

Die 4-Promille-Initiative „Böden für Ernährungssicherung und Klima“ – Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland

Axel Don, Heinz Flessa, Kirstin Marx, Christopher Poeplau, Bärbel Tiemeyer, Bernhard Osterburg

Thünen Working Paper 112

PD Dr. Axel Don
Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Bundesallee 65
38116 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 / 596 - 2641
E-Mail: axel.don@thuenen.de

Prof. Dr. Heinz Flessa
Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Bundesallee 65
38116 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 / 596 - 2601
E-Mail: heinz.flessa@thuenen.de

Kirstin Marx
ehemals Stabsstelle Boden
Thünen-Institut für Ländliche Räume

Dr. Christopher Poeplau
Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Bundesallee 65
38116 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 / 596 - 2679
E-Mail: christopher.poeplau@thuenen.de

Dr.-Ing. Bärbel Tiemeyer
Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Bundesallee 65A
38116 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 / 596 - 2644
E-Mail: baerbel.tiemeyer@thuenen.de

Bernhard Osterburg
Stabsstelle Klimaschutz
Thünen-Institut für Ländliche Räume
Bundesallee 64
38116 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 / 596 5211
E-Mail: bernhard.osterburg@thuenen.de

Thünen Working Paper 112

Braunschweig/Germany, Dezember 2018

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
2 Bewertung der 4-Promille-Initiative hinsichtlich der zugrunde liegenden Analysen, Daten und Annahmen	5
3 Maßnahmen zur Erhaltung und Erhöhung der Kohlenstoffvorräte in landwirtschaftlichen Böden	9
3.1 Organische Düngung	9
3.2 Management von Ernteresten	10
3.3 Zwischenfruchtanbau	12
3.4 Fruchtfolgegestaltung und Anbau tiefwurzelnder Pflanzen	12
3.5 Mechanische Einbringung organischer Substanz in Unterböden	13
3.6 Biokohle als Bodenzusatzstoff	14
3.6 Erhalt von Dauergrünland und Umwandlung von Ackerland in Grünland	16
3.7 Vernässung und Schutz von Moorböden	16
3.8 Aufforstung und Agroforstwirtschaft	18
3.9 Zusammenfassung zu landwirtschaftlichen Maßnahmen zum Humusaufbau	19
4 Wirkungen einer Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte auf die landwirtschaftlichen Erträge und Bodenfunktionen	23
5 Politische Instrumente zur Unterstützung der Erhaltung und Erhöhung der Kohlenstoffvorräte in landwirtschaftlichen Böden	25
6 Vorschläge für mögliche Beiträge zur 4-Promille-Initiative aus Deutschland	29
7 Literatur	33

Zusammenfassung

Die 4-Promille-Initiative der französischen Regierung stellt den Erhalt und die Vermehrung von organischer Substanz in landwirtschaftlichen Böden und deren Bedeutung für den Klimaschutz, die Anpassung an den Klimawandel und die Ernährungssicherung in den Mittelpunkt. Die Relevanz der globalen Vorräte organischer Bodensubstanz für den globalen Kohlenstoffkreislauf und die atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen ist ohne Zweifel gegeben.

Das Anliegen der Initiative, die Erhaltung der Ressource Boden und die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit ins Bewusstsein zu rücken, ist sehr zu begrüßen. Allerdings ist die einseitige Fokussierung auf die theoretischen Potenziale für eine weitere Anreicherung von organischem Bodenkohlenstoff kritisch zu beurteilen. Praktisch realisierbare Potenziale zur Bodenkohlenstoffsequestrierung sind wesentlich geringer, zeitlich begrenzt und außerdem reversibel, aus Kohlenstoff-Senken können auch wieder Kohlenstoff-Quellen werden. Beiträge der Initiative zur Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte sollten nicht als isolierte Klimaschutzmaßnahmen konzipiert werden, sondern immer als Bestandteil einer ressourceneffizienten und nachhaltigen Nutzungsstrategie für Agrarböden. Entscheidend für die Gesamtbewertung von Maßnahmen zur langfristigen Bodenkohlenstoffsequestrierung im Sinn der 4-Promille-Initiative sind letztlich anhaltend positive Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und auf weitere Bodenfunktionen sowie die zusätzlich erbrachten Umweltleistungen der Maßnahmen.

In diesem *Working-Paper* wird die 4-Promille-Initiative einer kritischen Bewertung aus wissenschaftlicher Sicht unterzogen. Für Deutschland werden konkrete Maßnahmen zur Kohlenstofffestlegung in landwirtschaftlichen Böden sowie zum Schutz vorhandener Kohlenstoffvorräte vorgestellt und diskutiert. Abschließend werden Aktivitäten vorgeschlagen, die in Deutschland zur 4-Promille-Initiative beitragen können.

1 Einleitung

Die Initiative „4 Promille“ („4 per 1000“ oder „4‰“) der französischen Regierung wurde während der Weltklimaverhandlungen im Dezember 2015 in Paris (COP21) vom französischen Agrarminister Stéphane Le Foll vorgestellt. Ziel der Initiative ist es, möglichst viele Staaten, aber auch Nichtregierungsorganisationen, Unternehmen und Institutionen für das Thema „Klimaschutz und Ertragsicherheit durch die Speicherung von organischem Kohlenstoff in Böden (im Folgenden abkürzend als „Bodenkohlenstoff“ bezeichnet)“ zu sensibilisieren und zu einer aktiven Teilnahme zu bewegen. Deutschland gehört zu den ersten Unterzeichnern der internationalen Deklaration zu dieser Initiative. Im Vorfeld der Weltklimaverhandlungen war die Initiative auf verschiedenen Tagungen angekündigt worden, u. a. auf der Konferenz "Climate Smart Agriculture 2015" im März 2015 in Montpellier. Der Europäische Rat und die EU-Kommission haben auf der Ratssitzung am 13. Juli 2015 ihre Unterstützung signalisiert.

Die Initiative stellt die organische Kohlenstoffeinbindung in Böden in den Mittelpunkt. Eine zusätzliche Speicherung von jährlich 4 ‰ mehr organischer Bodensubstanz in allen Böden der Welt könnte demnach die aktuellen globalen, anthropogenen Treibhausgasemissionen weitgehend kompensieren. Frankreich hat eine globale Initiative initiiert, um die Bodenkohlenstoffvorräte weltweit zu erhöhen und dementsprechend Maßnahmen zu fördern, die zur Anreicherung von Kohlenstoff in Böden führen. Dabei soll der Fokus auf verbesserten landwirtschaftlichen Praktiken liegen. Neben dem Beitrag zum Klimaschutz durch Kohlenstoffeinbindung wird dadurch gleichzeitig eine Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit angestrebt, mit positiven Wirkungen auf die Ertragsfähigkeit und Ertragsicherheit der Böden. Die Initiative ist Teil der sogenannten Lima-Paris-Action-Agenda und besteht aus zwei Teilen – der Etablierung eines internationalen Forschungsprogramms sowie einem Aktionsprogramm für konkrete Maßnahmen zur Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte.

Die 4-Promille-Initiative verfolgt unter anderem das Ziel, auch die Entwicklungsländer in Klimaschutzaktivitäten im Bereich Landwirtschaft und Landnutzung einzubinden. Bisher sind die Verhandlungsthemen der Entwicklungs- und Schwellenländer in den Weltklimaverhandlungen auf Klimawandel, Auswirkungen und Anpassung sowie Ernährungssicherung fokussiert. Mit Hilfe der Initiative sollen diese Anliegen aufgegriffen und mit Beiträgen zum Klimaschutz verbunden werden.

Das Thünen-Institut hält die 4-Promille-Initiative grundsätzlich für unterstützenswert, da sie eine Einbeziehung der Landwirtschaft und die Integration von Ernährungssicherung, Bodenschutz, Klimaanpassung und Klimaschutz in die internationalen Klimaschutzinitiativen ermöglicht. Kritisch hingewiesen wurde auf Probleme der Messbarkeit, der zeitlich begrenzten Wirksamkeit und Reversibilität der Klimaschutzwirkungen der vorgeschlagenen Maßnahmen und auf die unrealistischen und zu optimistischen Annahmen zu einer weltweiten Umsetzung. Weiterhin wurde vorgeschlagen, nicht nur die Chancen einer Kohlenstoffeinbindung in Böden für das Klima zu thematisieren, sondern auch auf die Gefahren durch fortgesetzte Kohlenstoffverluste aus Böden

hinzuweisen und damit die Notwendigkeit des Stopps diese Verluste durch den Schutz kohlenstoffreicher Böden (Moorböden und Grünlandböden) zu betonen.

In diesem *Working-Paper* werden die der 4-Promille-Initiative zugrundeliegenden Analysen, Daten und Annahmen wissenschaftlich bewertet. Die Bewertung erfolgt vor dem Hintergrund der Möglichkeiten und Grenzen einer Kohlenstoffanreicherung in Böden und der Risiken von Kohlenstofffreisetzungen aus Böden. Für Deutschland werden schließlich konkrete Maßnahmen zur Kohlenstofffestlegung in landwirtschaftlichen Böden sowie zum Schutz vorhandener Kohlenstoffvorräte vorgestellt und diskutiert. Abschließend werden Aktivitäten vorgeschlagen, die in Deutschland zur 4-Promille-Initiative beitragen können.

2 Bewertung der 4-Promille-Initiative hinsichtlich der zugrunde liegenden Analysen, Daten und Annahmen

Global wird vier Mal so viel Kohlenstoff als Humus im Boden gespeichert wie in Form von Kohlendioxid in der Atmosphäre vorhanden ist (Ciais *et al.*, 2013). Kleine Veränderungen in den Kohlenstoffvorräten des Bodens können deshalb großen Einfluss auf die atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen haben und damit klimawirksam sein. Dies ist der Ausgangspunkt der 4-Promille-Initiative, der über viele Publikationen u.a. vom IPCC gut hinterlegt ist (Ciais *et al.*, 2013; Minasny *et al.*, 2017). Zusätzlich basiert die Initiative auf der Erkenntnis, dass die Kapazität der Böden, Kohlenstoff zu speichern nicht vollständig genutzt ist, also eine Steigerung der Bodenkohlenstoffvorräte möglich ist. Dies ist insbesondere in Ackerböden der Fall, weil die landwirtschaftliche Nutzung sowohl in tropischen als auch in temperaten Systemen im Mittel zu einem Kohlenstoffverlust von 30 bis 40% im Vergleich zu natürlicheren Systemen wie Wäldern führt (Don *et al.*, 2011; Poeplau *et al.*, 2011). In nicht degradierten Grünländern sind die Kohlenstoffvorräte in Mitteleuropa vergleichbar mit denjenigen natürlicher Ökosysteme; die Kapazität zur Speicherung von zusätzlichem Kohlenstoff in Böden ist daher gering. Der Fokus der Anstrengungen der 4-Promille-Initiative liegt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und müsste sogar noch enger auf Ackerland und degradierte Böden gefasst werden. Ackerland macht rund 12% der globalen eisfreien Landfläche aus (Erb *et al.*, 2016), degradierte Böden umfassen je nach Definition eine Fläche von 1 bis 6 Mrd. ha, was 7 bis 44% der Landfläche entspricht (Gibbs & Salmon, 2015). Der größte Anteil an degradiertem Land entfällt auf Weideland außerhalb der temperaten Zone. Durch Überweidung sind viele Böden dort durch Erosionsprozesse degradiert und haben dadurch Bodenkohlenstoff verloren. Insgesamt kann die Landoberfläche, auf der eine nennenswerte Steigerung der Bodenkohlenstoffvorräte erreicht werden kann, nur sehr ungenau abgeschätzt werden.

Trotz hoher Unsicherheiten in der globalen Datenbasis ist unbestreitbar, dass das theoretische Potenzial zu Steigerung von Bodenkohlenstoff global groß ist und theoretisch die gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen zumindest vorübergehend kompensieren könnte. In den Scientific Notes der 4-Promille-Initiative wird jedoch versäumt, zwischen einem theoretischen Potenzial, einem technisch machbaren Potenzial und einem praktisch erreichbaren Potenzial zu unterscheiden. Eine durch die 4-Promille-Initiative angestrebte weltweite C-Sequestrierung von 3,5 Gt pro Jahr und den gleichzeitigen Stopp aller Kohlenstoffverluste durch die tropische Entwaldung ($0,9 \text{ Gt a}^{-1}$) entspricht einem rein rechnerischen, theoretischen Potenzial. Es basiert auf der Annahme, dass Bodenkohlenstoff in den obersten 40 cm des Bodens durch Managementmaßnahmen beeinflussbar ist. Global sind außerhalb der Permafrostregion 820 Gt Kohlenstoff in dieser Bodenschicht gespeichert, davon etwa 0,3% in deutschen Böden. Die angestrebte C-Sequestrierung errechnet sich aus 4 ‰ von diesem Kohlenstoffvorrat. Große Teile dieser Kohlenstoffvorräte befinden sich unter Wald oder in Mooren. Für diese Ökosysteme wäre eine Beendigung der andauernden Verluste an Bodenkohlenstoff durch Drainage von Mooren (weltweit derzeit mindestens $0,21 \text{ Gt a}^{-1}$, Tubiello *et al.*, 2016, Leifeld & Menichetti, 2018) und Entwaldung (weltweit etwa $0,10$ bis $0,15 \text{ Gt a}^{-1}$) ein großer Erfolg für den Klima- und Naturschutz. Daneben müssten die derzeit C-sequestrierenden naturnahen Moore vor Entwässerung geschützt werden.

