Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

Bundesinformationszentrum
Landwirtschaft

Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz

Bild: Th. Vorderbrügge

2 Vorsorge zur Erhaltung des standorttypischen Humusgehaltes

Autorinnen und Autoren:
Thomas Vorderbrügge, Michaela Busch, Robert Brandhuber, Jan Bug, Stefan Schrader, Thomas Weyer

Einleitung

Die Erhaltung der organischen Substanz (Humus) ist ein Grundsatz der Guten fachlichen Praxis (GfP) gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG). Neben der großen Bedeutung für Bodeneigenschaften und -funktionen gewinnt Humus im Boden zunehmend an Bedeutung im Rahmen der Diskussion zum Klimawandel und zu den Folgen des Anbaus von Energiepflanzen. Verluste an Humus durch Erosion, vermehrter Anbau humuszehrender Kulturen, verstärkte Abfuhr von Ernteresten, z. B. zur energetischen Nutzung, Nutzungswandel (Grünland zu Acker), Eingriffe in den Grundwasserhaushalt oder die Melioration von Mooren (s. Abb. 2.1) können zu einer dauerhaften Beeinträchtigung der Bodenfunktionen sowie der biologischen Vielfalt im Boden führen. Um die Bodenfunktionen und die biologische Vielfalt zu sichern, müssen deshalb Verluste an Humus im Boden vermieden werden.

Humus – Definition, Funktionen und Wirkung

Der Begriff „Humus“ bezieht sich auf die Gesamtheit aller im und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Substanzen und deren Umwandlungsprodukte sowie durch anthropogene Tätigkeit eingebrachten z. T. synthetischen organischen Stoff (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010; AD-HOC-AG BODEN, 2005). Humus ist also gleichbedeutend mit der unbelebten organischen Substanz. Humus umfasst auch Stoffgruppen, die keine Gewebestrukturen mehr aufweisen (LIEBEROTH, 1982). Lebende Pflanzenwurzeln, Bodenorganismen (Edaphon) und Kohle gehören gemäß Definition nicht zum Humus (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Bei der Verwendung des Begriffes „Humus“ stehen Funktionalität und Wirkung der organischen Stoffe im Vordergrund. Da bei der Humusbestimmung der Anteil der lebenden organischen Substanz methodisch nicht ohne weiteres von der toten organischen Substanz abgetrennt werden kann, werden die Begriffe „Humus“und „organische Substanz“ häufig synonym gebraucht.

Abb. 2.1: Reste von Niedermoor über Feinsedimenten aus Schluff und Ton über Sand und Kies nach Entwässerung und Torfabbau seit Ende des 18. Jahrhunderts (Donaumoos) (Foto: R. Brandhuber, LfL)

Die organische Substanz im weiteren Sinn besteht zu ca. 85 % aus Humus. Davon entfallen ca. 60 bis 90 % auf den sogenannten Dauerhumus, der vergleichsweise langsam um- und abgebaut wird. Er ist das Umsetzungsprodukt der Tätigkeit von Bodentieren und Mikroorganismen. Weitere 10 bis 40 % sind Nährhumus. Dies sind schnell abbaubare Bestandteile, wie Wurzeln abgeernteter Kulturen, eingearbeitete Ernterückstände, Gründüngung und wirtschaftseigener Dünger. Lebende Pflanzenwurzeln sowie Bodentiere und Bodenmikroorganismen haben einen Anteil von ca. 15 % an der organischen Substanz (LfL, 2011). Insgesamt handelt es sich hierbei um Werte, die in Abhängigkeit vom Boden, vom Standort und von der Bewirtschaftung einer starken Streuung unterliegen. Der Humus spielt eine wichtige Rolle für eine Vielzahl der Bodenfunktionen (HANGE & FÜHR, 1992; HÜTTL ET AL., 2007; SAUERBECK, 1984, 1992, 2001; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010; WESSOLEK ET AL., 2008; WHALEN & SAMPEDRO, 2010).

Große Bedeutung hat er als:

- Nährstoff- und Energiequelle für Mikroorganismen, Bodentiere und Pflanzen,
- Lebensraum für Mikroorganismen und Bodentiere,
- Grundlage der Filter- und Pufferfunktion, insb. für den Grundwasserschutz,
- Faktor des Ertragspotenzials eines Bodens.

Er ist beteiligt an einer Vielzahl von physikochemischen und physikalischen Austausch- und Speicherprozessen im Boden wie:

- Gasaustausch,
- Wasserrückhaltevermögen (vor allem bei sandigen und tonigen Substraten),

- Wärmespeicherung, Minderung starker Temperaturschwankungen im Oberboden,
- Stabilisierung des Bodengefüges,
- Erhöhung der Aggregatstabilität durch die Bildung von Ton-Humuskomplexen aufgrund biologischer Aktivität,
- Reduzierung der Gefahr einer Verschlämmung,
- Minderung von Oberflächenabfluss und Bodenerosion,
- je nach den sonstigen Standortbedingungen Nährstoffbindung, -freisetzung oder -verlust, sofern die Nutzpflanzen die Nährstoffe nicht aufnehmen,
- Schadstoffbindung sowie Ein-, Um- und Abbau von Schadstoffen,
- Pufferung der Bodenversauerung,
- kurzfristige Senke und Quelle für Spurengase und Kohlenstoff aus der Atmosphäre,
- Rückhalt von Pflanzenschutzmitteln gegenüber dem Eintrag ins Grundwasser,
- Minderung der Krankheitsanfälligkeit der Kulturpflanzen (anti-phytopatogenes Potenzial),
- ... [diese Aufzählung ist nicht abschließend].

Aufgrund seiner herausragenden Bedeutung für die ökologischen Bodenfunktionen ist die Erhaltung des Humus aus Sicht des vorsorgenden Bodenschutzes von besonderer Bedeutung.

Humusgehalte in Böden

Der Humusgehalt beschreibt den Anteil der toten organischen Substanz eines Bodens in Prozent. Er wird zumeist differenziert für verschiedene Bodentiefen ausgewiesen. Die Höhe des Humusgehaltes wird vor allem bestimmt durch Klima (Niederschlag, Temperaturverlauf, klimatische Wasserbilanz), Lage im Relief (Kuppe oder Senke, Höhe über NN, Exposition), Historie der Bewirtschaftung, biologische Aktivität, Vegetation, Wasserhaushalt, Bodenart, Substrat der Bodenbildung und Nutzung.

Bei der Abschätzung (standort-)typischer Gehalte ist zunächst vor allem zu beachten, ob es sich um mineralische Böden (z. B. Pararendzinen oder Parabraunerden aus Löss, Kolluvien), organogene Böden (z. B. Niedermoore), stark grundnässe- oder stauwasser-geprägte Böden oder aber um Böden in einer Aue handelt. Selbst bei gleichen Bodentypen können sich die Humusgehalte (bspw. von Schwarzerden unterschiedlicher Bodenlandschaften) deutlich unterscheiden.

