

2.2.5 Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden

SIEGMAR-W. BRECKLE & MARTIN WIESMEIER

Landwirtschaftlich genutzte Böden sind die wichtigste Grundlage für die Ernährung des Menschen, aber auch Basis für zahlreiche pflanzliche Rohstoffe. Der Boden, die dünne Haut der Erde, Grenzregion zwischen Gesteinen und Atmosphäre ist wichtige Basis für die Ökosysteme mit ihren Produzenten, Konsumenten und Destruenten. Ein kleiner Teil des organischen Materials wird als Humus im Boden gespeichert; der organische Bodenkohlenstoff (SOC) im Humus ist damit eine wichtige Komponente im Kohlenstoffkreislauf der Erde und damit auch von Einfluss auf das Klimageschehen. Landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmethoden, die den Humusaufbau fördern, sind somit bedeutsame Maßnahmen für den Klimaschutz. Die Erhaltung und Vergrößerung des SOC-Vorrats ist aber nur durch geeignete Maßnahmen erreichbar, und sie ist von vielen anderen Faktoren abhängig.

Sequestration of organic matter in agricultural soils: *Agricultural soils are the most important basis for human nutrition, but also as a basis for numerous vegetable raw materials. The soil, the thin skin of the earth, the contact region between rocks and atmosphere is an important basis for ecosystems with their producers, consumers and decomposers. A small part of the organic material is stored as soil organic matter; the soil organic carbon (SOC) in the soil organic matter is therefore an important component in the earth's carbon cycle and therefore also important for the climate. Agricultural management practices that promote the formation of soil organic matter are therefore also important measures for mitigating climate change. However, maintaining and increasing the SOC stocks in soil can only be achieved through appropriate measures, and it depends on many other factors.*

Acumulación de humus en suelos agrícolas: *Los suelos utilizados en la agricultura son la base más importante para la nutrición humana, pero también la base de numerosas materias primas vegetales. El suelo, la fina piel de la tierra, la región fronteriza entre las rocas y la atmósfera es una base importante para los ecosistemas con sus productores, consumidores y descomponedores. Una pequeña parte de la materia orgánica se almacena como humus en el suelo; el carbono orgánico en el humus es, por lo tanto, un componente importante en el ciclo del carbono de la tierra y, por lo tanto, también importante para los eventos climáticos. Por lo tanto, los métodos de procesamiento agrícola que promueven la formación de humus también son medidas importantes para la protección del clima. Sin embargo, mantener y aumentar las reservas de carbono orgánico en el suelo solo se puede lograr con medidas adecuadas y depende de muchos otros factores.*

Boden als Teil des Kohlenstoffkreislaufs

Die Böden der Erde sind ein integraler Bestandteil des Klimasystems. Vor allem in humiden Gebieten mit hoher Primärproduktion und damit großer Biomassebildung und ertragreichem Ackerbau sind die Böden große Kohlenstoffspeicher. Schätzungen zufolge sind weltweit über 2.500 Mrd. Tonnen Kohlenstoff in den Böden gespeichert (SCHARLEMANN et al. 2014) – das ist etwa viermal so viel wie der Mensch seit Beginn der Industrialisierung durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre gepustet hat.

Der Kohlenstoffspeicher Boden befindet sich in einem dynamischen Fließgleichgewicht. Das heißt: Der Stoffwechsel der Bodenorganismen setzt große Mengen des im Boden gebundenen Kohlenstoffs in Form von Kohlendioxid frei, dieses wird aber auch durch die Photosynthese der Pflanzen wieder gebunden. Teile der Pflanzenreste und Pilze werden in den Bodenkohlenstoffspeicher überführt und damit der Atmosphäre entzogen. Diesen typischen Kreislauf des Kohlenstoffs in Ökosystemen (Abb. 2.2.5-1) kann der Mensch erheblich stören und verändern.

Organischer Kohlenstoff im Boden (soil organic carbon, SOC) ist ein wesentlicher Bestandteil von Böden mit weitreichenden Auswirkungen auf das Funk-

tionieren terrestrischer Ökosysteme. In den letzten Jahrzehnten hat die Menschheit den Bodenkohlenstoff überwiegend vermindert und dadurch die globale Erderwärmung und den Klimawandel verstärkt.

