



Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands

Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung



Liebe Leserinnen und Leser,

der Klimaschutz ist eine der zentralen Aufgaben unserer Zeit und weltweit von herausragender Bedeutung. Wir alle sind aufgerufen, an der Einhaltung der Klimaschutzziele bestmöglich mitzuwirken. Ein Kernelement des Klimaschutzes ist der Bodenschutz.

Wir können uns glücklich schätzen, dass Deutschland eine der fruchtbarsten Agrarregionen weltweit ist. Verantwortlich sind dafür die guten Bodeneigenschaften und die günstigen klimatischen Bedingungen. Dabei sollte uns bewusst sein, dass der Boden eine nicht erneuerbare Ressource ist. Um die hohe Fruchtbarkeit unserer Böden in Deutschland zu erhalten, müssen wir sie nachhaltig bewirtschaften.

Gute und gesunde Böden sind buchstäblich die Grundlage guter und gesunder Lebensmittel. Sie sind aber nicht nur Produktionsgrundlage, sie sind auch ein bedeutender Kohlenstoffspeicher, und zwar im Humus.

Um den Zusammenhang von Boden und Klima genauer zu untersuchen, hat mein Ministerium das Thünen-Institut mit der „Bodenzustandserhebung Landwirtschaft“ beauftragt. Denn ein aktueller und einheitlicher Datensatz, der den Kohlenstoffgehalt unserer Böden für das gesamte Bundesgebiet misst, fehlte bislang.



Mit der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft wurde nun erstmalig eine umfassende und repräsentative Inventur der organischen Kohlenstoffvorräte in den landwirtschaftlich genutzten Böden durchgeführt. Dafür sind in enger Zusammenarbeit mit über 3.100 Landwirten in den Jahren von 2012 bis 2018 mehr als 120.000 Bodenproben genommen und analysiert worden.

Mit einem eindrucksvollen Ergebnis: Insgesamt sind über zwei Milliarden Tonnen Kohlenstoff in den landwirtschaftlichen Böden Deutschlands gespeichert. Die Bodenzustandserhebung unterstreicht damit die große Bedeutung der Agrarböden für den Klimaschutz und die Klimaanpassung – ein Potenzial, das häufig unterschätzt wird.

Die Bodenzustandserhebung wird in Zukunft alle zehn Jahre stattfinden, um mögliche Veränderungen der Kohlenstoffvorräte und Bodeneigenschaften zu erfassen. Sie wird damit zu einer wichtigen Grundlage für unsere weitere Bodenschutz- und Klimapolitik.

Mit herzlichen Grüßen

Ihre

Julia Klöckner

Bundesministerin für Ernährung und Landwirtschaft



INHALT

1

Humus für Bodenfruchtbarkeit und Klimaschutz 06

2

Bodenmonitoring – Zustand und Entwicklung erkennen 09

3

Boden – der unterschätzte Kohlenstoffspeicher 15

4

Was bestimmt die Variabilität der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff? 21

5

Humus hat Geschichte 25

6

Nehmen die Humusvorräte zu oder ab? – Abschätzungen durch Modelle 29

7

Humusmanagement – welche Maßnahmen haben Potenzial? 32

8

Moorbodenschutz ist Klimaschutz 36

9

Humusmanagement – Teil einer Klimastrategie Landwirtschaft 41

10

Literaturnachweise 43



1

Humus für Bodenfruchtbarkeit und Klimaschutz

Wir leben nicht nur auf dem Boden, sondern vor allem vom Boden. Landwirtschaftlich genutzte Böden sind die wichtigste Grundlage für unsere Ernährung – dies gilt sowohl für einen Speiseplan mit überwiegend pflanzlicher Kost als auch für den Verzehr von Milchprodukten, Fleisch und Eiern. Darüber hinaus sind Böden auch Basis für die Erzeugung zahlreicher Rohstoffe, wie Naturfasern und Pflanzenöle, die in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Fruchtbare Böden sind daher grundlegend für unser Leben – ihr Erhalt und ihre nachhaltige Nutzung gehören zu den wichtigsten Aufgaben unserer Gesellschaft.



Humus – ein Schlüssel zur Bodenfruchtbarkeit

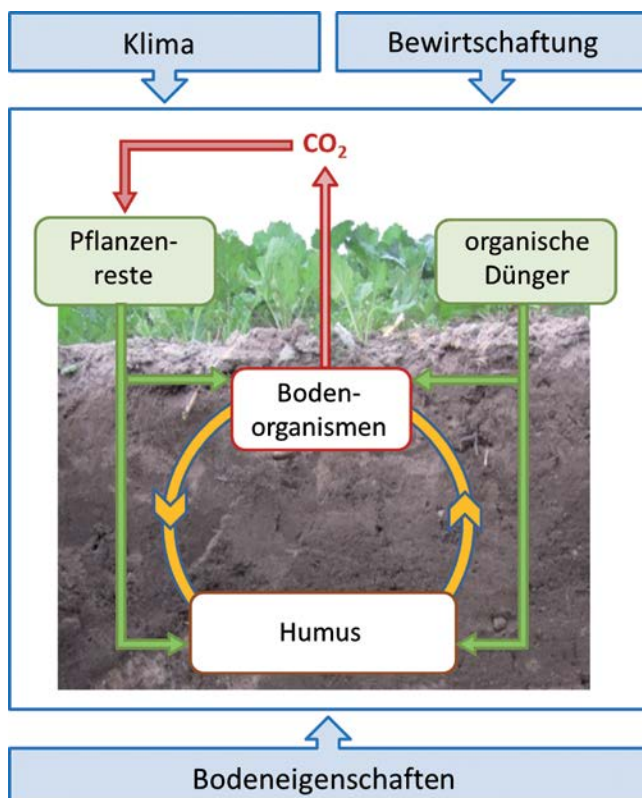
Der Gehalt und die Zusammensetzung von Humus sind wesentliche Parameter für die Bodenfruchtbarkeit. Er wirkt vielfältig und entscheidend auf biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften sowie auf die wichtigsten Prozesse in Böden und dies bereits bei geringen Gehalten.

Humus – kleiner Anteil, große Wirkung

Humus fördert die Bodenfruchtbarkeit, er

- ist Basis der biologischen Aktivität
- liefert Nährstoffe für Pflanzen
- erhöht das Bodenporenvolumen
- verbessert die Wasserspeicherung des Bodens
- verbessert die Wasserinfiltration in den Boden
- führt zu günstiger Bodenstruktur
- erhöht die Aggregatstabilität
- mindert die Erosionsanfälligkeit
- hat Filter- und Pufferfunktion

ABBILDUNG 1: Bildung und Abbau von Humus sowie die Einstellung eines standortabhängigen Humusgleichgewichts werden beeinflusst durch Klimafaktoren, Bewirtschaftung und Bodeneigenschaften – vereinfachte schematische Darstellung.



WAS IST HUMUS?

Als Humus (lateinisch humus für Erdboden) bezeichnet man die gesamte abgestorbene organische Substanz des Bodens. Er besteht überwiegend aus Pflanzenresten und ihren Umsetzungsprodukten sowie aus den Resten, Ausscheidungen und Umwandlungsprodukten von Bodentieren und Mikroorganismen.

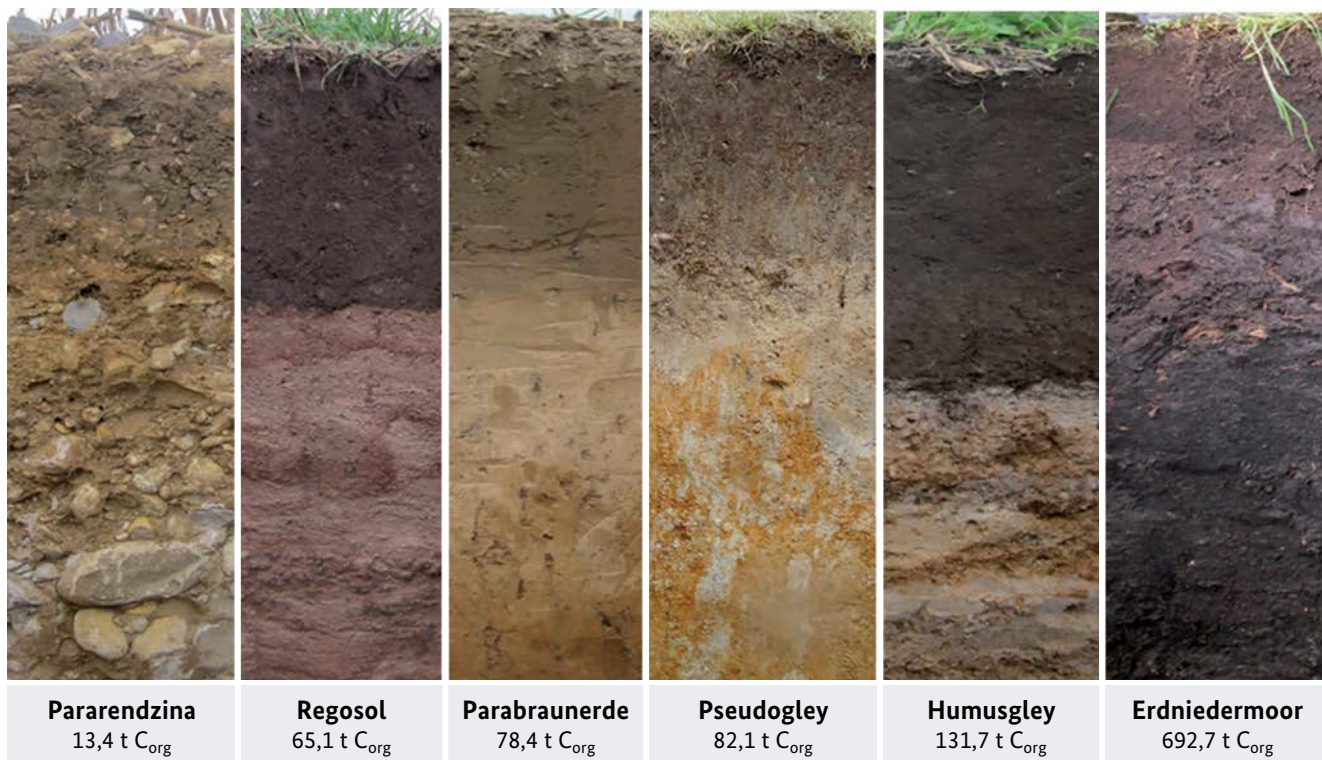
Humus besteht zu rund 58 % aus Kohlenstoff. Er ist mengenmäßig somit das wichtigste Element im Humus. Der Humusgehalt wird anhand der Bestimmung des Gehalts an organischem Kohlenstoff in Böden ermittelt. Näherungsweise gilt für den Humusgehalt in Mineralböden der Zusammenhang (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005):

Humus (Masse-%) = 1,72 × organischer Bodenkohlenstoff (Masse-%)

Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden bildet sich aus Pflanzenrückständen und organischen Düngern wie Gülle, Stallmist, Kompost oder Gärresten aus Biogasanlagen. Bodentiere und unzählige Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) nutzen diese organischen Substanzen als Nahrung und leisten zusammen ihre Zersetzung. Der überwiegende Teil des organischen Kohlenstoffs wird dabei vollständig abgebaut und als Kohlendioxid (CO_2) freigesetzt. Ein kleiner Teil wird stabilisiert und bleibt im Boden langfristig gespeichert. Bodenorganismen haben über die Zersetzungsprozesse und die Bildung stabiler Bodenaggregate auch einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung und Stabilisierung von Humus in Böden. Ihre Aktivität ist eng mit den positiven Wirkungen des Humus auf die Bodenfruchtbarkeit verbunden.

Die Höhe des Humusgehalts in Böden ergibt sich aus dem komplexen Zusammenspiel zwischen der Menge und Zusammensetzung des Eintrags organischer Substanzen sowie deren Umsetzung, Abbau und Stabilisierung im Boden (Abbildung 1). Letztere werden maßgeblich durch Bodeneigenschaften (z. B. biologische Aktivität, Textur, pH-Wert, Wassersättigung, Sauerstoffverfügbarkeit), die Zusammensetzung der eingetragenen organischen Substanzen sowie durch Klimafaktoren (z. B. Temperatur und Niederschlag) beeinflusst. Die Humusgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden sind sehr variabel: Sie reichen von unter einem Masse-% in sehr schwach humosen Böden bis zu 100 % in Moorböden (Abbildung 2).

ABBILDUNG 2: Böden haben sehr unterschiedliche Vorräte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) Die Messwerte beziehen sich auf 0 bis 100 cm Tiefe und einen Hektar Fläche.



Humus – ein Beitrag zum Klimaschutz

Der Humus in Böden ist der größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff. Böden speichern rund viermal so viel Kohlenstoff wie die oberirdische Vegetation und mehr als doppelt so viel wie die Atmosphäre (Ciais et al. 2013). Bereits geringe Veränderungen des Vorrates von organischem Bodenkohlenstoff, sei es durch Klimaänderungen, Landnutzungsänderungen oder Bewirtschaftungsmaßnahmen, können die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre daher erheblich verändern. Ein Verlust von organischem Bodenkohlenstoff ist verbunden mit der Freisetzung des Treibhausgases CO_2 in die Atmosphäre. Der Vorratsaufbau führt zu einer Festlegung von CO_2 -Kohlenstoff in Böden, also einer Kohlenstoff-Sequestrierung. Wichtig für den Klimaschutz sind daher besonders langfristig stabile Humusvorräte.

Auf der Grundlage internationaler Klimaschutzabkommen berichtet die Bundesrepublik Deutschland jährlich im Rahmen der nationalen Emissionsberichterstattung

für Treibhausgase über Veränderungen der Vorräte an organischem Kohlenstoff in land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden. Das Thünen-Institut erstellt diese Berichte im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft. Die hier vorgestellten Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft dienen der Verbesserung der nationalen Emissionsberichterstattung und einem besseren Verständnis über den Zustand und die potenziellen Entwicklungen der Humusvorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland.



2

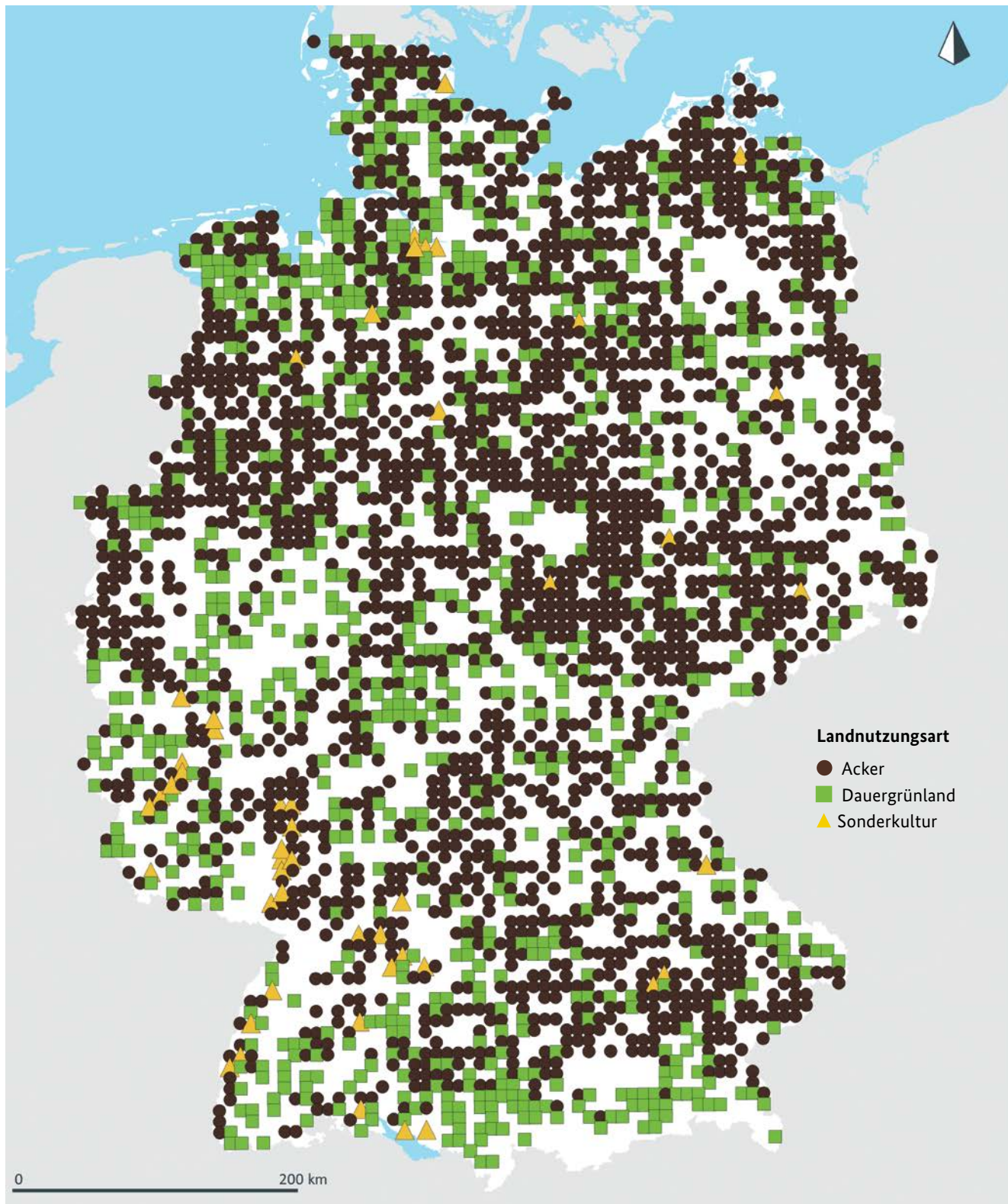
Bodenmonitoring – Zustand und Entwicklung erkennen



Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) wurde am Thünen-Institut für Agrarklimaschutz durchgeführt. Die Planungen der Freilandarbeiten begannen im Jahr 2010 mit der Festlegung der Beprobungspunkte in

einem Acht-mal-acht-Kilometer-Raster über das gesamte Bundesgebiet (Karte 1). Wo ein Rasterpunkt eine Ackerfläche, Grünland oder landwirtschaftliche Sonderkulturen (z. B. Wein, Hopfen, Baumobst) traf, wurde

KARTE 1: Beprobungspunkte mit Landnutzungsart der bundesweiten Bodenzustandserhebung Landwirtschaft



anschließend eine Bodenbeprobung durchgeführt. Insgesamt ergaben sich 3.104 Beprobungspunkte, die mit aktiver Unterstützung der bewirtschaftenden Landwirte untersucht wurden. Der erste Spatenstich war 2011 in Niedersachsen, der letzte 2018 in Baden-Württemberg.

