte Bodenproben entnommen werden können.

Der Skelettanteil der Probe (Steine und Fragmente >2 mm Partikelgröße), ist ein wichtiger Faktor für die Berechnung des C_{org} -Vorrats (Gleichung 2). Gleichzeitig ist seine Bestimmung mit erheblichem Aufwand und Unsicherheiten (Entnahme und Siebung größerer Probenmengen oder Schätzung an der Profilwand einer Schürfgrube) verbunden. Bei Skelettanteilen <5 Vol%, was im Oberboden der meisten der landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands zu erwarten ist (Poeplau et al., 2017), kann der Skelettanteil bei der Berechnung des C_{org} -Vorrats vernachlässigt werden.

C_{org} -Vorratsberechnung

Um die im Gesamtboden gespeicherte C_{org} -Menge zu ermitteln, ist es notwendig, den C_{org} -Gehalt des Feinbodens auf eine bestimmte Volumen- bzw. Flächeneinheit Boden zu normieren. Hierfür wird der C_{org} -Vorrat unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte sowie des Skelettanteils (Hobley et al., 2018; Poeplau et al., 2017) berechnet (Gleichung 2):

$$Vorrat_{C_{org}} = \text{Gehalt}_{C_{org}} \times LD \times \text{Tiefe} \times (1 - \text{Skelettanteil}) \times \frac{1}{100} \quad (\text{Gleichung 2}).$$

Der $Vorrat_{C_{org}}$ ($kg\ m^{-2}$) ist abhängig vom $\text{Gehalt}_{C_{org}}$ des Feinbodens ($mg\ g^{-1}$), der Lagerungsdichte der Probe ($LD, g\ cm^{-3}$), der Beprobungstiefe (Tiefe, cm) und der Masse des

Skelettanteils (g kg^{-1}). Eine initiale Bestimmung der Lagerungsdichte sowie zumindest eine Abschätzung des Skelettanteils ist für die korrekte C_{org} -Vorratserfassung unabdingbar. Eine Abschätzung der Lagerungsdichte aus Pedotransferfunktionen ist sehr fehlerbehaftet und sollte deshalb unterbleiben (Wiesmeier et al., 2012). Bei Wiederholungsbeprobungen kann auf eine erneute Bestimmung der Lagerungsdichte und Skelettanteile verzichtet werden, es ist lediglich eine Bestimmung des C_{org} -Gehalts erforderlich. Die C_{org} -Vorratsberechnung erfolgt dabei unter Verwendung der initialen Werte für die Lagerungsdichte und den Skelettanteil und folgt somit dem Prinzip äquivalenter Bodenmassen (Ellert & Bettany, 1995; Wendt & Hauser, 2013).

Die Umrechnung des im Boden gespeicherten C_{org} in CO_2 -Äquivalente ergibt sich aus dem Masseverhältnis des Elements C im CO_2 -Molekül (Gleichung 3):

$$\text{Umrechnungsfaktor} = \frac{\text{Molare Masse}_{\text{CO}_2}}{\text{Molare Masse}_C} = \frac{44 \text{ g mol}^{-1}}{12 \text{ g mol}^{-1}} \approx 3,67 \quad (\text{Gleichung 3}).$$

Hinweise zu Unsicherheiten

Messunsicherheiten in Form von zufälligen Fehlern lassen sich auch bei sorgfältigem Arbeiten nicht vollständig ausschließen und beinhalten zum Beispiel kleinste Schwankungen im Messvorgang oder Fehler aufgrund der Heterogenität von Böden. Durch Messwiederholungen oder Mischproben lassen sich diese minimieren. Daher ist es umso wichtiger, einen tatsächlichen Anstieg der C_{org} -Vorräte von natürlichen Schwankungen oder zufälligen Messfehlern zu unterscheiden. Trends im C_{org} -Vorrat sind frühestens anhand zweier Datenpunkte erkennbar und anhand dreier Datenpunkte statistisch testbar.

Die Frage, ob die C_{org} -Vorräte über die Zeit einen tatsächlichen Anstieg aufweisen, lässt sich statistisch formal in der Hypothese ausdrücken: „Die Steigung der Regressionslinie aus C_{org} -Vorrat (y) und Zeit (x) unterscheidet sich signifikant von 0“. Diese Hypothese lässt sich mittels eines t-Testverfahrens statistisch prüfen (wenn mehr als zwei Beprobungen durchgeführt wurden), welches allerdings nur unter den Voraussetzungen der Normalverteilung, Linearität, Unabhängigkeit und Varianzhomogenität der Daten zulässig ist. Das Ergebnis einer statistischen Auswertung auf Basis von drei Datenpunkten dürfte jedoch auf Grund der geringen Teststärke bei $n = 3$ mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Fehlinterpretation führen. Es gilt der Grundsatz, je größer die Anzahl der Beobachtungen, desto größer die Teststärke. Für eine statistisch verifizierbare Aussage darüber, ob über die Zeit ein signifikanter Anstieg der C_{org} -Vorräte vorliegt, wären daher mehr Datenpunkte notwendig (Leifeld et al., 2019). Dies ist wiederum mit messtechnischem als auch zeitlichem Aufwand verbunden.