Profile aus Löss

Abb. 2.2: Schwarzerde aus Löss humos bis in den Unterboden (60 cm), kolluvial überprägt;

Abb. 2.3: Pararendzina aus Löss (Verlust des Oberbodens und damit des Humus durch Erosion);

Abb. 2.4: tiefgründiges Kolluvium, humusreich bis in den tiefen Unterboden (> 130 cm), am Hangfuß.

(Fotos: Th. Vorderbrügge)

Insbesondere in der landwirtschaftlichen Fachliteratur finden sich allerdings häufig nur Angaben zu den Humusgehalten der Oberböden, der bearbeiteten Krume.

Aus Sicht des Bodenschutzes ist aber unbedingt zu beachten, dass die Formulierung in § 17 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG 1998, § 17 (2) Nr. 7) ausdrücklich den Humusgehalt des Bodens und nicht nur des Oberbodens anführt. Im Sinne des Gesetzes ist somit auch der Humusgehalt des Unterbodens (Kolluvien, Auenböden, tiefgründig humos (s. Abb. 2.2–2.4) und damit eigentlich der Humusvorrat zu erhalten. Dies gilt z. B. bei der Frage der Melioration von organogenen Substraten (Trockenlegung von Niedermooren etc. (SRU, 2012)). Aus Sicht des Vorsorgenden Bodenschutzes und der Beratung, wäre es aber grundsätzlich hilfreich, wenn einige Formulierungen § 17 (2) Nr. 7 präzisiert würden. Erste Vorschläge hierzu liegen vor (VORDERBRÜGGE, 2022).

Die Bedeutung des Humus für Bodenfunktionen ist für verschiedene Bodentiefen unterschiedlich. So fördert ein hoher Humusgehalt in der oberen Krume (Grenzschicht Boden – Atmosphäre) die Aggregatstabilität, das Infiltrationsvermögen und damit den Schutz vor Wassererosion. Der Erhalt von Humusvorräten in tieferen Bodenhorizonten dient dagegen vorrangig dem Klimaschutz.

Die Bestimmung des Humusgehaltes einer Bodenprobe erfolgt im Labor durch Messung des Gesamtkohlenstoffs und des in Karbonaten gebundenen Kohlenstoffs. Die Differenz ergibt den organisch gebundenen Kohlenstoff (C_{org}), das Ergebnis wird in der Regel in Prozent angegeben. Durch Multiplikation mit dem Faktor 1,72 (bzw. 2 bei Torfen und Auflagehumus, nach KA 5 der Ad-hoc-AG Boden (2005)) kann anschließend der Humusgehalt errechnet werden.

Bei der Interpretation von Ergebnissen ist darauf zu achten, ob der Gehalt an organischem Kohlenstoff (% C_{org}) oder der daraus errechnete Humusgehalt angegeben ist. Aus dem Gehalt an Humus oder C_{org} kann mit Hilfe der Trockenrohdichte des Bodens (ggf. unter Berücksichtigung des Steinanteils) der Vorrat an Humus bzw. C_{org} berechnet werden, also die absolute Masse in einem definierten Bodenvolumen, z. B. 9 kg Humus pro m^2 bis zu einer bestimmten Tiefe.

Unterstellt man bspw. für eine 30 cm mächtige Krume eine Rohdichte von 1,5 g/cm^3 Boden und einen Humusgehalt von 2 %, dann beläuft sich der Humusvorrat im Oberboden auf 90 t/ha bzw. 9 kg/m^2. Ein tiefgründiges Kolluvium mit 2 % Humus in einer 30 cm mächtigen Ackerkrume sowie 1 % Humus bis in 1 m Tiefe und einer durchschnittlichen Rohdichte von 1,5 g/cm^3 Boden speichert ca. 200 t Humus je ha (20 kg/m^2). In Abhängigkeit von Humusgehalt und Rohdichte ergeben sich somit rein rechnerisch Werte zwischen 50 und 250 t Humus/ha ackerbaulich genutzter Fläche.

Die Unterscheidung zwischen Gehalt und Vorrat ist insbesondere beim Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme zu beachten, kommt es doch beim Wechsel von wendender zu nichtwendender Bodenbearbeitung häufig zu Konzentrationsänderungen innerhalb der vormaligen Krume, ohne dass dies auch zu Vorratsänderungen bzw. einer Humuszunahme führen muss (APPEL, 2011; RÖßLER & NOWAK, 2011). Eine korrekte Interpretation der Wirkung von unterschiedlichen Systemen der Bodenbearbeitung auf die Humusgehalte und -vorräte im Oberboden setzt deshalb eine gleichzeitige Ermittlung der Rohdichte voraus (JACOBS & KOCH, 2012).

Die potenziell hohen Vorräte von 50 bis 200 t/ha Humus bedeuten aber auch, dass für Bilanzierungen sowie die Prognose von Zu- oder Abnahme des Humus infolge eines Bewirtschaftungswandels sowohl der Humusvorrat als auch die Rohdichte und ggf. der Steingehalt sehr genau bestimmt werden müssen. Führen doch geringe Abweichungen von 0,1 % in der Bestimmung beim Humus bzw. 0,1 g in der Bestimmung der Rohdichte für eine Ungenauigkeit von mehreren t/ha. Angesichts der Heterogenität vieler Standorte reicht bei einer üblichen Flächenbeprobung eine analytische und mathematische Genauigkeit nicht aus, um z. B. eine Änderungstendenz zu erfassen. Hier könnte man wie folgt verfahren: ein repräsentatives Teilstück von maximal 5 x 5 m einmessen sowie beproben und auf diesem später die Beprobung auch immer wiederholen.

In den letzten Jahren wurde in Deutschland eine Vielzahl von Auswertungen zur Ermittlung der Humusgehalte in den Oberböden ackerbaulich genutzter Standorte durchgeführt. Diese Auswertungen erfolgten bundesweit, länderübergreifend oder aber für einzelne Bundesländer. Im Rahmen ihrer bundesweiten Auswertung von ca. 22.000 Daten fanden z. B. DÜWEL ET AL., 2007, dass die Humusgehalte in Abhängigkeit von Klima, Nutzung und Boden für ackerbaulich genutzte Standorte i. d. R. zwischen 1 und 4 % liegen.

Eine länderübergreifende Auswertung von mehr als 40.000 Proben der Südzucker AG in den süddeutschen Zuckerrübenanbaugebieten ergab mittlere Gehalte (Median) von 2,04 %, wobei die Gehalte in Abhängigkeit von Bundesland, Höhenlage und Bewirtschaftung (viehhaltend, viehlos) deutlich differieren können. Gemäß den Auswertungen ergab sich die Bodenart als ein bedeutender Einflussfaktor auf die Humusgehalte der Mineralböden. So waren die Humusgehalte im Mittel auf schweren Böden (Tone und Lehme) mit 2,42 % deutlich höher als auf leichten Böden (Sande) mit 1,83 %. Die Höhenlage hatte im Bereich bis 400 m nur einen sehr geringen Einfluss auf die Bodenhumusgehalte (Mittelwerte zwischen 2,08 und 2,11 %), im Höhenlagenbereich 400 bis 500 m war jedoch im Mittel ein signifikanter Anstieg der Bodenhumusgehalte auf 2,28 % und auf 2,39 % im Höhenlagenbereich oberhalb von 500 m festzustellen (EBERTSEDER ET AL., 2010).