Die BZE-LW umfasste mehrere Arbeitsbereiche: Die Datenaufnahme erfolgte in den Bereichen „Geländearbeit“, „Laboranalysen“, „Bewirtschaftungsdaten“ und „zusätzliche Untersuchungen“ (Abbildung 3). Zwei übergreifende Arbeitsbereiche waren für die Datenzusammenführung und -archivierung („Datenbanken und Probenarchiv“) sowie für die Ergebniserstellung und -veröffentlichung („wissenschaftliche Auswertung“) verantwortlich.

ABBILDUNG 3: Arbeitsbereiche und Struktur der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft

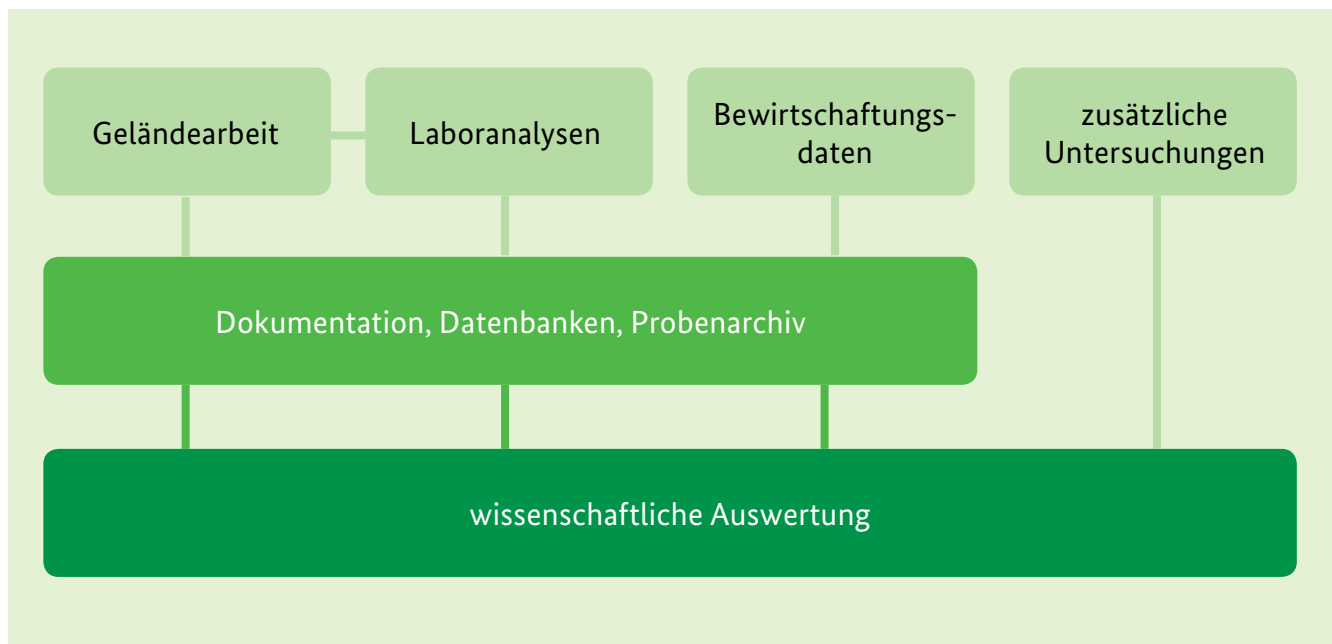
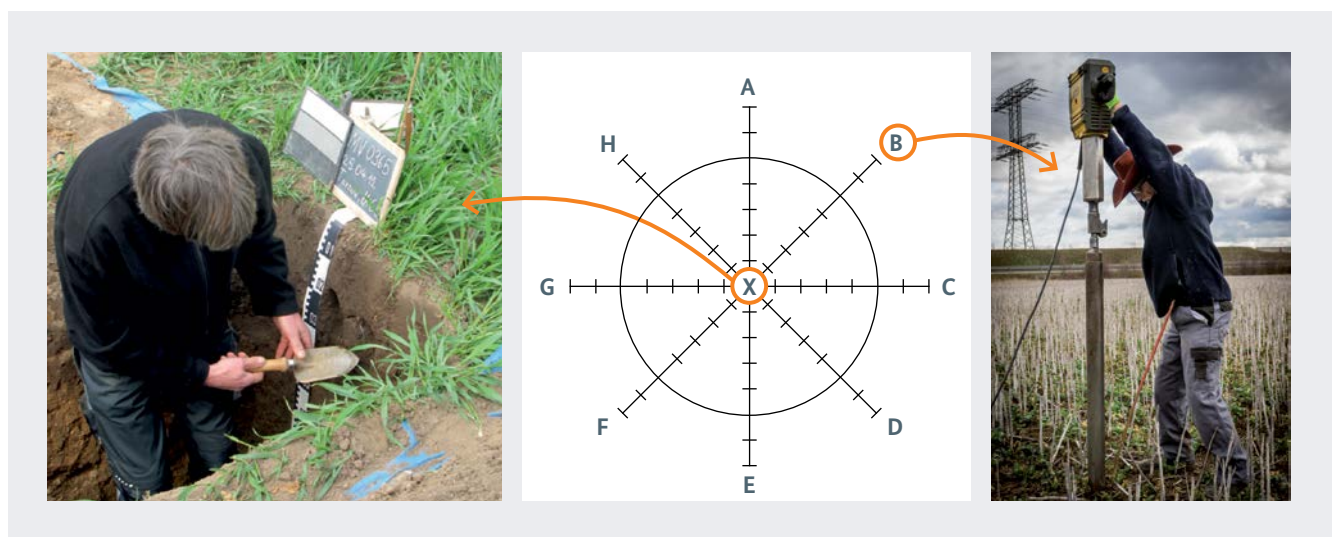


ABBILDUNG 4: An jedem Beprobungspunkt der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft wurden eine Bodenprofilgrube ausgehoben (X) und acht Bodenkerne mittels Rammkernsondierung entnommen (A bis H im Umkreis von 10 m um die Profilgrube). Es wurden sowohl Boden-Mischproben als auch volumengerechte Bodenproben entnommen.



An jedem der Beprobungspunkte wurde eine Profilgrube von 1 Kubikmeter ausgehoben und zusätzlich wurden acht Bodenbohrkerne entnommen (Abbildung 4). Die bodenkundliche Kartierung mit Aufnahme der bodentypologischen Parameter und die Entnahme von Bodenproben erfolgte durch erfahrene Bodenkundler des Thünen-Instituts für Agrarklimaschutz. Die Bodenproben (Mischproben und volumengerechte Proben) wurden aus den Tiefenstufen 0–10, 10–30,

30–50, 50–70 und 70–100 cm entnommen. Bei deutlichen Abweichungen zwischen diesen Tiefenstufen und der natürlichen Horizontierung der Böden wurden zusätzlich die Bodenhorizonte beprobt. Insgesamt wurden so über 120.000 Bodenproben für die Untersuchungen entnommen. Die Profilgruben wurden per GPS exakt eingemessen, zusätzlich mit einer Unterflurmarke markiert und können so für eine Wiederholungsbeprobung exakt lokalisiert werden.

ABBILDUNG 5: Die Analyse der Bodenproben der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft erfolgte im Bodenlabor des Thünen-Instituts



Alle Bodenproben wurden zentral im Bodenlabor des Thünen-Instituts aufbereitet und analysiert (Abbildung 5). Es wurden sowohl Bodenkenngrößen zur Erfassung des Vorrates an organischem Kohlenstoff als auch mögliche Einflussgrößen der Bodenkohlenstoffspeicherung bestimmt.



AN ALLEN STANDORTEN GEMESSENE BODENKENNGRÖSSEN:

- Feinbodenanteil (< 2 mm)
- Grobbodenanteil (≥ 2 mm)
- Wurzelmasse
- Trockenrohddichte des Feinbodens
- Korngrößenzusammensetzung des Feinbodens
- pH-Wert (Calciumchlorid)
- Gehalt an organischem Kohlenstoff
- Gehalt an anorganischem Kohlenstoff
- Stickstoffgehalt (gesamt)

Die Landwirte unterstützten die Auswertung der BZE-LW, indem sie Daten über die Bewirtschaftung der beprobten Flächen und ihren landwirtschaftlichen Betrieb zur Verfügung stellten. Die Angaben über die Fruchtfolge, den Umgang mit Ernteresten, Zwischenfruchtanbau, organische Düngung und Tierhaltung sowie zum Grünlandmanagement lieferten wichtige Informationen zum Humusmanagement auf den Betrieben und den beprobten Flächen.

Parallel zur BZE-LW wurden weitere Untersuchungen zum Einfluss der Nutzung und des Managements auf den organischen Bodenkohlenstoff durchgeführt. Hierfür wurden insbesondere landwirtschaftliche Dauerversuche und gezielt ausgewählte Moorstandorte genutzt und Metastudien zu Bewirtschaftungseinflüssen angefertigt.

ABBILDUNG 6: Im Thünen-Institut für Agrarklimaschutz wurde ein Probenarchiv eingerichtet: Dort stehen rund 124.000 Rückstellproben getrocknet und gesiebt für weitere Analysen und Vergleichsmessungen bereit



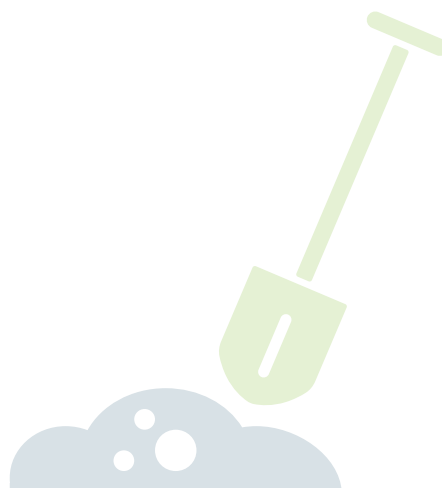
Mit der BZE-LW wurde der Grundstein für ein regelmäßiges, deutschlandweit einheitliches Monitoring landwirtschaftlich genutzter Böden gelegt.



HAUPTZIELE DER BODENZUSTANDSERHEBUNG LANDWIRTSCHAFT

- Die repräsentative und systematische Erfassung und Bewertung der Gehalte und Vorräte an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland.
- Die systematische, deutschlandweite Erfassung und Bewertung von Bodenkenngößen, die den Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff beeinflussen.
- Die Analyse und Bewertung des Einflusses von Standort-, Nutzungs- und Bewirtschaftungsfaktoren auf den aktuellen Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff.
- Die deutschlandweite Analyse und Bewertung möglicher Veränderungen des Vorrats an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Mineralböden mittels Modellen.
- Die Etablierung einer Basis für ein regelmäßiges Bodenzustandsmonitoring für landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland.

Mit der BZE-LW wurde der Grundstein für ein regelmäßiges, deutschlandweit einheitliches Monitoring landwirtschaftlich genutzter Böden gelegt. Es hilft der Landwirtschaft und der Politik, Veränderungen zu erkennen und das Bodenmanagement zu optimieren und ist darüber hinaus eine wichtige Basis für die nationale Berichterstattung zu Treibhausgasemissionen in Deutschland.



3

Boden – der unterschätzte Kohlenstoffspeicher

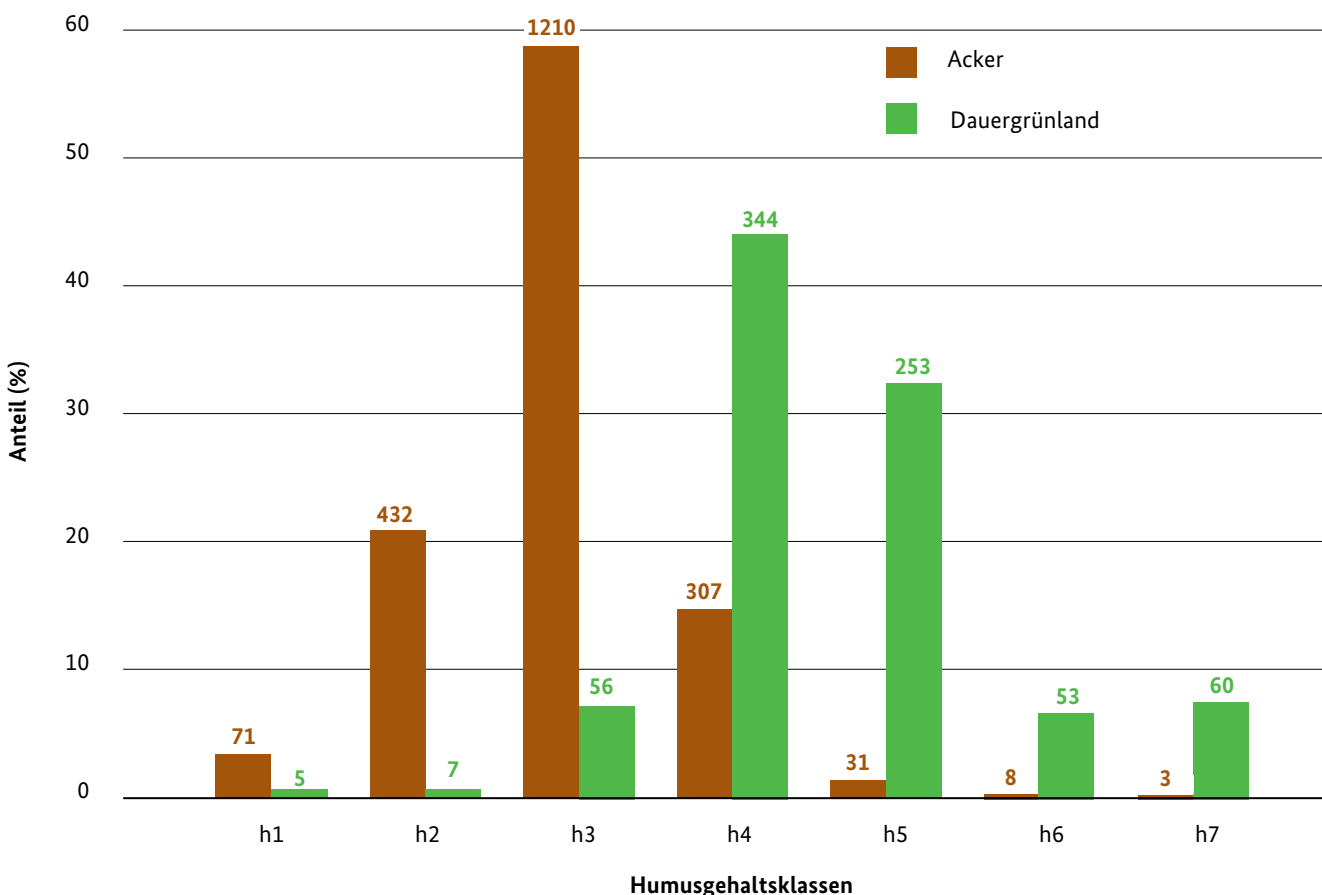


Die Humusgehalte in den Oberböden (0–10 cm) unter Acker- und Grünlandnutzung unterscheiden sich deutlich (Abbildung 7). Legt man die Humusgehaltsklassen von h1 (schwach humos) bis h7 (organisch, Torf) zugrunde (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005), liegen über 50 % der Ackerböden in der Klasse h3 (mittel humos, 2 bis < 4 % Humus). Die meisten Grünlandböden entsprechen der Klasse h4 (stark humos 4 bis < 8 % Humus). Deutlich ist auch, dass Böden mit den höchsten Humusklassen h6 (anmoorig, 15 bis < 30 % Humus) und h7 (Torf, > 30 % Humus), die sich unter anhaltender Wassersättigung (stark hydromorphe Bedingungen) gebildet haben, überwiegend als Dauergrünland genutzt werden. Die Humusgehaltsklassen h3 für Ackerböden und h4 für Grünlandböden sind typisch für sehr viele grundwasserferne Mineralböden (Düwel et al. 2007). Dabei ermöglicht der absolute Humusgehalt eines Bodens noch keine

Aussage darüber, ob ein Boden optimal mit Humus versorgt ist oder nicht, da sich in tonigen Böden in der Regel höhere Humusgehalte einstellen als in sandigen Böden (siehe Kapitel 4 „Was bestimmt die Variabilität der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff?“).