Weltweit sind die Böden einer Vielzahl von Stressfaktoren ausgesetzt. Sie werden weggespült oder weggeblasen, versiegelt, überdüngt, ausgedörrt oder sie versalzen. Besonders die Landwirtschaft, die von fruchtbarem Boden abhängig ist, trägt selbst wesentlich zu diesen Schädigungen und Verlusten bei. So wird oft mehr des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs als CO₂ freigesetzt, als neu im Humus gebunden wird. Auch die Desertifikation ist vor allem in semi-ariden Gebieten ein ernstes Problem und die Übernutzung der Böden mit Produktionseinbußen nimmt in vielen Regionen zu. Um in Zukunft die Ernährung einer noch zunehmenden Weltbevölkerung zu sichern, müssen die Böden geschützt und erhalten werden, schließlich ist ihre Bildung aus dem anstehenden Gestein ein langwieriger Prozess.

In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten der Landwirtschaft vor allem in temperierten Klimazonen besprochen, Böden so zu bewirtschaften, dass sie als Kohlenstoffspeicher mindestens erhalten bleiben oder ihre SOC-Vorräte sogar erhöht werden.

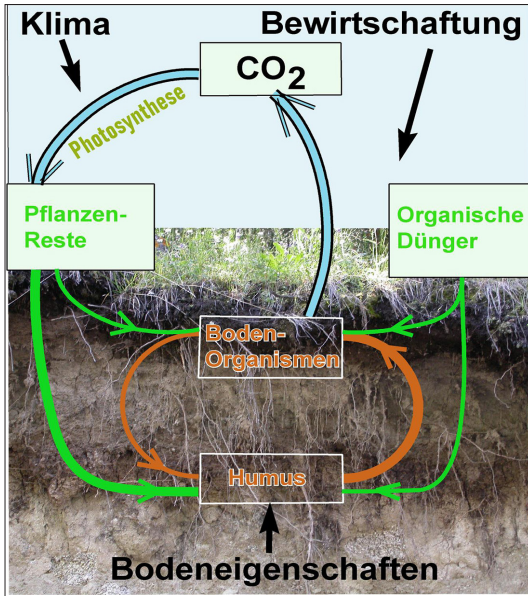


Abb. 2.2.5-1: Bildung und Abbau von Humus. Das standortabhängige Fließgleichgewicht wird durch Klimafaktoren, Bewirtschaftung und Bodeneigenschaften beeinflusst – vereinfachte schematische Darstellung (nach FLESSA et al. 2019).

Humusbildung

Die abgestorbene organische Substanz im Boden wird als Humus bezeichnet. Sie besteht aus allen Umwandlungsprodukten der in den Boden eingetragenen organischen Substanz. Die in der organischen Substanz enthaltenen Nährstoffe werden in der Regel erst dann für die Pflanzen wieder nutzbar, wenn Ernterückstände, abgestorbene Wurzeln, organische Dünger oder Reste der Bodenfauna genügend zersetzt sind. Die organische Substanz wird von den Bodenorganismen zerkleinert und weiter durch Mikroorganismen in die organische Bodensubstanz umgewandelt. Diese ist wichtig für die Nährstoffspeicherung des Bodens und damit für die Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff oder Phosphor sowie K, Ca, Mg. Aber auch die Porenverteilung und damit der Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt des Bodens hängen davon ab. Folglich sind auch das Wasserspeichervermögen und die Puffer- und Filterfunktion der Böden vom Humus mitbestimmt. Als Lieferant vieler Pflanzennährstoffe ist damit Humus entscheidend für die Bodenfruchtbarkeit.

Humus als Kohlenstoffspeicher

Die obersten 10 bis 30 cm des Bodens enthalten in der Regel mehr Humus als der Boden darunter (Abb. 2.2.5-2). Der dunklere Oberboden enthält auch mehr Nährstoffe für die Pflanzen. Er ist daher der Lebensraum für die vielfältigen Bodenlebewesen.