Das heißt, das von der 4-Promille-Initiative ausgewiesene theoretische C-Sequestrierungspotenzial muss genauer lokalisiert und Managementoptionen müssen bewertet werden, um zu einem technisch umsetzbaren Potenzial zu kommen. Dieses berücksichtigt nur Flächen, die anthropogen gemanagt sind und auf denen durch bestimmte Managementoptionen eine C-Sequestrierung in den Böden möglich ist. Erst unter Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen lässt sich dann aus dem technisch umsetzbaren Potenzial ein praktisch umsetzbares Potenzial ableiten.

Bewertung

Die dargestellten Zusammenhänge zeigen sehr deutlich, dass 4-Promille pro Jahr kein konkretes Ziel für die Anreicherung von organischem Bodenkohlenstoff in Agrarböden darstellen, sondern einen theoretischen Wert, der allgemein die Bedeutung von Vorratsänderungen organischer Bodensubstanz im Kontext des Klimaschutzes hervorhebt.

Generell sind bei der Anreicherung von Bodenkohlenstoff als Klimaschutzmaßnahme folgende Probleme und Restriktionen zu beachten:

- Die Möglichkeit der Kohlenstoffsequestrierung in Böden durch ein bodenkohlenstoffförderndes Management ist zeitlich begrenzt, da sich nach mehreren Jahrzehnten ein neues Gleichgewicht des Bodenkohlenstoffvorrats auf höherem Niveau einstellt. Eine anfänglich hohe Kohlenstoffanreicherung pro Jahr kann nicht dauerhaft aufrechterhalten werden. Der Bodenkohlenstoffvorrat im neuen Gleichgewicht ist standortanhängig und so können keine allgemein gültigen Richtwerte angegeben werden.
- Anreicherungsprozesse können wieder umgekehrt werden, wenn es durch verändertes Management oder verändertes Klima zur Netto-Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Boden kommt (Umkehrbarkeit).
- Die Möglichkeiten einer Kohlenstoffanreicherung in (landwirtschaftlich genutzten) Böden sind stark abhängig vom jeweiligen Standort, Klima und dem langfristigen Management. Quantitative Ergebnisse zur Maßnahmenwirkung können nicht ohne weiteres auf andere Standorte und Klimabedingungen übertragen werden.
- Die Kohlenstoffsequestrierung in Böden ist immer verbunden mit einer Anreicherung weiterer Elemente. Ein Beitrag zum Klimaschutz ist nur gegeben, wenn die Kohlenstoffanreicherung nicht zu Nährstoffüberschüssen oder Schadstoffanreicherungen in Agrarböden führt.
- Je nach Maßnahme ist die Kohlenstoffsequestrierung mit zusätzlichen Treibhausgasemissionen verbunden, die dem positiven Effekt der Sequestrierung entgegengestellt werden müssten.
- Landwirtschaftlich genutzte entwässerte organische Böden sind derzeit weltweit und in Deutschland eine C-Quelle. Eine Netto-C-Sequestrierung in allen landwirtschaftlichen Bö-

den ist ohne eine Minderung (oder ein Stoppen) der Emissionen aus genutzten organischen Böden und Schutz derzeit naturnaher Moore (v.a. in den Tropen) kaum möglich.

- Es muss eine sehr große Zahl von Flächeneigentümern und -nutzern dazu motiviert werden, die Art ihres Flächenmanagements umzustellen und das klimafreundlichere Management langfristig beizubehalten.
- Einer kurzfristigen Messbarkeit der Erhöhung von Bodenkohlenstoff ist aufgrund der langsamen Anreicherung und der hohen Anforderungen an die Probenahme und Messgenauigkeit Grenzen gesetzt. Es ist davon auszugehen, dass eine Veränderung des Bodenkohlenstoffvorrats ab ein bis zwei t C pro Hektar mit entsprechendem Aufwand gemessen werden kann (Schrumpf *et al.*, 2011).

Erfahrungen aus Deutschland zeigen, dass eine Anreicherung von organischer Substanz nur langsam und nicht auf allen Standorten erreicht werden kann. Beispielsweise konnte nachgewiesen werden, dass reduzierte Bodenbearbeitung den Bodenkohlenstoffvorrat nicht erhöht, sondern nur zwischen den Bodenschichten verlagert (Hermle *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2010). Jede Praxis ist daher genau zu untersuchen, bevor Bewertungen vorgenommen werden. Schließlich sollte untersucht werden, ob Nutzungskonflikte mit der zunehmenden energetischen Nutzung von Biomasse auftreten, denn der Bodenkohlenstoffvorrat muss letztlich aus pflanzlichen Rückständen und ihren Umsetzungsprodukten aufgebaut werden. Es besteht ein Wettbewerb um die Nutzung pflanzlicher Biomasse für die stoffliche Verwertung, die energetische Nutzung oder für den Aufbau organischer Bodensubstanz.

Angesichts der Unsicherheiten über die Höhe und Dauerhaftigkeit von Klimaschutzwirkungen des Humusaufbaus sollten Beiträge zur 4-Promille-Initiative immer im Kontext ihrer Synergien in den Bereichen Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit sowie weiterer positiver Umweltwirkungen bewertet werden. Dies ist besonders wichtig, weil das globale Potenzial zur C-Sequestrierung in Böden durch Restaurierung und Rekultivierung degradierter Böden fast ebenso hoch ist wie das Potenzial auf nicht degradierten landwirtschaftlich genutzten Böden (Paustian *et al.*, 2016). Daneben sollte der Schutz von kohlenstoffreichen Böden (Mooren) gestärkt werden. Global könnten durch die Wiedervernässung von organischen Böden 0,3 bis 1,3 Gt C an Treibhausgasemissionen eingespart werden (Paustian *et al.*, 2016). In Deutschland wäre die Wiedervernässung von organischen Böden die mit Abstand effektivste Klimaschutzmaßnahme im Bereich der Bodenkohlenstoffspeicherung.

Die 4-Promille Initiative sollte auf keinen Fall so verstanden werden, dass klimaschutzpolitische Ziele und entsprechende Anstrengungen in anderen Sektoren verringert oder zurückgenommen werden könnten.

3 Maßnahmen zur Erhaltung und Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte in landwirtschaftlichen Böden

3.1 Organische Düngung

Die organische Düngung umfasst alle Wirtschaftsdünger wie Gülle und Stallmist, aber auch andere Dünger wie Komposte und Klärschlamm. Sie dient besonders der Rückführung von Nährstoffen auf die landwirtschaftlichen Flächen und sollte deshalb stets nach den Vorgaben der Düngeverordnung erfolgen und eine optimale Nährstoffeffizienz und die Einsparung von Mineraldünger zum Ziel haben. Humusaufbau durch organische Düngung leistet nur dann einen Beitrag zum Klimaschutz, wenn die zugeführten Nährstoffe effizient von den landwirtschaftlichen Kulturen genutzt und umwelt- sowie klimabelastende Stoffausträge minimiert werden.

Durch organische Düngung können die Vorräte der organischen Bodensubstanz deutlich erhöht werden. Dies ist insbesondere mit Stallmist, aber ebenso mit Gülle möglich, wenn zusätzlich das Stroh auf dem Feld verbleibt (Pommer, 2003). Die unterschiedliche Wirkung verschiedenen organischer Dünger wird z.B. in der VDLUFA-Humusbilanzierung als „Humusproduktionspotenzial“ bezeichnet ausgewiesen (Körschens *et al.*, 2004). Pro Tonne ausgebrachten Stallmist-Kohlenstoffs erhöht sich der Vorrat von Bodenkohlenstoff durchschnittlich um 320 kg. In europäischen Dauerversuchen sind die Vorräte an organischen Bodenkohlenstoff durchschnittlich 6 t ha⁻¹ höher mit Stallmistdüngung im Vergleich zur rein mineralisch gedüngten Varianten (Carlgrén & Mattsson, 2001; Körschens *et al.*, 2013). Dies entspricht einer C-Sequestrierungsrate von 160 kg C ha⁻¹ a⁻¹ über einen Versuchszeitraum von 42 Jahren bei 5 bis 10 t Stallmistdüngung pro Jahr. Die Effekte der organischen Düngung sind abhängig von der Art des Düngers und von Bodeneigenschaften.

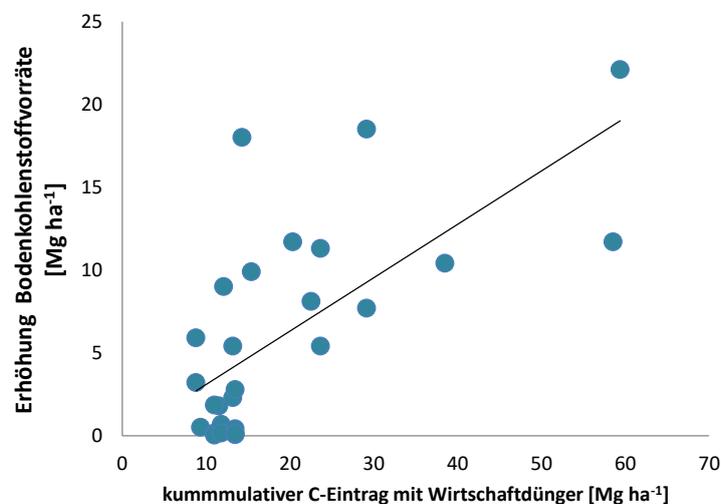


Abbildung 1: Erhöhung der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff durch Stallmist Düngung. Quelle: Eigene Darstellung nach Carlgrén and Mattsson (2001) und Körschens *et al.* (2013)

Nur rund 60% aller Äcker in Deutschland werden auch organisch gedüngt, weil die Spezialisierung in der Landwirtschaft und die räumliche Trennung von Tierhaltungsbetrieben und Marktfruchtbetrieben immer weiter voranschreiten (Schultheiß *et al.*, 2010). In marktfrucht dominieren Regionen, wie in Ostdeutschland, werden nur noch etwa 40% aller Äcker auch organisch gedüngt. Die organische Düngung ist wichtig für das Nährstoffrecycling und um den mit der Ernte entzogenen Kohlenstoff im Sinne der Kreislaufwirtschaft wieder zurück auf die Fläche zu bringen.

Andere organische Dünger sind nur in begrenzten Mengen in Deutschland verfügbar. Mit verfügbaren Fertigungsmengen kann man in Deutschland nur 1 bis 2% der Ackerflächen versorgen (Höper & Schäfer, 2012). Beim Eintrag von externen Kohlenstoffquellen sind postulierte Klimaschutzbeiträge durch Humusaufbau generell sehr kritisch zu hinterfragen, da dieses Humusreproduktionspotenzial an anderer Stelle fehlt und es sich letztlich nur um eine räumliche Verlagerung der Humusreproduktion handelt. Sehr sinnvoll kann diese Verlagerung im Kontext Klimaschutz sein, wenn zusammen mit dem organischen Kohlenstoff Nährstoffe aus Regionen mit strukturellen Nährstoffüberschüssen exportiert und effizient verwertet werden. Eine vollständige Bewertung der Treibhausgas effekte muss in diesen Fällen auf der Basis einer Lebensweganalyse mit weiten Systemgrenzen erfolgen: i) Austrag, Transport und Prozessieren von Biomasse, ii) alternative Nutzungsformen der Biomasse, iii) Interaktion mit anderen Treibhausgasemissionen, iv) Substitutionsleistung von synthetischen Düngern sowie v) Synergien durch Effekte auf die Fixierung und Speicherung von in-situ produzierter Biomasse (Paustian *et al.*, 2016). Hier ist weitere Forschung zur regionalen Netto-Treibhausgasbilanz verschiedener Szenarien mit mehr oder weniger weit transportiertem organischem Dünger notwendig.

Der ökologische Landbau ist auf höhere Humusgehalte und damit ganz zentral auf die organische Düngung angewiesen, um produktiv zu sein. Daher wird die organische Düngung im Ökolandbau als essentieller beurteilt als in der konventionellen Landwirtschaft, und auch die Vorräte der organischen Bodensubstanz sind entsprechend höher (Gattinger *et al.*, 2012). Dies ist ein Ergebnis der humuserhaltenden Fruchtfolgen und der stärker verbreiteten organischen Düngung und ließe sich mit entsprechenden Maßnahmen auch unter konventioneller Landwirtschaft erreichen (Leifeld, 2013).

3.2 Management von Ernteresten

Der Verbleib von Ernteresten wie Stroh auf der Fläche ist eine weitere Möglichkeit, die Kohlenstoffzufuhr und damit auch die Bodenkohlenstoffvorräte im Boden zu erhöhen. Erntereste umfassen oberirdische Pflanzenteile wie Stoppel, Stroh oder Rübenblatt und Wurzeln als unterirdische Pflanzenteile. Für Stroh besteht auch die Möglichkeit, dieses abzufahren und in der Tierhaltung einzusetzen oder energetisch zu nutzen. In Deutschland ist das Abbrennen von Stoppelfeldern untersagt, wodurch die organische Substanz erhalten bleibt (§ 7 AgrarZahlVerpflV). Rund 5 t

C ha⁻¹ fallen bei Weizen jährlich als Erntereste an, davon etwa 50% als Wurzeln. Wurzeln tragen im Vergleich zu oberirdischen Ernteresten überproportional zur Bildung von Bodenkohlenstoff bei (Katterer *et al.*, 2011). Nachhaltig hohe Erträge sichern auch die Produktion von Ernteresten. Bei gleichem Management der Erntereste steigt der Bodenkohlenstoffvorrat daher mit dem Ertrag an (Wiesmeier *et al.*, 2015). Durch züchterischen Fortschritt und den Einsatz von Halmverkürzern hat sich die anfallende Menge an Ernteresten reduziert oder ist trotz steigenden Erträgen gleich geblieben. Genaue Zahlen insbesondere zu Wurzelmenge moderner Ackerfruchtsorten fehlen.