Die Vorräte an organischem Kohlenstoff zeigen einen deutlichen Zusammenhang mit der Landnutzung (Abbildung 8). Mineralböden unter Ackernutzung in Deutschland weisen in der Bodentiefe 0–30 cm im Mittel einen Vorrat an organischem Kohlenstoff von 61 t/ha auf und haben damit 31 % weniger organischen Kohlenstoff als Böden unter Grünlandnutzung mit 88 t/ha. Bilanziert man das gesamte Bodenprofil bis in einen Meter Tiefe, erhöhen sich die mittleren Vorräte an organischem Kohlenstoff in Mineralböden auf 96 t/ha für Ackerböden und 135 t/ha für Böden unter

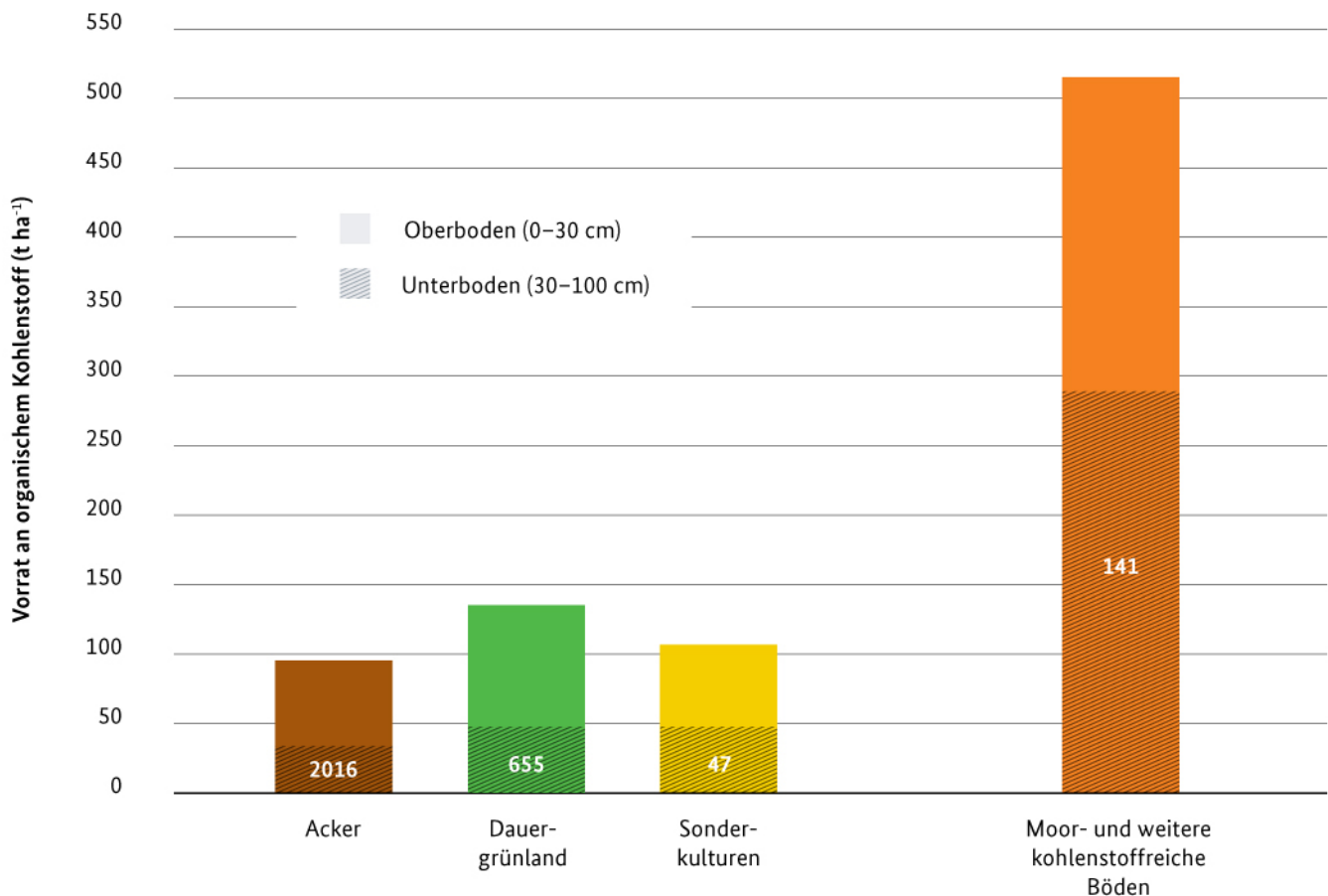
ABBILDUNG 7: Häufigkeit von Humusklassen (h1 schwach humos bis h7 Torf nach Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005) in Oberböden (0–10 cm) unter Ackernutzung und Dauergrünland; die Zahlen über den Säulen kennzeichnen jeweils die Anzahl der beprobten Standorte



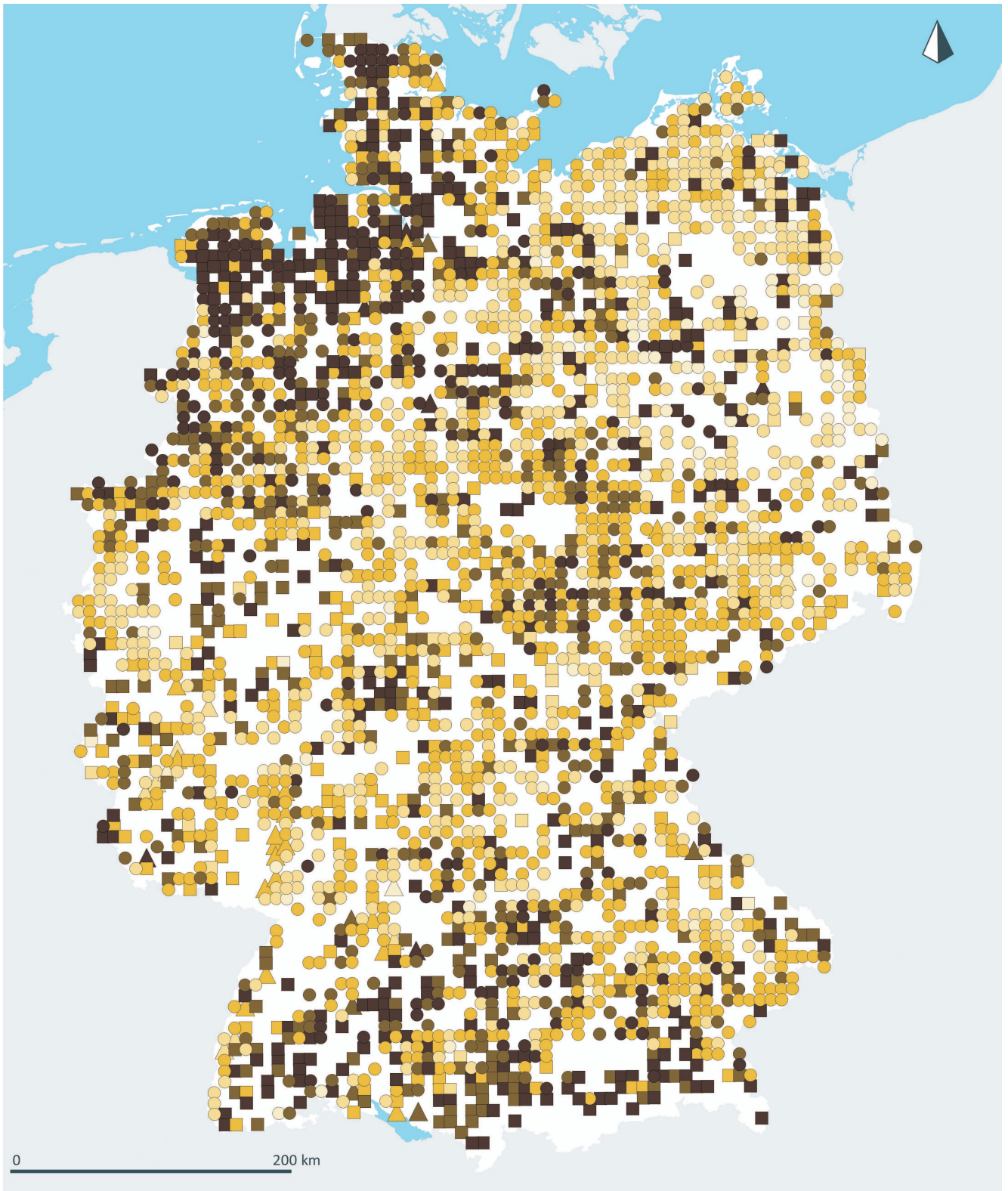
Dauergrünland. Im Durchschnitt befinden sich also rund 65 % des organischen Kohlenstoffs im Oberboden (0–30 cm) und 35 % im Unterboden (30–100 cm). Mineralische Oberböden sind generell kohlenstoffreicher als Unterböden, denn sie erhalten den meisten Kohlenstoffeintrag durch Wurzel- und Erntereste und organische Dünger. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft verdeutlichen, dass auch Unterböden maßgeblich an der Speicherung organischen Kohlenstoffs beteiligt sind. Da der organische Kohlenstoff 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 rund 6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ausmachen, heben sich unabhängig von der Nutzung sehr deutlich von den Mineralböden ab. Ihr Vorrat an organischem Kohlenstoff beträgt mit rund 507 t/ha im oberen Meter ein Vielfaches der Kohlenstoffspeicherung in Mineralböden. Viele Moore sind aber noch deutlich tiefergründiger. Moorböden, die mindestens zwei Meter mächtig sind, haben im Mittel Vorräte an organischem Kohlenstoff von 1024 t/ha in den oberen zwei Metern. Aufgrund dieser Sonderstellung der landwirtschaftlich genutzten Moorböden als Kohlenstoffspeicher ist ihnen ein extra Kapitel gewidmet („Moorbodenschutz ist Klimaschutz“ ab Seite 36).

ABBILDUNG 8: Vorräte an organischem Kohlenstoff im Oberboden (0–30 cm) und Unterboden (30–100 cm) von Mineralböden mit Ackernutzung, Dauergrünland, Anbau von Sonderkulturen sowie in landwirtschaftlich genutzten Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden (Dauergrünland und Acker). Zahlen in den Säulen kennzeichnen die Anzahl der beprobten Standorte.



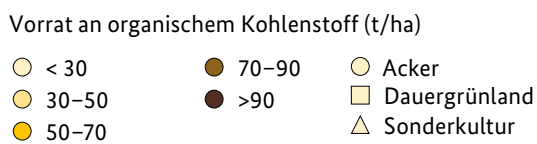
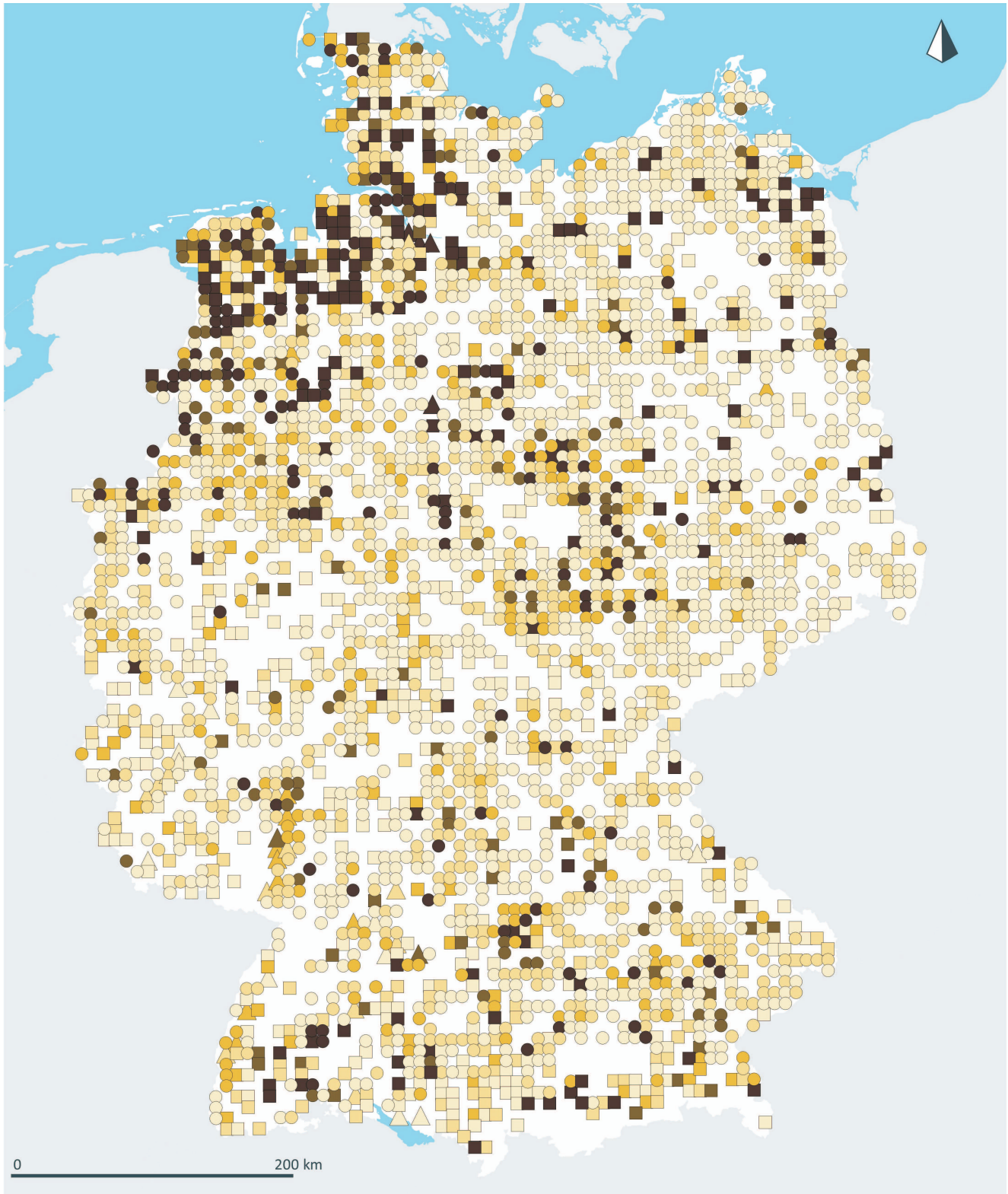
KARTE 2: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Oberböden (0–30 cm). Stand Juli 2019. Die Symbole differenzieren die Landnutzungsarten Acker, Dauergrünland und Sonderkulturen (z. B. Wein, Obstbau, Hopfen).



Vorrat an organischem Kohlenstoff (t/ha)

- | | | |
|---------|---------|-----------------|
| ○ < 30 | ● 70–90 | ● Acker |
| ○ 30–50 | ● >90 | ■ Dauergrünland |
| ○ 50–70 | | ▲ Sonderkultur |

KARTE 3: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Unterböden (30–100 cm). Stand Juli 2019. Die Symbole differenzieren die Landnutzungsarten Acker, Dauergrünland und Sonderkulturen (z. B. Wein, Obstbau, Hopfen).



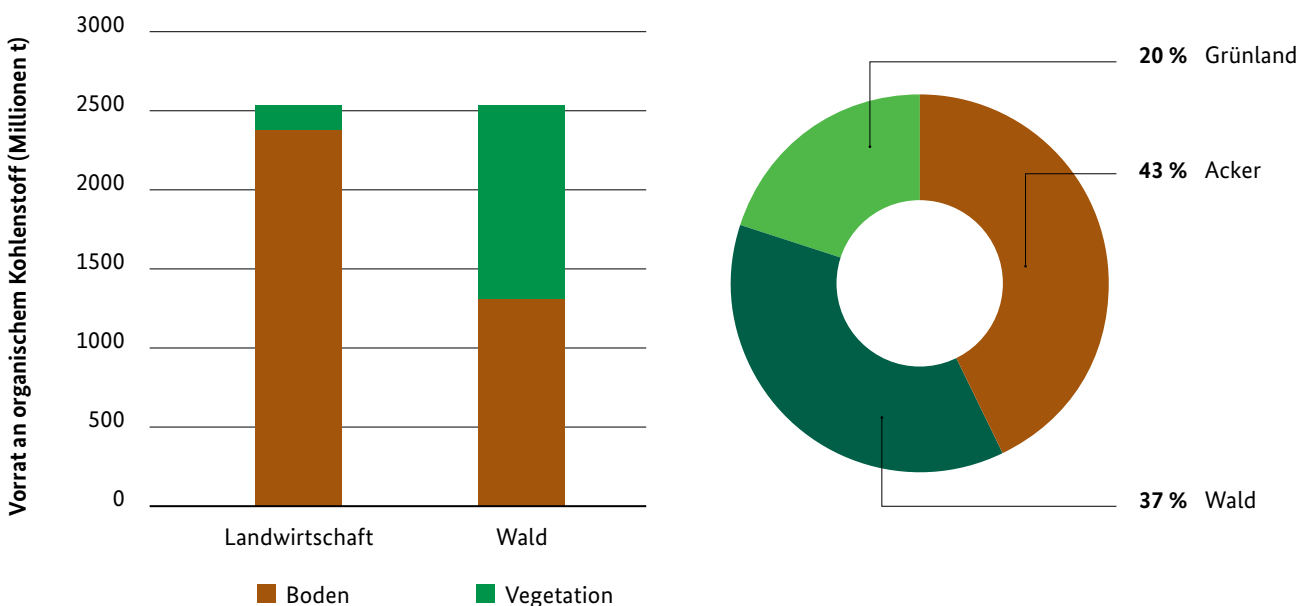
Die Verteilung von Böden mit höheren und niedrigeren Vorräten an organischem Kohlenstoff in Deutschland zeigt deutlich regionale Unterschiede, die in erster Linie durch die Vernässung (Hydromorphie) von Böden und sekundär durch die Landnutzung und weitere Bodeneigenschaften beeinflusst sind. Überdurchschnittlich hohe Vorräte an organischem Kohlenstoff im Oberboden (0–30 cm) finden sich besonders in den moorreichen Regionen (z. B. Nordwestdeutschland) sowie in den klassischen Grünlandregionen in Norddeutschland und im Voralpenland (Karte 2). Der dominierende Einfluss der Hydromorphie auf die Bodenkohlenstoffvorräte wird im Unterboden noch deutlicher. Hohe Vorräte von über 90 t ha⁻¹ sind hier oft verbunden mit dem Vorkommen von Moorböden, Auenböden und Marschen. Auch innerhalb der Mineralböden gibt es eine große Variabilität der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff. Sie reichen im oberen Meter des Bodens von unter 30 t Kohlenstoff pro ha in sandigen oder flachgründigen Böden der Jungmoränen in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern bis über 400 t Kohlenstoff pro ha in grundwasserbeeinflussten Böden in den Altmoränenlandschaften.

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft ermöglichen neue Einblicke in die Bindungsleistung terrestrischer Ökosysteme für organischen Kohlenstoff in Deutschland. In Kombination mit Ergebnissen zu den ober- und unterirdischen Kohlenstoffvorräten in den Wäldern Deutschlands (BMEL 2016) und der Erfassung der mittleren Kohlenstoffvorräte in der Biomasse landwirtschaftlichen Kulturen (NIR 2016) wurde der gesamte Vorrat in wald- und landwirtschaftlichen Ökosystemen

Deutschlands errechnet. Zusammen beträgt die aktuelle Speicherleistung dieser Ökosysteme für organischen Kohlenstoff rund fünf Milliarden Tonnen (Abbildung 9). Den höchsten Anteil hieran (ca. 48 %) haben landwirtschaftlich genutzte Böden mit rund 2,4 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Der Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden bevorratet damit mehr als doppelt so viel Kohlenstoff wie alle Bäume in den Wäldern Deutschlands zusammen. Dies ist in erster Linie auf den größeren Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen im Vergleich zur Waldfläche zurückzuführen (Abbildung 9, rechts). Bezogen auf einen Hektar und 0–90 cm Bodentiefe ergibt sich folgendes Bild: Die deutlich größten Vorräte an organischem Kohlenstoff weisen mit 181 t Böden unter Dauergrünland auf, gefolgt von Waldböden mit 100 t (BMEL 2016, Wellbrock et al. 2017) und knapp dahinter Ackerböden mit 95 t. Die hohen Vorräte an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden werden maßgeblich durch ihre Tiefgründigkeit und die größeren Anteile an grundwasserbeeinflussten Böden mit sehr hohen Kohlenstoffvorräten (z. B. Moorböden und moorähnliche Böden) verursacht.