Abb. 2.2.5-2: Bodenprofil einer ackerbaulich genutzten tiefgründigen Schwarzerde mit Zottiger Wicke (*Vicia villosa*) als Zwischenfrucht, Republik Moldau (Foto: M. Wiesmeier).

Die Menge des Bodenkohlenstoffs hängt von der Landnutzungsart ab. In Deutschland sind bis 30 cm Tiefe im Mittel in Ackerböden 61 t/ha Kohlenstoff gespeichert, das sind 31% weniger als in Grünland Böden mit 88 t/ha. Bis in einen Meter Tiefe belaufen sich die mittleren Kohlenstoffvorräte in Mineralböden auf 96 t/ha für Acker und 135 t/ha für Grünland. Im Durchschnitt befinden sich also rund 65 % des Bodenkohlenstoffs (SOC) im Oberboden (0–30 cm) und 35% im Unterboden (30–100 cm). Mineralische Oberböden sind generell kohlenstoffreicher als Unterböden, denn sie erhalten den meisten Kohlenstoffeintrag durch Wurzeln und Erntereste und organische Dünger. Aber auch Unterböden sind maßgeblich an der Speicherung von SOC beteiligt (FLESSA et al. 2019). Da der SOC dort im Mittel sehr viel langsamer umgesetzt wird als im Oberboden, haben Kohlenstoffeinträge in den Unterboden, z.B. über tiefwurzelnde Pflanzen und die wühlende Aktivität der Bodenfauna (z.B. Regenwürmer), eine besondere Bedeutung für die langfristige Kohlenstoffspeicherung.

Moorböden und moorähnliche kohlenstoffreiche Böden (z.B. Moorgleye, Moorfolgeböden, Moorböden mit Tiefumbruch), die in Deutschland über 5 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ausmachen, sind unabhängig von der Nutzung um mindestens das Vierfache kohlenstoffreicher als die Mineralböden (ROSSKOPF et al. 2015) mit bis über 500 t/ha im oberen Meter. Viele

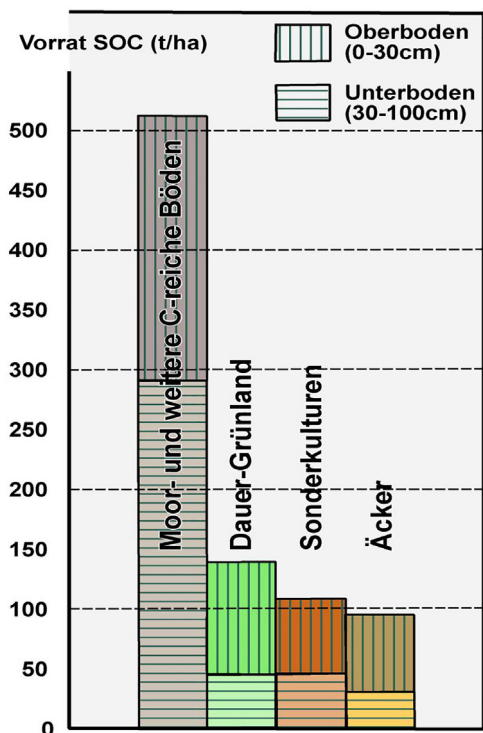


Abb. 2.2.5-3: Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff (SOC) im Oberboden (0–30 cm) und Unterboden (30–100 cm) von Mineralböden unter Ackernutzung, Anbau von Sonderkulturen, Dauergrünland, sowie in landwirtschaftlich genutzten Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden (Dauergrünland und Äcker) (nach FLESSA et al. 2019).

Moore sind aber noch deutlich tiefgründiger. Aufgrund dieser Sonderstellung der landwirtschaftlich genutzten Moorböden als Kohlenstoffspeicher und als CO₂-Quelle ist ihnen ein separates Kapitel gewidmet (s. Kap. 2.1.2).