4. Eignung von Maßnahmen zum Humusaufbau

Im Folgenden werden Maßnahmen bewertet, die zu einem Anstieg der C_{org} -Vorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden führen können und daher im Rahmen der Vergabe von CO_2 -Zertifikate relevant sind. Bei den genannten mittleren C-Sequestrierungsraten handelt es sich um linear ermittelte Werte aus Feldversuchen und Praxisschlägen, die der Literatur entnommen wurden und für die gemäßigte Zone bzw. Deutschland als Durchschnittswerte dienen können.

Verbesserte Fruchtfolgen/Dauerkulturen

Die Gestaltung der Fruchtfolge ist eine zentrale Maßnahme für die Anreicherung von C_{org} in Ackerböden. Durch den Anbau humusmehrender Kulturen (Futter- und Körnerleguminosen), Kulturen mit einem intensiven und tiefgreifenden Wurzelsystem und mehrjährigen Kulturen kommt es zu einem Anstieg der C_{org} -Vorräte. Die beobachteten C-Sequestrierungsraten sind je nach Kultur sehr variabel und reichen von 0,15 bis 0,36 t $ha^{-1} a^{-1}$ (Bolinder et al., 2012; West & Post, 2002).

Durch die Integration von Zwischenfrüchten als Stoppel- oder Untersaat zur Nutzung als Gründüngung oder Tierfutter kommt es zu einem zusätzlichen Eintrag organischer Substanz in Ackerböden und dementsprechend zu einer Steigerung der C_{org} -Vorräte. Bei einem jährlichen Zwischenfruchtanbau mit Gründüngung werden im Mittel 0,32 t $C_{org} ha^{-1} a^{-1}$ aufgebaut (Poeplau & Don, 2015). Zudem bietet der Zwischenfruchtanbau eine Reihe weiterer Vorteile wie verminderte Erosion, Unkrautregulierung, Förderung der Biodiversität, Nährstoffbindung nach der Hauptkultur und dadurch verringerte Nitratauswaschung.

Management von Ernteresten

Der Verbleib bzw. eine erhöhte Rückführung von Ernteresten erhöht den Eintrag organischer Substanz in Böden und führt so zu einem Anstieg der C_{org} -Vorräte. Dabei spielt insbesondere eine verstärkte Belassung oberirdischer Erntereste wie Stroh, Stoppel oder Rübenblatt bzw. eine Rückführung in Form von Stallmist, Gülle oder Gärresten eine zentrale Rolle. Der Anfall von Ernteresten kann über die Sortenwahl und einem hohen Ertragspotential optimiert werden. Allerdings kann die energetische Nutzung von Ernteresten vorteilhafter sein hinsichtlich des Klimaschutzes als deren Verbleib auf den landwirtschaftlichen Flächen mit dem Ziel der C_{org} -Erhöhung (Powelson et al., 2008). Die energetische Nutzung von Ernteresten in Biogasanlagen und eine Rückführung der Gärreste kann in ähnlichem Ausmaß zum Humushaushalt beitragen wie eine Belassung der Erntereste auf den Flächen, da Gärreste ein relativ hohes Humusreproduktionspotential besitzen (Burmeister et al.,

2019). Eine Abwägung möglicher Nutzungspfade von Ernteresten sollte aber nicht nur hinsichtlich der Klimaschutzwirkungen erfolgen, sondern auch andere Aspekte wie Auswirkungen auf die Bodenflora und -fauna miteinbeziehen.

Landnutzungsänderungen

Da Grünlandböden vor allem aufgrund höherer wurzelbürtiger C-Einträge deutlich höhere C_{org} -Vorräte besitzen als Ackerböden, ist eine Umwandlung von Acker- zu Grünland eine sehr effektive Maßnahme zur Erhöhung der C_{org} -Vorräte. Durch eine Neuanlage von Grünland ist langfristig mit einem mittleren C_{org} -Aufbau von $0,73 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zu rechnen (Conant et al., 2001; Poeplau et al., 2011). Weitere Vorteile bieten sich hinsichtlich des Gewässer- und Erosionsschutzes sowie der Förderung der Biodiversität. Allerdings ist bei einer Ausdehnung des Dauergrünlands mit einer Zunahme der Tierbestände und damit einhergehend deutlich höheren THG-Emissionen zu rechnen, was die Klimawirkung der zusätzlichen Kohlenstoffbindung im Boden mindern oder aufheben würde.

Durch Aufforstungen von Ackerland kommt es ebenfalls zu einer deutlichen Anreicherung von C_{org} um durchschnittlich $0,79 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Poeplau et al., 2011). Allerdings ist etwa ein Drittel des C_{org} in der Streuauflage der aufgeforsteten Wälder gebunden und damit störungsanfällig. Außerdem kann es durch den Verlust landwirtschaftlicher Flächen bei gleichbleibendem Konsum zu Leakage-Effekten kommen (siehe Kap. 5). Aufforstungen von Grünland führen im Mittel zu keinen signifikanten Veränderungen der Bodenkohlenstoffvorräte.