Die Bedeutung dieser Vorräte im Kontext Klimaschutz wird deutlich, wenn sie in Bezug zu den aktuellen CO₂-Emissionen Deutschlands (219 Millionen Tonnen CO₂-Kohlenstoff im Jahr 2016, Umweltbundesamt 2018) gesetzt werden. Die Wald- und Agrarökosysteme speichern zusammen so viel organischen Kohlenstoff wie Deutschland bei dem derzeitigen Emissionsniveau in 23 Jahren als CO₂ emittiert. Die Zahlen verdeutlichen die Verantwortung, diese Vorräte an organischem Kohlenstoff durch eine nachhaltige Nutzung zu sichern und, wo möglich, zu mehr.

ABBILDUNG 9: Gesamter Vorrat an organischem Kohlenstoff in der Vegetation und in den Böden (Landwirtschaft: 0–90 cm, Wald: 0–90 cm plus Humusaufgabe) von landwirtschaftlich genutzten Flächen und Wäldern in Deutschland (links) sowie relative Flächenanteile von Böden unter Wald, Acker und Dauergrünland (rechts: 100 % = Wald + landwirtschaftlich genutzte Fläche). Datenquellen: Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (2018); BMEL (2016); Roßkopf et al. 2015, ATKIS® Basis-DLM 2016.



4

Was bestimmt die Variabilität der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff?

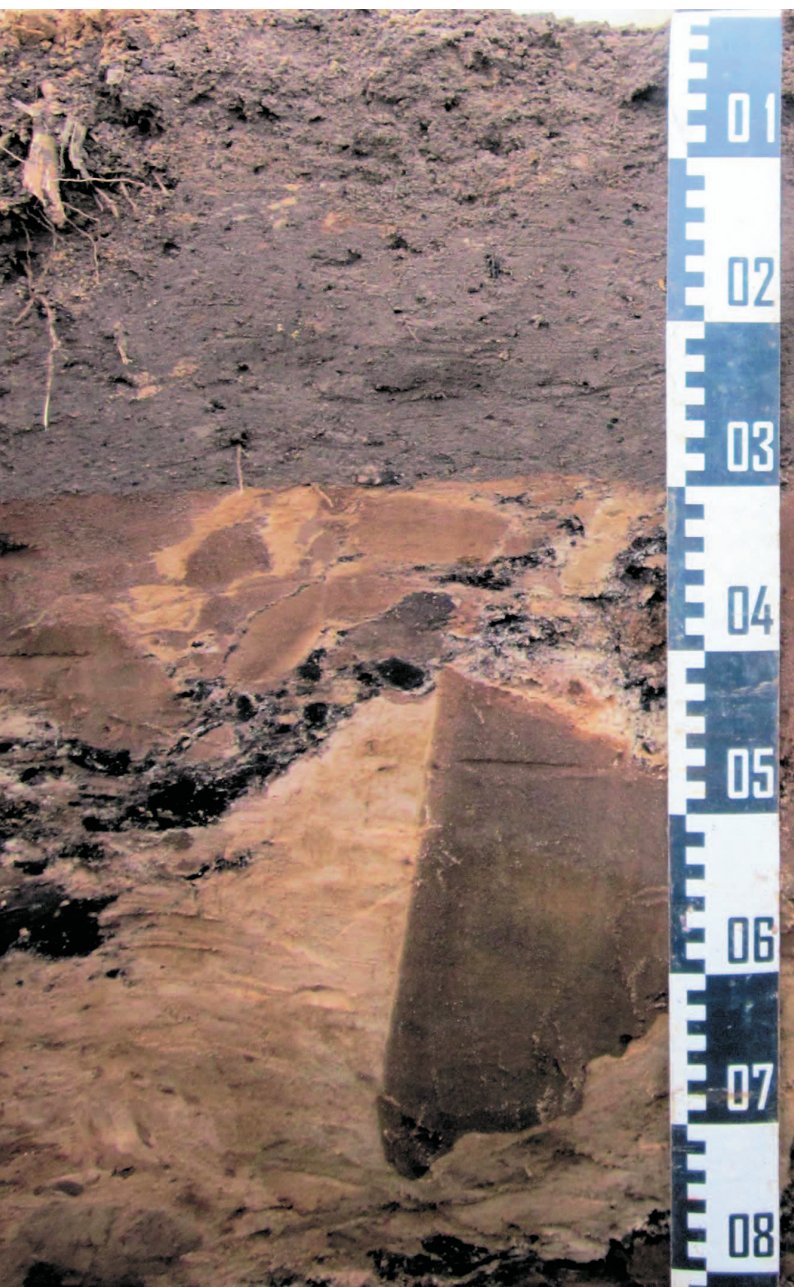
Die Humusvorräte, und damit der organische Bodenkohlenstoff, in den landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands sind so variabel, dass sich von einem beprobten Boden nicht auf die im Umkreis von acht Kilometern nächstgelegenen Standorte und ihre Humusvorräte schließen lässt. Was verursacht diese große Variabilität?



Sonderstellung Moorböden

Am deutlichsten ist der prägende Einfluss der Wassersättigung auf den Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff. Wo sich unter dem Einfluss anhaltender Wassersättigung und Sauerstoffmangel Moore gebildet haben, weisen die Böden mit Abstand die höchsten Vorräte an organischem Kohlenstoff auf (Abbildung 8 und Kapitel 8 „Moorbodenschutz ist Klimaschutz“).

ABBILDUNG 10: Treposol (Tiefumbruchboden); Treposole gehören zu den stark durch den Menschen geprägten Böden, die einen deutlich sichtbaren Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Humusvorrat im Unterboden aufweisen. Rund 3 % der Ackerböden in Deutschland sind Tiefumbruchböden.



Variable Vorräte an organischem Kohlenstoff in Mineralböden

Die Ursachen für die unterschiedlich hohen Vorräte an organischem Kohlenstoff in den sogenannten „Mineralböden“, die über 90 % der landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland stellen, sind sehr komplex. Um ihnen auf die Spur zu kommen, wurden die Beziehungen zwischen dem Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff und potenziellen Einflussgrößen wie Klimavariablen (z. B. Niederschlag, Temperatur, Verdunstung), Bodenfaktoren (z. B. Textur, Lage im Gelände, Ausgangsmaterial, Grundwassereinfluss) sowie verschiedenen Bewirtschaftungsfaktoren (z. B. Bodennutzung, organische Düngung, Fruchtfolge) mit einem statistischen Verfahren geprüft.

Die Analysen zeigen, dass in verschiedenen Bodentiefen unterschiedliche Einflussgrößen relevant sind (Abbildung 12). In den obersten 10 cm der Böden besteht eine sehr enge Beziehung zwischen der Landnutzungsart (Grünland, Grünland-Wechselwirtschaft oder Acker) und den Vorräten an organischem Bodenkohlenstoff. Bereits in 10–30 cm Bodentiefe bilden Bodeneigenschaften die wichtigsten Einflussfaktoren und die Nutzungsart und Bewirtschaftungsfaktoren stehen nur an zweiter Stelle. Entscheidend sind nun Faktoren wie die Textur des Bodens und der Grundwassereinfluss. Mit fortschreitender Bodentiefe dominieren die durch das geologische Ausgangsmaterial geprägten Bodeneigenschaften. Keine Regel ohne Ausnahme: An ca. 15 % der Beprobungspunkte fanden sich Böden, die durch menschliche Eingriffe in ihrem Aufbau grundlegend verändert sind. Dies sind z. B. Böden, die tief gepflügt oder mit Sand künstlich überdeckt wurden. In diesen Böden reicht der Einfluss des Menschen auf die Humusvorräte bis in den Unterboden (Beispiel in Abbildung 10).

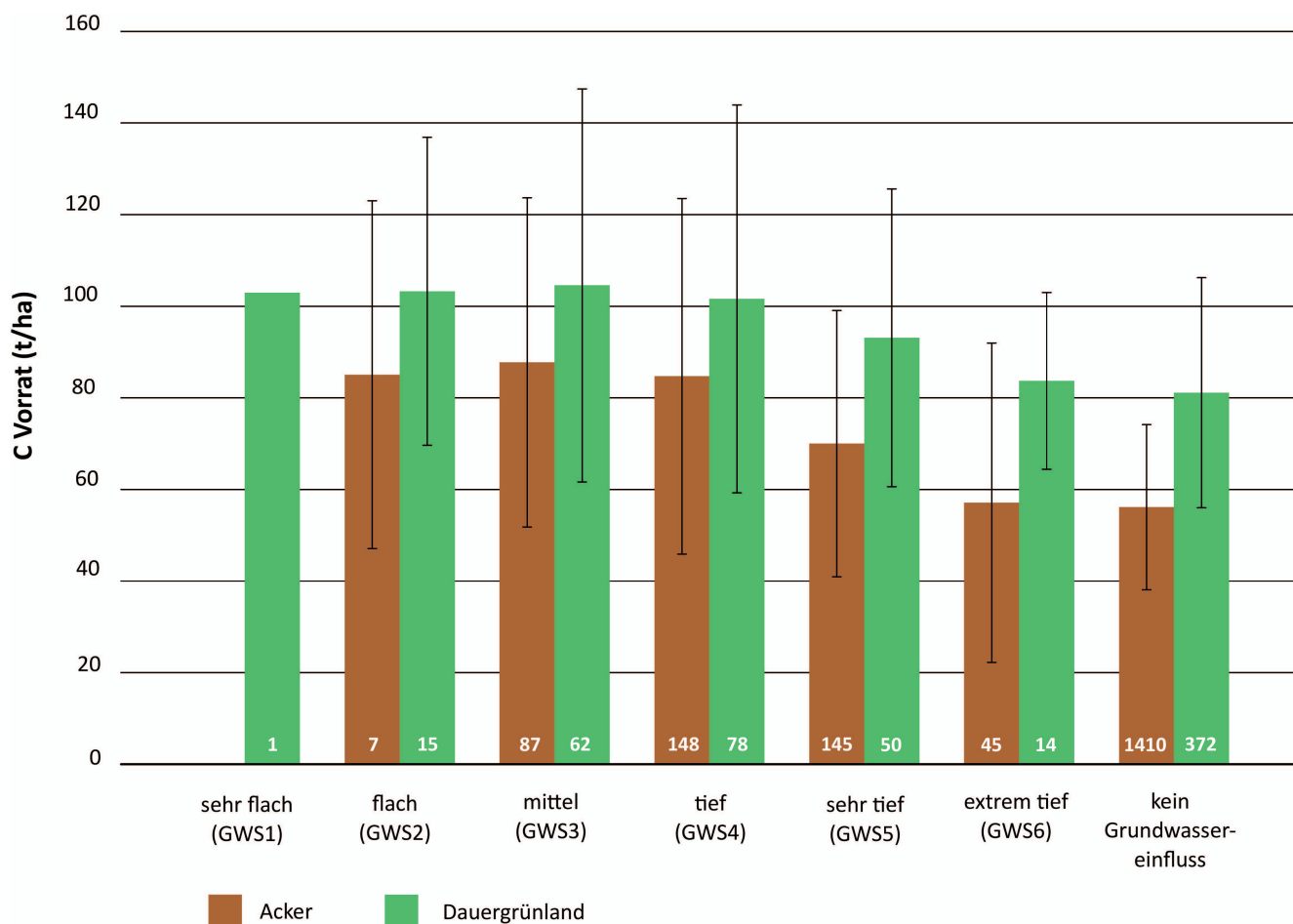
Da die Einflussgröße Landnutzungsart (Acker oder Dauergrünland) enge Beziehungen zu Standort- und Bodeneigenschaften aufweist, wurde die Variabilität der Bodenkohlenstoffvorräte auch getrennt für die Nutzungsarten Acker und Dauergrünland ausgewertet. Innerhalb dieser Nutzungsklassen sind in erster Linie Bodeneigenschaften für die Variabilität des organischen Bodenkohlenstoffs verantwortlich – allen voran der Tongehalt des Bodens. Tonreiche Böden (> 45 % Ton) haben im Mittel doppelt so viel organischen Kohlenstoff im Oberboden gespeichert wie sehr sandige Böden (< 12 % Ton). Auch Grundwassereinfluss prägt die Bodenkohlenstoffvorräte unter Grünland- bzw. Ackernutzung: Grundwassernahe Standorte in Senken und entlang von Flussläufen mit einem mittleren Grundwasserstand oberhalb von 80 cm Bodentiefe speichern im Oberboden im Mittel 87 t organischen Kohlenstoff pro Hektar in Ackerböden und 104 t pro Hektar in

WAS BESTIMMT DIE HUMUSVORRÄTE IN MINERALBÖDEN?

In landwirtschaftlich genutzten Mineralböden werden Humusvorräte in erster Linie durch Boden- und Standortfaktoren bestimmt. Zentrale Einflussgrößen sind der Tongehalt und Faktoren, die den Wassergehalt im Boden prägen. Wichtigster Managementfaktor ist die Nutzungsart als Acker bzw. Dauergrünland, die besonders den Humusvorrat des Oberbodens prägt. Innerhalb der jeweiligen Nutzungsarten können die Humusvorräte nur in begrenztem Umfang durch Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst werden.

Grünlandböden – dies sind 43 % bzw. 18 % mehr als der mittlere Vorrat an organischem Kohlenstoff in Acker- und Grünlandböden bei durchschnittlichem Grundwasserstand (Abbildung 11). Zwischen den verschiedenen Mineralbodentypen ohne Grundwassereinfluss gab es keine deutlichen Unterschiede. Es zeigte sich, dass die Art der Bewirtschaftung innerhalb der Nutzungsklassen Grünland und Acker nicht zu den zentralen Einflussgrößen für die Variabilität der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff auf nationaler Skala zählt.

ABBILDUNG 11: Vorrat an organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Oberboden (0–30 cm) in Mineralböden unter Acker- und Dauergrünlandnutzung bei verschiedenen Grundwasserstufen (GWS) nach Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) (Mittelwerte mit Standardabweichung)

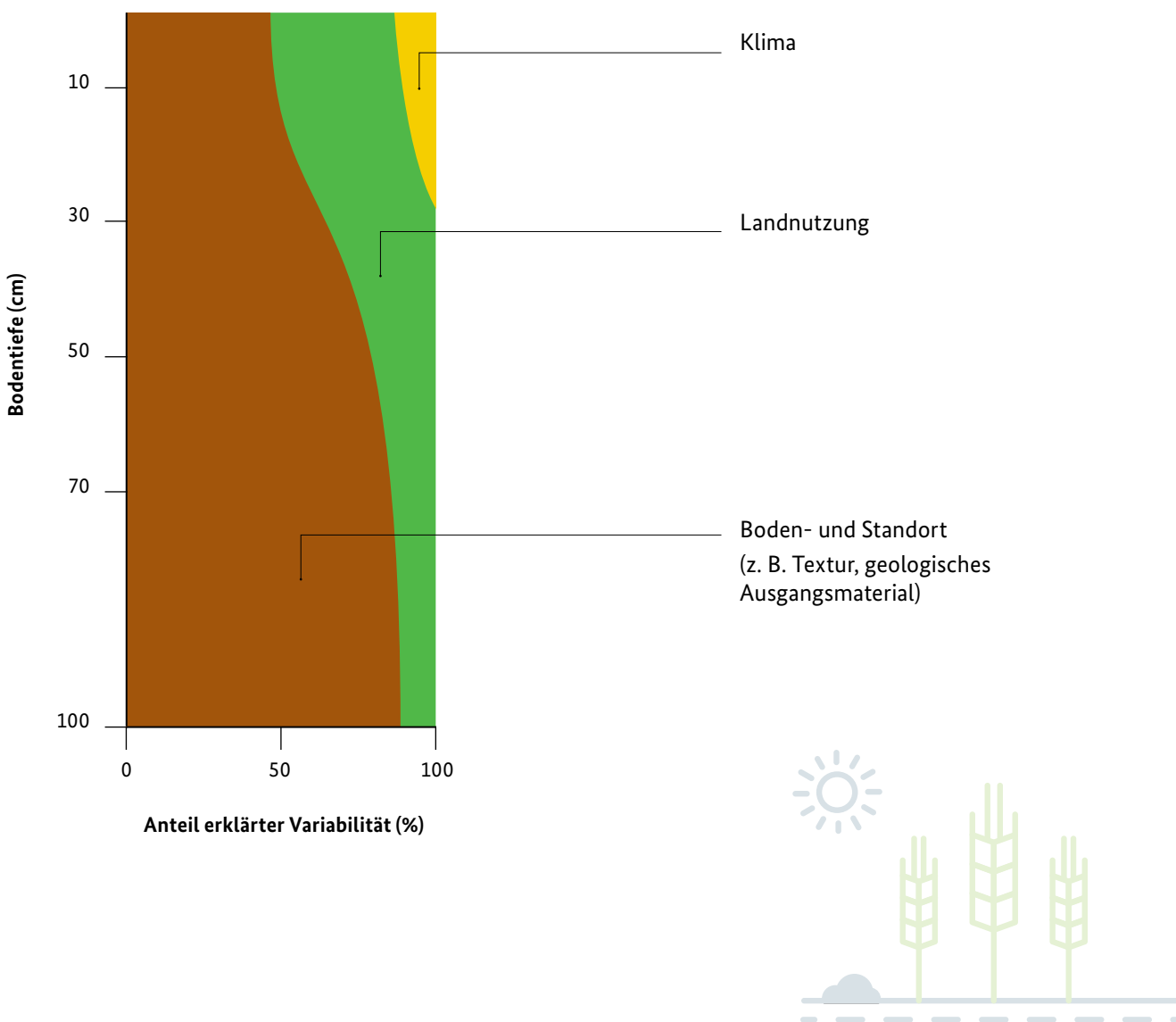


Den geringsten Erklärungsgehalt für die Variabilität von organischem Bodenkohlenstoff hatten die Klimafaktoren (Abbildung 12). Nur der Jahresniederschlag konnte einen kleinen Teil der vorhandenen Unterschiede erklären, wobei höherer Niederschlag mit erhöhten Bodenkohlenstoffvorräten einherging. Für Veränderungen des Vorrates an organischem Bodenkohlenstoff sind Klimafaktoren jedoch sehr bedeutsam: Klimaänderungen, wie steigende Temperaturen und abnehmende Niederschläge in der Vegetationszeit, können über ihren Einfluss auf die landwirtschaftlichen Erträge und die Mineralisation von organischem Bodenkohlenstoff zu deutlichen

Veränderungen der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff führen. Die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel leistet folglich auch einen Beitrag zum Humuserhalt.