Humus als Grundlage für fruchtbare Böden

Als Lieferant vieler Pflanzennährstoffe ist Humus entscheidend für die Bodenfruchtbarkeit. Sehr hoch sind die Humusvorräte in Steppen, Laubwäldern mittlerer Breiten und insbesondere dem borealen Nadelwald. Durch die hohen Humusgehalte werden die Böden der Trockenen Mittelbreiten (Prärien, Steppen und Waldsteppen, soweit sie nicht versalzt sind) auch als »Kornkammern der Erde« bezeichnet. Relativ wenig Humus enthalten hingegen Böden in den Tropen. Durch die Umweltbedingungen (v.a. hohe Temperaturen und Niederschläge) wird die organische Substanz hier sehr schnell zersetzt. Die Nährstoffe können in einem abgekürzten Kreislauf mittels der Pilze direkt wieder aus der Streu aufgenommen werden (BRECKLE & RAFIQPOOR 2019).

Der Klimawandel könnte die SOC-Vorräte vor allem landwirtschaftlich genutzter Böden verändern (**Smith et al. 2012). Die Dynamik der SOC-Vorräte hängt von der Balance zwischen dem Eintrag und dem Abbau von organischer Substanz ab. Der Klimawandel verändert Temperatur- und Niederschlagsmuster, die nicht nur den Abbau, sondern auch die Bildung von Biomasse beeinflussen. Vergangene und aktuelle Änderungen der SOC-Vorräte wurden mit wiederholten, regionalen Bodeninventuren erfasst, während zukünftige Änderungen der SOC-Vorräte mithilfe von Modellen geschätzt werden müssen.

Wiederholte nationale Bodeninventuren lieferten Hinweise sowohl auf rückläufige SOC-Vorräte, z.B. in Finnland (HEIKKINEN et al. 2013) als auch steigende SOC-Vorräte, z.B. in Schweden (POEPLAU et al. 2015). In Deutschland sind für Ackerbauflächen im Bundesland Niedersachsen keine signifikanten Veränderungen für den Zeitraum 1997 bis 2010 festgestellt worden (HÖPER & MESENBURG 2012) aber in Bayern nahmen die SOC-Gehalte für Ackerflächen zwischen 1986 und 2016 ab (WIESMEIER & BURMEISTER 2022). Eine Prognose der Humusentwicklung in landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns erbrachte Hinweise auf beträchtliche SOC-Verluste für das 21. Jahrhundert (WIESMEIER et al., 2016).

Die Erhöhung der SOC-Vorräte wird derzeit oft als CO₂-Senke mit dem Potenzial, relevante Mengen CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen, diskutiert. Diese Humusanreicherung wird auch als negative Emissionstechnologie bezeichnet. Da verschiedene Bewirtschaftungsmethoden die SOC-Vorräte erhöhen können, sind Strategien sowohl zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs als auch zu seinem verminderten Abbau zu entwickeln. Diese veränderten Managementmethoden müssen allerdings langfristig angewandt werden, um den erhöhten Kohlenstoffgehalt im Humus aufrecht zu erhalten. Der Aufbau von SOC wird jedoch wiederum durch die globale Erwärmung beeinflusst.

Maßnahmen zum Humusaufbau

Unter langfristig konstanten Umweltbedingungen nähern sich die SOC-Vorräte einem dynamischen Gleichgewicht aus Eintrag und Abbau organischer Substanz an. Für den Aufbau von SOC muss die Bodenbewirtschaftung daher so verändert werden, dass entweder die Speicherung von Kohlenstoff im Boden durch verbesserte Landnutzungs-/Bewirtschaftungspraktiken erhöht und/oder der Abbau von Bodenkohlenstoff verringert wird. Wichtig ist dabei, Zielkonflikte mit anderen Bodenfunktionen und Ökosystemdienstleistungen zu vermeiden oder zumindest zu minimieren. So sollte die Biomasseproduktion nicht wesentlich verringert sein oder die Lachgasemission nicht zunehmen.

Da die Art der Landnutzung weitgehend den Kohlenstoffgehalt der Böden steuert, können Landnutzungsänderungen erfolgreiche Strategien zur Anreicherung von Kohlenstoff in Mineralböden sein. Eine Landnutzungsänderung von intensiv bewirtschafteten Landnutzungssystemen wie Ackerland zu extensiv bewirtschafteten Landnutzungen (Grünland, Wald) führt in der Regel zu einem langfristigen Anstieg der SOC-Vorräte (GUO & GIFFORD 2002). Die Umwandlung von Ackerland in Dauergrünland ist dafür ein besonders effizienter Weg. Die Umwandlung von Ackerland in Wald führt dagegen in der Regel zu einer geringeren SOC-Bindung als die Umwandlung in Grünland, insbesondere in mittleren Breiten, ist aber auch sehr vom Klima und den Boden-Bedingungen abhängig (Kap. 2.2.1).