Mit den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) (JACOBS ET AL. 2018, POEPLAU ET AL. 2020) steht eine aktuelle bundesweite Auswertung zu Humusgehalten- und Humusvorräten der landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland zur Verfügung. Im Prinzip bestätigt sie die bisherigen Auswertungen. Die Frage, ob sich die Humusgehalte im Lauf der Jahre, vor allem klimatisch bedingt, in Deutschland ändern, soll mit der erneuten Beprobung der

Abb. 2.5: Unterschiedliche Humusgehalte innerhalb eines Schlages (Foto: W. Bauer, Agroluftbild)

BZE-Flächen in den Jahren 2023-2027 festgestellt werden (POEPLAU ET AL., 2022).

Auch für einzelne Bundesländer wie Baden-Württemberg (NEUFELDT, 2005), Bayern (CAPRIEL & SEIFFERT, 2009; CAPRIEL, 2010), Hessen (HEYN, 2011), Niedersachsen (FORTMANN ET AL., 2012; HÖPER & SCHÄFER, 2012), Nordrhein-Westfalen (PREGER ET AL., 2006; KÖNIG, 2009), Rheinland-Pfalz (SAUER & WIESNER, 2021) oder Sachsen-Anhalt (GRABE ET AL., 2003) liegen umfangreiche Auswertungen vor.

Alle Auswertungen sind gekennzeichnet durch eine breite Streuung der Gehalte (zwischen 1 und 4 %) in Abhängigkeit von Klima, Bewirtschaftung und Boden. Weiterhin liegen die Gehalte im Schnitt bei ca. 2 %, i. d. R. haben dabei die sandigen Oberböden etwas geringere Gehalte als die lehmigen bzw. tonigen Oberböden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Gehalte an Humus in den Oberböden unter landwirtschaftlicher Ackerbaunutzung i. d. R. zwischen 1,5 und 3 % liegen, abhängig von den jeweiligen standort- und nutzungsbedingten Faktoren. Ein standorttypischer Humusgehalt lässt sich somit nur bedingt bzw. mit großem Aufwand ableiten. Dabei ist zu beachten, dass sich die Gehalte bereits innerhalb eines Schlages mit unterschiedlichen Böden (Pararendzina, Kolluvium) durchaus in einer Größenordnung von 1 bis 5 % unterscheiden können (WERNER & BACHINGER, 2009). Damit könnte die gesamte Spannweite der durchschnittlichen bundesweiten Humusgehalte bereits auf einem Schlag ermittelt werden.

Bei Grünlandnutzung liegen die Humusgehalte deutlich höher, organogene Substrate (Moore) haben Gehalte von mehr als 30 %.

„Standorttypischer“ Humusgehalt

Die im vorigen Kapitel angeführten Auswertungen zeigen, dass sich ein eindeutiger und allgemeingültiger Zusammenhang zwischen standortkundlichen Parametern und Humusgehalt aus den publizierten Daten nicht zwingend nachweisen lässt. Tendenzen (Einfluss Substrat (Geologie und Bodenart), Klima, Nutzung, Bewirtschaftung, Düngung, Historie etc.) lassen sich für einzelne Datenkollektive durchaus ableiten. Diese gelten aber zunächst nur für die einzelnen Datenkollektive. So wird von einigen Untersuchungen ein (positiver, linearer) Zusammenhang zwischen Tongehalt (bzw. Feinanteil, d. h. die Summe aus Ton und Feinschluff, HOYER ET AL., 2007; KÖRSCHENS & SCHULZ, 1999) und Humus aufgezeigt, es gibt aber auch die gegenteilige Aussage – ein Zusammenhang sei nicht erkennbar. Offensichtlich

Abb. 2.6: Anschwemmung der leichteren Humusbestandteile in Fahrspuren und im Vorgewende nach Starkregen (Foto: R. Brandhuber, LfL)

überlagern Einflüsse der Bewirtschaftung und von Standorteigenschaften, die bei den Monitoringprogrammen nicht miterfasst werden, das Herausarbeiten eindeutiger Zusammenhänge.

Umso wichtiger ist der Erhalt der Dauerfeldversuche (BARKUSKY & JOSCHKO, 2020), die kontinuierliche Auswertung der Ergebnisse der langjährigen Bodendauerbeobachtungsprogramme (HÖPER, 2021) sowie eine länderübergreifende Auswertung einzelner Datenkollektive (MARX & GAUL, 2021).

Bundes- oder landesweit bzw. für einen Einzelschlag gültige standorttypische Humusgehalte gibt es eigentlich nicht, bzw. wären nur mit hohem analytischen Aufwand zu ermitteln.

Gewisse Tendenzen eines Zusammenhanges zwischen Substrat, Bodenart, Nutzung, Höhenlage, Wasserhaushalt und Humusgehalt sind zwar zu erkennen, aber im Prinzip ist z. Zt. nur ein „bewirtschaftungsdifferenzierter“ Humusgehalt vorstellbar. Dieser könnte von der landwirtschaftlichen Fachberatung, z. B. im Rahmen der „Besonderen Ernteermittlung“ (BEE), festgestellt und um Strategien zur Erhaltung ergänzt werden. Eine weitere Grundlage für eine orientierende Bewertung der Humusgehalte könnte der von WESSOLEK ET AL. (2008) vorgeschlagene Ansatz zur Schätzung der Humusgehalte in Abhängigkeit von Substrat, Boden und Klima sein.

Grundsätzlich bleibt aber immer das Problem der Streuung der Humusgehalte innerhalb eines Schlages, denn diese ist absolut häufig größer als lokale, regionale oder überregionale Durchschnittswerte (APPEL ET AL., 2008; KÖRSCHENS & SPITZL, 1978; HIEROLD ET AL., 2012; HÜLSBERGEN & DIEPENBROCK, 2000).

Fazit: Es ist derzeit schwierig, einheitliche bundesweite, also für den Wirkungsbereich des BBodSchG gültige, standortspezifische Humusgehalte von Ober- und Unterböden zu benennen. Ein erster Vorschlag für die Oberbodengehalte liegt vor (DREXLER ET AL., 2020). Der Vorschlag wurde aber bisher, soweit bekannt, in den Gremien des Bodenschutzes (BOVA und LABO)[1] noch nicht diskutiert. Wenn regional ausreichend Daten zu Verfügung stehen, können ggf. relativ breite Spannen von standortspezifischen Humusgehalten im Oberboden, etwa in Abhängigkeit von der Bodenart, angegeben werden, wie dies für Bayern erfolgte.

1 LABO: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz;
BOVA: Ständiger Ausschuss „Vorsorgender Bodenschutz“

Ursachen für den Verlust an organischer Substanz

Die Ursachen für den Verlust an Humus sind vielfältig. Die Verluste sind durchaus zum einen lokal begrenzt, z. B. die Verlagerung von humosem Bodenmaterial innerhalb eines Schlages durch Bodenbearbeitung und/ oder Erosion. So finden sich i. d. R. bereits auf nur schwach hängigen Ackerschlägen sowohl Bereiche mit hohen als auch mit geringen Humusgehalten. Besonders im Frühjahr zum Zeitpunkt der Abtrocknung sieht man häufig stark unterschiedlich gefärbte Bereiche auf einem Schlag: einerseits die hellen Bereiche an den Hangschultern, in Lösslandschaften befinden sich dort die sogenannten Pararendzinen, andererseits die dunkleren Bereiche am Unterhang oder im Bereich von Tiefenlinien (Kolluvien), in denen das humose Material der Krume abgelagert wurde (s. Abb. 2.5).