Die Zusammenhänge auf der Skalenebene „Deutschland“ sollen nicht den Blick auf die einzelnen Standorte ersetzen, denn hier spielen die Landnutzung und Bewirtschaftung eine wichtige Rolle (siehe Kapitel 7 „Humusmanagement – welche Maßnahmen haben Potential?“) und beeinflussen, ob und in welche Richtung sich die Humusvorräte verändern (siehe Kapitel 6 „Nehmen Humusvorräte zu oder ab?“).

ABBILDUNG 12: Einfluss von Bodeneigenschaften, Landnutzungsart und Bewirtschaftung sowie Klimavariablen auf die Variabilität (erklärter Anteil) der Vorräte an organischem Kohlenstoff in verschiedenen Tiefen landwirtschaftlich genutzter Mineralböden in Deutschland



5

Humus hat Geschichte

Mitteleuropa hat eine über tausend Jahre alte Kulturlandschaft. Der Großteil der deutschen Landesfläche befindet sich seit langer Zeit in land- oder forstwirtschaftlicher Nutzung, die von Standorteigenschaften, jedoch auch stark von sozio-ökonomischen Bedingungen der jeweiligen Zeit und Region bestimmt war und ist. So haben viele Böden im Laufe der Zeit einen Landnutzungswandel erfahren.



Wie bereits gezeigt, hat die Landnutzung (Acker bzw. Grünland) einen starken Einfluss auf Humusvorräte im Oberboden. Des Weiteren ist bekannt, dass Prozesse im Boden langsam ablaufen und Humusvorräte sich erst Jahrzehnte nach starken Eingriffen wie Landnutzungsänderungen wieder dem neuen Gleichgewicht annähern (Poeplau et al. 2011). Am Beispiel der Beprobungspunkte auf Mineralböden der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft in Niedersachsen wurde untersucht, inwieweit sich die Nutzungsgeschichte der Böden in den aktuellen Bodeneigenschaften widerspiegelt.

Im Kartenarchiv des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen wurde die Nutzungshistorie für insgesamt fünf Zeitpunkte bzw. -intervalle für jeden Beprobungspunkt ermittelt: um 1750–1800, um 1870–1910, um 1950, um 1970 und um 1990. Wie in Abbildung 13 deutlich zu erkennen ist, hat sich die Landnutzung im Laufe der letzten drei

Jahrhunderte stark gewandelt. Insgesamt wurde für 73 % aller beprobten Standorte in Niedersachsen mindestens eine Landnutzungsänderung festgestellt. Vor allem die Ackernutzung nahm kontinuierlich zu. Aktuell werden 79 % der beprobten Standorte ackerbaulich genutzt. Seit 1970 und 1990 bis zur Probenahme durch die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft haben die Punkte, die als Acker genutzt werden, um 21 bzw. 8 % zugenommen. Viele der heutigen Acker- und Grünlandstandorte der niedersächsischen Geest befinden sich auf ehemaligen Moor- oder Heidestandorten (Abbildung 13). Die meist sandigen Böden dieser Standorte zeichnen sich durch auffallend weite Kohlenstoff-zu-Stickstoff-Verhältnisse (C/N) aus, was durch einen höheren Anteil an schwach zersetzten Pflanzenresten zu erklären ist. Auch ihre Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff waren im Vergleich zu ähnlich sandigen Böden ohne Heide- oder Moorvegetationsvergangenheit erhöht (signifikant für ehemalige Moorvegetation, tendenziell für ehemalige Heideflächen).

ABBILDUNG 13: Relative Anteile der historischen sowie aktuellen Landnutzung der Beprobungspunkte auf Mineralböden in Niedersachsen; Datenquelle: Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen

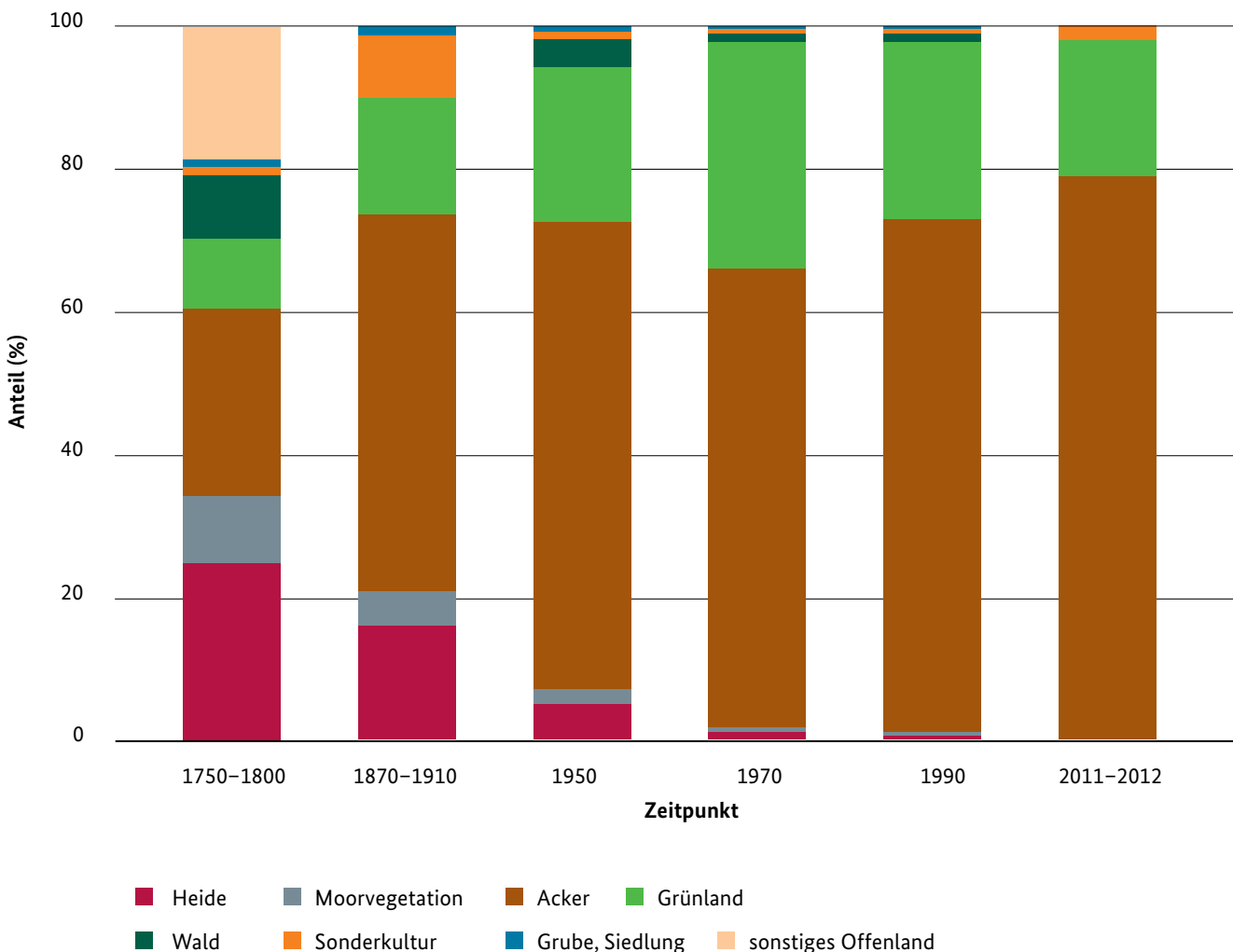
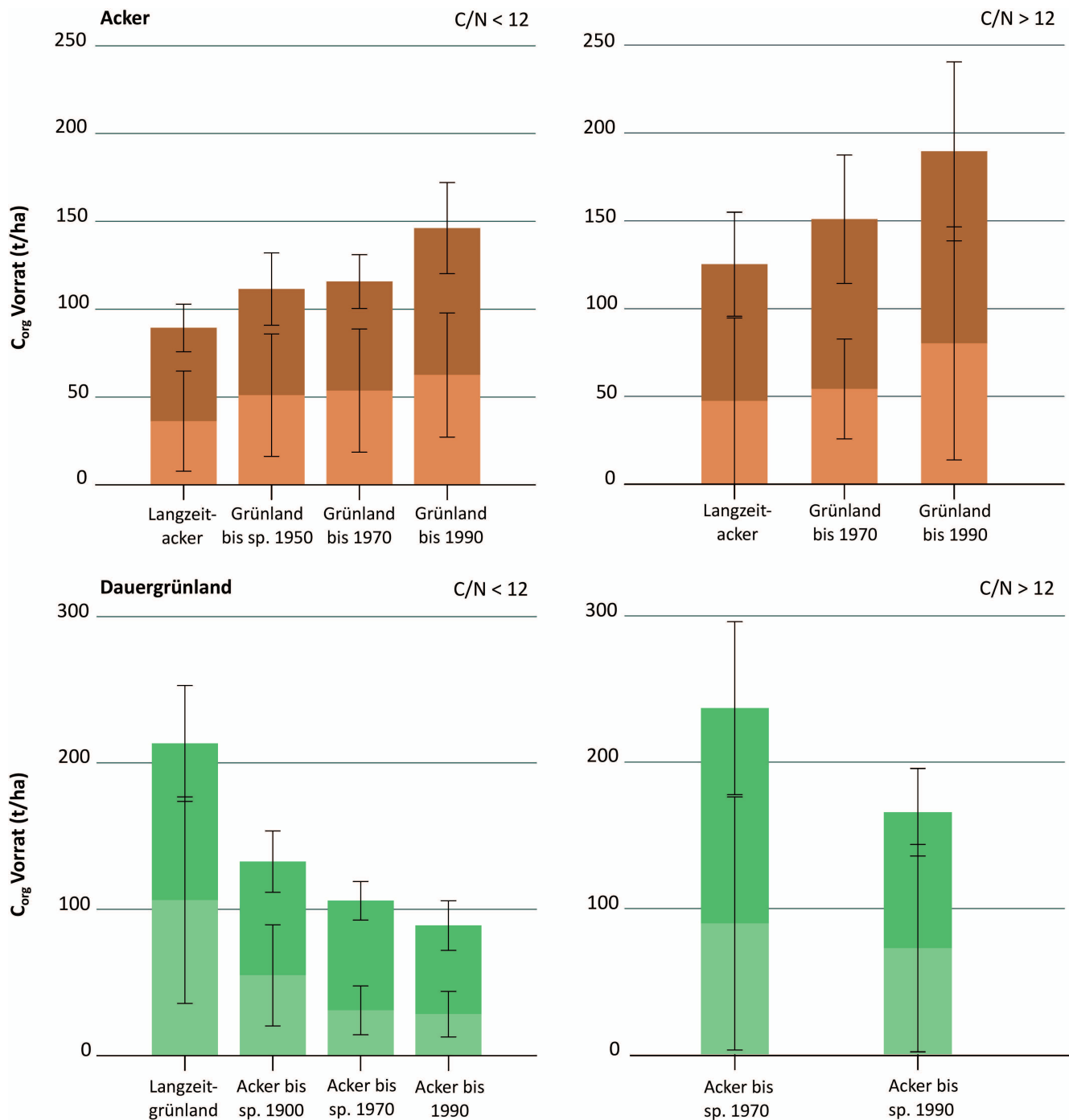
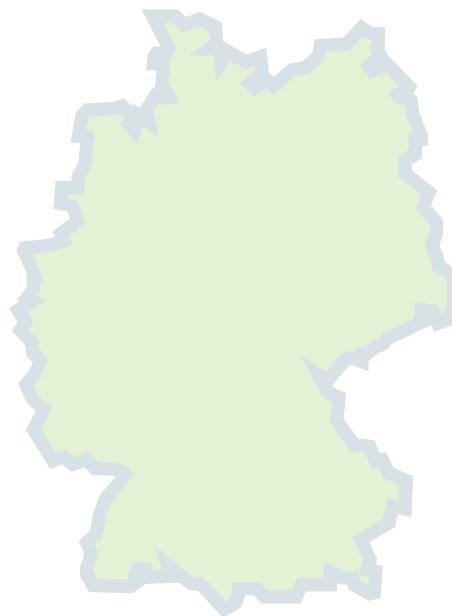


ABBILDUNG 14: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Acker- und Grünlandböden mit unterschiedlich lang zurückliegender Grünland- und Ackervornutzung und unterschiedlichem aktuellem C/N-Verhältnis in 0–30 cm Tiefe (dunkler) und 30–100 cm Tiefe (heller). Die Bezeichnung „Bis sp.“ (bis spätestens) deutet an, dass in der entsprechenden Vornutzungskategorie verschiedene Umnutzungszeitpunkte zusammengefasst wurden. Fehlerbalken sind Standardabweichungen.



Sowohl für die aktuellen Acker- als auch die aktuellen Grünlandstandorte zeigten sich deutliche Einflüsse der Landnutzungsgeschichte auf die aktuellen Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff (Abbildung 14). Auch der Zeitpunkt der letzten Nutzungsänderung spielte eine entscheidende Rolle. Je länger der Wechsel zu Acker bzw. zu Grünland zurücklag, desto niedriger bzw. höher war der aktuelle Humusvorrat. Böden unter Dauergrünland ohne Ackervorgeschichte (hier bezeichnet als Langzeitgrünland) haben die höchsten Vorräte an organischem Kohlenstoff (218 t C/ha in 0-100 cm Tiefe) und Ackerböden ohne frühere Grünlandnutzung (hier bezeichnet als Langzeitacker) weisen die niedrigsten Vorräte auf (89 t C/ha in 0-100 cm Tiefe für Böden mit einem engeren C/N-Verhältnis kleiner 12 und 125 t C/ha für Böden mit einem weiteren C/N-Verhältnis größer zwölf). Im Gegensatz dazu weisen junge Grünländer, die aus Äckern entstanden sind, die niedrigsten Vorräte an organischem Kohlenstoff von Grünländern auf (Abbildung 14). Dies verdeutlicht, dass die Nutzungshistorie über sehr lange Zeiträume hinweg (>100 Jahre) auf die Humusvorräte wirken kann. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass weitere Standortunterschiede zwischen den Böden mit unterschiedlicher Nutzungshistorie zu den Ergebnissen beigetragen haben. So hatten Langzeitgrünländer etwa im Mittel den höchsten Tongehalt, was darauf hindeutet, dass besonders schwere Böden nicht ackerbaulich genutzt wurden. Auch die sehr hohen Vorräte an organischem Kohlenstoff im

Unterboden der Langzeitgrünländer weisen darauf hin, dass diese Standorte einen deutlichen Grundwassereinfluss aufweisen und deshalb keine Ackernutzung stattfand. Die Tatsache, dass Böden mit $C/N > 12$ tendenziell höhere Humusvorräte aufwiesen als Böden mit $C/N < 12$ (Abbildung 14), weist auf die anhaltende Wirkung von Heide- und Moorvegetation sowie Plaggenwirtschaft hin. Die Streu und Biomasse von Heide- und Hochmoorvegetation sind oft stickstoffarm, haben ein weites C/N-Verhältnis und sind schlecht abbaubar. Auch wenn im Rahmen dieser Auswertung keine eindeutige Trennung der Wirkungen unterschiedlicher Nutzungsgeschichte und unterschiedlicher Standorteigenschaften möglich ist, verdeutlichen die Ergebnisse, dass sowohl für die Bewertung bestehender Humusvorräte als auch für die Bewertung ihrer potenziellen Veränderung Kenntnisse über die Nutzungshistorie erforderlich sind.



6

Nehmen die Humusvorräte zu oder ab? – Abschätzungen durch Modelle



Entwässerte und landwirtschaftlich genutzte Moorböden verlieren große Mengen an organischem Kohlenstoff (siehe Kapitel 8 „Moorbodenschutz ist Klimaschutz“). Für mineralische Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung in Deutschland ist bisher nicht klar, ob sich die Humusvorräte im Gleichgewicht befinden oder ob sie sich verändern.

Um erste Abschätzungen zu möglichen Veränderungen zu erhalten, wurde mit fünf verschiedenen Bodenkohlenstoffmodellen (siehe Kasten) in Kombination mit verschiedenen Funktionen zur Abschätzung des Eintrags an organischem Kohlenstoff aus Wurzeln und Streu ermittelt, ob sich die aktuellen Vorräte an organischem Kohlenstoff im Oberboden (0–30 cm) im Gleichgewicht mit der derzeitigen Nutzung und den aktuellen Klima- und Standortbedingungen befinden. Die Prüfung der geeignetsten Modellkombinationen erfolgte anhand der Ergebnisse von Bodendauerbeobachtungsflächen in Deutschland.