Agroforstsysteme

Bei Agroforstsystemen handelt es sich um global in unterschiedlichster Form verbreitete Landnutzungssysteme, bei denen Gehölze mit landwirtschaftlichen Flächen kombiniert werden. In Deutschland ist die Agroforstwirtschaft bislang nur in Form traditioneller Systeme wie Hecken und Streuobstwiesen verbreitet, moderne Energie- oder Wertholzsysteme spielen noch keine Rolle. Neben vielfältigen positiven Umweltwirkungen hinsichtlich des Erosionsschutzes, erhöhter Habitatvielfalt und Biodiversität und einem verbesserten Mikroklima können Agroforstsysteme durch die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in der Gehölzbiomasse und im Boden einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Studien zu temperierten Agroforstsystemen belegen einen mittleren C_{org} -Aufbau im Boden von $0,68 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Cardinael et al., 2017; Cardinael et al., 2019; De Stefano & Jacobson, 2018; Shi et al., 2018). Bei der Anlage von Kurzumtriebsplantagen in Deutschland wurde aber im Mittel keine zusätzliche Bodenkohlenstoffspeicherung gefunden (Walter et al., 2015). Im Allgemeinen ist eine Anlage von Agroforstsystemen auf Ackerland deutlich effektiver als

auf Grünland, da aufgrund der hohen C_{org} -Vorräte in Grünlandböden eine nur geringe zusätzliche Kohlenstofffixierung im Boden zu erwarten ist.

Organische Düngung/Kompost

Durch die Ausbringung organischer Dünger wie Stallmist, Gülle, Gärresten und Kompost wird bei der Ernte entzogener Kohlenstoff sowie Nährstoffe den landwirtschaftlichen Flächen zurückgeführt. Die organische Düngung stellt damit eine zentrale Komponente eines ausgeglichenen Humushaushalts und einer nachhaltigen Bodennutzung im Sinne des Nährstoffrecyclings dar. Dabei müssen die Vorgaben der Düngeverordnung eingehalten werden und es sollte grundsätzlich aus ökonomischen und ökologischen Gründen eine hohe Nährstoffeffizienz angestrebt werden. Durch die Anwendung organischer Dünger kann der Einsatz von Mineraldüngern, deren Herstellung sehr energieintensiv ist, reduziert werden.

Eine Nutzung externer Kohlenstoffquellen für den C_{org} -Aufbau stellt allerdings keinen Beitrag zum Klimaschutz dar, da C_{org} lediglich räumlich verlagert und lokal konzentriert wird, sofern die Gesamtmenge an organischen Düngern (Wirtschaftsdünger, Kompost etc.) gleich bleibt. Durch diese Verlagerung verringert sich das Humusreproduktionspotential der Flächen, von denen die externe organische Substanz ursprünglich stammt. Eine solche räumliche Verlagerung kann einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, wenn es durch den Export organischer Dünger aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen zu einer effizienteren Nutzung von Nährstoffen kommt (Don et al., 2018). Eine räumliche Verlagerung von Kohlenstoffquellen für den Humusaufbau kann aber im Rahmen von CO_2 -Zertifikate nicht als Beitrag zum Klimaschutz anerkannt werden. Nur im Falle eines Ertragsanstiegs bedingt durch eine Förderung der Bodenfruchtbarkeit als Folge organischer Düngung kann es indirekt zu einer erhöhten Fixierung atmosphärischen Kohlenstoffs kommen (Sykes et al., 2019), was aber kaum vom direkten Anstieg der C_{org} -Vorräte durch die aufgebrauchten organischen Dünger getrennt werden kann.

Biokohle

Bei Bio- oder Pflanzenkohle handelt es sich um mittels Pyrolyse thermisch umgewandelte organische Substanz, die vorwiegend als Bodenhilfsstoff zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und als Güllezusatz zum Einsatz kommt. Daneben können aus Substraten mit hohem Restwassergehalten über die hydrothermale Karbonisierung (HTC) unter hohem Druck und deutlich geringeren Temperaturen braunkohleähnliche Produkte hergestellt werden, die als HTC-Kohlen bezeichnet werden. Hinsichtlich einer zusätzlichen Kohlenstofffixierung im Boden durch Biokohlen ist deren Abbaustabilität entscheidend, die weitgehend von den Produktionsbedingungen, insbesondere der Pyrolysetemperatur abhängt. Pyrolysekohlen, die bei Temperaturen >450 °C hergestellt wurden, besitzen

allgemein eine hohe Stabilität und tragen daher zur Kohlenstoffbindung im Boden bei (Crombie und Masek, 2015). Allerdings sind auch hier räumliche Umverteilungseffekte von organischer Substanz analog zu organischen Düngern zu beachten, so dass die Eignung von Biokohlen im Rahmen von CO₂-Zertifikate äußerst begrenzt ist. HTC-Kohlen zeichnen sich zudem durch eine weitaus geringere Abbaustabilität aus und eignen sich daher nicht für eine langfristige Kohlenstofffixierung (Bach, 2017).