Tatsächliche Humus- bzw. Bodenverluste vom Ackerschlag erfolgen durch Wind- oder Wassererosion. Insbesondere die Winderosion kann vor allem auf sandigen Böden zu hohen Humusverlusten führen, sind doch gerade die Humusteilchen so leicht, dass sie mit dem Wind über große Strecken verlagert werden können. Zudem trennt der Wind Humus und mineralische Bodenteilchen. Dadurch bleiben häufig die reinen Sandpartikel zurück. Dies führt zu einer Verringerung des Wasserspeichervermögens der sandigen Oberböden.

Bodenabtrag durch Wassererosion ist eine weitere Ursache für unwiederbringliche Humusverluste. Bei Eingriffen in den Wasserhaushalt eines Standortes wie Drainage oder Grundwasserabsenkung, bei Meliorationsmaßnahmen wie Tiefumbruch, Tiefenlockerung oder Meliorationskalkung, kommt

Tab. 2.1: Ursachen fur Humusverluste von ackerbaulich genutzten Standorten und Maßnahmen zur Minderung der Verluste

Ursache	Indikator	Maßnahmen
Erosion	Verlagerung durch Winderosion	Anlage von Hecken siehe Kapitel 4.1 S. 79 ff.
	Verlagerung durch Wassererosion	Präventiv: Bodenbedeckung/Rauhigkeit erhöhen; Bodenbearbeitung reduzieren siehe Kapitel 4.2 S. 92 ff.
	Verlagerung bei Überflutung (Auenböden)	Bodenbedeckung sicherstellen; Verzicht auf Grünlandumbruch
Entwässerung	Luftzufuhr in ehemals durchnässte Bodentiefen; dadurch erhöhte biologische Aktivität und entsprechender Abbau organischer Substanz	Verzicht auf Neuanlage von Drainagen; in Projektgebieten Wiedervernässung ggf. Anbau von Paludikulturen*; Verzicht auf Grünlandumbruch; Umwandlung von Acker in Grünland
Grünlandumbruch	Nutzungswandel	Zwischenfruchtanbau; Wiedereinsaat von Grünland; Kleegras; Stroh auf dem Feld belassen u. v. m.
Bewirtschaftungsänderung (z. B. viehhaltend zu viehlos)	Verringerung der Zufuhr an organischer Substanz	Fruchtfolge mit ausreichend Zufuhr organischer Substanz; Zwischenfruchtanbau; Kleegras; Reduzierung der Bodenbearbeitung
	Fruchtfolge mit hohem Anteil an Hackfrüchten (Marktfrüchte)	Anpassen der Fruchtfolge; Stroh auf dem Feld belassen; Zwischenfrüchte anbauen
Anbau von Energiepflanzen	Abfuhr allen Aufwuchses inklusive Ernteresten (z. B. auch Stroh zur energetischen Verwertung)	Zufuhr „neuer“ Reststoffe/Kompost/Gärrückstände
	Neue Fruchtfolge (40 % Mais); Bilanzdefizit	

* Paludikultur („palus“ – lat. „Sumpf, Morast“) ist die nasse Bewirtschaftung von Mooren. Sie schließt traditionelle Verfahren der Moorbewirtschaftung (Rohrmahd, Streunutzung) ein, beinhaltet aber auch neue Verfahren wie die energetische Verwertung von Moor-Biomasse. Dabei ist der Torferhalt oberstes Ziel. In vielen Fällen kommt es sogar zu Torfneubildung, wie z. B. bei Schilfnutzung, bei der die oberirdische Biomasse abgeschöpft wird und die für die Torfbildung gebrauchte unterirdische Biomasse neuen Torf akkumuliert.

es i. d. R. zu einer Intensivierung der Durchlüftung im Unterboden. Diese ist häufig mit einer Steigerung der biologischen Aktivität und damit einer Intensivierung der Umsetzung der organischen Substanz verbunden. Letzteres führt dann zu Humus- und (!) Nährstoffverlusten insbesondere durch den Abbau des Humusvorrates im Unterboden (GENSIOR ET AL., 2012).

Nährstoffverlusten kann man vor allem durch den Anbau tiefwurzelnder Kulturen, die die Nährstoffe aus dem Unterboden aufnehmen, entgegenwirken, der Humusabbau lässt sich damit aber nicht aufhalten.

Ein Landnutzungswandel, z. B. infolge einer Einstellung der Milchviehhaltung und der damit einhergehenden Umstellung auf Ackerbau, führte und führt zu einer Umnutzung von bisherigen Dauergrünlandflächen. Häufig sind für die künftige Nutzung von reinen Grünlandflächen als Ackerflächen vorab ein Eingriff in den Wasserhaushalt (Grundwasserabsenkung, Drainage) und eine Melioration (Kalkung) notwendig. Zudem entfällt zunehmend die organische Düngung mit Wirtschaftsdünger, da die Viehhaltung aufgegeben wurde. Ein Nutzungswandel ist deshalb i. d. R. mit deutlichen Humusverlusten verbunden. Auch der regelmäßige Wechsel zwischen mehrjährigem Grünland und Acker führt durch den vorausgegangenen Grünlandumbruch zu Humusverlusten.

Der Anbau von Kulturen zur Energiegewinnung, z. B. Mais auf vormaligen Grünlandflächen oder die Abfuhr von Stroh zur Energiegewinnung, kann ebenfalls mit Humusverlusten verbunden sein (KBU, 2006). Der Bedarf an Biomasse für sehr große Biogasanlagen führt zu einem Antransport von Biomasse aus einem weiten Umkreis. Eine gleichmäßige Rückfuhr der Gärreste in die Liefergebiete ist wegen der hohen Transportkosten nicht immer gewährleistet. Die komplette Abfuhr des Aufwuchses ohne adäquate Rückführung organischer Dünger führt deshalb langfristig zu niedrigeren Humusgehalten, insbesondere dann, wenn die Standorte nur der Produktion von Biomasse zur Energiegewinnung dienen (KBU, 2006).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass jede Änderung der Bewirtschaftung in Richtung „weniger Verbleib organischer Substanz im und auf dem Boden“ langfristig zu einem gewissen Absinken des vorher vorhandenen Humusgehaltes führen wird. Dieser Prozess könnte schon bei Aufgabe der Tierhaltung, also mit Wechsel vom Futterbau in eine Marktfrucht-Fruchtfolge, in Gang kommen. Im Rahmen des Strukturwandels sind solche Veränderungen gegeben. Allerdings kann allein daraus kein Konflikt mit der Guten fachlichen Praxis konstruiert werden.