EINGESETZTE BODENKOHLENSTOFFMODELLE

- C-Tool: einfaches dänisches Bodenkohlenstoffmodell (Taghizadeh-Toosi et al. 2014 und 2016)
- CCB: deutsches Bodenkohlenstoffmodell (Franko et al. 2011)
- ICBM: einfaches schwedisches Bodenkohlenstoffmodell (Andren & Kätterer 1997)
- Yasso07: finnisches Bodenkohlenstoffmodell, ursprünglich für Waldböden entwickelt (Tuomi et al. 2009 und 2011)
- RothC: britisches Bodenkohlenstoffmodell für landwirtschaftliche Böden (Coleman & Jenkinson 1995)
- Century: US-amerikanisches Bodenkohlenstoffmodell als Teil eines Ökosystemmodells (Parton et al. 1994)

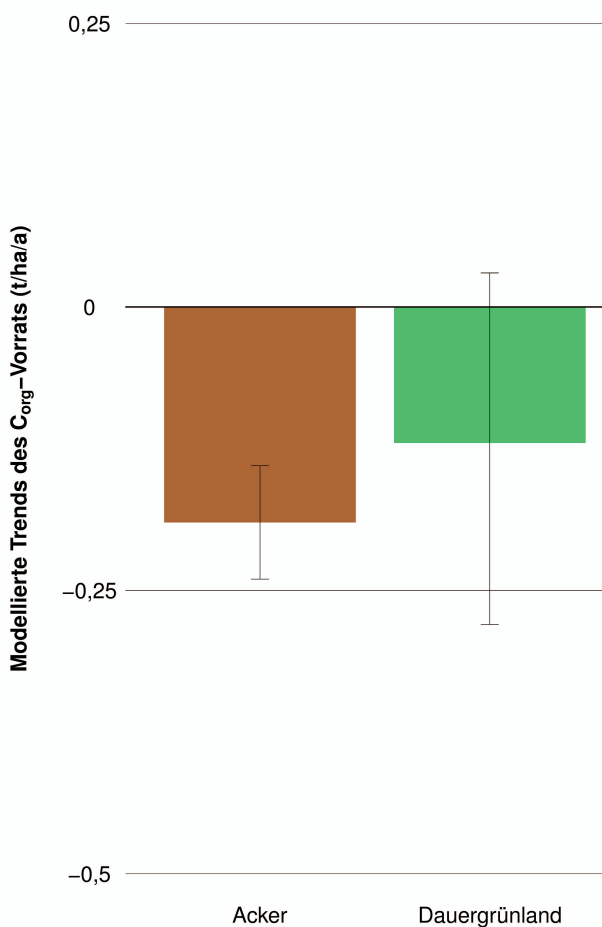
Die Modelle gehen alle davon aus, dass sich für jeden Boden unter konstanten Klima- und Bewirtschaftungsbedingungen langfristig ein Gleichgewichtswert des Kohlenstoffvorrates einstellt. Unter Gleichgewichtsbedingungen versorgen Erntereste und organische Düngung den Boden mit exakt der Menge an organischem Kohlenstoff, die über die Mineralisierung wieder verloren geht. Liegt der modellierte Vorrat im Gleichgewichtszustand über dem heutigen Messwert der Bodenzustandserhebung, dann ist die Modellaussage „der Boden reichert tendenziell organischen Kohlenstoff an“ – umgekehrt würde er Kohlenstoff verlieren.

Der Gültigkeitsbereich der verwendeten Bodenkohlenstoffmodelle ist eingeschränkt: Sie gelten nicht für Böden mit deutlichem Grundwassereinfluss. Daher wurden Standorte mit einer Grundwasserstufe kleiner oder gleich drei (mittlerer Grundwasserstand oberhalb 80 cm Bodentiefe) von der Modellierung ausgeschlossen. Weiterhin wurden Standorte mit Landnutzungsänderungen innerhalb der letzten 60 Jahre und Standorte mit Heide- und Moorvergangenheit nicht berücksichtigt (siehe Kapitel „Humus hat Geschichte“). Die Ergebnisse zeigten im Mittel für ganz Deutschland eine deutliche Differenzierung nach der Landnutzung: Für die mineralischen Böden ohne deutlichen Grundwassereinfluss unter Dauergrünlandnutzung weisen die Modelle im Mittel keine Veränderung des Vorrates an organischem Bodenkohlenstoff aus, die vorhandenen Vorräte liegen überwiegend nahe am Gleichgewichtswert (Abbildung 15). Das heißt, die Grünlandböden behalten im Mittel bei der aktuellen Nutzung und der Annahme gleichbleibender Klimabedingungen die aktuell vorhandenen Kohlenstoffvorräte. Für Ackerböden zeigen die Modelle im Mittel einen Verlust an organischem Kohlenstoff in Höhe von 0,19 t/ha/a für die nächsten zehn Jahre. An einzelnen Standorten werden die Prognosen jedoch recht unsicher. Deutlich wurde auch, dass sich die Ackerböden sehr unterschiedlich verhalten: Für 90 % der Standorte zeigen die Modelle keine signifikante Veränderung des Vorrats an organischem Bodenkohlenstoff, an 9 % der Standorte wird ein Verlust vorhergesagt und für 1 % der Ackerböden prognostizieren die Modelle eine Zunahme des Vorrats an organischem Kohlenstoff im Oberboden.



Im gesamten Bundesgebiet finden sich sowohl kohlenstoffverlierende als auch kohlenstoffanreichernde Böden. Die Modellergebnisse zeigen, dass die Gefahr für Humusverluste an Standorten mit geringen Einträgen an organischem Kohlenstoff und relativ hohen

ABBILDUNG 15: Modellerte mittlere Änderungen der Vorräte an organischem Kohlenstoff in Mineralböden (0–30 cm) ohne deutlichen Grundwassereinfluss unter Acker- und Grünlandnutzung bei konstanter Bewirtschaftung und konstantem Klima; Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall



Humusvorräten erhöht ist. Auch geringe Ton- und hohe Sandgehalte begünstigen den Humusverlust. Am deutlichsten fallen die modellierten Verluste an organischem Kohlenstoff in den Ackerböden der neuen Bundesländer aus, die im Mittel relativ geringe Einträge an organischem Kohlenstoff über Pflanzenreste und organische Wirtschaftsdünger aufweisen. Die geringeren Kohlenstoffeinträge über Erntereste stehen in Zusammenhang mit einer geringeren Wasserverfügbarkeit auf den niederschlagsärmeren und oft sandigen Standorten Ostdeutschlands. Die Ergebnisse werfen jedoch auch die Frage auf, inwieweit sich die Humusvorräte in den Ackerböden Ostdeutschlands im Zuge der Neustrukturierung der Landwirtschaft nach der Wiedervereinigung mit einem starken Rückgang der Nutztierhaltung und des Feldfutterbaus insgesamt verändert haben und möglicherweise noch verändern.

Die Modellergebnisse geben wichtige Hinweise über mögliche Entwicklungen des organischen Bodenkohlenstoffs in Acker- und Dauergrünlandböden, sie sind jedoch kein Ersatz für verlässliche Bodenuntersuchungen. Die Frage, ob und wie stark landwirtschaftlich genutzte Mineralböden in Deutschland unter der aktuellen Bewirtschaftung Humus verlieren oder aufbauen, kann mit Sicherheit erst im Zuge regelmäßiger und standardisierter Wiederholungsbeprobungen an den Standorten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft beantwortet werden. Dazu sind Untersuchungsserien in zehnjährigem Abstand erforderlich.



7

Humusmanagement – welche Maßnahmen haben Potenzial?

Die Höhe der Humusvorräte in unseren Böden wird in erster Linie durch Standortfaktoren beeinflusst. Auf der einzelnen Fläche bestimmen darüber hinaus die landwirtschaftliche Nutzung und Bewirtschaftung die Humusvorräte.



Für den Erhalt und Aufbau von Humus gibt es viele gute Gründe: Die Förderung der Bodenfruchtbarkeit und Ertragsicherheit, den Bodenschutz und auch den Klimaschutz. Wie kann die Landwirtschaft die vorhandenen Humusvorräte in Mineralböden nachhaltig sichern und wie den Humusaufbau fördern?

Erhalt von Dauergrünland

Böden unter Dauergrünland haben im Mittel höhere Humusvorräte als vergleichbare Böden unter Ackernutzung. Dies zeigt sich besonders im Oberboden (Abbildung 16). Der ganzjährige Bewuchs, eine intensive Durchwurzelung sowie der übliche Einsatz von organischen Düngern führen auf vergleichbaren Standorten dazu, dass die Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff unter Acker rund ein Drittel niedriger sind als bei Grünlandnutzung (Poepplau et al. 2011). Der Erhalt von Dauergrünland ist besonders auf humusreichen Standorten ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz. Auch die gezielte Umwandlung von Acker in Dauergrünland, beispielsweise als Maßnahme für den Gewässer- und Erosionsschutz, kann durch Humusaufbau einen zusätzlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Maßnahmen auf dem Acker

Ein entscheidender Faktor für die Höhe der Humusvorräte ist die Menge und Zusammensetzung der Einträge an organischer Substanz über oberirdische und unterirdische Erntereste sowie organische Dünger wie Mist, Gülle, Gärreste und Kompost. Im Mittel bleiben auf deutschen Äckern jährlich rund 1,6 t C/ha als Wurzelstreu und 1,5 t C/ha als oberirdische Streu (Stoppeln und Stroh). Nur rund 10–20 % dieser Pflanzenreste werden längerfristig als Humus im Boden stabilisiert. Dennoch sind es in erster Linie die Pflanzenrückstände und ganz besonders die Wurzeln, die für den Humusaufbau entscheidend sind. Der Landwirt hat verschiedene Möglichkeiten, den Humusaufbau über den Eintrag von Pflanzenresten zu fördern: Zu den Wichtigsten gehören der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten für eine möglichst ganzjährige Begrünung des Bodens (Abbildung 17), der Anbau mehrjähriger Kulturen wie z. B. Klee gras, der Verbleib von Ernteresten auf dem Acker sowie ein hohes und sicheres Ertragsniveau, das auch die Erzeugung von Ernterückständen einschließt. Durch langjährigen Zwischenfruchtanbau konnten die Vorräte an organischem Kohlenstoff in Ackerböden innerhalb von 20 Jahren im Mittel um 8 t C/ha im Oberboden gesteigert werden (Poepplau & Don 2015) (Abbildung 18, mittlere Vorratsänderung: 0,4 t C_{org} pro Hektar und Jahr).

Auch die organische Düngung mit z. B. Mist, Gülle oder Gärresten beeinflusst die Menge an organischem Kohlenstoff, die zum Humusaufbau zur Verfügung steht. Sie ist

ABBILDUNG 16: Böden unter Dauergrünland speichern mehr Bodenkohlenstoff als Ackerböden



ABBILDUNG 17: Zwischenfruchtanbau im Herbst mindert die Nitratauswaschung und fördert den Humusaufbau



die zentrale Stellschraube für das Nährstoffrecycling in der Landwirtschaft und bringt auch organischen Kohlenstoff, der mit der Ernte entzogen wurde, wieder zurück auf die Äcker. Organische Düngung, insbesondere von Stallmist und Kompost, kann wesentlich zum Aufbau von Humus beitragen mit langfristig 2 bis 22 t/ha mehr Kohlenstoff im Vergleich zu Ackerböden ohne organische Düngung (Körschens et al. 2015). Die Verfügbarkeit dieser Dünger ist jedoch regional sehr unterschiedlich. Sie konzentriert sich auf Gegenden mit Nutztierhaltung. Nur rund 70 % der Äcker in Deutschland werden mit organischen Düngern versorgt. Auf der anderen Seite gibt es Regionen, in denen Überschüsse an organischen Düngern die Nährstoffbilanzen aus dem Gleichgewicht bringen mit erheblichen negativen Umweltfolgen. Regionale und überregionale Nährstoffkonzepte sind daher auch eine wichtige Basis für ein optimiertes Humusmanagement.

Im ökologischen Landbau wird ausschließlich organischer N-Dünger und kein mineralischer N-Dünger eingesetzt. Außerdem werden mehr Klee gras oder Luzerne gras als

stickstofffixierende und humusmehrende Kulturen angebaut. Zusammen ergibt sich dadurch im globalen Durchschnitt eine Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte um etwa 3 bis 4 t/ha im Vergleich zu konventionell bewirtschafteten Böden (Gattinger et al. 2012).

BEIM HUMUSMANAGEMENT GILT:

- Vorhandene Humusvorräte schützen
- Nährstoffüberschüsse vermeiden
- Nährstoffe recyceln und Dünger sparen
- Positive Humuswirkungen optimal nutzen

MASSNAHMEN MIT POTENZIAL FÜR MINERALBÖDEN

Ackerbau:

- Verbleib, Rückführung von Ernteresten
- Zwischenfruchtanbau und Untersaaten
- Mehrjährige Kulturen
- Ganzjährige Begrünung
- Organische Düngung
- Anlage von Hecken und Feldgehölzen

Grünland:

- Erhalt von Dauergrünland
- Organische Düngung
- Umwandlung von Acker in Grünland
- Anlage von Hecken oder Baumreihen

Alle diese Maßnahmen wirken in erster Linie über den erhöhten Eintrag an organischem Kohlenstoff humusaufbauend. Ihr Potenzial zur Kohlenstoffanreicherung in Böden ist sowohl mengenmäßig als auch zeitlich begrenzt, da sich ein neues Gleichgewicht zwischen Eintrag und Mineralisation von organischem Kohlenstoff einstellt (Abbildung 19). Entsprechend ist auch die Klimaschutzwirkung durch die zusätzliche Bindung von CO₂-Kohlenstoff im Boden zeitlich begrenzt. Wird die humusaufbauende Maßnahme beendet, gehen die zuvor angereicherten Kohlenstoffvorräte rasch wieder verloren. Die Zusammenhänge verdeutlichen, dass Klimaschutz durch Humusaufbau zeitlich begrenzt ist und zudem Kontinuität erfordert.

ABBILDUNG 18: Jährliche Anreicherung von organischem Kohlenstoff in Ackerböden mit Zwischenfruchtanbau im Vergleich zu Winterschwarzbrache aus 37 Feldversuchen (verändert nach Poeplau & Don, 2015)

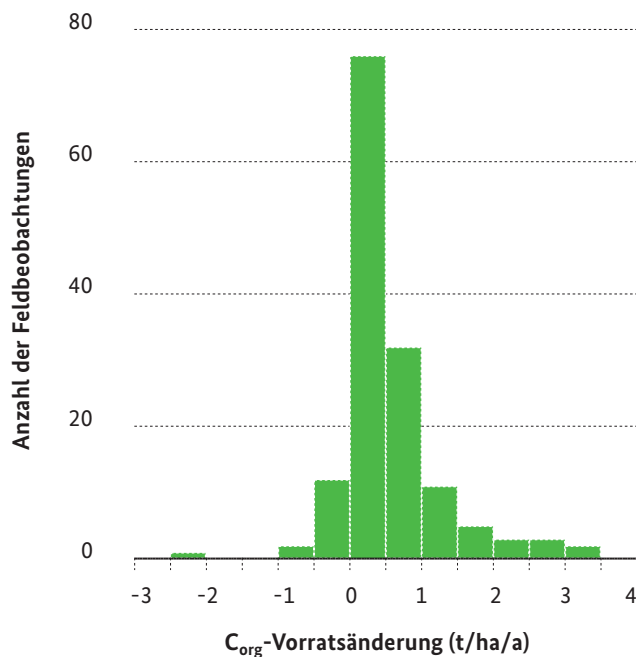


ABBILDUNG 19: Dynamik der Kohlenstoffsequestrierung in Böden durch eine erhöhte Zufuhr von Biomasse (z. B. durch Zwischenfruchtanbau oder organische Düngung): Die Effekte sind zeitlich und mengenmäßig begrenzt und reversibel

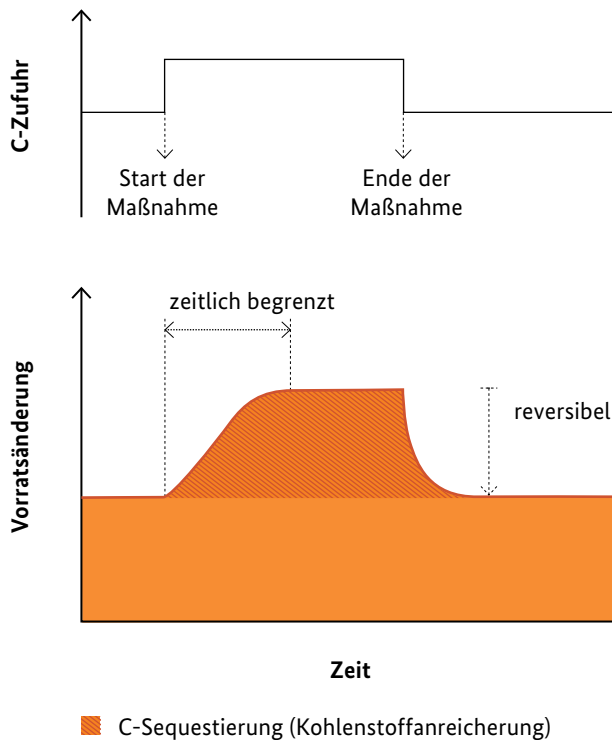


ABBILDUNG 20: Feldgehölze und Hecken haben vielfältige Funktionen in der Landschaft und können bei Neuanlage zusätzlich CO₂-Kohlenstoff in der aufwachsenden Biomasse und im Boden binden



Wie wirkt konservierende Bodenbearbeitung?

Konservierende Bodenbearbeitung oder Direktsaatverfahren haben in den meisten Fällen keinen signifikanten Einfluss auf die Humusvorräte im Bodenprofil (Luo et al. 2010). Sie führen zu einer Humusanreicherung in den obersten Zentimetern des Bodens, aber zu einem Humusverlust in den darunter liegenden Bodentiefen.

Hat der Einsatz von Biokohle Potenzial?

Biokohle aus dem Prozess der Pyrolyse weist in Böden eine hohe Stabilität auf und könnte damit zur stabilen Fraktion des Dauerhumus beitragen. Positive Ertrags-effekte von Biokohle konnten bisher nur in nährstoffarmen tropischen Böden nachgewiesen werden, aber nicht in den nährstoffreicheren Böden der gemäßigten Klimazonen (Jeffrey 2017). Offene Fragen zu der Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsubstrate für die Biokohlen, deren Schadstoffgehalten, der Rentabilität und den rechtlichen Rahmenbedingungen sowie der energetischen und ökologischen Gesamtbewertung stehen derzeit einer positiven Bewertung des Einsatzes von Biokohle in unseren Ackerböden entgegen.

Humusaufbau im Unterboden

Unterböden unterhalb von 30 cm Tiefe zeichnen sich durch niedrigere Humusgehalte aus als Oberböden und haben dadurch ein großes Potenzial, zusätzlichen organischen Kohlenstoff zu stabilisieren und zu

speichern. Durch tiefwurzelnde Pflanzen lässt sich mehr Humus in die Tiefe bringen. Auch Regenwürmer und ein durchlässiger, nicht verdichteter Boden sind dazu wichtig. Eine technische Maßnahme zur Kohlenstoffsequestrierung in Unterböden von Äckern ist ein Tiefumbruch, bei dem humusreiches Oberbodenmaterial in den Unterboden gepflügt und dort stabilisiert wird. Im Mittel werden die Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff hierdurch um 15 t/ha erhöht (nur Mineralböden, Alcantara et al. 2016). Solche Maßnahmen sind jedoch wegen der hohen Kosten und möglicher negativer Nebenwirkungen nur auf einzelnen speziellen Flächen sinnvoll einsetzbar.