In Deutschland sind nach dem Düngemittelrecht nur Biokohlen aus unbehandeltem Holz mit einem C-Gehalt von mindestens 80 % zulässig. Grundsätzlich sollten nur mit dem European Biochar Certificate (EBC) zertifizierte Pflanzenkohlen verwendet werden, um sicherzustellen, dass die Böden nicht mit organischen und/oder anorganischen Schadstoffen belastet werden. Zuverlässige C-Sequestrierungsraten können für Deutschland aufgrund mangelnder Langzeitversuche unter Praxisbedingungen nicht abgeleitet werden und sind zudem von der applizierten Menge an Biokohle abhängig.

Es bleibt anzumerken, dass die Verfügbarkeit geeigneter Reststoffe für die Biokohleherstellung sehr begrenzt ist (Teichmann, 2014). Substrate mit hohem Nährstoffgehalt wie Gülle oder Gärreste sind für die Biokohleherstellung nicht geeignet und auch nicht zulässig. Zudem konnten relevante bodenverbessernde Wirkungen bzw. eine Ertragssteigerung bislang nur auf tropischen Böden, nicht aber in temperierten Regionen nachgewiesen werden (Jeffery et al., 2017). Es bestehen also Zweifel hinsichtlich des Nutzens der relativ teuren Biokohlen in der Landwirtschaft (Teichmann, 2014).

Reduzierte Bodenbearbeitung

Pfluglose oder reduzierte Bodenbearbeitungssysteme, wie Mulch- und Direktsaat, sind essentielle Komponenten eines wirksamen Erosionsschutzes und können Vorteile hinsichtlich der Bodenmakrofauna haben. Eine Humusmehrung kann über reduzierte Bodenbearbeitung aber in unseren Böden im Allgemeinen nicht erreicht werden, sondern lediglich eine vertikale Umverteilung von C_{org} im Oberboden. Durch eine Reduzierung der Bodenbearbeitungstiefe kommt es zwar zu einem C_{org}-Anstieg in der oberen Ackerkrume (in der Regel im Bereich 0-10 cm), da sich in diesem Bereich der Eintrag organischer Substanz konzentriert. Im darunterliegenden Bereich der Ackerkrume nehmen die C_{org}-Vorräte allerdings ab, da der Eintrag organischer Substanz (abgesehen von wurzelbürtigen Einträgen) reduziert ist.

In Summe ergeben sich auch nach jahrzehntelanger Betrachtung in den meisten Fällen keine signifikanten Veränderungen der C_{org}-Vorräte im Vergleich zu wendenden Bodenbearbeitungssystemen mit dem Pflug (Powlson et al., 2014). Zudem kann es bei

dauerhaft ausbleibender Bodenbearbeitung je nach Bodentyp aufgrund einer dichteren Lagerung zu erhöhten Emissionen von Lachgas (N_2O) kommen. Nur wenn die reduzierte Bodenbearbeitung mit einer Steigerung der Erträge einhergeht und damit einer Erhöhung der Menge an Ernteresten, kann reduzierte Bodenbearbeitung indirekt auch zu erhöhten C_{org} -Vorräten führen.

5. Einschränkungen

Die Festlegung von C_{org} in Böden unterscheidet sich in einigen wichtigen Punkten von Kompensationsmaßnahmen, die auf eine Reduzierung von Emissionen abzielen. So beruht beispielsweise die positive Klimawirkung eines C_{org} -Aufbaus auf dem einmaligen Auffüllen eines Kohlenstoffspeichers und ist dadurch limitiert. Je größer das noch freie Speichervolumen ist, desto größer ist die erzielbare Klimawirkung, was Implikationen für Fragen der Fairness hat. Während Emissionsreduktionen kumulative Effekte erzielen können und daher Reduktionen zu einem frühen Zeitpunkt aus Sicht des Klimas vorteilhafter sind als spätere, ist dies bei der Anreicherung organischer Bodensubstanz nicht der Fall. Dies erschwert die Bewertung der Zusätzlichkeit von Maßnahmen. Anders als bei vermiedenen Emissionen, ist eine Erhöhung der organischen Bodensubstanz zudem reversibel, was eine Absicherung der Dauerhaftigkeit der positiven Klimawirkung erforderlich macht. Die Konsequenzen dieser Unterschiede werden im Folgenden diskutiert.

Fairness

Das Potential für einen Aufbau von C_{org} ist umso größer, je stärker der C_{org} -Gehalt als Folge der bisherigen Bewirtschaftungspraxis eines Standorts gesunken ist (Galati et al., 2016). Von einer Zertifizierung des C_{org} -Aufbaus könnten daher am stärksten jene Landwirte profitieren, deren Management die C_{org} -Vorräte reduziert hat, während Landwirte, die erfolgreich C_{org} in ihren Böden aufgebaut haben, wenig oder gar nicht profitieren könnten. Bereits erfolgte Klimaschutzmaßnahmen der letztgenannten Gruppe würden somit nicht gewürdigt. Daher sollten Landwirte bereits im Vorfeld hinsichtlich der zu erwartenden Effektivität landwirtschaftlicher Maßnahmen für den C_{org} -Aufbau beraten werden (siehe Abbildung 2).