Als Orientierung hat der Gesetzgeber deshalb den Begriff des „standorttypischen Humusgehaltes“ eingeführt, der erhalten

Abb. 2.7: Ausbringung von Gärresten mit Schleppschläuchen (Foto: TI Braunschweig)

werden sollte. Die Probleme bei der Festlegung derartiger Humusgehalte bzw. Gehaltsklassen wurden bereits angesprochen. Es sollte deshalb weiter das Ziel verfolgt werden, auf regionaler Ebene Spannen von Humusgehalten benennen zu können, deren Einhaltung die Erhaltung der Bodenfunktionen sicherstellt.

Eine erste Hilfestellung bei der Beurteilung, ob ein Anbauverfahren dem Humuserhalt dient oder nicht, können Humusbilanzen sein, wie sie z. B. vom VDLUFA für Deutschland angeboten werden. Auch die sensorische Beurteilung des Bodengefüges, wie in Kapitel „Bodenverdichtungen erkennen und beurteilen“ auf Seite 36 beschrieben, kann wertvolle Hinweise auf eine unzureichende Humusversorgung geben.

Die quantitativ gravierendsten Verluste an Humus sind in Deutschland nicht den veränderten Bewirtschaftungsformen auf dem Acker zuzuschreiben, sondern der in der Vergangenheit forcierten Entwässerung organischer Böden (GENSIOR ET AL., 2012). In Tabelle 2.1 auf S. 17 sind wesentliche Ursachen für Humusverluste zusammengestellt und Gegenmaßnahmen angeführt.

Maßnahmen für die Humuserhaltung

Der Gesetzgeber hat durch die Formulierung der Grundsätze der GfP im BBodSchG § 17 (2) Nr. 7 zwei Maßnahmen besonders betont. Einerseits soll durch „eine ausreichende Zufuhr“ an organischer Substanz, andererseits durch die „Reduzierung der Bearbeitungsintensität“ die Humuserhaltung gewährleistet werden. Damit hat der Gesetzgeber die Wege aufgezeigt, die es einem Bewirtschafter mit betriebsinternen Maßnahmen der Fruchtfolgegestaltung und Düngung bzw. der Bodenbearbeitung relativ einfach und mit relativ geringem Aufwand ermöglichen, seiner Vorsorgepflicht nachzukommen.

Im Folgenden werden Möglichkeiten des Ackerbaus zur Gewährleistung einer „ausreichenden Zufuhr organischer Substanz bzw. Reststoffe“ bzw. der „Reduzierung der Bearbeitungsintensität“ auf den Humusgehalt angeführt.

Erhaltung des Humusgehaltes durch ausreichende Zufuhr an organischer Substanz

Viele ackerbauliche Faktoren haben Einfluss auf den Humusgehalt am jeweiligen Standort:

- Die Qualität des Eintrags an organischer Substanz (leicht und schnell umsetzbar oder sehr ligninreich und damit sehr langsam umsetzbar),
- das Landnutzungssystem aus Fruchtfolge (z. B. Anteil an NaWaRo), Düngung und Bodenbearbeitung und schließlich auch
- das Landbausystem (reiner Ackerbau oder Betriebe mit unterschiedlich intensiver Viehhaltung, ökologisch oder konventionell).

Abb. 2.8: Zwischenlagerung von Kompost für die spätere Ausbringung auf dem Feld (Foto: P. Meyer/BLE)

Klima, Relief und Boden sind – mit Ausnahme des pH-Wertes, welcher durch Kalkung im Zuge der Fruchtfolge reguliert werden kann – die natürlichen und unveränderbaren Gegebenheiten eines Standortes.

Die Qualität der zugeführten organischen Substanz, die Intensität der Bodennutzung sowie das Landbausystem liegen allerdings in der Hand des Anbauers. Unbestritten ist der günstige Einfluss des zellulose- und hemizellulosehaltigen Strohs und die Zufuhr hochwertiger Komposte für die Humusbildung (VDLUFA-Standpunkt, 2004) sowie eine Düngung, welche die Zufuhr hochwertiger organischer Dünger mineralisch ergänzt.

So ergaben z. B. Untersuchungen von KASTEN (2002), dass in viehreichen Regionen des Rheinlandes (Kreis Kleve) die Humusgehalte von Ackerflächen zu ca. 40 % in der Größenordnung von 2,1 bis 2,5 % lagen, während in einer vieharmen Kernregion der Köln-Aachener Bucht (Erftkreis und Kreis Neuss) ca. 20 % der untersuchten Standorte im Oberboden weniger als 1,7 % Humus aufwiesen. Dies belegt den besonderen Einfluss der Düngung, da in den viehreichen Regionen überwiegend Wirtschaftsdünger eingesetzt und in der vieharmen Region überwiegend mineralisch gedüngt wird. Auch die Untersuchungen von ALBERT (2011) zeigten, dass in einem 1966 angelegten Versuch durch den Verzicht auf organische Düngung die Humusgehalte im Laufe der Jahre nahezu halbiert wurden und sich erst nach ca. 30 Jahren ein neues Gleichgewicht zwischen Humusab- und -aufbau eingestellt hat.

Im Ackerbau kann man den Humusgehalt prinzipiell durch Feldfutterpflanzen oder durch periodische Grasnutzung fördern, weil diese beiden Bewirtschaftungsformen – von der vermehrten Zufuhr an Pflanzenrückständen abgesehen – mit zeitweiliger Bodenruhe verbunden sind (SAUERBECK, 1992). Für Betriebe, die weder für Feldfutterpflanzen noch für Grünland Verwendung haben, wären entsprechende Fruchtfolgeglieder bzw. Zwischenfrüchte durch die Beratung zu empfehlen.

Hilfe für eine ungefähre Abschätzung der Wirkung einzelner Kulturen auf den Humushaushalt könnten in einer ersten Annäherung die von der VDLUFA publizierten Daten sein (VDLUFA, 2004). Die Methoden der Humusbilanzierung befinden sich z. Zt. aber noch in einer intensiven fachlichen Diskussion.

Erhaltung des Humusgehaltes durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität

Konservierende/nicht wendende Bodenbearbeitung kann zur Steigerung der Humusgehalte in der oberen Krume beitragen, da sie i. d. R. das Bodenleben schont und einen Humusabbau mindert. Unterliegen Böden dagegen einer sehr intensiven Durchmischung bzw. Bodenbearbeitung und bleiben die organischen Reststoffe wie Stroh nur selten auf der Fläche und ist der Anteil humuszehrender Feldfrüchte, wie z. B. Zuckerrüben, Mais und Gemüse hoch, so ist mit einseitigem Humusabbau und negativen Folgen für den Humushaushalt zu rechnen (s. a. PREGER ET AL., 2007).

Eine Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität muss aber nicht zwingend zu einer Erhaltung bzw. zu einer Erhöhung des Humusgehaltes führen, liegen doch zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Humusgehalt durchaus widersprüchliche Aussagen von „kein Einfluss“ bis „sehr wohl

Abb. 2.9: Intensive Durchwurzelung des Bodens durch Zwischenfruchtanbau (Foto: R. Brandhuber, LfL)

Abb. 2.10: Gleichmäßige Verteilung des Strohs auf der Oberfläche während des Drusches durch den Mähdrescher (Foto: Voßhenrich, TI Braunschweig)

Einfluss“ vor. Dies zeigen Literaturauswertungen von HÖPER & SCHÄFER (2012) oder ULRICH (2008) HADDAWAY ET AL. (2017), KRAUSS ET AL. (2022), XIAO ET AL. (2021) sowie die Ergebnisse von APPEL (2011) oder HOFMANN ET AL. (2009).