Synergien von Feldhecken und Agroforst nutzen

Große Synergien mit anderen Umweltzielen, wie Erosionsschutz und Biodiversität, ergeben sich durch die Anlage von Agroforstsystemen, Feldgehölzen oder in waldarmen Regionen auch durch Aufforstungen (Abbildung 20). Agroforstsysteme speichern rund 18 % mehr organischen Kohlenstoff im Boden als Äcker mit annualen Pflanzen, aber ähnlich viel wie Grünländer (Chatterjee et al. 2018). Hier zeigt sich noch einmal der große Wert von Dauergrünland als Kohlenstoffspeicher, den es zu erhalten gilt.



8

Moorbodenschutz ist Klimaschutz

Naturnahe Moorökosysteme beherbergen hochspezialisierte und heute in Deutschland seltene und gefährdete Tier- und Pflanzenarten. Derzeit verlieren landwirtschaftlich genutzte Moorböden in 20 Jahren im Mittel mehr Kohlenstoff als an einem Grünlandstandort auf Mineralboden durchschnittlich gespeichert ist.



Moorböden entstehen über Jahrtausende, wenn aufgrund von Wassersättigung und Sauerstoffmangel Pflanzen wie Torfmoose, Seggen oder Schilf nicht vollständig zersetzt werden und somit ein Torfkörper wächst. Torf besteht fast vollständig aus organischer Substanz, jedoch können z. B. durch Überflutung oder Einwehung Mineralbodenbestandteile enthalten sein. Naturnahe Moorökosysteme beherbergen hochspezialisierte und heute in Deutschland seltene und gefährdete Tier- und Pflanzenarten. Natürliche Moore sind langfristige Senken für den Kohlenstoff im atmosphärischen Kohlendioxid (CO₂) und – trotz der Emission von Methan (CH₄) – im Durchschnitt treibhausgasneutral. Wenn Moore für land- oder forstwirtschaftliche Nutzung entwässert werden, setzen Mikroorganismen den organischen Kohlenstoff im Torf zu CO₂ um. Neben CO₂ wird auch Lachgas (N₂O) freigesetzt, das aber im Vergleich zum CO₂ in der Gesamttreibhausgasbilanz von Mooreböden meist eine untergeordnete Rolle spielt.

Parallel zu der deutschlandweiten Inventur landwirtschaftlich genutzter Böden wurden zusammen mit zahlreichen Forschungseinrichtungen intensive Untersuchungen zu CO₂-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Mooreböden durchgeführt. In diesem deutschlandweiten Verbundprojekt „Organische Böden“ wurde in 16 Mooregebieten mit mehr als 100 Einzelstandorten in Deutschland (Karte 4) der Treibhausgasausaustausch von Mooren und weiteren moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden direkt mit der Haubenmethode (Abbildung 21) gemessen.

Ergebnisse dieses Projekts haben gezeigt, dass Moor- und moorähnliche kohlenstoffreiche Böden unter Grünlandnutzung im Mittel 7,5 t organischen Bodenkohlenstoff pro ha und Jahr verlieren (Tiemeyer et al. 2016). In 20 Jahren verliert ein entwässerter Moorboden folglich mehr organischen Bodenkohlenstoff als ein typischer Grünlandboden auf einem Mineralbodenstandort insgesamt speichert. Zusammen mit einer Verdichtung führt dieser Verlust an organischer Substanz zu einer Sackung der Bodenoberfläche, die vielfältige Probleme wie z. B. Infrastrukturschäden und Überflutungsgefahr, die Freisetzung von Nährstoffen sowie eine irreversible Veränderung der Bodenstruktur mit sich bringt.

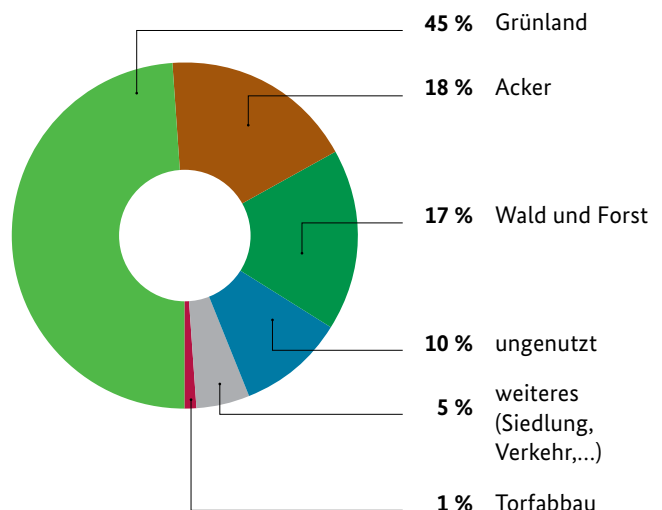
In Deutschland ist der größte Teil der Moore entwässert und wird land- oder forstwirtschaftlich genutzt, wobei Grünland die am häufigsten auftretende Nutzungsart ist (Abbildung 22). „Ungenutzte“ Flächen umfassen sowohl naturnahe und wiedervernässte Standorte als auch trockene, nicht anderweitig genutzte Flächen. Moore und moorähnliche Böden machen ungefähr 6 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland aus. Die CO₂-Emissionen aus diesen extrem kohlenstoffreichen Böden mit landwirtschaftlicher Nutzung verursachen rund 37 % der gesamten Treibhausgasemissionen aus den Sektoren Landwirtschaft, landwirtschaftliche Landnutzung und Landnutzungsänderung.

ABBILDUNG 21: Messung des CO₂-Austauschs mit manuellen Hauben im Großen Moor bei Gifhorn



Neben der Entwässerung haben umfangreiche Kultivierungsmaßnahmen (z. B. Sanddeckkulturen, Sandmischkulturen) ursprüngliche Moorstandorte stark verändert. Mehr als die Hälfte der in der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft untersuchten Standorte mit Moor- und moorähnliche Böden sind durch Meliorationsmaßnahmen verändert, flachgründig oder weisen anmoorige Horizonte auf. Auch typische Nieder- und Hochmoorböden sind durch degradierte Horizonte v. a. im Oberboden gekennzeichnet (Abbildung 23). Messungen haben gezeigt, dass auch moorähnliche Böden, wie z. B. Moorogleye und Anmoorogleye, Emissionen in vergleichbarer Höhe wie „echte“ Moorböden aufweisen können (Eickenscheidt et al., 2015; Leiber-Sauheitl et al., 2014; Tiemeyer et al., 2016).

ABBILDUNG 22: Landnutzung auf Moor- und weiteren moorähnlichen Böden in Deutschland (Quellen: ATKIS® Basis-DLM und Karte Organischer Böden [Roßkopf et al., 2015])



KARTE 4: Standorte mit Treibhausgasmessungen im „Verbundprojekt Organische Böden“. Hintergrundkarte: Karte Organischer Böden (Roßkopf et al., 2015).

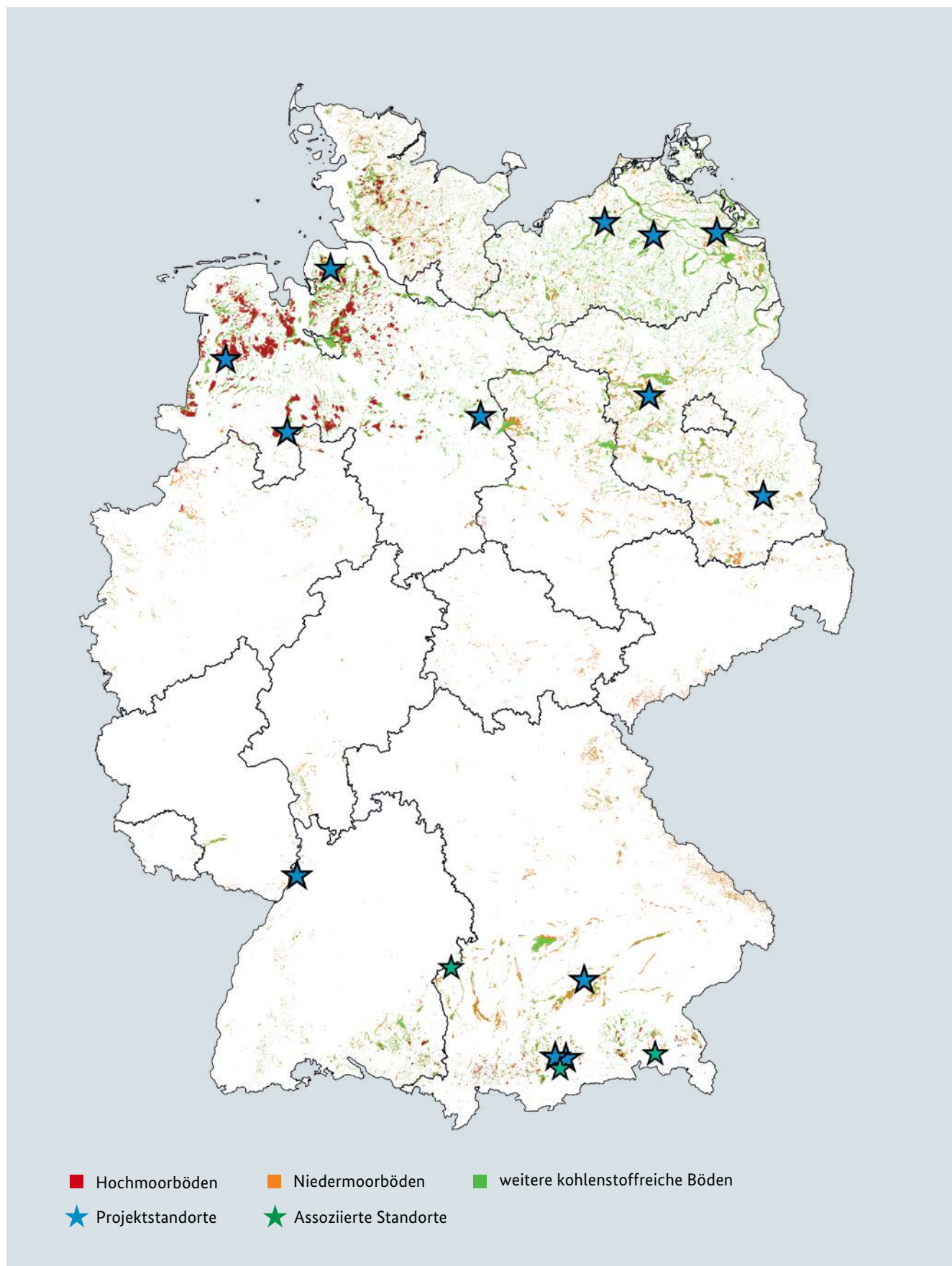


ABBILDUNG 23: Beispiele für Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff (0 bis -100 cm) von Moor- und weiteren moor-ähnlichen Böden. Tiefgründige Standorte können noch erhebliche zusätzliche Mengen an organischem Bodenkohlenstoff in tieferen Horizonten speichern.

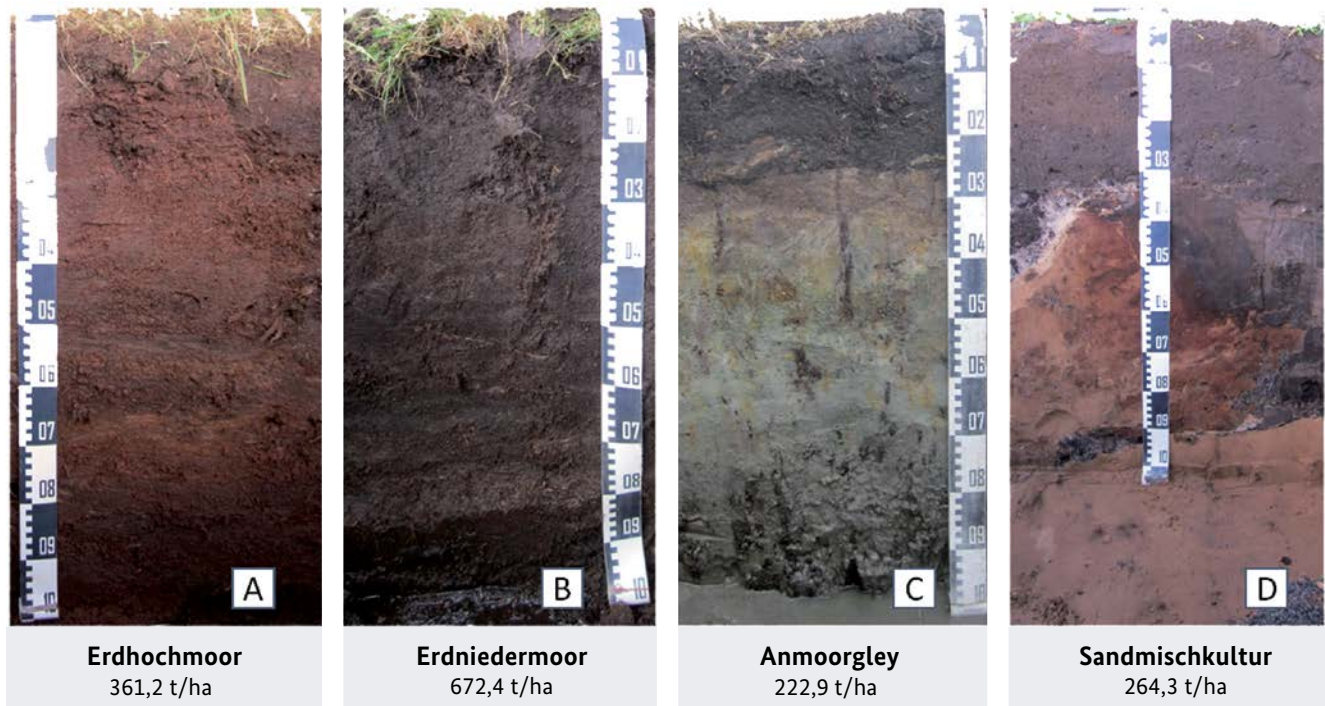
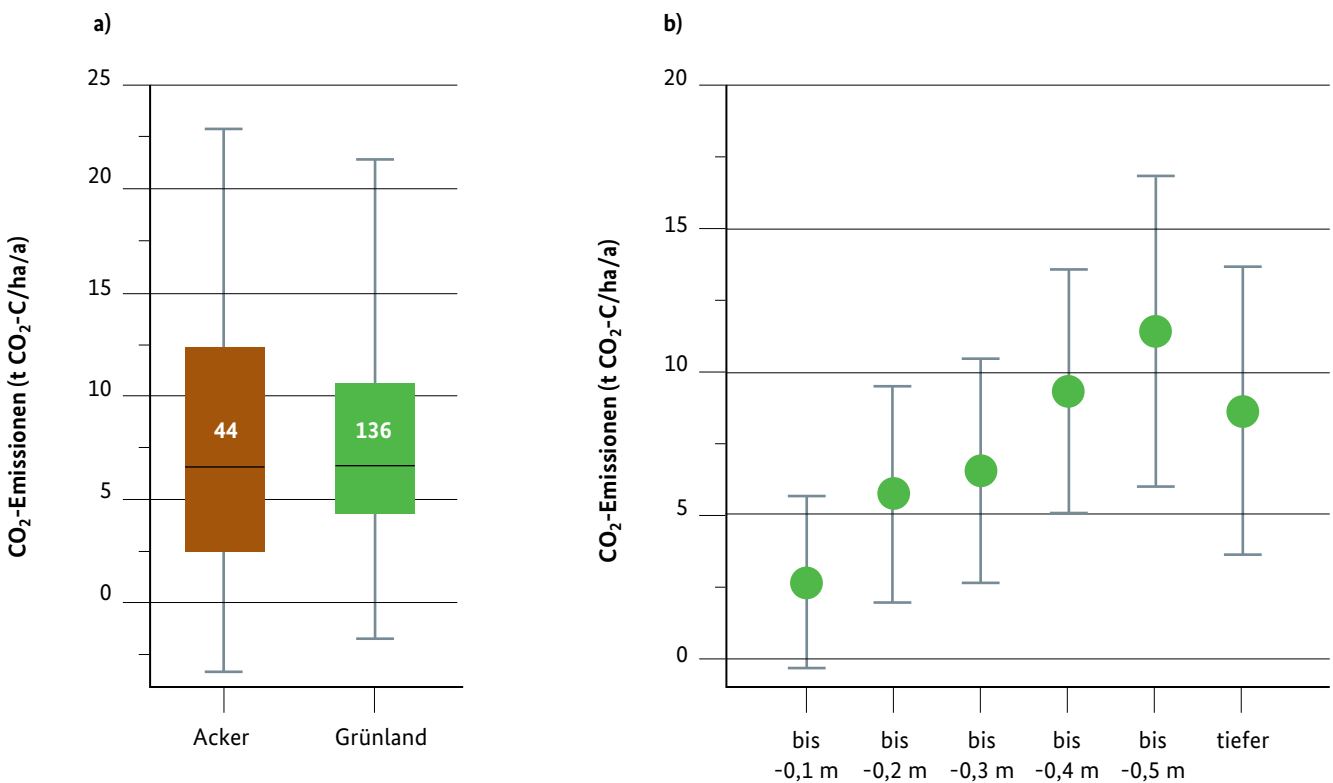


ABBILDUNG 24: Jährliche CO₂-Emissionen von Acker- und Grünlandstandorten auf Moor- und weiteren moor-ähnlichen Böden (a) sowie jährliche CO₂-Emissionen von Grünlandstandorten in Abhängigkeit vom mittleren jährlichen Grundwasserflurabstand (b). Daten: Eickenscheidt et al., 2015, Poyda et al., 2016, Tiemeyer et al., 2016, Verbundprojekt Organische Böden und Thünen Institut (unveröffentlicht). (Median mit 25 %- und 75 %-Quartil als Box und Minimum und Maximum als Fehlerbalken).