Für Ackerböden stehen verschiedene SOC-steigernde Bewirtschaftungsmethoden zur Verfügung. In diesem Zusammenhang ist die Gestaltung der Fruchtfolge entscheidend, da vielfältige Fruchtfolgen humusfördernd sind (WEST & POST 2002). Insbesondere führt die Integration von Leguminosen, Klee, Zwischenfrüchten, Untersaaten sowie tiefwurzelnden und mehrjährigen Kulturpflanzen zu einem Aufbau von SOC. Mehr Ernterückstände auf den Feldern zu belassen, ist eine weitere Strategie zur Erhöhung des C-Eintrags in landwirtschaftliche Böden. Insbesondere die Ernterückstände auf Äckern wie Stoppeln, Rübenblätter und Stroh oder deren Rückführung über organische Düngemittel (Gülle, Mist, Kompost oder Gärreste) sind ein effizienter Weg zur Erhöhung der SOC-Vorräte. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass z.B. externe organische Dünger nicht zu insgesamt mehr Bodenkohlenstoff führen, da dieser Kohlenstoff woanders fehlt.

Eine weitere vielversprechende Maßnahme zur Steigerung der SOC-Vorräte ist die Umwandlung landwirtschaftlich genutzter Flächen zu Agroforstsystemen durch die Integration von Gehölzen (z.B. Streuobstwiesen). Agroforstsysteme erbringen vielfältige Ökosystemleistungen und erhöhen die SOC-Vorräte. Mehrere Übersichtsarbeiten lieferten Belege für einen Aufbau von SOC durch Agroforstsysteme, insbesondere in tropischen und subtropischen Regionen, aber auch in mittleren Breiten (MAYER et al. 2022). Bäume in landwirtschaftlichen Systemen erhöhen den Bodenkohlenstoffgehalt sowohl im direkten Einflussbereich der Bäume als auch oft in den angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen, z.B. durch günstigeres Mikroklima.

Neben ackerbaulichen Maßnahmen stehen auch für Grünlandökosysteme verschiedene Bewirtschaftungsmethoden zur Verfügung, um die SOC-Vorräte

zu erhöhen. Vor allem ein verbessertes Weidemanagement wie eine optimierte Beweidungsintensität und Weidesysteme können die SOC-Vorräte erhöhen (CONANT et al. 2017). Insbesondere in semi-ariden Regionen führt eine reduzierte Beweidungsintensität oder ein räumlicher/zeitlicher Ausschluss der Beweidung zu mehr SOC. In mittleren Breiten beeinflussen z.B. die Schnitthäufigkeit und die Düngung die SOC-Menge (SOUSSANA et al. 2004). Darüber hinaus scheint die Biodiversität von Grünlandgesellschaften positiv mit der SOC-Speicherung korreliert zu sein (LANGE et al., 2015). Ob die Erneuerung der Grasnarbe und tiefwurzelnde und/oder leguminöse Arten die SOC-Menge erhöhen, muss weiter untersucht werden. Darüber hinaus müssen die potentiell erhöhten Lachgas- oder Methanemissionen aus der Viehhaltung verrechnet werden, um den wirklichen Beitrag der SOC-Erhöpfung in Weidesystemen zur Minderung der Treibhausgasemissionen bewerten zu können.

Neben Strategien zur Erhöhung der Kohlenstoffaufnahme in landwirtschaftliche Böden gibt es auch Bewirtschaftungsmethoden, die den Kohlenstoffverlust verringern bzw. die Verweildauer im Boden erhöhen. Tiefere Bodenbearbeitung (Krumenvertiefung) transportiert organische Substanz nach unten, wodurch stabilere organisch-mineralische Verbindungen zunehmen (WIESMEIER et al. 2014). Infolgedessen können so die SOC-Vorräte langfristig erhöht werden, wie es in Ackerböden Mitteleuropas beobachtet wurde. Darüber hinaus kann eine tiefe Bodenbearbeitung verdichtete Unterböden mit Bodenkohlenstoff anreichern (ALCÁNTARA et al. 2016).