Untersuchungen und Auswertungen im Rahmen der BZE-LW weisen auf eine Verschiebung innerhalb dieser Böden hin (Plus im Oberboden, Minus im Unterboden).

Die Wirkung einer reduzierten Bodenbearbeitung auf den Humusgehalt ist i. d. R. nur durch langjährige und umfangreiche Untersuchungen nachzuweisen. Insbesondere im Rahmen der aktuellen Diskussion zur C-Sequestrierung ist deshalb nicht per se von einer Humuszunahme auszugehen. Der größte Beitrag dürfte ein indirekter sein, da ein Humusverlust durch Erosion auf reduziert bearbeiteten Standorten geringer sein dürfte als auf gepflügten.

Abschließende Betrachtung

Auf Basis der international (FREIBAUER ET AL., 2004; GOBIN ET AL., 2011) und national vorliegenden Daten und Erhebungen können z. Zt. weder der „Status Quo der Humusversorgung“, „optimale Humusgehalte“, „standorttypische Humusgehalte“ noch „Potenziale der Kohlenstoff-Sequestrierung in Böden“ (NIEDER ET AL., 2007) verlässlich abgeleitet werden.

Auch finden sich in einer Vielzahl von Publikationen Hinweise, dass der Nachweis einer Zu- oder Abnahme des Humusgehaltes im Boden oder der Beleg für die Einstellung eines neuen Humusgleichgewichts nur in langjährigen Untersuchungsreihen mit hohem analytischen Aufwand zu leisten ist (AUTORENKOLLEKTIV, 2012).

Ungeachtet dessen gibt es einige grundlegende landwirtschaftliche Maßnahmen, die Humusgehalt und die Humusqualität fördern (CAPRIEL, 2010):

- Standortgerechte vielfältige Fruchtfolge mit einem ausgewogenen Verhältnis zwischen humuszehrenden (z. B. Zuckerrübe, Kartoffel, Mais, Raps, Sonnenblume, Getreide mit Strohabfuhr) und humusmehrenden (z. B. Kleegras, Luzerne, Körnerleguminosen, Zwischenfrüchte) Fruchtarten.
- Ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz. Die Zufuhr von organischer Substanz erfolgt durch die bei der Ernte auf dem Feld verbleibenden Ernterückstände (Wurzeln, Stoppeln, Stroh, Sprossmasse), den gezielten Anbau von Zwischenfrüchten zur Gründüngung und durch Wirtschaftsdünger (Stallmist, Gülle, Kompost).
- Gleichmäßige Verteilung und Einarbeitung von Pflanzenresten und organischen Düngern.
- Standort- und bedarfsgerechte Bodenbearbeitung. Eine hohe Bearbeitungsintensität verstärkt den Humusabbau.
- Vermeidung von schädlichen Bodenverdichtungen. Eine gute Bodenstruktur ist die Voraussetzung für die Sauerstoff- und Wasserversorgung und damit für eine optimale mikrobielle Aktivität.
- Beachtung der Grundsätze der Guten fachlichen Praxis bei Düngungsmaßnahmen.
- Standortgerechte Kalkversorgung. Die Bodenbakterien schränken ihre Aktivität mit zunehmender Versauerung ein. Die Kalkung hebt den pH-Wert an und fördert damit die mikrobielle Aktivität.

Es zeigt sich, dass es für die Praxis eine Vielzahl von Möglichkeiten gibt, zur Erhaltung des Humusgehaltes seiner Böden beizutragen: Maßnahmen, die nach Stand des Wissens positive Wirkungen auf den Humushaushalt haben. Dazu gehört grundsätzlich, soweit wie möglich, organische Reststoffe (z. B. Stroh nach der Getreideernte) auf dem Ackerstandort zu lassen. Ausschlaggebend ist zudem die gleichmäßige Verteilung der Reststoffe (s. Abb. 2.10) und eine gezielte Aufbereitung – intensiv aufbereiten im Sinne einer beschleunigten Verrottung bei Herbstbestellung. Und wenn eine Sommerung folgt, Stoppel/Stroh lange auf der Ackeroberfläche belassen im Sinne eines verzögerten Abbaus.

In der Reihenfolge Bodenbearbeitung „mit Pflug" – „konservierend tief/flach" – „Direktsaat" wird der Boden durch zunehmende Bedeckung der Oberfläche deutlich stabilisiert gegenüber äußeren mechanischen Einflüssen, wie z. B. durch erosive Niederschläge. Daher sollte die Bearbeitung des Bodens so extensiv sein, wie der jeweilige Standort es zulässt. Diese Vorgehensweise setzt aber einen ganzheitlichen Ansatz voraus, in dem etwa das Befahren des Ackerstandorts mit bodenschonender Bereifung unerlässlich ist. Darauf aufbauen können schließlich alle weiterführenden Maßnahmen der Fruchtfolgegestaltung, der Bestellung, des Pflanzenschutzes, der Düngung und der Ernte.

Literatur

AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Auflage; Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 S.

ALBERT, E. (2011): Wirkung einer langjährig differenzierten mineralisch- organischen Düngung auf Ertrag, Humusgehalt, N-Bilanz, Nmin-Vorrat und N-Einwaschung in Unterflurlysimeter. VDLFUA – Kongressband 67, 340–352.

APPEL, T., BERG, V., LAUFER, O. & BAI, M. (2008): Bewirkt die konservierende Bodenbearbeitung eine Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden? In: VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 64/2008, Kongressband Jena, S. 519–528. http://www.vdlufa.de.

APPEL, T. (2011): Weniger Kohlenstoff im Boden nach langjährig pflugloser Bodenbearbeitung. Berichte der DBG http://eprints.dbges.de/596

AUTORENKOLLEKTIV (2012): 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. Archivs of Agronomy and Soil Sience, 1–24.

BARKUSKY, D. & M. JOSCHKO, (2020): Dauerfeldversuche sind unverzichtbar – „C-Sequestrierung - was kann die Landwirtschaft leisten?" LOP – Landwirtschaft ohne Pflug; 06/2020, S. 14–22.

BMU (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG); Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 5 Absatz 30 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.

CAPRIEL, P. & SEIFFERT, D. (2009): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern. Teil 3: Entwicklung der Humusgehalte zwischen 1986 und 2007. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 10, 2009. http://www.LfL.bayern.de

CAPRIEL, P. (2010): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 05/2010, 46 S. http://www.lfl.bayern.de

DREXLER, S., BROLL, G., DON, A. & H. FLESSA, (2020): Standorttypische Humusgehalte landwirtschaftlich genutzter Böden Deutschlands. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 75, 200 S.