Die Art der Landnutzung als Acker oder Dauergrünland ist nicht entscheidend für die Höhe der CO₂-Emission aus entwässerten Moorböden (Abbildung 24a). Entscheidend ist die Tiefe der Entwässerung. Allerdings ist für eine Ackernutzung häufig ein tieferer Grundwasserstand notwendig als für eine Grünlandnutzung. Auch weitere, für die Entwicklung der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff in Mineralböden entscheidende Faktoren, wie organische Düngung und Rückstände landwirtschaftlicher Nutzpflanzen, erklären nicht die Vorratsänderung bzw. die CO₂-Emissionen aus Moorböden. Insgesamt ist der Grundwasserstand der entscheidende Faktor für die Höhe der CO₂-Emissionen und den Verlust an organischem Bodenkohlenstoff, wobei aber eine sehr hohe standortbedingte Variabilität auftritt (Abbildung 24b).

Zur Minderung der CO₂-Emissionen und dem Schutz vorhandener Kohlenstoffvorräte ist daher eine Anhebung der Grundwasserstände notwendig. Eine reine Nutzungsexensivierung oder eine Umwandlung von Acker zu Grünland ist dagegen keine effektive Minderungsmaßnahme. Ein kompletter Stopp der CO₂-Emissionen und das Erreichen der Klimaneutralität sind nur durch eine Anhebung des Grundwasserstandes auf Geländeneiveau möglich. Im Idealfall können solche Standorte sogar wieder zu Kohlenstoffsenken werden. Allerdings treten an nassen Standorten CH₄-Emissionen auf, die aber den Minderungseffekt im Vergleich zum vorherigen Zustand

nur in den seltensten Fällen aufwiegen. Unter naturnahen hydrologischen Bedingungen kann die bisherige landwirtschaftliche Nutzung nicht aufrechterhalten werden. Innovative Verfahren nasser Landnutzung („Paludikultur“) z. B. zum Anbau von Rohrkolben oder Schilf befinden sich derzeit in der Erprobung.

Bodeninventuren können die gesamten Vorräte an organischem Kohlenstoff in Moorböden erfassen und die Bedeutung dieser Böden als Kohlenstoffspeicher beziffern. Sie sind jedoch nur sehr eingeschränkt dazu geeignet, aktuelle Veränderungen dieser Vorräte zu erfassen. Die kleinräumige Variabilität der CO₂-Emissionen sowie deren hohe Dynamik und ihre Abhängigkeit u. a. von bodenhydrologischen Steuergrößen erfordern moorspezifische Inventurmethode. Eine Kombination der Erfassung der Sackung über längere Zeiträume (Grønlund et al., 2008) mit Messungen bodenhydrologischer und weiterer Steuergrößen sowie Modellen ist ein geeigneter Ansatz, um Vorratsänderungen des organischen Bodenkohlenstoffs zu erfassen und standort- und managementdifferenziert bewerten zu können.



9

Humusmanagement – Teil einer Klimastrategie Landwirtschaft



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 organischen Wertstoffen, wie Pflanzenresten oder organischen Wirtschaftsdüngern, erforderlich. Humusaufbau erfordert Ausdauer und langfristige Maßnahmen, da er in der Regel langsam über viele Jahre und Jahrzehnte erfolgt.

Humusmanagement für den Klimaschutz beginnt weit vor der Kohlenstoffbindung in Böden

Klimaschutz beginnt mit den Nährstoffwirkungen der humusfördernden Maßnahmen. Auf- und Abbau von Humus sind direkt verbunden mit der Festlegung und Freisetzung von Nährstoffen. Das Humusmanagement zählt daher zu den wichtigsten Stellschrauben der Düngung. Ein effizientes und verlustarmes Nährstoffrecycling ist oberstes Gebot und das zentrale Ziel entlang des Weges des Humusaufbaus in landwirtschaftlich genutzten Böden. Die Herstellung von synthetischen Düngern ist mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden, das gilt ganz besonders für Stickstoffdünger. Viele Maßnahmen für den Humuserhalt und -aufbau in Böden leisten in erster Linie über das Nährstoffrecycling und die Einsparung von synthetischen Düngern einen Beitrag zum Klimaschutz. Doch es ist Vorsicht geboten: Leicht werden aus Klimaschutzpotenzialen organischer Wirtschaftsdünger erhebliche Klimabelastungen, wenn Nährstoffüberschüsse auftreten und im Stall, bei der Lagerung und Ausbringung umwelt- und klimabelastende Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen entstehen. Auch Zwischenfrüchte und Untersaaten helfen, Nährstoffe z.B. mineralischen Stickstoff im Boden zu binden, die Stickstoffauswaschung zu mindern und synthetischen Stickstoffdünger in der Fruchtfolge einzusparen. Maximaler Klimaschutz durch optimales Humusmanagement ist daher eine umfassende betriebliche Herausforderung.

Entscheidend ist der Kohlenstoffkreislauf am Standort

Darüber hinaus leistet der Humusaufbau wichtige Beiträge sowohl zum Klimaschutz als auch für die Bodenfruchtbarkeit und den Bodenschutz. Entscheidend ist hierbei, die Produktivität des Standorts gezielt auch für den Humuserhalt einzusetzen und die positiven Rückkopplungen auf die Bodenfruchtbarkeit und Ertragsicherheit zu optimieren. Warum ist der Kohlenstoffkreislauf innerhalb eines Standorts so entscheidend für den Klimaschutz? Humusaufbau durch Import zugekaufter organischer Substanz, z. B. Kompost oder zugekaufte

Futtermittel, führen überregional nur zu einer Umverteilung der organischen Substrate und zu einer örtlichen Verschiebung von Humusaufbaupotenzialen. Ein gesicherter Beitrag zum Klimaschutz ergibt sich aus der Kohlenstoff-Sequestrierung in diesen Fällen nicht. Auch bei der Humusmehrung durch Aufforstung landwirtschaftlicher Flächen besteht das Risiko, dass landwirtschaftliche Produktion und damit verbundene Emissionen nur auf andere Flächen verlagert, aber nicht verringert werden.

Konkurrierende Verwertungslinien

Humusaufbau steht in Konkurrenz mit der energetischen und stofflichen Verwertung von Ernteresten und organischen Wirtschaftsdüngern, z. B. der Biogasproduktion, die über die Einsparung fossiler Energieträger, aber auch durch die Vermeidung von Methanemissionen der Wirtschaftsdüngerlagerung Beiträge zum Klimaschutz leistet (Abbildung 25). Welche Substrate sollten zu welchen Anteilen für den Humuserhalt und die Bodenfruchtbarkeit oder als Biorohstoff eingesetzt werden? Neben der rein ökonomischen Betrachtung erfordert diese Frage die integrierende Bewertung der Humusbilanz, Nährstoffbilanz und Treibhausgasbilanz. Die Optimierung der Klimaschutzleistung mit diesen konkurrierenden Nutzungsoptionen muss auf der Basis des langfristigen Erhalts der Bodenfruchtbarkeit erfolgen und darf den Humusaufbau daher nicht vernachlässigen. Für alle Verwertungslinien gilt die Anforderung, dass Nährstoffe in den Ernteresten und organischen Wirtschaftsdüngern möglichst effizient und verlustarm in der Nährstoffversorgung der landwirtschaftlichen Kulturen wiederverwertet werden.

Veränderungen nachweisen, verstehen und gestalten

Für den Nachweis von Veränderungen der Vorräte von organischem Bodenkohlenstoff sind regelmäßige und repräsentative Bodeninventuren, die im Turnus von 10 bis 15 Jahren erfolgen sollten, erforderlich.

Die Kombination der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft mit denen weiterer, langfristig etablierter Aktivitäten der Bodenbeobachtung (Abbildung 26) ermöglicht differenzierte Einblicke in die Entwicklung der Humus- und organischen Kohlenstoffvorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland unter sich ändernden Nutzungs- und Klimabedingungen. Zudem ermöglichen sie zusammen, Wirkungen von Maßnahmen zum Humuserhalt und Humusaufbau auf nationaler Skala nachzuweisen und im Rahmen der nationalen Emissionsberichterstattung für Treibhausgase abzubilden.

ABBILDUNG 25: Erntereste und organische Wirtschaftsdünger können sowohl für den Humuserhalt als auch für die Produktion von Bioenergie und Biorohstoffen verwendet werden. Die Aufwendungen für den Humuserhalt und Humusaufbau müssen groß genug sein, um die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu sichern.

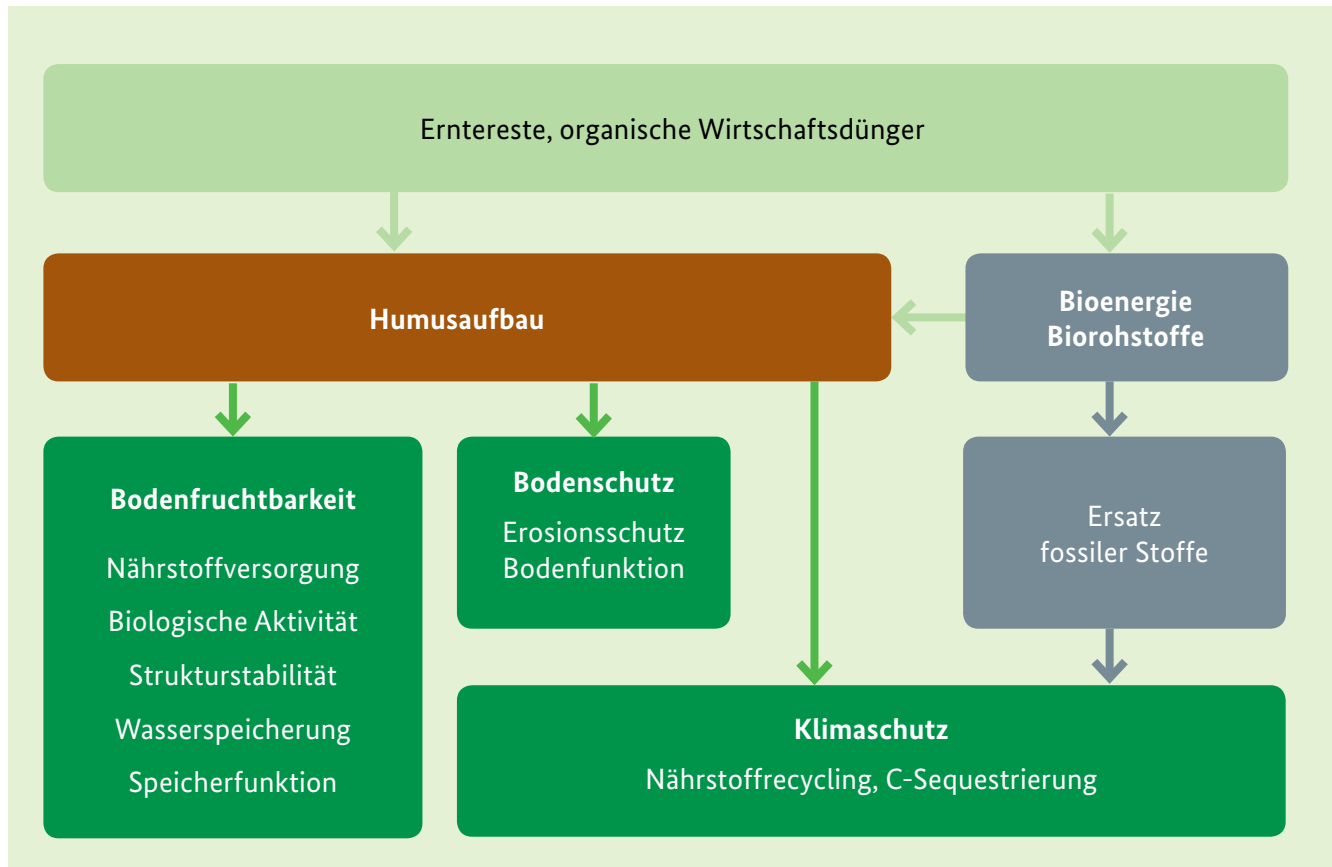


ABBILDUNG 26: Langfristige Forschungsinfrastrukturen (Moorboden-Monitoring in Planung) zur Bewertung der Veränderungen der Vorräte an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands unter sich ändernden Nutzungs- und Klimabedingungen



Die Klimaänderungen in Deutschland mit steigenden Temperaturen, abnehmenden Niederschlägen im Sommerhalbjahr und zunehmenden Extremwetterereignissen steigern die Produktionsrisiken der Landwirtschaft. Ein nachhaltiges Humusmanagement gewinnt daher auch als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel an Bedeutung. Maßnahmen des Humusaufbaus bieten im Rahmen eines verlustarmen Nährstoffmanagements vielfältig positive Wirkungen und Chancen sowohl für die Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit als auch für den Boden- und Klimaschutz. Diese Chancen und ihre Synergien gilt es im Sinne einer effizienten und umweltschonenden Landwirtschaft zu nutzen.



10

Literaturnachweise



- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005):** Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Kapitel 5.6.5 Humusgehalt, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Alacantara V., Don A., Well R., Nieder R. (2016):** Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global Change Biology* 22(8): 2939–2956.
- Andren O., Kätterer T. (1997):** ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Ecological Applications* 7(4): 1226–1236.
- Chatterjee, N., Nair, P. K. R., Chakraborty, S. & Nair, V. D. (2018):** Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 266, 55–67.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton, 2013:** Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Coleman K., Jenkinson D. S. (1995):** ROTHC-26.3: A Model for the Turnover of Carbon in Soil: Model Description and Users Guide, IACR.
- Düwel O., Siebner C. S., Utermann J., Krone F. (2007):** Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands – Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Archiv Nr. 0126616, Hannover.
- Eickenscheidt, T., Heinichen, J., and Drösler, M. (2015):** The greenhouse gas balance of a drained fen peatland is mainly controlled by land-use rather than soil organic carbon content, *Biogeosciences*, 12, 5161–5184.
- Franko U., Kolbe H., Thiel E. & Liess E. (2011):** Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma*, 166, 119–134.
- Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mader, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N.E.H. & 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.
- Grønlund A., Hauge A., Hovde A., Rasse D. P. (2008):** Carbon loss estimates from cultivated peat soils in Norway: a comparison of three methods, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81, 157–167.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M. & Bastos, A.C. (2011):** A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 144, 175–187.
- 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, M. T., Rogasik, J., Ruhlmann, J., Spiegel, H., Schulz, E., Tajnsek, 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.
- Leiber-Sauheitl K., Fuß R., Voigt C., Freibauer A. (2014):** High CO₂ fluxes from grassland on histic Gleysol along soil carbon and drainage gradients, *Biogeosciences*, 11, 749–761.
- Luo, Z. K., Wang, E.L. & Sun, O.J. (2010):** Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 139, 224–231.
- Parton W. J., Ojima D. S., Cole C. V., Schimel D. S. (1994):** A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. *Quantitative modeling of soil forming processes (quantitativemod)*: 147–167.
- Poeplau C., Don A. (2015):** Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – a meta-analysis. *Agriculture Ecosystem & Environment* 200(1): 33–41.
- 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(7): 2415–2427.

- Poeplau C., Kätterer T., Bolinder M. A., Borjesson G., Berti A., Lugato E. (2015):** Low stabilization of above-ground crop residue carbon in sandy soils of Swedish long-term experiments. *Geoderma* 237: 246–255.
- Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Loges, R., and Taube, F. (2016):** Greenhouse gas emissions from fen soils used for forage production in northern Germany, *Biogeosciences*, 13, 5221–5244.
- Roßkopf N., Fell H., Zeitz J. (2015):** Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks, *Catena*, 133, 157–170.
- Taghizadeh-Toosi A., Christensen B. T., Hutchings N. J., Vejlin J., Kätterer T., Glendining M., Olesen J. E. (2014):** C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling* 292: 11–25.
- Taghizadeh-Toosi A., Olesen J. E. (2016):** Modelling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low potential for future carbon sequestration. *Agricultural Systems* 145: 83–89.
- Tiemeyer B., Albiac Borraz E., Augustin J., Bechtold M., Beetz S., Beyer C., Drösler M., Eickenscheidt 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, 4134–4149.
- Tuomi M., Rasinmaki J., Repo A., Vanhala P., Liski J. (2011):** Soil carbon model Yasso07 graphical user interface. *Environmental Modelling & Software* 26(11): 1358–1362.
- Tuomi M., Thum T., Jarvinen H., Fronzek S., Berg B., Harmon M., Trofymow J. A., Sevanto S., Liski J. (2009):** Leaf litter decomposition-Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling* 220(23): 3362–3371.
- Wellbrock N., Grüneberg E., Riedel T., Polley H. (2017):** Carbon stocks in tree biomass and soils of German forests. *Central European Forestry Journal* 63: 105–112.



HERAUSGEBER

Bundesministerium für Ernährung
und Landwirtschaft (BMEL)
Referat 521
Rochusstr. 1
53123 Bonn

AUTOREN

Thünen-Institut für Agrarklimaschutz:
Prof. Dr. Heinz Flessa, PD Dr. Axel Don, Dr. Anna Jacobs, Dr. René
Dechow, Dr. Bärbel Tiemeyer, PD Dr. Christopher Poeplau

STAND

August 2019

GESTALTUNG

design idee, büro für gestaltung, Erfurt

TEXT

Thünen-Institut für Agrarklimaschutz

DRUCK

BMEL

BILDNACHWEIS

Titel + 48: Thünen Institut; Seite 2: Christian Schwier/StockAdobe.com;
Seite 3: Torsten Silz/CDU-Rheinland-Pfalz;
Seite 4; Seite 8; Seite 11 (re); Seite 11 (li); Seite 12 (re);
Seite 12 (li); Seite 13; Seite 14; Seite 22; Seite 33 (o); Seite 35 (re);
Seite 35 (li); Seite 37; Seite 39 = *alle* Thünen Institut
Seite 33 (u): A. Don

BESTELLINFORMATIONEN

Diese und weitere Publikationen können Sie kostenlos bestellen:

Internet: www.bmel.de/publikationen

E-Mail: publikationen@bundesregierung.de

Fax: 01805-77 80 94

(Festpreis 14 ct/Min., abweichende Preise
a. d. Mobilfunknetzen möglich)

Tel.: 01805-77 80 90

(Festpreis 14 ct/Min., abweichende Preise
a. d. Mobilfunknetzen möglich)

Schriftlich: Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09 | 18132 Rostock

**Diese Publikation wird vom BMEL kostenlos
herausgegeben. Sie darf nicht im Rahmen
von Wahlwerbung politischer Parteien oder
Gruppen eingesetzt werden.**

Weitere Informationen unter
www.bmel.de