Ein optimiertes Management von Ernteresten mit dem Ziel des Humuserhalts bzw. Humusaufbaus sollte folgende Aspekte beinhalten:

- (1) Verbleib aller Erntereste auf dem Acker oder Rückführung z.B. in Form von Stallmist, Gülle oder Gärresten.
- (2) Erhöhung des unterirdischen Anteils der Erntereste (Wurzeln) durch entsprechende Gestaltung der Fruchtfolge (z.B. mehrjährige Kulturen wie Klee-Gras oder Luzerne-Gras) oder Auswahl von Sorten mit intensivem Wurzelwachstum.
- (3) Produktion von Ernteresten durch Steigerung der Erträge und entsprechende Sorten- und Fruchtfolgeward.
- (4) Produktion von Ernteresten durch standortoptimierten Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten (siehe Kapitel 3.3).

Ackerfrüchte mit einer großen Menge an Ernteresten sind Körnermais sowie Futterbau mit Luzernen oder Ackergras. Wenige Erntereste haben Hackfrüchte wie Zuckerrübe und Kartoffeln. Mehr Forschung ist nötig, um den Verbleib und die Stabilisierungswege verschiedener Erntereste zu verstehen. Zurzeit gibt es auch keine Datengrundlage zum aktuellen Ernterestmanagement in Deutschland. Durch den Ausbau verschiedener Bioenergielinien werden Erntereste zunehmend für die energetische Nutzung verwendet. Dies kann dem Ziel entgegen stehen, die Kohlenstoffvorräte von Böden zu erhöhen, wenn z.B. Stroh thermisch als Energiequelle genutzt wird. Bei der Nutzung von Biomasse in Biogasanlagen und der anschließenden Rückführung der Gärreste auf den Acker kann der Effekt auf die Vorräte der organischen Bodensubstanz ähnlich ausfallen wie beim direkten Verbleib der Biomasse auf dem Acker, da Gärreste ein höheres Humusreproduktionspotenzial haben. Aus reiner Klimaschutzsicht wäre (beim derzeitigen Energiemix als Referenz) die energetische Nutzung von Stroh sogar besser als deren Verbleib auf der Fläche zum Aufbau von Bodenkohlenstoff (Powelson *et al.*, 2008). Die Bewertung der Klimaschutzwirkung unterschiedlicher Verwertungsverfahren von Ernterückständen sollte daher sehr differenziert und nicht ausschließlich im Kontext der Humuserhaltung erfolgen.

3.3 Zwischenfruchtanbau

Zwischenfruchtanbau ist der Anbau von Feldfrüchten, die zwischen den zur Hauptnutzung dienenden Feldfrüchten als Gründüngung oder zur Nutzung als Tierfutter angebaut werden. Die Zwischenfrucht wird nach der Ernte der Hauptfrucht oder sogar mit der Hauptfrucht als Untersaat etabliert. Als Zwischenfrüchte kommen verschiedene Gras- und Leguminosenarten, Roggen, verschiedenen Kreuzblütler und andere Pflanzen in Frage. Der Zwischenfruchtanbau sorgt neben einer Nährstoffbindung nach Ernte der Hauptkultur oder der Unkrautregulierung für eine erhöhte Zufuhr an organischem Kohlenstoff in den Boden, v. a. wenn die Biomasse auf der Fläche verbleibt (Gründüngung). Gerade in Marktfruchtbetrieben führt der Zwischenfruchtanbau daher zu einer besseren Humusbilanz. Bei jährlichem Anbau von Zwischenfrüchten werden durchschnittlich $320 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zusätzlich im Boden gespeichert (Poeplau & Don, 2015). Im Vergleich zu anderen Maßnahmen ist der Zwischenfruchtanbau eine sehr wirksame Maßnahme, um die Bodenkohlenstoffvorräte zu erhöhen. Darüber hinaus leisten Zwischenfrüchte über die Minderung der Nitratauswaschung und den Stickstofftransfer in die nachfolgende Hauptfrucht eine zentrale Ansatzstelle für Klimaschutz im Pflanzenbau.

Zwischenfrüchte lassen sich nicht immer in die Fruchtfolge integrieren. So ist vor dem Anbau von Winterungen ein Zwischenfruchtanbau nicht möglich. Auch Wassermangel nach der Ernte der Hauptfrucht kann die Eignung eines Standorts für den Zwischenfruchtanbau begrenzen. Neue Studien belegen aber für winterabfrierende Zwischenfrüchte keinen höheren Wasserverbrauch als auf einer Brache (Böttcher *et al.*, 2015). Im Jahr 2016 wurden auf etwa 15 % der deutschen Äcker Zwischenfrüchte oder Untersaaten angebaut. Im Zusammenhang mit den Greening-Auflagen der Gemeinsamen Agrarpolitik hat die Zwischenfruchtfläche gegenüber 2010 um ca. 45 % zugenommen. Bezogen auf die Fläche aller Sommerkulturen, also der Fläche, die für den Zwischenfruchtanbau maximal zur Verfügung steht, waren im Jahr 2016 45 % mit Zwischenfrüchten bestellt (DESTATIS, 2017). Auch global sind Zwischenfrüchte und Untersaaten bisher eine Randerscheinung, deren Potenzial nicht voll genutzt wird. Hier stellt ein Mangel an verfügbarem Wasser, die Kosten und mangelnde Erfahrung die größten Hindernisse dar. N_2 -fixierende Zwischenfrüchte und mehr Wissen zu den positiven Effekten von mehr Bodenkohlenstoff könnten helfen, den Anbau von Zwischenfrüchten zu verbreiten.

3.4 Fruchtfolgegestaltung und Anbau tiefwurzelnder Pflanzen

Auch über die Fruchtfolgegestaltung lässt sich eine Anreicherung von Bodenkohlenstoff erreichen. Wichtige Faktoren sind hierbei besonders kurze Brachezeiten, große Mengen an auf der Fläche verbleibenden Ernterückständen sowie die Durchwurzelungsintensität und die Durchwurzelungstiefe. Kohlenstoffmehrende Kulturen sind insbesondere Grass, Klee gras sowie Leguminosen- bzw. Luzernegrasgemenge und Körnerleguminosen. Mehrjährigen Kulturen wirken aufgrund der fehlenden Brachezeit und der intensiven Durchwurzelung besonders positiv. In Schweden konnten zwischen 1990 und 2010 die Bodenkohlenstoffgehalte auf Ackerland durch den Anstieg von Ackergrasanbau von 35% auf 50% der Gesamtackerfläche um 8% erhöht werden (Poeplau *et*

al., 2015). In einem nordschwedischen Langzeitversuch (52 Jahre) wurde eine Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts in 0-25 cm Bodentiefe von 9%, 23% und 45% durch die Integration von zwei, drei oder fünf Jahren Ackergras in einer sechsjährigen Rotation erreicht (Bolinder *et al.*, 2012). Die Rotation mit fünfjährigem Ackergras erhöhte den Bodenkohlenstoffvorrat dabei um insgesamt 19 t ha^{-1} , oder $360 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Tidåker *et al.* (2014) haben, ebenfalls für schwedische Ackerstandorte, bei zwei Jahren Ackergras in fünfjähriger Rotation eine jährliche Akkumulation von 168 kg C ha^{-1} modelliert. Besondere Bedeutung haben tiefwurzelnde Pflanzen. Dadurch wird Kohlenstoff in den Unterboden, d.h. in Bereiche verbracht, in denen eine hohe ungenutzte Speicherkapazität für Bodenkohlenstoff besteht. Durch die im Allgemeinen niedrigen Kohlenstoffgehalte im Unterboden ist diese Kapazität in den meisten Böden kaum genutzt. Die Nutzung setzt das Einbringen von organischer Substanz z.B. als Wurzeln in den Unterboden voraus. Gleichzeitig können auch Ressourcen wie Nährstoffe und Wasser aus dem Unterboden genutzt werden, was z.B. eine Anpassung an Trockenstress darstellt (Lynch & Wojciechowski, 2015).

Durch den züchterischen Fortschritt und die optimierte Düngung kann davon ausgegangen werden, dass es in den letzten Jahren zu einer Reduzierung der Durchwurzelungsintensität und Durchwurzelungstiefe zu Gunsten der oberirdischen Ertragsbildung kam. Der gezielte Anbau von tiefwurzelnden und stark wurzelbildenden Kulturen und Sorten als Teil der Fruchtfolge könnte dem entgegenwirken. Durch tiefe Wurzeln entstandene Bioporen können auch länger erhalten bleiben und damit den nachfolgenden Früchten eine Exploration der Wasser- und Nährstoffressourcen des Unterbodens mit ihren Wurzeln ermöglichen. Wieviel Bodenkohlenstoff dadurch zusätzlich gespeichert werden kann, ist im Moment unklar und bedarf weiterer Forschung. Bisher sind die Optionen, Kohlenstoff in tieferen Bodenschichten zu speichern, kaum erforscht. Besonders im Hinblick auf eine vorhergesagte Zunahme von Trockenjahren könnte der Anbau von tiefer wurzelnden Sorten und Ackerfrüchten nicht nur die Bodenkohlenstoffvorräte erhöhen, sondern auch die Erträge stabilisieren.

3.5 Mechanische Einbringung organischer Substanz in Unterböden

In den letzten Jahrzehnen wurde intensiv zur Wirkung der pfluglosen Bodenbearbeitung auf die Bodenkohlenstoffspeicherung geforscht. Die Ergebnisse zeigen, dass auf den meisten Standorten nur eine Umverteilung der Kohlenstoffgehalte, aber keine Zunahme der Bodenkohlenstoffvorräte im Bodenprofil erreicht wird (Baker *et al.*, 2007; Hermle *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2010; Powlson *et al.*, 2014). Es verdichten sich die Hinweise, dass gerade die tiefere Einbringung von organischer Substanz ein Potenzial zur Bodenkohlenstoffanreicherung hat (Alcantara *et al.*, 2016). Schon Nieder und Richter (2000) wiesen darauf hin, dass die Krümmenvertiefung die Kohlenstoffspeicherung in Ackerböden erhöht. Technische Maßnahmen können so neben den Tiefwurzeln auf geeigneten Standorten helfen, das Potenzial von Unterböden für die Kohlenstoffspeicherung zu erschließen. Durch Tiefpflügen konnten die Bodenkohlenstoffvorräte auf lehmigen und sandigen Böden langfristig um über 40% erhöht werden (Alcantara *et al.*, 2016). Dies ist nicht auf allen Bodentypen möglich und ein starker Eingriff. Die Klimabilanz dieser Maßnahme ist aber positiv und auf Böden mit verdichteten Unterboden können weitere positive Ef-

fekte erzielt werden, wie eine tiefere Durchwurzelung, bessere Drainage und teilweise auch erhöhte Erträge. Es besteht erheblicher Forschungsbedarf zu technischen und pflanzenbaulichen Verfahren der Erschließung von Unterböden für die Kohlenstoffspeicherung und die Bewertung der Verfahren im Kontext der Ertragssicherheit und des Klimaschutzes.

3.6 Biokohle als Bodenzusatzstoff

Der Begriff Biokohle (im deutschen Sprachraum auch Pflanzenkohle) beschreibt Biomasse pflanzlichen oder teilweise auch tierischen Ursprungs, die durch Pyrolyse thermisch umgewandelt wurde, um diese zur Verbesserung der Bodeneigenschaften in den Boden einzubringen (Lehmann & Joseph, 2015). Die Idee dazu basiert auf unter anthropogener Beeinflussung entstandenen, kohlehaltigen Schwarzerdeböden im Amazonasgebiet (Terra Preta), die im Vergleich zu anderen tropischen Böden eine außergewöhnliche und langanhaltende Fruchtbarkeit aufweisen (Glaser & Birk, 2012). Der Begriff Biokohle wird im allgemeinen Sprachgebrauch aber auch für andere Formen thermisch umgewandelter organischer Substanz verwendet. Ein Beispiel hierfür ist die „Biokohle“ aus dem Prozess der hydrothermalen Karbonisierung (HTC-Kohle). Beim Prozess der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) wird Biomasse in einer wässrigen Lösung unter hohen Drücken in ein braunkohle- oder torfähnliches Produkt umgewandelt. Im Gegensatz zur Pyrolyse-Biokohle, die Substrate mit geringen Restwassergehalten benötigt, können im HTC-Prozess auch Substrate mit hohem Wassergehalt umgesetzt werden. Die Eigenschaften der HTC-Kohle unterscheiden sich grundlegend von denen der Pyrolyse-Biokohle. Bei der Bewertung von Biokohlen im Kontext einer möglichen Klimaschutzwirkung durch die langfristige C-Sequestrierung in Böden müssen daher sowohl die Art und Klimawirksamkeit der verschiedenen Inkohlungsverfahren (z.B. Energiebedarf, Emissionen, Koppelprodukte) als auch die Eigenschaften der produzierten Biokohlen im Boden differenziert betrachtet werden.