DÜWEL, O., SIEBNER, C., UTERMANN, J. & KRONE, F. (2007): Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands – Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR. 61 S. http://www.bgr.bund.de

EBERTSEDER, TH., MUNZER, M., HORN, D. & MAIER, H. (2010): Ableitung von Einflussfaktoren auf die Humusgehalte von Böden durch flächenbezogene Auswertung von Bodenuntersuchungsdaten. Bericht zur Teilaufgabe 6 für den VDLUFA-F&EBericht „Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen", 28 S. http://www.humusnetzwerk.de

FORTMANN, H., RADEMACHER, P., GROH, H. & HÖPER, H. (2012): Stoffgehalte und -vorräte im Boden und deren Veränderungen. In: GeoBerichte 23, Hrsg. LBEG Niedersachsen, S. 48–69. http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live. php?navigation_id=31402&article_id=108163&_psmand=4

FREIBAUER, A., ROUNSEVELL, M. D. A., SMITH, P. & VERHAGEN, J. (2004): Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. Geoderma 122, 1–23.

GENSIOR, A., ROTH, G., & WELL, R. (2012): Landwirtschaftliche Bodennutzung – Eine Bestandsaufnahme aus Sicht der Klimaberichterstattung. Bodenschutz 3/12, 81–89.

GOBIN, A., CAMPLING, P., JANSSEN, L., DESMET, N., VAN DELDEN, H., HURKENS, J., LAVELLE, P & BERMAN, S. (2011): Soil organic matter management across the EU – best practices, constraints and trade-offs, Final Report for the European Commission's DG Environment, September 2011, 180 S. http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/som/full_report.pdf

GRABE, M., KLEBER, M., HARTMAN, K.-J. & JAHN, R. (2003): Preparing a soil carbon inventory of Saxony-Anhalt, Central Germany using GIS and the state soil data base SABO_P. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166, S. 642–648.

HADDAWAY, N.R., HEDLUND, K., JACKSON, L.E., KÄTTERER, TH., LUGATO, E., THOMSEN, I. K., JØRGENSEN, H. B. & P.-E. ISBERG, (2017): How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. Environ Evid 6, 30, 48 S. https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9

HANGE, J. & FÜHR, F. (1992): Rolle der organischen Substanz bei der Festlegung und Entgiftung von Xenobiotika. In: Berichte über Landwirtschaft, 206. Sonderheft, Band 4 der Reihe Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Humushaushalt, S. 82–96.

HEYN, J. (2011): Humus, Humusgehalte, Humusbilanzierung. http://www.llh-infonet.de/index.php?option=com_content&view=article&id=652&Itemid=543

HIEROLD, W., ELLERBROCK, R. H. & STANG, S. (2012): Muster der organischen Bodensubstanz (OBS) auf Ackerflächen – zur Regionalisierung von Menge und Qualität. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 24: 66–67.

HÖPER, W. & SCHÄFER, W. (2012): Die Bedeutung der organischen Substanz von Mineralböden für den Klimaschutz. Bodenschutz, 3, 12, 72–80.

HÖPER, H., (2021): Veränderungen der Gehalte und Vorräte an organischer Substanz im Boden der landwirtschaftlich genutzten Bodendauerbeobachtungsflächen. In: HÖPER, H. & H. MEESENBURG, (HRSG.): 30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen, Band 39 der Reihe GeoBerichte, S. 55–64

HOFMANN, B., BISCHOFF, J., RÜCKNAGEL, J. & CHRISTEN, O. (2009): Einfluss langjähriger Bodenbearbeitung auf C_{org}-Gehalte bei Löß-Schwarzerde und pseudovergleyter Parabraunerde. In: Böden – eine endliche Ressource, September 2009, Bonn. http://eprints.dbges.de/334

HOYER, U., LEMNITZER, B. & HÜLSBERGEN, K.-J. (2007): Einfluss des ökologischen Landbaus auf unterschiedliche Humuspools im Boden und Schlussfolgerungen zur Humusbilanzierung. 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. http://orgprints. org/9603

HÜLSBERGEN, K. J. & DIEPENBROCK, W. (2000): Die Entwicklung von Fauna, Flora und Boden nach Umstellung auf ökologischen Landbau – Untersuchungen auf einem mitteldeutschen Trockenlößstandort. UZU-Schriftenreihe, Sonderband, Halle/Saale , S. 101–107.

HÜTTL, F., PRECHTEL, A. & BENS, O. (2007): Humusversorgung von Böden in Deutschland. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 360 13 008. Erschienen in der Reihe „Publikationen des Umweltbundesamtes", 203 S.

JACOBS, A. & KOCH, H. (2012): Speicherung von organischem Kohlenstoff unter Mulch- und Direktsaat. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 24: 196–197.

JACOBS, A., FLESSA, H., DON, A., HEIDKAMP, A., PRIETZ, R., DECHOW, R., GENSIOR, A., POEPLAU, C., RIGGERS, C., SCHNEIDER, F., TIEMEYER, B., VOS, C., WITTNEBEL, M., MÜLLER, T., SÄURICH, A., FAHRION-NITSCHKE, A., GEBBERT, S., JACONI, A., KOLATA, H., LAGGNER, A., ET AL, (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 316 p, Thünen Rep 64, DOI:10.3220/REP1542818391000

KASTEN, P. (2002): Spezifischer Bedarf an Humusdüngern bei hackfruchtintensivem Ackerbau nach guter, fachlicher Praxis. In: FRICKE, BURTH und WALLMANN (Eds.): Biomasse und Abfallwirtschaft, Schriftenreihe des ANS. Berlin, 249–262.

KBU – KOMMISSION BODENSCHUTZ BEIM UBA (2006): Bodenschutz beim Anbau nachwachsender Rohstoffe – „Empfehlungen der Kommission Bodenschutz beim UBA". Hrsg.: Umweltbundesamt, 84 S. http://www.umweltdaten.de

KÖNIG, W. (2009): Humus- und Nährstoffversorgung mitteleuropäischer Böden. In LANUV-Fachbericht 18, Biomasse aus Abfällen, S. 13–18. http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/ fachberichte/fabe18/fabe18.pdf

KÖRSCHENS, M. & SPITZL, M. (1978): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung des Ct- und Nt-Gehaltes im Boden. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd., Berlin, 22, (11) S. 705– 711.

KÖRSCHENS, M. & SCHULZ, E. (1999): Die organische Bodensubstanz. Dynamik – Reproduktion – ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. UFZ-Bericht Nr. 13/1999, 46 S. + Anhang.

KRAUSS, M., WIESMEIER, M., DON, A., CUPERUS, F., GATTINGER, A., GRUBER, S., HAAGSMA, WK., PEIGNE, J., CHIODELLI PALAZZOLI, M., SCHULZ, F., VAN DER HEIJDEN, M. G. K., VINCENT-CABOUD, L., WITTWER, R. A., ZIKELI, S. & M. STEFFENS, (2022): Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. Soil Tillage Res 216:105262, https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105262

LIEBEROTH, I. (1982): Bodenkunde. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 3. Auflage 1982. 432 S.

LFL – BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2011): Humus – Leben aus dem Boden. Info-Broschüre, 10 S.