Reversibilität/Langfristigkeit

Im Gegensatz zu einer direkten Vermeidung von THG-Emissionen ist der Aufbau von C_{org} als Klimaschutzmaßnahme nur wirksam, wenn die C-Speicherung dauerhaft erfolgt und die entsprechende CO_2 -Menge somit auf absehbare Zeit der Atmosphäre entzogen bleibt. Der positive Effekt des C_{org} -Aufbaus ist allerdings vollständig reversibel. Verluste des durch die beschriebenen Maßnahmen aufgebauten C_{org} (siehe Kapitel 4) können sowohl durch externe Einflüsse, wie den Klimawandel, als auch durch einen erneuten Wechsel der

Bewirtschaftung erfolgen. Falls Zertifikate genutzt werden, um unvermeidbare Emissionen in anderen Sektoren auszugleichen, müssten sich die Landwirte daher dauerhaft verpflichten, die humusmehrende Bewirtschaftung beizubehalten oder andernfalls die Emissionen durch den Kauf anderer Zertifikate auszugleichen (Thamo & Pannell, 2016). Theoretisch müsste eine solche Verpflichtung sogar eine Ewigkeitsklausel enthalten, da auch bei einem sehr viel später erfolgenden Bewirtschaftungswechsel die Wirkung des Zertifikats komplett aufgehoben werden kann. Bisher gibt es keine verlässlichen Prognosen, wie sich C_{org} -Gehalte allein durch die erfolgten und zu erwartenden Klimaveränderungen verändern werden. Zusätzlich gespeicherter C_{org} könnte im Zuge des Klimawandels auch ohne Zutun der Flächenbewirtschafter verloren gehen.

Stickstoffemissionen

Die organische Bodensubstanz enthält neben Kohlenstoff auch Nährstoffe, wie z.B. Stickstoff (N), und leistet durch ihren Umsatz daher einen wichtigen Beitrag zur Pflanzenernährung. Dies gilt jedoch nur, solange der wachsende Pflanzenbestand die freiwerdenden Nährstoffe aufnimmt. Langfristig kann leicht verfügbarer C_{org} im Humus zu steigenden N_2O -Emissionen führen (Lugato et al., 2018). Bei einer sehr hohen Humusversorgung und den damit einhergehenden hohen Umsatzraten kann es, in Abhängigkeit von der Temperatur, dem pH-Wert, Bodenfeuchte und/oder Textur, zu einem Überschuss an mineralischem Stickstoff kommen, sodass negative Folgen für die Umwelt nicht auszuschließen sind. Allerdings kann ein C_{org} -Aufbau über mehrere Jahrzehnte eine positive Klimaschutzwirkung entfalten, bis steigende N_2O -Emissionen den Effekt ins Gegenteil umkehren und Böden zu THG-Quellen werden (Lugato et al., 2018).

Zusätzlichkeit

Nach den gängigen Definitionen müssen Emissions-Kompensationen das Kriterium der Zusätzlichkeit erfüllen (Leifeld et al., 2019). Handlungen, die ohnehin erfolgen oder unterlassen werden, können demnach nicht als Kompensation gewertet werden. Humusaufbauende Maßnahmen, die im Rahmen des jeweiligen Anbausystems (konventionell oder ökologisch) ohnehin erfolgen, stellen daher keine Kompensationsmaßnahme dar. Der Aufbau von C_{org} sollte durch eine Maßnahme erfolgen, die über die Zertifikate motiviert und finanziert ist. Dabei sollten Doppelförderungen vermieden werden, da dadurch die Effizienz der für den Klimaschutz eingesetzten Mittel reduziert würde. Zusätzlichkeit kann nur dann vorausgesetzt werden, wenn die entsprechenden Maßnahmen ohne finanzielle Förderung unwirtschaftlich wären. Allerdings ist selbst in diesem Fall eine Zusätzlichkeit nicht immer gegeben, da Landwirte bei ihren

Management-Entscheidungen nicht ausschließlich von ökonomischen, sondern auch von sozialen Erwägungen geleitet werden (Bartkowski & Bartke, 2018; Thamo & Pannell, 2016).

Ebenfalls muss berücksichtigt werden, dass Maßnahmen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt das Kriterium der Zusätzlichkeit erfüllen, dies zu einem späteren Zeitpunkt möglicherweise nicht mehr erfüllen. Für die Bewertung der Klimawirkung einer Maßnahme muss dieser Effekt sogar rückwirkend betrachtet werden (Thamo & Pannell, 2016). Wird beispielsweise durch Zertifikate im Jahr 2020 die Einführung von humusaufbauenden Verfahren ermöglicht, die andernfalls unwirtschaftlich gewesen wären, wird dadurch ein C_{org} -Vorrat aufgebaut, der zunächst als zusätzlich gilt. Werden diese oder gleichwertige Verfahren allerdings zu einem späteren Zeitpunkt durch technischen Fortschritt auch ohne Förderung rentabel und allgemein verbreitet, dann ist der Klimanutzen der Zertifikate damit aufgehoben. Mit oder ohne Zertifikate würde sich langfristig derselbe C_{org} -Vorrat im Boden einstellen.