In Versuchen mit Pyrolyse-Biokohle in tropischen, landwirtschaftlich genutzten Böden konnten positive Effekte der Biokohle auf den Ertrag gezeigt werden. Eine Ertragssteigerung wird hier vor allem auf eine Erhöhung des pH-Wertes der von Natur aus nährstoffarmen, tropischen Böden und eine somit verbesserte Nährstoffverfügbarkeit und Nährstoffspeicherfähigkeit sowie verringerte Aluminiumtoxizität zurückgeführt (Jeffery *et al.*, 2011). Seit 2007 werden auch in temperaten und mediterranen Regionen Labor- und Freilandversuche zu Auswirkungen der Biokohle auf Bodeneigenschaften und Pflanzenwachstum durchgeführt. Eine globale Meta-Analyse zeigt, dass es positive Ertragseffekte von Biokohle nur in tropischen Böden gibt, nicht aber in Böden der temperaten Zone wie in Deutschland (Jeffery *et al.*, 2017). Die bisher in der landwirtschaftlichen Praxis einsetzbaren Biokohlen müssen nach Düngemittelgesetz aus unbehandeltem Holz hergestellt worden sein und einen C-Anteil von mindestens 80 % aufweisen. Für die praktische Anwendung von Biokohle aus anderen biogenen Materialien fehlen derzeit innerhalb der EU und Deutschlands die rechtlichen Rahmenbedingungen. Biokohle kann aber aus sehr verschiedenen biogenen Materialien hergestellt werden und auch die Herstellungsbedingungen und Wege sind sehr vielfältig, so dass auch die Eigenschaften und Wirkungen von Biokohlen sehr divers sind und verallgemeinerbare Aussagen erschweren.

Für die langfristige Erhöhung des Bodenkohlenstoffs und die angestrebte positive Klimawirkung der Biokohle durch C-Sequestrierung im Boden ist die Stabilität der Biokohle gegen biotischen und abiotischen Abbau die Schlüsselgröße. Die intrinsische Stabilität der Biokohle beruht auf ihrer chemischen Struktur: die durch die Verkohlung entstehenden aromatischen Kohlenstoff-Verbindungen werden mikrobiell nur sehr langsam abgebaut. Insgesamt haben Biokohlen, die durch Pyrolyse bei Temperaturen von $> 450^{\circ}\text{C}$ hergestellt werden, einen stabilen C-Anteil von 80 bis fast 100 % (Masek *et al.*, 2013; Crombie & Masek, 2015). Hierzu muss jedoch beachtet werden, dass die Abbaustabilität eines Bodenzuschlagstoffes neben der intrinsischen Stabilität auch von Bodeneigenschaften wie Bodenart, Bodenstruktur und Bodenmilieu sowie Klima und Bewirtschaftung bestimmt wird. Dies spiegelt sich auch in den vielfältigen, stark variierenden Versuchsergebnissen zur Stabilität der Biokohle wider. Ein am Thünen-Institut durchgeführter Feldversuch ergab eine hohe Abbaurate für HTC-Kohle (-23 bis -30 % in 19 Monaten) und nur 3% Abbau von Biokohle aus der Pyrolyse (Gronwald *et al.*, 2016). HTC-Kohlen eignen sich wegen der relativ geringen Anteile an stabilen Kohlenstoff-Verbindungen nicht zur langfristigen C-Sequestrierung in Böden. Diese Ergebnisse zur Abbaubarkeit der Pyrolyse-Biokohle decken sich mit Ergebnissen aus Laborversuchen aus einer Meta-Studie: Im Mittel von 24 Studien mit einer Versuchsdauer von mehreren Wochen bis 8,5 Jahren betrug die labile Fraktion 3 % des Gesamt-Kohlenstoffs der Biokohlen, sodass angenommen werden kann, dass 97 % des Biokohle-C langfristig im Boden angereichert werden können (Wang *et al.*, 2016). Die Übertragung der Ergebnisse der Laborexperimente auf Feldbedingungen ist jedoch insofern schwierig, als dass suboptimale Bedingungen im Feld den Abbau der Biokohle verlangsamen, extreme Wetterbedingungen aber den Abbau auch kurzfristig sehr beschleunigen können (Nguyen *et al.*, 2009). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Das Potenzial zur C-Sequestrierung mit Biokohle wird wesentlich durch die Verfügbarkeit geeigneter Biomasse bestimmt (Schuchardt & Stichnothe, 2011; Teichmann, 2014) und es muss auch im Kontext Klimaschutz sehr kritisch hinterfragt werden, ob bzw. unter welchen Bedingungen die Produktion von Biokohle wirklich die günstigste Verwertungslinie ist. Die größten Biomassepotenziale bestehen wohl bei Gülle, Gärresten und Waldrest- und Schwachholz; alle Stoffe, die vielfältiger andere Nutzung unterliegen und nachgefragt sind. Substrate mit hohem Wassergehalt müssen vor der Pyrolyse zunächst energieintensiv getrocknet werden. Bei Substraten mit zusätzlich relevanten Nährstoffgehalten wie Gülle und Gärresten, die einen hohen Düngewert aufweisen, ist die Umwandlung in Pyrolyse-Biokohle aus Sicht eines effizienten Nährstoffrecyclings nicht zu empfehlen. Tatsächlich gibt es in Deutschland kaum Biomasse, die nicht bereits stofflich oder energetisch verwertet wird. Das praktisch realisierbare Potenzial für verschiedene Szenarien ist bisher nicht untersucht. Der mögliche landwirtschaftliche Zusatznutzen der Biokohle in Form von erhöhter Bodenfruchtbarkeit könnte ihre Treibhausgasvermeidungspotenziale und -kosten verbessern. Er ist in tropischen und subtropischen Regionen besonders relevant (Teichmann 2014). In Deutschland sind diese Zusatzeffekte (erhöhte Erträge, geringe Nährstoffauswaschung, verbesserter Bodenwasserhaushalt, weniger Lachgas-Emissionen) durch Biokohle in landwirtschaftlich genutzten Böden relativ gering und beschränkt auf Grenzertragsstandorte (Möller & Höper, 2014; Gronwald *et al.*, 2015).

3.6 Erhalt von Dauergrünland und Umwandlung von Ackerland in Grünland

Grünlandböden speichern vor allem in den oberflächennahen Bodenschichten deutlich mehr Kohlenstoff als Böden unter Ackernutzung. Dies ist durch die höhere unterirdische Nettoprimärproduktion und somit die höheren wurzelbürtigen C-Einträge sowie durch die fehlende Bodenbearbeitung erklärbar. Die Bodenbearbeitung im Ackerland führt zu einer Homogenisierung der Ackerkrume (z.B. 0-30 cm) und damit zu einer Verdünnung und Verringerung der C_{org} -Gehalte in 0 bis 10 cm Tiefe. Da der Boden im Gegensatz zu Ackerflächen in der Regel nicht gestört wird, entwickelt sich zudem eine Bodenstruktur und Aggregation, die zu einer verstärkten Stabilisierung der organischen Substanz führt (Six *et al.*, 2000). Poeplau *et al.* (2011) fanden in ihrer Meta-Analyse zu Landnutzungsänderungen in der temperaten Klimazone eine mittlere Abnahme des Vorrats an organischem Bodenkohlenstoff durch die Umwandlung von Dauergrünland in Ackerland in der Höhe von 36%. Wiesmeier *et al.* (2012) stellten bei einer Analyse der C-Vorräte im Freistaat Bayern ebenfalls 31% höhere Bodenkohlenstoffvorräte in Grünlandböden (0-100 cm) fest. Somit ist der Erhalt von Dauergrünland besonders auf humusreichen Standorten ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz. Die dauerhafte Umwandlung von Ackerland in Grünland ist eine sehr effektive Maßnahme zur Erhöhung der C-Vorräte in Böden. Die gezielte Etablierung von Grünland als Maßnahme für den Gewässer- und Erosionsschutz hat darüber hinaus zahlreiche positive Wirkungen auf die Umweltziele Biodiversitätsförderung, Bodenschutz und Wasserschutz. Eine besonders sinnvolle und langfristig angelegte Maßnahme wäre z.B. die Umwandlung von Acker in Grünland entlang von Gewässern (jenseits der sehr schmalen Schutzstreifen).

Die Umwandlung von Acker zu Grünland führt zu einer langsamen Anreicherung von Bodenkohlenstoff, im Gegensatz zum vergleichsweise schnell eintretenden Bodenkohlenstoffverlust bei Grünlandumbruch. Wie Langzeitversuche zeigen, ist dabei unter temperatem Klima eine Akkumulationszeit des Bodenkohlenstoffs von etwa 100 Jahren anzunehmen (Johnston *et al.*, 2009). Bei Grünlandumbruch ist hingegen schon nach 20 Jahren ein Großteil der Veränderung des Bodenkohlenstoffs eingetreten und die Gehalte streben einem neuen Gleichgewicht entgegen.

Für die Bewertung der insgesamt zu erwartenden Klimaschutzwirkungen einer Ausdehnung der Dauergrünlandfläche sind mögliche Veränderungen der Wiederkäuerbestände zu berücksichtigen. Eine Zunahme der Emissionen aus der Tierhaltung kann die Wirkungen der zusätzlichen Kohlenstoffeinbindung mindern oder überkompensieren.

3.7 Vernässung und Schutz von Moorböden

Moore bestehen aus Torfen, d.h. Böden mit einem mehr als 30 cm mächtigen Horizont mit mehr als 30 % organischer Substanz. Torf besteht im Wesentlichen aus unter wassergesättigten Bedingungen akkumulierten Pflanzenresten. Daher sequestrieren naturnahe Moore über Jahrtausende und auch derzeit noch Kohlenstoff (z.B. Frohling & Roulet, 2007, Peichl *et al.*, 2014). Die Entwässerung für Land- und Forstwirtschaft führt zu einem mikrobiellen Abbau der organischen Sub-

stanz und einer sehr hohen Freisetzung von Kohlendioxid (IPCC, 2014; Maljanen *et al.*, 2010; Tiemeyer *et al.*, 2016).

In Kombination mit einer Verdichtung des Torfes führt die Mineralisierung in entwässerten Mooren zu einer Sackung der Bodenoberfläche in Mittel- und Nordeuropa im Mittel etwa 1 cm pro Jahr (van den Akker *et al.*, 2012; Weinzierl & Waldmann, 2015). Für tropische Moore werden zumindest in der Anfangsphase weitaus höhere Sackungsraten berichtet (Hooijer *et al.*, 2012). Letztendlich droht aufgrund von Sackung (und Anstieg des Meeresspiegels) insbesondere in küstennahen Gebieten ein Verlust von nutzbarer Landfläche durch Überflutung (Erkens *et al.*, 2016).

Globale Schwerpunkte der Treibhausgasemissionen aus entwässerten Mooren sind Nord- und Mitteleuropa, Russland, Kanada und Südostasien (Tubiello *et al.*, 2016). Äcker auf organischen Böden in der temperaten Zone emittieren im Mittel 7,9 t ha⁻¹ Kohlenstoff pro Jahr und Grünländer auf organischen Böden 3,6 bis 6,1 t C ha⁻¹ a⁻¹ (IPCC, 2014). Mittlere deutsche Messwerte für Grünland liegen mit 7,5 t CO₂-C ha⁻¹ a⁻¹ noch höher (Tiemeyer *et al.*, 2016). Mittlere Schätzungen für weltweite Emissionen aus entwässerten Mooren liegen zwischen 0,21 Gt CO₂-C-Emissionen (Tubiello *et al.*, 2016) bzw. 1,91 Gt CO₂-Äquivalenten größtenteils als CO₂ (Leifeld & Menichetti, 2018, entspricht ~ 0,52 Gt CO₂-C).

Zur Minimierung der Kohlenstoffverluste im Sinne der 4-Promille-Initiative müssten a) weltweit naturnahe Moore geschützt werden, um ihre derzeitige C-Sequestrierungsleistung zu erhalten und b) derzeit entwässerte Moore nasser werden. Eine Reduzierung der CO₂-Emissionen derzeit entwässerter Moore ist nur über eine Anhebung des Grundwasserstands möglich, wobei die Effekte einer Wasserstandsanhhebung stark gebietsspezifisch sind (Tiemeyer *et al.*, 2016). Die Anhebung der Wasserstände kann als klassische Naturschutzmaßnahme, als Nutzung nasser Flächen als sogenannte „Paludikultur“ (Wichtmann *et al.* 2016) oder als Anhebung der Wasserstände in genutzten Mooren erfolgen.

Um die CO₂-Emissionen komplett zu stoppen oder gar ein erneutes Torfwachstum anzuregen, ist eine Anhebung der Grundwasserstände bis an die Geländeoberfläche notwendig. Dies führt in der temperaten Zone je nach Nährstoffsituation zu einer C-Sequestrierung (nährstoffarme Standorte: -0,22 t ha⁻¹ C a⁻¹, vergleichbar mit naturnahen Standorten) bzw. im Vergleich zum entwässerten Zustand zu stark verringerten Emissionen (nährstoffreiche Standorte: 0,52 t CO₂-C ha⁻¹ a⁻¹) (Wilson *et al.*, 2016). Eine Alternative zur klassischen naturschutzorientierten Wiedervernässung stellt die Paludikultur dar, d.h. der Anbau von Biomasse unter nassen Verhältnissen. Studien über eine relativ kurze Zeitdauer zeigen eine mit naturnahen Verhältnissen vergleichbare C-Bilanz (Torfmoose als Substratersatz: Beyer & Höper, 2015; verschiedene Niedermoorpflanzen zur energetischen Nutzung: Günther *et al.*, 2014), wobei jedoch zu langfristigen Auswirkungen regelmäßiger Ernte, geeignetem Saatgut, Erntetechnik etc. sowie langfristigen Treibhausgasbilanzen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

In Deutschland werden derzeit jährlich ca. 11,8 Mio. t CO₂-C aus den überwiegend entwässerten organischen Böden emittiert (Tabelle 1, UBA 2016a). Dies entspricht 43,3 Mio. t CO₂.

Tabelle 1: Kohlenstofffreisetzung durch CO₂-C-Verluste aus organischen Böden in Deutschland im Jahr 2014. „Feuchtgebiete“ umfassen u.a. degradierte und wiedervernässte Flächen auf organischen Böden.

	1000 ha	CO ₂ -C Mio. t
Wald	145	0,3
Acker	379	3,1
Grünland	1090	6,8
Feuchtgebiete inkl. Torfabbau	138	1,1
Siedlungen	72	0,5
Gesamt	1824	11,8

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der im Jahr 2016 für Deutschland berichteten Treibhausgasemissionen im Common Reporting Format (CRF), s. im Internet http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php

In Deutschland besteht im Bereich organischer Böden ein erhebliches Potenzial zur Minderung der landwirtschaftlichen CO₂-Emissionen. Aus Sicht des Klimaschutzes ist dieses Potenzial in Deutschland größer und auf weit weniger Fläche umzusetzen als Klimaschutzmaßnahmen auf Mineralböden. Auch im Hinblick auf die derzeitigen weltweiten Emissionen aus entwässerten Mooren besteht erhebliches Potenzial und prioritärer Handlungsbedarf.

3.8 Aufforstung, Anlage von Hecken und Feldgehölzen sowie Agroforstwirtschaft

Agroforstwirtschaft ist eine Form der Landnutzung, bei der mehrjährige Holzpflanzen (Bäume, Sträucher, Palmen, Bambus, etc.) auf derselben Fläche wie landwirtschaftliche Nutzpflanzen angebaut werden. Eine Kombination mit der Haltung von Nutztieren ist möglich. Diese Form der Landnutzung ist in Europa kaum verbreitet, in vielen tropischen Regionen aber die traditionelle Landnutzungsform. In Deutschland spielt diese Landnutzungsform bisher mit Ausnahme von Streuobstwiesen und Knicks als traditionellen Landnutzungsformen kaum eine Rolle. Eine Verbindung von landwirtschaftlicher Produktion mit einer Produktion von Holz z.B. als Bioenergieträger in Form von Kurzumtriebsplantagen oder Hecken ist eine Option mit vielfältigen Umweltvorteilen in den Bereichen Klimaschutz, Wasserschutz, Bodenschutz und Biodiversität.

Die C-Sequestrierung bei der Anlage dieser Systeme auf Ackerland findet in erster Linie in der Biomasse der Bäume und Sträucher statt. Untersuchungen zu den Bodenkohlenstoffvorräten unter Kurzumtriebsplantagen zeigen im Mittel keine Erhöhung der Vorräte (Walter *et al.*, 2014). Dies könnte aber auch an der begrenzten Untersuchungsdauer von rund 13 Jahren liegen, in der eine Veränderung der Kohlenstoffvorräte oft nicht signifikant nachweisbar ist. Langfristig angelegte Agroforstsysteme müssten in ihrer Wirkung auf die Bodenkohlenstoffvorräte weitergehend

untersucht werden. Globale Fallstudien zeigen, dass die Umwandlung von Acker in Agroforst die Bodenkohlenstoffvorräte signifikant erhöht (De Stefano & Jacobson, 2018).

Aufforstungen von Ackerland führen im Mittel immer zu deutlichen Anreicherungen von Bodenkohlenstoff (Laganière *et al.*, 2010; Poeplau *et al.*, 2011). Über einen Zeitraum von 100 Jahren können die Kohlenstoffvorräte im Boden nahezu verdoppelt werden. Etwa ein Drittel des Bodenkohlenstoffs in den Aufforstungen ist allerdings in der Streuauflage des Waldes gebunden und damit recht labil und störungsanfällig.

Aufforstungen von Grünland führen im Mittel zu keinen signifikanten Veränderungen der Bodenkohlenstoffvorräte. Eine C-Sequestrierung findet dort nur in der Biomasse der Bäume und in der Streuauflage statt (Poeplau *et al.*, 2011). Die Anlage von Agroforstsystemen auf Grünland als C-Sequestrierungsmaßnahme ist deshalb für die Bodenkohlenstoffsequestrierung nicht zielführend. In der Biomasse kommt es aber zu einer C-Sequestrierung.

In Deutschland werden derzeit jährlich > 1 Mio. t $\text{CO}_2\text{-Eqiv.}$ aus entwässerten Moorwäldern emittiert, so dass hier ein Minderungspotenzial besteht. Forstwirtschaft, Agroforstsysteme oder Kurzumtriebsplantagen auf organischen Böden sind langfristig nur dann eine C-Senke, wenn der Torf durch hohe Wasserstände geschützt wird.

Hecken und Feldgehölze gehören zu den wichtigsten Strukturen in Agrarlandschaften, die sowohl zentrale Bedeutung für den Bodenschutz (z.B. Erosionsschutz) als auch für die Biodiversität und den Biotopverbund haben. Unter Hecken in Schleswig-Holstein wurden im Vergleich zu den angrenzenden Äckern 66% höhere Bodenkohlenstoffvorräte ermittelt (Paulsen & Bauer, 2009), und auch eine französische Studie fand 13 bis 38% höhere Bodenkohlenstoffvorräte als Heckeneffekt (Walter *et al.*, 2003). Zusätzlich wird in der Biomasse der Hecken durchschnittlich rund 47 Mg C ha^{-1} gebunden (UBA, 2016b). Diese Werte sind Abschätzungen und Einzelstudien, verdeutlichen aber das große Potenzial, durch Anlage neuer Hecken Klimaschutz, Erosionsschutz und Biotopschutz gleichzeitig zu fördern. Um repräsentativ für verschiedenen Heckentypen und verschiedenes Heckenmanagement C-Sequestrierungspotenziale zu ermitteln, sind aber weitere Forschungsarbeiten nötig.

3.9 Zusammenfassung zu landwirtschaftlichen Maßnahmen zum Bodenkohlenstoffaufbau

Die in den letzten Unterkapiteln vorgestellten Maßnahmen zur Anreicherung von Bodenkohlenstoff werden hier zusammenfassend dargestellt. In Tabelle 2 finden sich sowohl Maßnahmen, die die Zufuhr von organischer Masse in den Boden erhöhen als auch Maßnahmen, die den Abbau der organischen Substanz reduzieren. Beide Maßnahmentypen tragen zur Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte bei oder zur Verringerung von Bodenkohlenstoffverlusten.

Tabelle 2: Maßnahmen zur Steigerung der Kohlenstoffvorräte in Agrarböden

mehr Zufuhr organischer Masse	geringerer Abbau organischer Substanz
<p><u>Maßnahmen im Ackerbau:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ertragssteigerung und Ertragssicherung und damit gesteigerte Einträge von Ernterückständen - Anbau von Zwischenfrüchten (Stoppelsaat und Untersaat) weniger Brachezeiten, möglichst ganzjährige Begrünung (Gründüngungspflanzen) - diversifizierte Fruchtfolgen mit mehr humusmehrenden Kulturen (erhöhte Zufuhr an Ernterückständen) - Anbau mehrjähriger Futterpflanzen (z.B. Klee gras) - Anbau von tiefwurzelnden Ackerkulturen - Ausbringung von Wirtschaftsdüngern und anderen organischen Düngern 	<p><u>In Mineralböden:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Aufbau von Kohlenstoffvorräten in tiefen Bodenhorizonten durch Einarbeitung oder Tiefwurzler - Einbringung schwer abbaubarer organischer Substrate (Pyrolysekohle) <p><u>In organischen Böden (Moore, Anmoore)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Erhöhung der Grundwasserstände in grundwassernahen C-reichen Böden - Mit Anhebung der Wasserstände verbundene gezielte Umwandlung von Acker in Feuchtgrünland - Wiedervernässung und Renaturierung von Mooren - Paludikulturen
<p><u>Maßnahmen mit Nutzungsänderungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - gezielte Umwandlung von Acker in Grünland (z.B. als Gewässerschutz- und Erosionsschutzmaßnahme) - gezielte Anlage von Hecken und Feldgehölzen (z.B. als Erosionsschutz und zur Biodiversitätsförderung) - Agroforstwirtschaft 	

Quelle: Eigene Darstellung nach Paustian *et al.* (1997) und Dignac *et al.* (2017).

Nicht alle Maßnahmen sind auf allen Standorten anwendbar und effektiv. Es ist deshalb eine Hierarchie der Maßnahmen zu beachten, wie sie in Abbildung 2 als Entscheidungsbaum dargestellt ist.

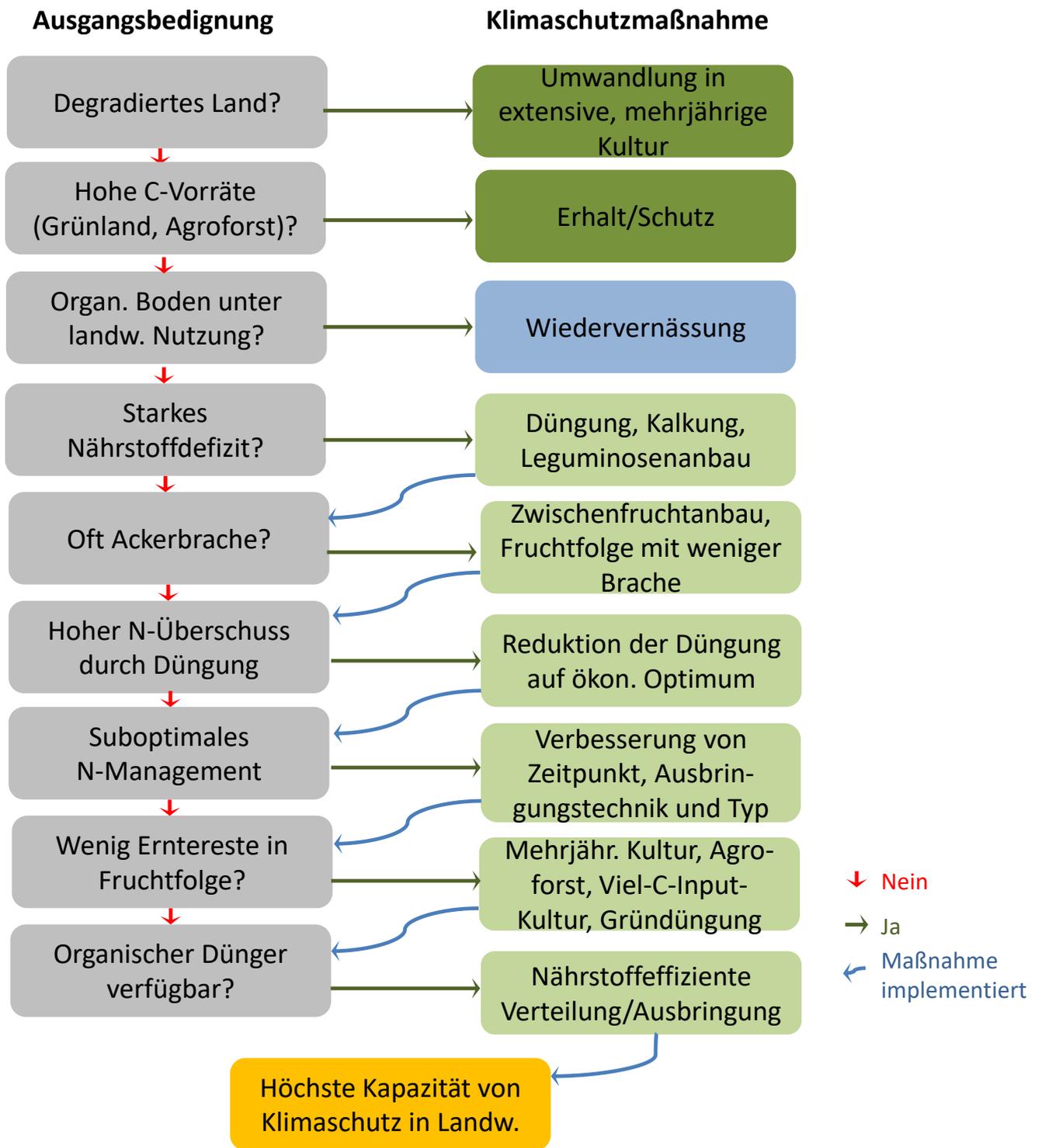


Abbildung 2: Entscheidungsbaum für landwirtschaftliches Klimaschutzmanagement von Böden
 Quelle: stark modifiziert nach Paustian *et al.* (2016).

4 Wirkungen einer Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte auf die landwirtschaftlichen Erträge und Bodenfunktionen

Unabhängig von den Maßnahmen, die zur Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte führen, wirken diese in vielfältiger Weise auf zahlreiche Bodenfunktionen. In den meisten Fällen wirkt sich eine Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts positiv auf die Erträge und die Ertragssicherheit aus. Eine Ausnahme stellen Moorböden dar, bei denen die Anhebung des Wasserspiegels die herkömmliche landwirtschaftliche Produktion stark einschränken bzw. sogar unmöglich machen kann. In einer chinesischen Studie wurden erhöhte Erträge direkt auf höhere Bodenkohlenstoffgehalte zurückgeführt (Pan *et al.*, 2009). Solch ein Zusammenhang ließ sich für eine hoch entwickelte Landwirtschaft mit intensivem Mineraldüngereinsatz wie in Deutschland bisher nicht direkt nachweisen, weil die Einflussfaktoren und Zusammenhänge zu vielfältig und komplex sind. In Mineralböden gibt es eine Reihe von Bodenfunktionen, die direkt positiv mit dem Aufbau organischer Bodensubstanz verknüpft sind:

- (1) Das Wasserspeichervermögen und die Infiltrationsrate werden erhöht: Die Wirkung von Extremwetterlagen kann dadurch besser gepuffert werden. Unter Dürrebedingungen kann die Wasserverfügbarkeit verbessert werden und bei Starkregenereignissen die Infiltrationsleistung.
- (2) Die Bodenstruktur wird verbessert: Hierdurch wird die Bodenbearbeitung erleichtert, die Befahrbarkeit verbessert und damit Energie und Arbeitszeit eingespart.
- (3) Die Erosionsanfälligkeit wird verringert, und damit der Bodenabtrag.
- (4) Die Nährstoffnachlieferung aus der Humusmineralisation ist ein zentraler Baustein der Pflanzenernährung. Die Humusanreicherung leistet nur dann einen Beitrag zum Klimaschutz, wenn die Nährstoffnachlieferung aus der Humusmineralisation effizient von den Kulturpflanzen genutzt wird und keine Nährstoffüberschüsse auftreten, die zu stark erhöhten umwelt- und klimawirksamen Stoffausträgen führen.
- (5) Humusreiche Mineralböden erwärmen sich im Frühjahr schneller durch ihre dunkle Farbe und fördern damit das Pflanzenwachstum.
- (6) Es gibt erste Studien, die humusreichen Böden eine erhöhte phytosanitäre Wirkung bescheinigen. Hohe Humusgehalte können somit helfen, bodenbürtige Pflanzenerreger zurück zu drängen.
- (7) Das Stoffbindungs- und Abbauvermögen ist erhöht und damit die Möglichkeit, organische Schadstoffe besser abzubauen oder andere Schadstoffe zu fixieren. Außerdem werden Nährstoffe besser zurückgehalten und vor Auswaschung geschützt.

Diese umfangreichen Funktionen von Humus können kaum durch einzelne Managementoptionen kompensiert werden. Gerade unter sich verändernden Klimabedingungen kann also die Erhöhung der landwirtschaftlichen Humusvorräte helfen, deren Folgen abzupuffern und den Ressourcenverbrauch in der Landwirtschaft zu reduzieren.

Dem Nährstoffrecycling im Zuge des Humusmanagements kommt eine zentrale Rolle zu. Organische Bodensubstanz enthält Nährstoffe, die im Zuge der Mineralisation den Pflanzen verfügbar gemacht werden. So kann die Rückführung organischer Dünger und der Zwischenfruchtanbau maßgeblich dazu beitragen, den Einsatz von Mineraldünger zu verringern. Die Produktion von Mineraldünger ist eine der wichtigsten Quellen von Treibhausgasen im Agrar- und Ernährungssektor einschließlich der vorgelagerten Sektoren. Tiefwurzelnde Pflanzen und der Anbau von Zwischenfrüchten erhöhen die Nährstoffeffizienz und reduzieren die N-Verluste aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Sie sind deshalb auch in Hinblick auf anderen Umweltwirkungen wie Nitrat Auswaschung ins Grundwasser positiv zu bewerten.

Höhere Bodenkohlenstoffgehalte sowie die kontinuierliche Bodenbedeckung im Grünland, in Feldhecken oder in Agroforstsystemen reduzieren deutlich die Bodenerosion. Bodenerosion gehört global und auch in Deutschland zu den größten Gefahren für Böden und deren Fruchtbarkeit.

Die vielfältigen positiven Aspekte der organischen Bodensubstanz für die Fruchtbarkeit und Resilienz von Böden kann sich auf die Erträge oder die Ertragssicherheit auswirken. Durch die komplexen Wirkungszusammenhänge gibt es bisher sehr wenige Studien, die eine Erhöhung von Ernteerträgen direkt in Verbindung mit einer Erhöhung des Bodenkohlenstoffs bringen konnten. Hier besteht Forschungsbedarf, um auch die ökonomische Relevanz der organischen Bodensubstanz aufzuzeigen. Klarer sind die Ertragseffekte der organischen Bodensubstanz im Ökolandbau sowie in Regionen, in denen weniger synthetische Dünger eingesetzt werden. Dies bestätigt die globale Relevanz organischen Bodensubstanz für die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit.

Die Bewertung der Wirkungen von unterschiedlichen Biokohlen auf Bodenfunktionen muss sehr differenziert erfolgen, da es keine Standardverfahren der Herstellung gibt und sich die Biokohle-Eigenschaften in Abhängigkeit der Herstellungsprozesse und der Ausgangssubstrate erheblich unterscheiden können. Neben positiven Effekten auf Bodeneigenschaften müssen auch potenziell negative Wirkungen (z.B. Schadstoffgehalte) berücksichtigt werden. Sowohl die Herstellungsverfahren als auch alternative Verwertungslinien für die Biomasse sollten kritisch hinterfragt werden.

5 Politische Instrumente zur Unterstützung der Erhaltung und Erhöhung der Kohlenstoffvorräte in landwirtschaftlichen Böden

Für die Politik stellt sich die Frage, inwieweit die Entwicklung der Bodenkohlenstoffvorräte steuerbar ist, ob und ggf. von welchen Steuerungsmöglichkeiten Gebrauch gemacht werden soll. Dabei sind die bereits diskutierten Herausforderungen zu berücksichtigen:

- Große Anzahl von Flächeneigentümern und -nutzern, die erreicht werden müssen,
- große Variabilität der Bodenkohlenstoffgehalte und Anreicherungspotenziale,
- Gleichgewichtseffekte und Umkehrbarkeit,
- die erforderliche Langfristigkeit
- fehlende kurzfristige Messbarkeit einer Erhöhung von Bodenkohlenstoff,
- Interaktionen mit anderen Treibhausgasquellen und anderen Umweltzielen,
- Konkurrenz um knappe biogene Kohlenstoffmengen zwischen den verschiedenen Verwendungen (Nahrungs- und Futtermittel, Bioenergie, Humusaufbau),
- direkte und indirekte, Klimaschutzrelevante Effekte auf Landnutzung und Tierhaltung.

Eine Umsetzung von Maßnahmen über Förderung oder Vorschriften macht es erforderlich, die Einhaltung von Anforderungen in den landwirtschaftlichen Betrieben bzw. auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen kontrollieren zu können. Wenn die Maßnahmen mit dem Ziel des Klimaschutzes umgesetzt werden, kommt die Anforderung hinzu, die Wirkungen in der nationalen Treibhausgas-Berichterstattung abzubilden.

Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs in landwirtschaftlich genutzten Mineralböden unterscheiden sich stark vom Schutz kohlenstoffreicher Böden. Letztere vermeiden eine Freisetzung aus dem vorhandenen Bodenvorrat und sind anhand der Flächennutzung und des Entwässerungszustands vergleichsweise gut zu überprüfen. Die Wirkungen sind auch im nationalen Treibhausgas-Inventar abbildbar, gleichzeitig bieten Grünlanderhaltung und Moorbodenschutz große Emissionsminderungspotenziale. Eine Kohlenstoffanreicherung auf mineralischen Böden erfolgt dagegen i.d.R. über graduelle Anpassungen des Produktionssystems (z.B. durch Zwischenfruchtanbau, Fruchtfolgeänderungen) und durch eine Erhöhung der Zufuhr an organischen Düngemitteln wie Kompost oder Wirtschaftsdünger. Es kann eine Vielzahl einzelner Maßnahmen umgesetzt werden, die im Einzelnen oft nur schwer überprüft werden können. Gut zu überprüfen sind Maßnahmen, die mit langfristigen Nutzungsänderungen (z. B. gezielte Umwandlung von Acker in Grünland, Etablierung von Agroforstsystemen) und der Etablierung dauerhafter Landschaftsstrukturen (z.B. Feldhecken und Feldgehölze) verbunden sind.

Ein Anreiz zur Erhöhung der Kohlenstoffzufuhr aus externen Kohlenstoffquellen muss aus Sicht des Klimaschutzes im Kontext einer effizienten und ressourcenschonenden Nährstoffversorgung kritisch geprüft werden. Eine hohe Anreicherung kann u.U. aufgrund der damit verbundenen,

hohen Nährstoffzufuhr kontraproduktiv auf Klimaschutz- und andere Umweltziele wirken. Ein Export von humusbildenden organischen Düngern aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen hin zu Marktfruchtbetrieben mit geringer Humusreproduktion kann sowohl im Sinne der Bodenfruchtbarkeit als auch des Klimaschutzes positiv sein. Bei einer Umverlagerung vorhandener organischer Dünger steht einer Kohlenstoffanreicherung auf bestimmten Flächen eine Abreicherung auf anderen Flächen gegenüber. Eine Förderung des Kohlenstoffaufbaus auf einzelnen Flächen oder in einzelnen Betrieben kann somit zu Verlagerungseffekten führen, ohne dass auf regionaler Ebene positive Nettoeffekte erzielt werden. Entscheidend für den Klimaschutz sind daher Humusstrategien, die auf regional optimierten, ressourceneffizienten Nährstoffkonzepten basieren.

Die Umkehrbarkeit einer Kohlenstoffanreicherung auf mineralischen Böden stellt die Sinnhaftigkeit von Politiken in Frage, die mit starken Anreizen für die Flächenbewirtschafter auf eine kurzfristige Anreicherung von Bodenkohlenstoff abzielen. Zum einen muss das Management, das zur Erreichung eines höheren Bodenkohlenstoffvorrats notwendig ist, langfristig beibehalten werden, ohne dass es zu einer weiteren Anreicherung kommt. Zum anderen ist die Umkehrbarkeit zu berücksichtigen. Wenn ein durch Förderung erzielter hoher Humusvorrat zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgebaut wird, stellt sich die Frage, ob dann Fördermittel zurückerstattet werden müssten. Diese Überlegungen gelten sinngemäß auch bei Einführung eines Marktes für Bodenkohlenstoff: Im Sinne des Klimaschutzes muss die langfristige Aufrechterhaltung der erzielten Kohlenstoffanreicherung gewährleistet werden. Neben Gutschriften für die Bindung von Bodenkohlenstoff müssen auch Lastschriften aufgrund der Freisetzung von Bodenkohlenstoff berücksichtigt werden. Da lange Zeiträume zwischen einer Anreicherung und einem Abbau von Bodenkohlenstoff liegen können, ist ein auf individuellen Anreizen beruhendes System nur schwer in konsistenter Weise umsetzbar. Hinzu kommt, dass Umstellungen der Bodennutzung mit dem Ziel einer stärkeren Kohlenstoffbindung Auswirkungen auf die Tierhaltung (z. B. Bestandsaufstockung zur Verwertung zusätzlich produzierter Futtermengen) und indirekte Landnutzungseffekte (als Folge einer Extensivierung der Produktion) zur Folge haben können. Die beschriebenen Probleme verdeutlichen, dass Politiken, die allein auf die Kohlenstoffanreicherung in Böden abzielen, mit sehr großen Risiken, Unwägbarkeiten und Problemen behaftet sind. Das Thema Kohlenstoffsequestrierung sollte daher nicht isoliert, sondern besser als Teil langfristiger angelegter Agrarumwelt- und Agrarstrukturmaßnahmen adressiert werden.

Deshalb wird von einer Neuausrichtung der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) auf die Kohlenstoffanreicherung in Mineralböden abgeraten, sofern nicht synergistische Effekte mit anderen Bodenfunktionen und Ökosystemdienstleistungen entstehen. Bereits die aktuelle Agrarförderung zielt mit einigen Maßnahmen auf Humuserhalt und Humusaufbau ab. Seit dem Jahr 2015 werden 30 Prozent des Budgets für die Direktzahlungen der GAP als neue, flächenbezogene Ökologisierungskomponente ausgezahlt. Im Rahmen des sogenannten *Greenings* wird diese Direktzahlungskomponente nur bei Einhaltung bestimmter Umweltauflagen in voller Höhe an die Landwirte ausgezahlt. Wirkungen auf die Erhaltung von Bodenkohlenstoff hatte die Begrenzung des Grünlandumbruchs. Auch die Anerkennung des Zwischenfruchtanbaus, des Leguminosenanbaus (z. B. Klee, Luzerne) und der Ackerflächenstilllegung als ökologische Vorrangfläche und die Gree-

ning-Auflagen zur Anbaudiversifizierung im Ackerbau haben einen Einfluss auf Humuserhaltung und -aufbau. Positive Effekte der GAP auf die Bodenkohlenstoffvorräte von Ackerböden wurden bisher aber nicht bilanziert.

Als weiteres Element der GAP ist der GLÖZ-Standard 6 (GLÖZ = Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen im guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand) zur Erhaltung des Anteils der organischen Substanz im Boden zu nennen. Dieser Standard wird als Teil der Cross-Compliance-Auflagen umgesetzt. Die Einhaltung der Cross Compliance-Auflagen ist Voraussetzung für den Erhalt der Direktzahlungen, Sanktionen im Falle von Verstößen berechnen sich im Gegensatz zum Greening auch Basis der gesamten Direktzahlungen. Der GLÖZ-Standard 6 wird in Deutschland über das ohnehin flächendeckend geltende Verbot des Abbrennens von Stoppeln und Ernteresten auf dem Feld umgesetzt. Von der Möglichkeit, weitere Auflagen zur Humuserhaltung unter dem GLÖZ-Standard 6 zu definieren, wird in Deutschland kein Gebrauch gemacht.

Zielrichtung politischer Maßnahmen sollte es sein, über Beratung und Ausbildung, Forschung, Entwicklung und Praxiseinführung Maßnahmen zum Erhalt und zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis zu stärken, und zwar nicht durch dauerhafte Förderatbestände oder Vorschriften, sondern im Eigeninteresse der Landwirte. Politische Förderinstrumente wie eine befristete Agrarumweltförderung können eine Erprobung und innerhalb einer Übergangsphase die Praxiseinführung von Maßnahmen unterstützen, sollten aber angesichts der langfristigen Zielstellung nicht als zentraler Lösungsansatz angesehen werden.

Fallbeispiel: Humus-Zertifikatehandel in Österreich

In der österreichischen „Ökoregion Kaindorf“ wird ein regionaler Humus-Zertifikatehandel umgesetzt (Initiative der „Ökoregion Kaindorf“): Landwirte erhalten für den jährlichen Humusaufbau ein Erfolgshonorar (30 Euro/t CO₂), das von Unternehmen in der Region als Zertifikate finanziert wird (45 Euro/t CO₂). Derzeit (Stand: 8.08.2016) beteiligen sich 120 landwirtschaftliche Betriebe in der Region (Tendenz steigend) mit einer Fläche von 1030 ha (Mitteilung Herr Thomas Karner). Die im Projekt vorliegenden Daten weisen auf ein Sequestrierungspotenzial von jährlich über 1 Million t CO₂/a in der Steiermark (130.000 ha) hin. Unklar ist jedoch, wie das Projekt mit der Förderung umgeht, wenn die Humusmenge nicht weiter steigt (Gleichgewichtseinstellung). Das Prinzip der Landwirte, wenige und ertragschwache Schläge für die Fördermaßnahme auszuwählen und auf diesen verschiedenen Maßnahmen zur C-Sequestrierung im Boden durchzuführen, könnte auf Deutschland übertragbar sein. Die Herausforderung liegt in der Überprüfung der C-Sequestrierung, die arbeitsaufwendig in der Ökoregion Kaindorf durch Bodenanalysen eines externen Sachverständigen erfolgt. Die Untersuchung der Humusgehalte erfolgt für die obersten 25 cm, so dass Änderungen im gesamten Bodenprofil nicht erfasst werden. Außerdem muss der Landwirt nur für 5 Jahre den Erhalt des zusätzlich gespeicherten Bodenkohlenstoffs garantieren. Ein kurzfristig erzielter Klimaschutzeffekt kann dadurch nach Ablauf der fünf Jahre ebenso schnell wieder in eine Treibhausgasquelle umgewandelt werden, wenn der Landwirt die Maßnahme zur Bodenkohlenstoffspeicherung nicht dauerhaft aufrechterhält.

6 Vorschläge für mögliche Beiträge zur 4-Promille-Initiative in Deutschland

Die 4-Promille-Initiative stellt die Synergie zwischen verschiedenen Bodenfunktionen durch die Erhöhung der Humusvorräte in den Mittelpunkt. Dies sollte auch bei Maßnahmen in Deutschland beachtet werden: Die Erhöhung der Humusvorräte sollte nicht nur oder nicht in erster Linie als Klimaschutzmaßnahme angestrebt werden, sondern um die verschiedenen Bodenfunktionen und Umweltleistungen der Landwirtschaft insgesamt zu stärken. Besonders relevant sind hierbei die Ertragsstabilität, der Gewässer- und Grundwasserschutz, der Boden- und Erosionsschutz sowie die Förderung der Lebensraumfunktion und Biodiversität. Als mögliche Beiträge in Deutschland zur 4-Promille-Initiative sind folgende Beispiele zu nennen:

- 1.) Die **Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und der Humusgehalte in der Ausbildung und Beratung von Landwirten** den Mittelpunkt stellen. Der Erhalt und die Erhöhung der Humusvorräte sind oft im eigenen (ökonomischen) Interesse der Landwirte. Maßnahmen und Methoden zum Humuserhalt und Aufbau und die positiven Wirkungen von Humus sollten integraler Teil der landwirtschaftlichen Ausbildung werden. Auch in die Beratung sollte Humusmanagement als Teilaspekt zur Verbesserung des landwirtschaftlichen Klimaschutzes und der Ressourceneffizienz integriert werden. Dazu könnten *Tools* wie Treibhausgasrechner oder standortspezifische Humusbilanz-Rechner einen Beitrag leisten.
- 2.) Den **Schutz kohlenstoffreicher Böden** (Grünland, Moore) sicherstellen. Der Schutz kohlenstoffreicher Böden stellt eine effektive Maßnahme zur Reduktion landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen und zum Erhalt von Humus dar. Auf einer geringen Fläche können große Effekte erzielt werden, die auch im Rahmen der Treibhausgasberichterstattung anrechenbar wären. Ertragsausfälle für Landwirte, die organische Böden oder andere C-reiche Böden bewirtschaften und deren Nutzung umstellen oder aufgeben, müssen angemessen kompensiert werden. Ein bundesweites Programm könnte die landesweiten Initiativen zum Moorschutz stärken und auf ein Niveau bringen, auf dem nennenswerte Klimaschutz-Effekte erreicht werden (siehe auch Osterburg *et al.*, 2018).
- 3.) Reduktion von Brachezeiten durch Förderung von **Zwischenfruchtanbau und Untersaaten**. Dies sollte integriert werden in Optionen einer zukünftigen Ackerbaustrategie zu Diversifizierung der Fruchtfolgen mit mehr Sommerungen, um in Fruchtfolgen zusätzliche Anbaufenster für Zwischenfrüchte zu schaffen.
- 4.) Gezielte Förderung der **Umwandlung von Acker in Grünland** zum Schutz sensibler Ökosysteme vor belastenden Stoffeinträgen aus der Landwirtschaft. Hier könnten insbesondere Gewässerrandstreifen oder Wasserschutzgebiete prioritär umgewandelt werden z.B. mit dem Ziel, den Grünanteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf das Niveau des Referenzjahres 2003 zu bringen (Wiesmeier *et al.*, 2017).

- 5.) Förderung der Etablierung von **Agroforstsystemen** besonders in landwirtschaftlich geprägten Regionen mit wenigen Landschaftsstrukturelementen und auf erosionsgefährdeten Standorten.
- 6.) Förderung der Umwandlung von **Ackerteilflächen in Hecken** besonders in landwirtschaftlich geprägten Regionen mit wenig Landschaftsstrukturelementen und hoher Winderosionsgefährdung.
- 7.) Organische Dünger müssen effektiver genutzt werden. Der **regionalen Ungleichverteilung des Aufkommens und der Verwendung von organischem Dünger** (Wirtschaftsdünger aus Tierhaltung, Biogas-Gärreste) ist entgegen zu wirken. Die positiven Wirkungen der organischen Düngung auf die Humusreproduktion und Bodeneigenschaften sollten zunehmend auch in Betrieben ohne Tierhaltung auf der Basis regionaler Nährstoffkonzepte genutzt werden. Wirtschaftsdünger ist ein wertvoller Dünger, der Mineraldünger ersetzt (Einsparung von Treibhausgasemissionen bei deren Produktion). Tierhaltungsbetriebe in Regionen mit wenig Tierhaltung sollten gestärkt werden und der weiteren Konzentration von Tierhaltungsbetrieben in bestimmten, jetzt schon überbelasteten Tierhaltungsregionen ist entgegen zu treten. Die düngerechtlichen Vorgaben zum Einsatz organischer Dünger sind so abzustimmen, dass Nährstoffüberhänge vermieden werden und ein Einsatz organischer Dünger in moderater Höhe auf möglichst vielen Landwirtschaftsflächen gefördert wird.
- 8.) **Wurzeln sind das zentrale Ausgangsmaterial für die Humusbildung.** Kulturen mit intensiver Durchwurzelung (z.B. Klee gras) sollten weiter verbreitet werden. Besondere mit tiefwurzelnden Genotypen und Kulturen (z.B. mehrjähriges Klee gras/Luzerne) könnte das Potenzial des (Unter)bodens zur Speicherung von Humus gezielt genutzt werden. Soweit mit solchen Maßnahmen eine Ausweitung der Futterpflanzenproduktion verbunden ist, muss eine Verwertung der Aufwüchse durch Wiederkäuer oder in der Biogasproduktion sichergestellt sein und in die Bewertung einbezogen werden. Für die meisten modernen Kultursorten liegen keine ausreichenden Daten vor, wie viele und wie tiefe Wurzeln sie bilden. Hier besteht Forschungsbedarf, um Kultursorten zu identifizieren, die tief/viel wurzeln und damit auch unter veränderten Klimabedingungen (z.B. Dürreperioden) hohe Erträge liefern.

Der Nachweis über Veränderungen der Humusvorräte ist die grundlegende Voraussetzung für Humusmanagement in der Zukunft. Solch ein Nachweis ist durch bundesweite **wiederholte Bodenkohlenstoffinventuren** wie der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft zu erbringen. Für die organischen Böden ist ein eigenes spezifisches Monitoringprogramm aufzustellen, das z.B. über die jährliche Sackung Humusverluste auf landwirtschaftlich genutzten Mooren dokumentiert und die zentralen bodenhydrologischen Steuerfaktoren der C-Umsetzung erfasst. Ein spezifisches Monitoring organischer Böden schafft erst die Möglichkeit, die Effekte eines gezielten Moorschutzes für den Klimaschutz nachzuweisen. In Rahmen der Bodenzustandserhebung Landwirt-

schaft liegen zu wenige Beprobungspunkte auf organischen Böden, um die Vielfalt der Landnutzungsvarianten und Bodeneigenschaften adäquat zu erfassen.

Die 4-Promille-Initiative wirbt mit plakativen Argumenten und einer sehr optimistischen Einschätzung der möglichen Klimaschutzbeiträge landwirtschaftlich genutzter Böden. Dies steigert zwar die Wahrnehmung der Bedeutung von Humus und seiner positiven Wirkungen, birgt aber die Gefahr, dass wegen der dadurch geweckten hohen und nicht einlösbaren Erwartungen Kritik aufkommt. Daher wird empfohlen, für die Unterstützung der 4-Promille Initiative seitens der Bundesregierung eine **Kommunikationsstrategie** zu entwickeln, welche die positiven Impulse der Initiative aufgreift, aber einen eigenen, kritischeren Standpunkt bezüglich der bestehenden Herausforderungen bezieht. Dabei sollte die Ressource Boden und die Erhaltung und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit gerückt und die Synergien von Maßnahmen in den Bereichen Wasserschutz, Bodenschutz, Biodiversitätsschutz und Klimaschutz betont werden. Neben den Chancen einer Kohlenstoffeinbindung in Böden für das Klima ist auch auf die Gefahren durch fortgesetzte Kohlenstoffverluste aus Böden und somit auf die Notwendigkeit, kohlenstoffreiche Böden zu schützen hinzuweisen. Dies bedeutet, dass die Ressource Boden eine hohe Relevanz für die Klimapolitik besitzt, und zwar sowohl hinsichtlich der Chancen als auch der Risiken.

7 Literatur

- ALCANTARA V, DON A, WELL R, NIEDER R (2016) Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks, *Global Change Biology*, 22, 2939-2956
- BAKER JM, OCHSNER TE, VENTEREA RT, GRIFFIS TJ (2007) Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 118, 1-5.
- BEYER C, HÖPER H, (2015) Greenhouse gas exchange of rewetted bog peat extraction sites and a *Sphagnum* cultivation site in northwest Germany, *Biogeosciences* 12, 2101-2117
- BOLINDER MA, KATTERER T, ANDREN O, PARENT, LE (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, *Canadian Journal of Soil Science*, 92, 821-833
- BÖTTCHER F, SCHMIDT M, MÜLLER E, SCHMIDT A, WEISKE T (2015) Grünes Licht für Zwischenfrüchte - Ergebnisse von Wasserhaushaltsuntersuchungen im Zwischenfruchtanbau, *Landwirtschaft ohne Pflug*, 6, 36-39
- CARLGRÉN K, MATSSON L. (2001) Swedish soil fertility experiments. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 51, 49-78
- CIAIS P, SABINE C, BALA G, BOPP L, BROVKIN V, CANADELL J, CHHABRA A, DEFRIES R, GALLOWAY J, HEIMANN M (2013) Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 465-570. Cambridge University Press.
- CROMBIE K, MASEK O (2015) Pyrolysis biochar systems, balance between bioenergy and carbon sequestration, *Global Change Biology Bioenergy*, 7, 349-361
- DE STEFANO A, JACOBSON MG (2018) Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis, *Agroforestry Systems*, 92, 285-299
- DESTATIS (2017) Feldfrüchte. In: *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei*, p. 77. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.
- DIGNAC MF, DERRIEN D, BARRE P, BAROT S, CECILLON L, CHENU C, CHEVALLIER T, FRESCHET GT, GARNIER P, GUENET B, HEDDE M, KLUMPP K, LASHERMES G, MARON PA, NUNAN N, ROUMET C, BASILE-DOELSCH I (2017) Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 37, DOI 10.1007/s13593-017-0421-2
- DON A, SCHUMACHER J, FREIBAUER A (2011) Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis, *Global Change Biology*, 17, 1658-1670
- ERB K-H, LUYSSAERT S, MEYFROIDT P, PONGRATZ J, DON A, KLOSTER S, KUEMMERLE T, FETZEL T, FUCHS R, HEROLD M, HABERL H, JONES CD, MARÍN-SPIOTTA E, MCCALLUM I, ROBERTSON E, SEUFERT V, FRITZ S, VALADE A, WILTSHIRE A, DOLMAN AJ (2016) Land management: data availability and process understanding for global change studies, *Global Change Biology*, 23, 512-533
- ERKENS G, VAN DER MEULEN MJ, MIDDELKOOP H (2016) Double trouble: subsidence and CO₂ respiration due to 1,000 years of Dutch coastal peatlands cultivation, *Hydrogeology Journal*, 24, 551-568
- FROLKLING S, ROULET N, 2007. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions, *Global Change Biology*, 13, 1079-1088
- GATTINGER A, MULLER A, HAENI M, SKINNER C, FLIESSBACH A, BUCHMANN N, MADER P, STOLZE M, SMITH P, SCIALABBA NEH, NIGGLI U (2012) Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 18226-18231

- GIBBS HK, SALMON JM (2015) Mapping the world's degraded lands, *Applied Geography*, 57, 12-21
- GLASER B, BIRK JJ (2012) State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Indio), *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 82, 39-51
- GRONWALD M, DON A, TIEMEYER B, HELFRICH M (2015) Effects of fresh and aged chars from pyrolysis and hydrothermal carbonization on nutrient sorption in agricultural soils, *SOIL*, 1, 475-489
- GRONWALD M, VOS C, HELFRICH M, DON A (2016) Stability of pyrochar and hydrochar in agricultural soil - a new field incubation method, *Geoderma*, 284, 85-92
- GÜNTHER A, HUTH V, JURASINSKI G, GLATZEL S (2014) The effect of biomass harvesting on greenhouse gas emissions from a rewetted temperate fen, *GCB Bioenergy*, doi: 10.1111/gcbb.12214.
- HERMLE S, ANKEN T, LEIFELD J, WEISSKOPF P (2008) The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions, *Soil & Tillage Research*, 98, 94-105
- HOOIJER A, PAGE S, JAUHAINEN J, LEE WA, LU XX, IDRIS A, ANSHARI G (2012) Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands, *Biogeosciences*, 9, 1053-1071.
- HÖPER H, SCHÄFER W (2012) Die Bedeutung der organischen Substanz von Mineralböden für den Klimaschutz, *Bodenschutz*, 3, 100-108
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2014): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, HIRAISHI T, KRUG T, TANABE K, SRIVASTAVA N, BAASANSUREN J, FUKUDA M, TROXLER TG (Hrsg.), IPCC, Schweiz.
- JEFFERY S, ABALOS, D, PRODANA M, BASTOS AC, VAN GROENIGEN JW, HUNGATE BA, VERHEIJEN F (2017), Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12, 053001.
- JEFFERY S, VERHEIJEN FGA, VAN DER VELDE M, BASTOS AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 144, 175-187
- JOHNSTON AE, POULTON PR, COLEMAN K (2009) Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes, *Advances in Agronomy*, 101, 1-57
- KATTERER T, BOLINDER MA, ANDREN O, KIRCHMANN H, MENICHETTI L (2011) Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 141, 184-192
- KÖRSCHENS M, ROGASIK J, SCHULZ E, BÖNING H, EICH D, ELLERBROCK R, HÜLSBERGEN K-J, KÖPPEN D, KOLBE H, LEITHOLD G, MERBACH W, PESCHKE H, PRYSTAV W, REINHOLD J, ZIMMER J (2004) Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. In: *Standpunkt des VDLUFA*, p. 12, Bonn.
- KÖRSCHENS M, ALBERT E, ARMBRUSTER M, BARKUSKY D, BAUMECKER M, BEHLE-SCHALK L, BISCHOFF R, CERGAN Z, ELLMER F, HERBST F, HOFFMANN S, HOFMANN B, KISMANYOKY T, KUBAT J, KUNZOVA E, LOPEZ-FANDO C, MERBACH I, MERBACH W, PARDOR MT, ROGASIK J, RUHLMANN J, SPIEGEL H, SCHULZ E, TAINSEK A, TOTH Z, WEGENER H, ZORN W (2013) Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59, 1017-1040
- LAGANIÉRE J, ANGERS DA, PARÉ D (2010) Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis, *Global Change Biology*, 16, 439-453.
- LEHMANN J, JOSEPH S (2015) *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Taylor & Francis.

- LEIFELD J (2013) Low-input farming: a way towards climate-friendly agriculture? *Carbon Management*, 4, 31-41
- LEIFELD J, MENICETTI L (2018) The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies, *Nature Communications*, 9, 1071, doi: 10.1038/s41467-018-03406-6
- LUO ZK, WANG EL, SUN OJ (2010) Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 139, 224-231
- LYNCH JP, WOJCIECHOWSKI T (2015) Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops, *Journal of Experimental Botany*, 66, 2199-2210
- MALJANEN M, SIGURDSSON BD, GUÐMUNDSSON J, ÓSKARSSON H, HUTTUNEN JT, MARTIKAINEN PJ (2010) Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps, *Biogeosciences*, 7, 2711–2738
- MASEK O, BROWNSORT P, CROSS A, SOHI S (2013) Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar, *Fuel*, 103, 151-155
- MINASNY B, MALONE BP, MCBRATNEY AB, ANGERS DA, ARROUAYS D, CHAMBERS A, CHAPLOT V, CHEN Z-S, CHENG K, DAS BS (2017) Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 292, 59-86
- MÖLLER A., HÖPER H (2014) Bewertung des Einsatzes von Biokohle in der Landwirtschaft aus Sicht des Bodenschutzes. In: *Geoberichte 29*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Bewertung, Hannover
- NGUYEN BT, LEHMANN J, KINYANGI J, SMERNIK R, RIHA SJ, ENGELHARD MH (2009) Long-term black carbon dynamics in cultivated soil, *Biogeochemistry*, 92, 163-176
- NIEDER R, RICHTER, J. (2000) C and N accumulation in arable soils of West Germany and its influence on the environment - Developments 1970 to 1998, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163, 65-72
- OSTERBURG B, TIEMEYER B, RÖDER N (2018) Hintergrundpapier zum Moorbodenschutz und zur torfschonenden und -erhaltenden Moorbodennutzung als Beitrag zum Klimaschutz, Thünen Working Paper 105, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 20 S.
- PAULSEN H-M, BAUER B (2009) Soil organic carbon stocks in hedge-banks as agricultural marginal areas. *Ressortforschung für den ökologischen Landbau 2008*, pp. 73-80.
- PAN G, SMITH P, PAN W. (2009) The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129, 344-348.
- PAUSTIAN K, LEHMANN J, OGLE S, REAY D, ROBERTSON GP, SMITH P (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49-57
- PAUSTIAN K, ANDREN O, JANZEN HH, LAL R, SMITH P, TIAN G, TIESSEN H, VAN NOORDWIJK M, WOOMER PL (1997) Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions, *Soil Use and Management*, 13, 230-244
- PEICHL M, ÖQUIST M, LÖFVENIUS MO, ILSTEDT U, SAGERFORS J, GRELE A, LINDROTH A, NILSSON MB (2014) A 12-year record reveals pre-growing season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide exchange in a boreal fen, *Environmental Research Letters*, 9, 055006, doi:10.1088/1748-9326/9/5/055006
- POEPLAU C, DON A (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41
- POEPLAU C, BOLINDER MA, ERIKSSON J, LUNDBLAD M, KATTERER T (2015) Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socio-economic drivers, *Biogeosciences*, 12, 3241-3251

- POEPLAU 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, 2415-2427
- POMMER G (2003) Vergleich der Wirkungen von Gülle mit Stallmist und Jauche im ökologischen Landbau. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan, 9 S.
- POWLSON DS, RICHE AB, COLEMAN K, GLENDINING N, WHITMORE AP (2008) Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: Limitations and alternatives. *Waste Management*, 28, 741-746
- POWLSON DS, STIRLING CM, JAT M, GERARD BG, PALM CA, SANCHEZ, PA, CASSMAN KG (2014) Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4, 678.
- SCHRUMPF M, SCHULZE ED, KAISER K, SCHUMACHER J (2011) How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 8, 1193-1212
- SCHUCHARDT F, STICHNOTHE H (2011) Abschätzung des Aufkommens an Kohlenstoff in Biomasse-Reststoffe in Deutschland für eine Verwertung über Hydrothermale Carbonisierung (HTC), *Landbauforschung*, 60, 205-212
- SCHULTHEIß U, DÖHLER H, SCHWAB M (2010) Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft — jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland, *Landtechnik*, 65, 354-356
- SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT ET, COMBRINK C (2000) Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon, *Soil Science Society of America Journal*, 64, 681-689
- TEICHMANN I (2014) Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten, *DIW Wochenbericht*, 3-13
- TIDAKER P, SUNDBERG C, OBORN I, KATTERER T, BERGKVIST G (2014) Rotational grass/clover for biogas integrated with grain production - A life cycle perspective, *Agricultural Systems*, 129, 133-141
- TIEMEYER B, ALBIAC BORRAZ E, AUGUSTIN J, BECHTOLD M, BEETZ S, BEYER C, DRÖSLER M, EICKENSCHIEDT T, EBLI M, FIEDLER S, FÖRSTER C, FREIBAUER A, GIEBELS M, GLATZEL S, HEINICHEN J, HOFFMANN M, HÖPER H, JURASINSKI G, LEIBER-SAUHEITL K, PEICHL-BRAK M, ROßKOPF N, SOMMER M, ZEITZ J (2016) High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils, *Global Change Biology*, 22, S. 4134–4149
- TUBIELLO FN, BIANCALANI R, SALVATORE M, ROSSI S, CONCHEDDA G (2016) A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils, *Sustainability* 8, 371, doi:10.3390/su8040371
- UBA (UMWELTBUNDESAMT, HRSG.) (2016a) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto Protokoll 2015, Nationaler Inventarbericht 1990 - 2013, *Climate Change 2/2016*, Dessau-Roßlau, 921 S.
- UBA (UMWELTBUNDESAMT, HRSG.) (2016b) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto Protokoll 2018, Nationaler Inventarbericht 1990 - 2014, *Climate Change 23/2016*, Dessau-Roßlau, 1040 S.
- VAN DEN AKKER JJH, HENDRIKS RFA, PLEIJTER M (2012) CO₂ emissions from peat soils in agricultural use: calculation and prevention, *Agrociencia*, 16, 43-50
- WALTER K, DON A, FLESSA H (2014) No general soil carbon sequestration under Central European short rotation coppices. *GCB Bioenergy*, 7, 727-740
- WALTER C, MEROT P, LAYER B, DUTIN G (2003) The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management*, 19, 201-207.

- WANG JY, XIONG ZQ, KUZYAKOV Y (2016) Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects, *Global Change Biology Bioenergy*, 8, 512-523.
- WEINZIERL W, WALDMANN F (2015) Ermittlung langjähriger CO₂-Emissionen und Beurteilung der Moore Oberschwabens auf Basis historischer und aktueller Höhennivellements. Abschlussbericht. LGRB Fachbericht, Freiburg, 112 S.
- WICHTMANN W, SCHRÖDER C, JOOSTEN H (Hrsg.) (2016) Paludikultur - Bewirtschaftung nasser Moore. Schweizerbart, Stuttgart, 272 S.
- WIESMEIER M, HÜBNER R, KÖGEL-KNABNER I (2015) Stagnating crop yields: An overlooked risk for the carbon balance of agricultural soils? *Science of The Total Environment*, 536, 1045-1051
- 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
- WIESMEIER M, BURMEISTER J, TREISCH M, BRANDHUBER R (2017) Klimaschutz durch Humusaufbau – Umsetzungsmöglichkeiten der 4 Promille-Initiative in Bayern. In: *Landwirtschaft im Klimawandel Lösungen, die Geld sparen*, pp. 21-30. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.
- WILSON D, BLAIN D, COUWENBERG J, EVANS CD, MURDIYARSO D, PAGE SE, RENOU-WILSON F, RIELEY JO, SIRIN A, STRACK M, TUUTTILA E-S (2016) Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat* 17, Article 4, 1-28

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

*Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliografie; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de*

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Don A, Flessa H, Marx K, Poeplau C, Tiemeyer B, Osterburg B (2018) Die 4-Promille-Initiative "Böden für Ernährungssicherung und Klima" - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 37 p, Thünen Working Paper 112, DOI:10.3220/WP1543840339000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



Thünen Working Paper 112

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1543840339000
urn:nbn:de:gbv:253-201812-dn060523-5