MARX, M. & V. GAUL, (2021): Gehaltsspannen von organischem Kohlenstoff in Ackerböden – Ergebnisse aus Deutschland. Bodenschutz, 04.21, S. 120–127.

NEUFELDT, H. (2005): Carbon stocks and sequestration potentials of agricultural soils in the federal State of Baden-Württemberg, SW Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168, S. 202–211.

NIEDER, R., HARTZSCH, M. & DAUCK, H.-P. (2007): Dynamik der organischen Bodensubstanz in Ackerböden: langfristige Entwicklungen in Niedersachsen. Mitteilungen der DBG, Band 110, Heft 1, S. 377–378.

POEPLAU, C., JACOBS, A., DON, A., VOS, C., SCHNEIDER, F., WITTNEBEL, M., TIEMEYER, B., HEIDKAMP, A., PRIETZ, R. & H. FLESSA, (2020): Stocks of organic carbon in German agricultural soils – Key results of the first comprehensive inventory. Journal of plant nutrition and soil science, 183(6), 665-681. [Status, BZE Landwirtschaft]

POEPLAU, C., DON, A. & H. FLESSA, (2022): Bodenzustandserhebung Landwirtschaft. Braunschweig: Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, 2 S., Project Brief Thünen Inst 2022/02. https://doi.org/10.3220/PB1641478727000

PREGER A., WELP, G., MARQUARDT, U., KOLECZEK, B. & AMELUNG, W. (2006): Humusgehalte in nordrhein-westfälischen Ackerböden: aktueller Status und zeitliche Entwicklung. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen, Band 45, S. 98.

RÖßLER, I. & NOWACK, A. (2011): Carbon Wechselwirkung Bodenschutz – Pflanzenschutz – Düngung. Schriftenreihe, LfULG Sachsen, Heft 38/2011, 175 S.

SAUER, T. & TH. WIESNER, (2021): Berechnung der Bodenkohlenstoffvorräte auf Basis der Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD50). Hrsg.: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB), Themenhefte Vorsorgender Bodenschutz, Heft 4: 42 S.

SAUERBECK, D. (1984): Funktionen, Güte und Belastbarkeit des Bodens aus agrikulturchemischer Sicht. Stuttgart: Kohlhammer. Materialien zur Umweltforschung, 10, Hrsg.: Sachverständigenrat für Umweltfragen, 257 S.

SAUERBECK, D. (1992): Funktionen und Bedeutung der organischen Substanzen für die Bodenfruchtbarkeit – ein Überblick. In: Berichte über Landwirtschaft, 206. Sonderheft, Band 4 der Reihe Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Humushaushalt, S. 13–29. SAUERBECK, D. (2001): CO2 emmissions and C sequestration by agriculture – perspectives and limitations. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 60, 253–266.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Neu bearbeitet von BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. und WILKE, B.-M.; 16. Auflage; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg. 569 S.

SRU –SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (2012): Moorböden als Kohlenstoffspeicher, Kapitel 7 in: Umweltgutachten 2012 „Verantwortung in einer begrenzten Welt“. 718 S. http://www.umweltrat.de

ULRICH, S. (2008): Zum Indikatorwert ausgewählter physikalischer Parameter und Kenngrößen des Kohlenstoffhaushaltes unter Berücksichtigung von Daten aus langjährigen Bodenbearbeitungs- und Düngungsversuchen. Schriftenreihe der Pflanzenbauwissenschaften des Institutes für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Bd. 3, 141 S. + XXXII S. Anhang.

VDLUFA (2014): Standpunkt – Humusbilanzierung Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland, 20 S. http://www.vdlufa.de

VORDERBRÜGGE, TH., (2022): Denkanstöße für die Evaluierung des Bundes-Bodenschutzgesetzes Konkretisierung von Begriffen des § 17 Absatz 2 zur guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft. In: Bodenschutz 1/22

WERNER, A. & BACHINGER, J. (2009): Humuswirtschaft mit Precision Farming. In: Humus in Böden – Garant der Fruchtbarkeit, Substrat für Mikroorganismen, Speicher von Kohlenstoff. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 35, S. 105–116.

WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M., DOMINIK, P., ILG, K., SCHMITT, A., ZEITZ, J., GAHRE, F., SCHULZ, E., ELLERBROCK, R., UTERMANN, J., DÜWEL, O. & SIEBNER, C. (2008): Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG Boden- Grundwasser. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 202 71 264. Erschienen in der Reihe „Publikationen des Umweltbundesamtes“ 162 S. + XXXVII S. Anhang.

WHALEN, J. K. & SAMPEDRO, L. (2010): Soil Ecology and Management. CAB International, Wallingford, 296 S.

XIAO, L., KUHN, N. J. ZHAO, R. & L. CAO, (2021): Net effects of conservation agriculture principles on sustainable land use: a synthesis. https://doi.org/10.1111/gcb.15906

Global Change Biology (2021), Vol.27, Iss.24, pp. 6321-6330. doi: 10.1111/GCB.15906 https://onlinelibrary.wiley.com/toc/13652486/2021/27/24

Impressum

3614/2022

Herausgeberin
Bundesanstalt für Landwirtschaft
und Ernährung (BLE)
Präsident: Dr. Hanns-Christoph Eiden
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Telefon: +49 (0)228 6845–0
Internet: www.ble.de, www.landwirtschaft.de,
www.praxis-agrar.de

Redaktion
Dr. Volker Bräutigam
Rainer Schretzmann
Wilfried Henke (i. R.)
alle Bundesinformationszentrum
Landwirtschaft in der BLE,
Referat 412 – Fachkommunikation,
Bundeszentrum Weidetiere und Wolf

Text
Kapitel 1: H. Honecker, M. List,
Caroline Hendrischke, Marion Senger
Kapitel 2: Th. Vorderbrügge, M. Busch,
R. Brandhuber, J. Bug, S. Schrader,
Th. Weyer
Kapitel 3: J. Brunotte, R. Brandhuber,
Th. Vorderbrügge, S. Schrader
Kapitel 4.1 Winderosion: M. Busch
Kapitel 4.2 Wassererosion: W. Schmidt,
R. Brandhuber, J. Bug

Gestaltung
Arnout van Son, Alfter

Titelbild
Joachim Brunotte

Umschlagseite hinten:
© Krzysztof – stock.adobe.com: U4
© rightdx – stock.adobe.com: U4
© Countrypixel – stock.adobe.com: U4
© Kletr – stock.adobe.com: U4

Druck
Kunst-und Werbedruck GmbH & Co. KG,
Hinterm Schloss 11,
32549 Bad Oeynhausen

Das Papier besteht zu 100 % aus Recyclingpapier.

Nachdruck und Vervielfältigung – auch auszugsweise – sowie Weitergabe mit Zusätzen, Aufdrucken oder Aufklebern nur mit Zustimmung der BLE gestattet.

Stand September 2022
© BLE 2022

Bestellungen an:
BLE-Medienservice
c/o IBRo Versandservice GmbH
Kastanienweg 1
18184 Roggentin
Telefon: +49 (0)38204 66544
Telefax: +49 (0)228 8499-200
bestellung@ble-medienservice.de
Alle Medien auch als Download: www.ble-medienservice.de