Verschiebungseffekte (Leakage)

Maßnahmen, die die landwirtschaftliche Produktivität stark senken (wie z.B. die großflächige Umwandlung von Ackerland in Kurzumtriebs-Plantagen) können zu indirekten Landnutzungsänderungen (ILUC) beitragen (Leifeld et al., 2019). Werden infolge eines entstehenden Ungleichgewichts zwischen Angebot und Nachfrage nach Agrarprodukten in anderen Regionen der Welt beispielsweise Wälder und Savannen in Ackerland umgewandelt, führt dies zu sehr starken THG-Emissionen, wodurch die klimatische Gesamtbilanz von Klimaschutzmaßnahmen negativ ausfallen kann (Searchinger et al., 2008).

Nimmt nur ein Teil der Betriebe in einer Region oder ein Teil der Flächen in einem Betrieb an Programmen zum zertifizierten Humusaufbau teil, besteht die Gefahr, dass humusaufbauende Maßnahmen auf diese Flächen konzentriert werden (z.B. der Anbau von humusmehrenden Kulturen oder Zwischenfrüchten, dass Ausbringen von organischen Düngern), entsprechendes Management auf den übrigen Flächen dafür aber reduziert wird (Leifeld et al., 2019). Bleibt dadurch die Gesamtmenge der positiven Maßnahmen im Betrieb oder in der Region gleich, ist keine positive Klimawirkung zu erwarten.

Nimmt die Menge oder Intensität der humusaufbauenden Maßnahmen dagegen zu (z. B. mehr Anbau von Zwischenfrüchten), müssen die damit verbundenen Emissionen von der positiven Klimawirkung des C_{org} -Aufbaus abgezogen werden. In Abhängigkeit vom Verhältnis der positiven und negativen Klimawirkungen führt dies früher oder später zu einer insgesamt negativen Klimawirkung (Thamo & Pannell, 2016).

Trade-Offs mit anderen Schutzgütern (Spill-over)

Für eine Gesamtbewertung der Eignung von humusaufbauenden Maßnahmen zur Kompensation von THG-Emissionen müssen neben der intendierten Klimawirkung auch zusätzliche positive (Synergien) wie negative (Trade-offs) Auswirkungen auf andere Schutzgüter berücksichtigt werden.

Zu den möglichen Synergien zählen eine Steigerung der Ertragsstabilität und der biologischen Aktivität im Boden, sowie eine Steigerungen der oberirdischen Biodiversität durch erweiterte Fruchtfolgen und Agroforst-Systeme, eine Reduzierung des mineralischen Stickstoffdüngerbedarfs durch Leguminosen, so wie eine Reduzierung von Bodenerosion durch verstärkten Einsatz von Zwischenfrüchten und reduzierter Bodenbearbeitung. Hinzu kommt die verbesserte Wasserinfiltration und Wasserspeicherkapazität humusreicher Böden, sodass der C_{org} -Aufbau ebenfalls als wichtige Anpassungsmaßnahme an Dürreperioden und häufigere Starkniederschläge angesehen wird (Hamidov et al., 2018).

Der größte Trade-off ist unter derzeitigen Marktbedingungen die verringerte Wirtschaftlichkeit. Fast alle diskutierten Maßnahmen zur Erhöhung der C_{org} -Vorräte verringern bei dem derzeitigen Preissystem landwirtschaftlicher Produkte die Wirtschaftlichkeit des Anbaus. Genau hier können Zertifikate ansetzen.

Derzeit wird ebenfalls diskutiert, eine Honorierung der ökologischen Leistungen veränderter Anbausysteme, die mit dem Aufbau organischer Bodensubstanz einhergehen, im Rahmen der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) zu implementieren. Ähnliche Wege geht die Schweizer Agrarpolitik, die im Rahmen der kürzlich vorgestellten Agrarpolitik 2022 (AP22+) versucht, ökologische Leistungen der Landwirtschaft am Markt in Wert zu setzen. Dies könnte das Preissystem dahingehend verschieben, dass humusfördernde Anbauverfahren mit positiven ökologischen Nebeneffekten unter bestimmten Bedingungen wirtschaftlich werden.

Weitere mögliche Trade-Offs sind eine Zunahme von N_2O -Emissionen mit steigendem C_{org} -Gehalt im Boden (Gu et al., 2017) sowie eine Reduzierung der Biomasseproduktion für Ernährung und Energie bei Umstellung auf ökologische Bewirtschaftung.

6. Zusammenfassung

CO_2 -Zertifikate können einen positiven Anstoß geben, damit sich Landwirte verstärkt mit einer nachhaltigen Bewirtschaftung und Humusversorgung ihrer Böden auseinandersetzen. Da Humus die zentrale Steuergröße für viele Funktionen des Bodens und nicht zuletzt der Bodenfruchtbarkeit darstellt, ist jede Anstrengung für mehr Humus sinnvoll. Um zum

Klimaschutz beizutragen, müssen bei der Vergabe von Zertifikaten aber bestimmte Kriterien eingehalten werden.

Insbesondere sind Verschiebungseffekte in Form von THG-Emissionen an anderen Stellen zu vermeiden sowie Emissionen, die durch die Klimaschutzmaßnahmen selbst erzeugt werden, zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Langfristigkeit eines C_{org} -Aufbaus sicherzustellen. Letzteres kann z.B. durch Humusaufbau in besonders geschützten Ökosystemen (z.B. Hecken oder Dauergrünland) erfolgen, wodurch potentielle Verluste des angereicherten C_{org} reduziert werden können. Zudem sollten CO_2 -Zertifikate so ausgestaltet sein, dass sie Maßnahmen, die in der Regel lediglich zu einer Umverteilung von C_{org} führen, nicht aber zu einer zusätzlichen Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs (z.B. Ausbringung von Kompost), bei der Honorierung nicht berücksichtigen.