Reduzierte Bodenbearbeitung oder Direktsaatssysteme werden weltweit praktiziert, um die Erosion zu verringern und die Bodenstruktur, die Wasserspeicherkapazität und die Bodenfauna durch eine erhöhte Bodenbedeckung und geringere Bodenstörung zu verbessern. Auch soll bei reduzierter Bodenbearbeitung der physikalische Schutz der organischen Substanz verbessert werden. Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass reduzierte Bodenbearbeitung nicht zu mehr Bodenkohlenstoff führt, sondern lediglich zu einer vertikalen Umverteilung von Bodenkohlenstoff (LUO et al. 2010). Bei reduzierter Bodenbearbeitung sind die SOC-Vorräte im obersten Bereich des Bodens (0–10 cm) oft erhöht, darunter allerdings verringert, da die Einarbeitung organischer Substanz in dieser Tiefe reduziert ist (Abb. 2.2.5-4).

Das Einarbeiten feinkörniger Materialien ist eine weitere Methode, um die Stabilisierung organischer Substanz zu verbessern, insbesondere in sandigen Böden mit einem von Natur aus geringen Bodenkohlen-

stoffgehalt. In Australien werden sandige Oberböden häufig mit Ton angereichert, um ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften zu verbessern, die Bodenerosion und Nährstoffauswaschung zu verringern und den SOC-Vorrat zu erhöhen (SCHAPEL et al. 2018). Neben der Einarbeitung von externem tonreichem Material in Oberböden ist auch das Einmischen von feinkörnigerem Unterbodenmaterial in grobkörnigere Oberböden eine vielversprechende Maßnahme.

Die Einarbeitung nur teilverbrannter organischer Substanz (Bio- oder Pflanzenkohle, siehe Kap. 2.2.4) in Ackerböden kann ebenfalls zum Klimaschutz beitragen, da sie gegenüber Abbau durch Mikroben recht stabil ist (LEHMANN et al., 2006). Der Beitrag zur Zunahme des Bodenkohlenstoffs hängt weitgehend von der Art der Biomasse und den Produktionsbedingungen ab, insbesondere von der Temperatur bei der Teilverbrennung (Pyrolyse).

Humusaufbau: ein potentieller Beitrag zu Klimaschutz und -anpassung

Die Bedeutung der SOC-Vorräte für den Klimaschutz wird deutlich, wenn sie in Bezug zu den CO₂-Emissionen Deutschlands (219 Millionen Tonnen Kohlenstoff als CO₂ im Jahr 2016, UMWELTBUNDESAMT 2018) gesetzt werden. Die Wald- und Agrarökosysteme (WELLBROCK et al. 2017) speichern zusammen so viel SOC wie bei dem derzeitigen Emissionsniveau in 23 Jahren als CO₂ emittiert wird. Die Zahlen verdeutlichen unsere Verantwortung, diese SOC-Vorräte durch eine nachhaltige Nutzung zu sichern und, wo irgend möglich, auszuweiten (FLESSA et al. 2019). Besonderes Augenmerk muss auf die Stickstoffdüngung gelegt werden, um die Emissionen von Lachgas (N₂O) möglichst niedrig zu halten, denn die Masseneinheit N₂O ist fast 300-mal treibhausgaswirksamer als die Masseneinheit CO₂.

Ein standortoptimiertes Humusmanagement ist zentraler Bestandteil einer nährstoff- und ressourceneffizienten Landwirtschaft, die die Bodenfruchtbarkeit langfristig sichert und umwelt- sowie klimabelastende Stoffausträge minimiert. Für den Erhalt des Humus und seiner positiven Wirkungen ist der regelmäßige Eintrag von organischer Substanz, wie Pflanzenresten oder organischen Düngern, erforderlich. Humusaufbau erfordert Ausdauer und langfristige Maßnahmen, da er in der Regel nur langsam über viele Jahre und Jahrzehnte erfolgen kann.

Entscheidend ist hierbei, die Produktivität des Standorts gezielt auch für den Humuserhalt einzusetzen und die positiven Rückkopplungen auf die Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit zu optimieren (FLESSA et al. 2019). Humusaufbau steht in Konkurrenz

zu der energetischen und stofflichen Verwertung von Ernteresten und organischen Düngern, z.B. bei der Biogasproduktion. Die Optimierung der Klimaschutzleistung durch mehr SOC mit konkurrierenden Nutzungsoptionen muss auf der Basis des langfristigen Erhalts der Bodenfruchtbarkeit erfolgen und sie darf daher den Humusaufbau nicht vernachlässigen (KOPITKE et al. 2022). Für alle Verwertungslinien gilt die Anforderung, dass Nährstoffe in den Ernteresten und organischen Düngern möglichst effizient und verlustarm in der Nährstoffversorgung der landwirtschaftlichen Kulturen wiederverwertet werden (FLESSA et al. 2019)

Schlussfolgerungen & Ausblick

Mit einer Reihe traditioneller und neuer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungspraktiken kann der Kohlenstoffgehalt landwirtschaftlich genutzter Böden erhalten bzw. erhöht werden. Die wichtigsten Maßnahmen sind dabei:

- Verringerte Verluste an Bodenkohlenstoff durch Vermeidung des Umbruchs von Dauergrünland in Äcker und von Überweidung, keine Verbrennung von Ernterückständen
- Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehaltes durch verbesserte Fruchtfolgen, Anbau von Zwischenfrüchten, Nutzung von Untersaaten, Mischkulturen, tiefwurzelnde Pflanzen und mehrjährige Energiepflanzen,

Bodentiefe (cm)

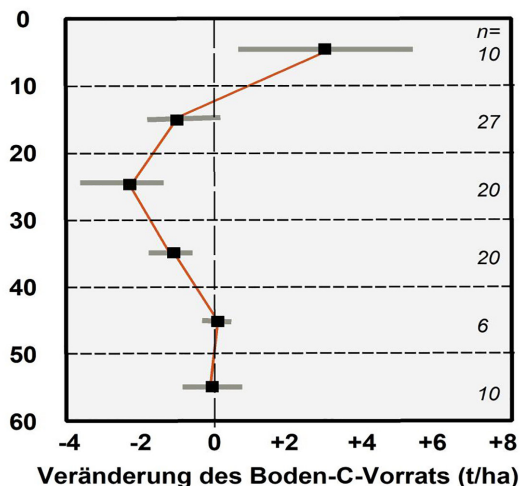


Abb. 2.2.5-4: Einfluss der Bodenbearbeitung auf die SOC-Speicherung in verschiedenen Bodentiefen. Mittlere Differenz des SOC-Vorrats im Boden (t C/ha) unter konventioneller SOC-Bearbeitung im Vergleich der Kultur (Null-Linie) ohne Bodenbearbeitung (Direktsaat). Horizontale Balken zeigen die 95%-Konfidenzintervalle, die Anzahl der Beobachtungen (n) ist rechts angegeben (nach SINGH et al. 2018)

verstärkte Belassung von Ernterückständen, Umstellung zu Ökolandbau, integriertes Nährstoffmanagement, Einarbeiten von Ton in sandige Böden, Umwandlung von Acker- in Dauergrünland und Ausweitung der Agroforstwirtschaft (vgl. Kap. 2.1.1).

Die Wirksamkeit der oben genannten Maßnahmen ist sehr unterschiedlich und die tatsächliche Zunahme des Bodenkohlenstoffs ist von Faktoren wie Bodentyp, Bodenart, Klima, Topographie und dem anfänglichen Kohlenstoffgehalt im Boden abhängig. Oft bedarf es weiterer Forschung, um über Optimierungen der humusaufbauenden Verfahren eine »regenerative Landwirtschaft« zu erreichen, die dann stärker zum Klimaschutz beitragen kann.