Der Nachweis eines C_{org} -Aufbaus ist aufwändig und erfordert neben einer repräsentativen Probenahme eine genaue Bestimmung der C_{org} -Gehalte sowie eine zumindest einmalige Bestimmung der Lagerungsdichte und des Skelettanteils. Eine Veränderung der Bearbeitungstiefe kann aber, selbst bei sachgemäßer Beprobung, zu Fehlinterpretationen führen. Landwirte, die sich für Humusaufbau interessieren, sollten hinsichtlich standort- und betriebspezifischen Optionen zum Aufbau von C_{org} umfassend unterstützt und beraten werden.

Danksagung

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung dieser Arbeit im Rahmen der Förderinitiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie“ (BonaRes, Modul B, Phase 2: BonaRes – Zentrum für Bodenforschung, Förderkennzeichen 031B0511).

Literatur

- Bartkowski, B., Bartke, S., 2018. Leverage Points for Governing Agricultural Soils: A Review of Empirical Studies of European Farmers' Decision-Making. *Sustainability* 10(9).
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009. Anleitung zur Bodenprobenahme gemäß Klärschlamm-, Bioabfall-, Dünge- und Cross-Compliance-Verordnung für Untersuchungen auf P, K, Mg, Spurenelemente, Schwermetalle, pH, Kalk, Humus und Bodenart. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.
- Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andren, O., Parent, L.E., 2012. Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Can. J. Soil Sci.* 92(6), 821-833.
- Burmeister, J., Wiesmeier, M., Parzefall, S., Freibauer, A., Fritz, M., 2019. Auswirkungen von Strohnutzung und Gärrestdüngung auf den Humushaushalt und andere Bodenparameter. Tagungsband Bayerische Biogasfachtagung, 29-37.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Beral, C., Barthes, B.G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E., Chenu, C., 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 243-255.
- Cardinael, R., Umulisa, V., Toudert, A., Olivier, A., Bockel, L., Bernoux, M., 2019. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems (vol 13, 124020, 2018). *Environ. Res. Lett.* 14(3), 1.
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* 188, 41-52.
- Conant, R.T., Paustian, K., Elliott, E.T., 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecol. Appl.* 11(2), 343-355.
- De Stefano, A., Jacobson, M.G., 2018. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agrofor. Syst.* 92(2), 285-299.
- Don, A., Flessa, H., Marx, K., Poeplau, C., Tiemeyer, B., Osterburg, B., 2018. Die 4-Promille-Initiative "Böden für Ernährungssicherheit und Klima" - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Thünen Working Paper 112. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- Galati, A., Crescimanno, M., Gristina, L., Keesstra, S., Novara, A., 2016. Actual provision as an alternative criterion to improve the efficiency of payments for ecosystem services for C sequestration in semiarid vineyards. *Agricultural Systems* 144, 58-64.
- Gu, J., Yuan, M., Liu, J., Hao, Y., Zhou, Y., Qu, D., Yang, X., 2017. Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China. *Science of The Total Environment* 595, 371-379.
- Hamidov, A., Helming, K., Bellocchi, G., Bojar, W., Dalgaard, T., Ghaley, B.B., Hoffmann, C., Holman, I., Holzkämper, A., Krzeminska, D., Kværnø, S.H., Lehtonen, H., Niedrist, G., Øygarden, L., Reidsma, P., Roggero, P.P., Rusu, T., Santos, C., Seddaiu, G., Skarbøvik, E., Ventrella, D., Żarski, J., Schönhart, M., 2018. Impacts of climate change adaptation options on soil functions: A review of European case-studies. *Land Degradation & Development* 29(8), 2378-2389.
- Hobley, E.U., Murphy, B., Simmons, A., 2018. Comment on "Soil organic stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content" by Poeplau et al. (2017). *SOIL* 4(2), 169-171.
- Leifeld, J., Müller, A., Steffens, M., 2019. Kriterien für die Zertifizierung von Kohlenstoffsenken in Landwirtschaftsböden. *Agrarforschung Schweiz* 10(9), 346-349.
- Lugato, E., Leip, A., Jones, A., 2018. Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N2O emissions. *Nature Climate Change* 8(3), 219-223.