Literatur

- ALCANTARA, V., A. DON, R. WELL & R. NIEDER (2016): Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global Change Biology* 22(8), 2939-2956.
- BRECKLE, S.-W. & M. D. RAFIQPOOR (2019): *Vegetation und Klima*. Springer Spektrum, 484 S.
- CONANT, R. T., C. E. P. CERRI, B. B. OSBORNE & K. PAUSTIAN (2017): Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications* 27(2), 662-668.
- FLESSA, H., A. DON, A. JACOBS et al. (2019): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. *Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung*. (ed.): BMEL/Bonn; Thünen-Institut, 48pp.
- GUO, L. B. & R. M. GIFFORD (2002): Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8(4), 345-360.
- HEIKKINEN, J., E. KETOJA, V. NUUTINEN & K. REGINA (2013): Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974-2009. *Global Change Biol.* 19: 1456-1469.
- HÖPER, H. & H. MEESENBURG (2012): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. *Landesamt f. Bergbau, Energie und Geologie. GeoBerichte* 23: 254 S.
- KOPITZKE, P. M., A. A. BERGE, Y. CARILLO, T. R. CAVAGNARO et al. (2022): Ensuring planetary survival: the centrality of organic carbon in balancing the multifunctional nature of soils. *Crit. Rev. Environm. Sci. Technol.* 52: 4308-4324.
- LANGÉ, M., N. EISENHAUER, C. A. SIERRA, H. BESSLER et al. (2015): Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications* 6(1), 6707.
- LEHMANN, J., J. GAUNT & M. RONDON (2006) Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(2), 403-427.
- LUO, Z., E. WANG & O. J. SUN (2010): Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139(1), 224-231.
- MAYER, S., M. WIESMEIER, E. SAKAMOTO, R. HÜBNER et al. (2022): Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 323, 107689.
- POEPLAU, C., T. KATTERER, M. A. BOLINDER et al. (2015): Low stabilization of aboveground crop residue carbon in sandy soils of Swedish long-term experiments. *Geoderma* 237: 246-255.
- ROSSKOPF, N., H. FELL & J. ZEITZ (2015): Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks, *Catena* 133: 157-170.
- SCHAPEL, A., P. MARSCHNER & J. CHURCHMAN (2018): Clay amount and distribution influence organic carbon content in sand with subsoil clay addition. *Soil and Tillage Research* 184, 253-260.
- SINGH, P. B., R. DETIA, M. WIESMEIER & A. KUNHIKRISHNAN (2018): Agricultural management practices and soil organic carbon storage. In: *Soil Carbon Storage*, Acad. Press, p.207-244 DOI: [org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00007.X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00007.X).
- SMITH, P., C. A. DAVIES, S. OGLE et al. (2012): Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: current capability and future vision. *Glob. Change Biol.* 18(7): 2089-2101.
- SOUSSANA, J.-F., P. LOÏSEAU, N. VUICHARD, E. CESCCHIA et al. (2004): Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20(2), 219-230.
- WELLBROCK, N., E. GRÜNEBERG, T. RIEDEL & H. POLLEY (2017): Carbon stocks in tree biomass and soils of German forests. *Central European Forestry Journal* 63: 105-112.
- WEST, T. O. & W. M. POST (2002): Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930-1946.
- WIESMEIER, M., P. SCHAD, M. VON LÜTZOW, C. POEPLAU et al. (2014): Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 185, 208-220.
- WIESMEIER, M., C. POEPLAU, C. A. SIERRA, H. MAIER et al. (2016): Projected loss of soil organic carbon in temperate agricultural soils in the 21st century: effects of climate change and carbon input trends. *Scientific Reports* 6(1), 32525.
- WIESMEIER, M. & J. BURMEISTER (2022): 35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung, Band 4: Humus. *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Schriftenreihe* 2/2022, 88 S.

Kontakt:

Prof. i. R. Dr. Siegmar-W. Breckle

Ökologie, Bielefeld

sbreckle@gmx.de

Prof. Dr. Martin Wiesmeier

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Martin.Wiesmeier@lfl.bayern.de

BRECKLE, S.-W. & M. WIESMEIER (2023): Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). *Warnsignal Klima*. S. 143-148. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.20