- Olson, K.R., 2013. Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U.S. croplands: Issues paper for protocol development. *Geoderma* 195-196, 201-206.
- Poepflau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 200, 33-41.
- Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J., Gensior, A., 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology* 17(7), 2415-2427.
- Poepflau, C., Vos, C., Don, A., 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3(1), 61-66.
- Powlson, D.S., Riche, A.B., Coleman, K., Glendining, N., Whitmore, A.P., 2008. Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: Limitations and alternatives. *Waste Manage.* 28(4), 741-746.
- Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., Cassman, K.G., 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 4, 678-683.
- Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Hiederer, R., Kapos, V., 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* 5(1), 81-91.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T.-H., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science* 319(5867), 1238.
- Shi, L.L., Feng, W.T., Xu, J.C., Kuzyakov, Y., 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degrad. Dev.* 29(11), 3886-3897.
- Sykes, A.J., Macleod, M., Eory, V., Rees, R.M., Payen, F., Myrgiotis, 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., 2019. Characterising the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. *Global Change Biology* 26(3), 1085-1108.
- Thamo, T., Pannell, D.J., 2016. Challenges in developing effective policy for soil carbon sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence. *Climate Policy* 16(8), 973-992.
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V., 1991. Band I Die Untersuchung von Böden, Das VDLUFA Methodenbuch. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, pp. 1655.
- von Lützow, M., Kogel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. *European Journal of Soil Science* 57(4), 426-445.
- Walter, K., Don, A., Flessa, H., 2015. No general soil carbon sequestration under Central European short rotation coppices. *GCB Bioenergy* 7(4), 727-740.
- West, T.O., Post, W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(6), 1930-1946.
- Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., 2012. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology* 18, 2233-2245.

Bisherige Veröffentlichungen

- 2019/6 Hoffmann et al. Data Standards for Soil- and Agricultural Research
DOI: [10.20387/BonaRes-ARM4-66M2](https://doi.org/10.20387/BonaRes-ARM4-66M2)
- 2019/5 Techen & Helming. Policy goals as reference points for interdisciplinary soil research
DOI: [10.20387/BonaRes-52TA-02M9](https://doi.org/10.20387/BonaRes-52TA-02M9)
- 2019/4 Paul & Helming. Handbook of Soil-Related Impact Assessment.
DOI: [10.20387/BonaRes-6DJM-E22M](https://doi.org/10.20387/BonaRes-6DJM-E22M)
- 2019/3 Gerdes et al. Workshop-Protokoll: Den Unterboden nutzen, um auf Trockenperioden besser vorbereitet zu sein - Eine Akzeptanzanalyse von Maßnahmen zur Aufwertung des Unterbodens
DOI: [10.20387/BonaRes-W02N-H27N](https://doi.org/10.20387/BonaRes-W02N-H27N)
- 2019/2 Grosse et al. Fact Sheet for the Description of Long-Term Field Experiments / Steckbrief zur Beschreibung von Dauerfeldversuchen
DOI: [10.20387/BonaRes-R56G-FGRW](https://doi.org/10.20387/BonaRes-R56G-FGRW)
- 2019/1 Stein et al. Report on available soil data for German agricultural areas.
DOI: [10.20387/BonaRes-CD4Q-1PEM](https://doi.org/10.20387/BonaRes-CD4Q-1PEM)
- 2018/3 Schucknecht et al. (Eds.) SUSALPS Conference 2018 - Book of Abstracts.
DOI: [10.20387/BonaRes-R0P3-X8GN](https://doi.org/10.20387/BonaRes-R0P3-X8GN)
- 2018/2 Hoffmann et al. Overview of relevant standards for the BonaRes-Program.
DOI: [10.20387/BonaRes-9D25-0D93](https://doi.org/10.20387/BonaRes-9D25-0D93)
- 2018/1 Schneider et al. Grünlandwirtschaft & Klimawandel. Zusammenfassung des Runden Tisches vom 18. Juli 2017 in Garmisch-Partenkirchen.
DOI: [10.20387/BonaRes-HV15-M61E](https://doi.org/10.20387/BonaRes-HV15-M61E)
- 2017/3 Gärtner et al. The BonaRes Metadata Schema.
DOI: [10.20387/BonaRes-5PGG-8YRP](https://doi.org/10.20387/BonaRes-5PGG-8YRP)
- 2017/2 Hoffmann et al. Overview of relevant standards for the BonaRes-Program.
DOI: [10.20387/BonaRes-FK84-PCR9](https://doi.org/10.20387/BonaRes-FK84-PCR9)
- 2017/1 Svoboda, N., Heinrich, U. The BonaRes Data Guideline.
DOI: [10.20387/BonaRes-E1AZ-ETD7](https://doi.org/10.20387/BonaRes-E1AZ-ETD7)



BONARES

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BonaRes Series

In der BonaRes Series werden verschiedene Formate zur Förderinitiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie - BonaRes“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) veröffentlicht. Im Fokus von BonaRes steht die nachhaltige Nutzung der Böden als begrenzte Ressource. BonaRes erweitert das gesicherte Wissen in Bezug auf das System Boden für Wissenschaftler*innen und Entscheidungsträger*innen. Ziel ist es, die Produktivität und alle anderen Bodenfunktionen zu erhalten und zu verbessern sowie neue Strategien für ein nachhaltiges Bodenmanagement zu entwickeln.

Die BonaRes Series wurde im Rahmen des Projektes „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie - BonaRes“, Projekt „BonaRes (Modul B): BonaRes-Zentrum für Bodenforschung, Teilprojekte A, B“ (Förderkennzeichen 031A608A, B) gefördert.

Erfahren Sie mehr über BonaRes: www.bonares.de

Senden Sie Ihr Manuskript zur Veröffentlichung an: info@bonares.de



BONARES



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung