



Dokumentation

Speicherung von CO₂ in Böden

Speicherung von CO₂ in Böden

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 061/21
Abschluss der Arbeit: 5. Juli 2021
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,
Bildung und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Daten zur CO₂-Speicherung in verschiedenen Böden	5
2.1.	Allgemeine Hinweise zu den Ökosystemen Wald, Landwirtschaftlich genutzte Böden und Moore	5
2.2.	Waldböden	9
2.3.	Moore	11
2.4.	Landwirtschaftlich genutzte Böden	14
3.	Populärwissenschaftliche Darstellungen	20
3.1.	Bodenatlas 2015	20
3.2.	Max Planck Gesellschaft	20
3.3.	Spektrum der Wissenschaft	21
3.4.	Umweltbundesamt	21
4.	Wissenschaftliche Literatur	22

1. Einleitung

Böden (d.h. die Pedosphäre) bilden die Grenzfläche zwischen der Atmosphäre und Biosphäre¹ auf der einen Seite und der Erdkruste und äußersten Schicht des Erdmantels auf der anderen Seite.

Böden erfüllen verschiedene Aufgaben: Sie sind Lebensgrundlage für terrestrische Pflanzen, sie regulieren den Wassergehalt (Wasserspeicher), filtern Wasser und dienen als Schadstoffpufferung. Böden bilden den Lebensraum für zahlreiche Bodenorganismen. Insbesondere sind sie auch für den Kohlenstoff-Kreislauf von Bedeutung. Im Boden wird mehr als doppelt so viel Kohlenstoff wie in der oberirdischen Pflanzendecke gespeichert (im Boden gespeicherter organischer Kohlenstoff = soil organic carbon = SOC²). Treten Veränderungen auf (z.B. im Zuge des Klimawandels), so können sich auch die Bodeneigenschaften nachhaltig ändern. Beispielsweise können Permafrostböden³ auftauen und dadurch Kohlendioxid und Methan freigesetzt werden.

Prinzipiell werden in gesunden Böden erhebliche Mengen an klimawirksamen Verbindungen, darunter auch CO₂, gespeichert. Dies gilt in unterschiedlichem Ausmaß für verschiedene Bodentypen wie Waldböden, Feuchtgebiete, Ackerboden und Grünland. Dies führt dazu, dass für die Definition von Maßnahmen, durch die klimaschädliche Wirkungen von Treibhausgasen eingedämmt werden sollen, die Betrachtung von Landnutzungsveränderungen und von Bewirtschaftung der Böden besonders wichtig sind. Durch Veränderungen und nicht nachhaltige Bewirtschaftung können Böden mehr Treibhausgase abgeben (Quelle), als sie speichern bzw. aufnehmen. Darum verfolgen Maßnahmen, durch die ein wirksamer Klimaschutz erreicht werden soll, das Ziel, die natürliche C-Senkenfunktion der Böden (mehr Kohlenstoff wird aufgenommen als abgegeben) weitest möglichst zu erhalten oder wiederherzustellen.

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst auf die Speicherung von Kohlenstoff in Waldböden, in Mooren und in landwirtschaftlich genutzten Böden eingegangen. Auftragsgemäß konzentriert sich die Arbeit auf die Speicherung von Kohlenstoff in Böden und seine Freisetzung, nicht auf andere klimawirksame Verbindungen wie beispielsweise Methan (CH₄) oder Distickstoffmonoxid (N₂O). Anschließend wird eine Literaturliste populärwissenschaftlicher und naturwissenschaftlicher Literatur aufgeführt, die verschiedene Aspekte der Speicherung organischer Kohlenstoff-Verbindungen in unterschiedlichen Bodentypen thematisieren.

-
- 1 Der von Organismen bewohnbare Raum der Erde. Die Biosphäre umfasst die Wasserlebensräume (Hydro-Biosphäre) und die Landlebensräume (Geo-Biosphäre). <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/biosphaere/1576>.
 - 2 Bodenkohlenstoff = Soil Carbon kann entweder als organischer Kohlenstoff oder anorganischer auftreten. Bei anorganischem Kohlenstoff im Boden handelt es sich um mineralische Formen von Kohlenstoff. Sie entstehen aus Verwitterungen oder aus der Reaktion von Bodenmineralien mit atmosphärischem CO₂. Organischer Kohlenstoff im Boden ist als organische Substanz im Boden vorhanden (Pflanzenreste, Humus und Holzkohle).
 - 3 „Von Permafrost oder Dauerfrostboden sprechen Forscher, sobald die Temperatur des Bodens in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null Grad Celsius liegt.“ (<https://www.awi.de/im-fokus/permafrost/permafrost-eine-einfuehrung.html>).

2. Daten zur CO₂-Speicherung in verschiedenen Böden

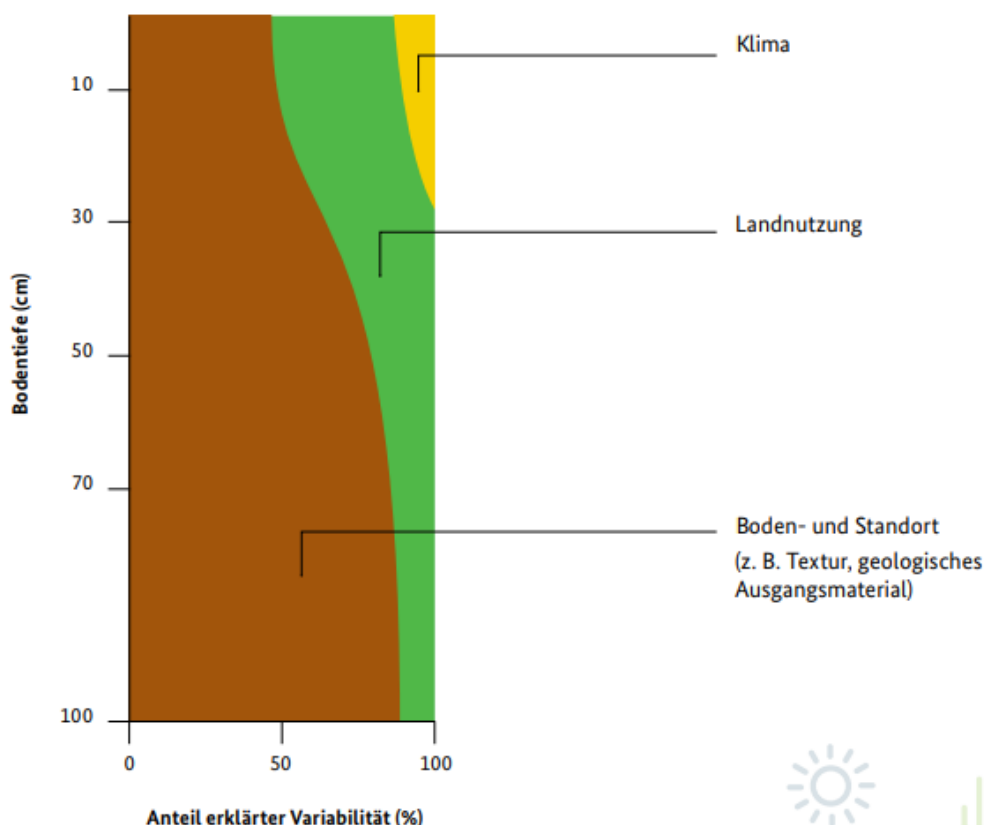
2.1. Allgemeine Hinweise zu den Ökosystemen Wald, Landwirtschaftlich genutzte Böden und Moore

Zur Interpretation von statistischen Erhebungen der Kohlenstoffvorräte in Böden sind verschiedene Faktoren zu beachten. Kohlenstoffvorräte in Böden sind nicht die einzigen klimawirksamen Faktoren. Auch Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) spielen eine Rolle in der Beziehung zwischen Boden und Klimasystem. Treibhausgas-Emissionen werden daher oftmals nicht in CO₂-Emissionen sondern in der Maßeinheit CO₂-Äquivalent angegeben. Hierbei wird die Treibhausgaswirkung der entsprechenden Verbindungen, beispielsweise Methan oder N₂O über einen festgelegten Zeitraum (meist 100 Jahre) im Vergleich zu derjenigen von CO₂ berechnet. Auf diese Weise verfügt man über eine einheitliche Maßeinheit (CO₂-Äquivalent). Des Weiteren muss beachtet werden, in welcher Bodentiefe, in welchem Bodentypus und in welcher Boden-Zustandsform Daten erhoben werden.

In einer Grafik, die in einer Darstellung ausgewählter Ergebnisse der Bodenzustandserhebung des Johann-Heinrich-von-Thünen-Instituts⁴ 2018 publiziert wurde, wird verdeutlicht, dass in unterschiedlichen Bodentiefen landwirtschaftlich genutzter Mineralböden die Variabilität der Vorräte an organischem Kohlenstoff auf unterschiedliche Faktoren zurückgeführt werden kann. So werden in ein Meter Tiefe die Kohlenstoffvorräte im Wesentlichen durch die geologische Zusammensetzung bestimmt, während oberflächennah Landnutzung und Klimaeinfluss ca. 50% Einfluss haben.

4 Bundesministerin für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands; September 2018; Seite 24. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.pdf;jsessionid=4599A701B3C1FDFA03B8FC6A65604D13.live832?__blob=publication-File&v=10.

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



Bei unterschiedlichen Standorten und Nutzungsformen ist auch die geologische Bodenstruktur sehr verschieden.⁵ Ebenso spielen Jahreszeit und das Wetter am Beprobungsstandort eine entscheidende Rolle.

Kohlenstoffspeicherkapazitäten von Waldböden hingegen unterliegen deutlichen Schwankungen, je nach Alter des Baumbestandes, Auswirkungen von Stürmen, Bränden und Schädlingseinwirkungen. In Folge von Einwirkungen wie Bränden werden gespeicherte Kohlenstoffvorräte freigesetzt (Emission).

Treten in Mooren vermehrt Brände auf, wird ebenfalls in großem Ausmaß CO₂ freigesetzt (Emission).

⁵ Siehe hierzu Seite II: Johann Heinrich von Thünen-Institut: Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland Ergebnisse der Bodenzustandserhebung; Thünen Report 64; DOI:10.3220/REP15428183910000.

Daten, die bezüglich einer Vielzahl dieser Einflussfaktoren stratifizieren, d.h. parallel auch Alter und Einwirkungen auf das Ökosystem umfassend erheben, konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden.

Im Folgenden wird kurz auf allgemeine Daten zu Emissionen von CO₂, bzw. CO₂-Äquivalenten in den Ökosystemen Wald, Ackerland, Grünland und Feuchtgebiete eingegangen.

Vom Umweltbundesamt (UBA) werden Daten zu Emissionen verschiedener klimawirksamer Verbindungen (CO₂, CH₄, N₂O) für verschiedene Landschaftstypen in der zeitlichen Entwicklung seit 1990 aufgelistet. Diese umfassen Wälder, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen und Holzprodukte. Alle Angaben sind in der Einheit CO₂-Äquivalente⁶ angegeben.⁷

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt der vom UBA zur Verfügung gestellten Daten.

Im ersten Tabellenteil werden die Treibhausgasemissionen/Senken (CO₂, NH₄, N₂O) der Bereiche: Wälder, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen und Holzprodukte in den Jahren 2012 bis 2019 dargestellt. Hierbei stellen negative Werte Senken dar, positive absolute Emissionsmengen im jeweiligen Jahr. Im zweiten Tabellenteil werden die Emissionen und Senken für dieselben Bereiche lediglich für Kohlendioxid angegeben. Es werden absolute Werte angegeben. Da die Flächenanteile unterschiedlich sind, kann hieraus nicht ein direkter Vergleich der Emission/Senke pro Flächeneinheit abgeleitet werden.

Es wird deutlich, dass die CO₂-Emission (Quelle (positiver Wert) oder Senke (negativer Wert)) in den vergangenen Jahren zwar punktuell Schwankungen unterlag, aber sich insgesamt nicht sehr stark verändert hat.⁸ Allerdings gibt es deutliche regionale Unterschiede, d.h. teilweise sind in gleichen Bodentypen Zunahmen, teilweise auch Abnahmen zu verzeichnen. Daher müssen Bodentypen wesentlich detaillierter nach spezifischen Charakteristika unterschieden werden. Bundesweite Daten in dieser Detailtiefe konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gefunden werden.

Laut Bodenzustandserhebung lässt sich aus den Analysen von Wald und landwirtschaftlichen Ökosystemen folgende allgemeine Aussage zum organischen Kohlestoffvorrat in Deutschland treffen:

„Zusammen beträgt die aktuelle Speicherleistung dieser Ökosysteme [wald- und landwirtschaftliche Ökosysteme] für organischen Kohlenstoff rund fünf Milliarden Tonnen. Den höchsten Anteil

6 Ein CO₂-Äquivalent ist eine Maßeinheit, die zur Vereinheitlichung der Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase eingeführt wurde. Sie beschreibt, wie viel eine genau definierte Masse eines Treibhausgases über einen festgelegten Zeitraum im Vergleich zu Kohlendioxid (CO₂) zum Treibhauseffekt beiträgt.

7 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#veranderung-des-waldbestands->

8 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2_tab_emi-senken-lulucf_2021.png. Erläuterungen siehe: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>.

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. Bezogen auf einen Hektar und 0 bis 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 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.“⁹

Emissionen und Senken im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

Einheit: Tsd. t CO₂-äquiv.

Treibhausgase gesamt	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
A. Wälder²⁾	- 59 490,4	- 60 399,7	- 63 400,9	- 62 129,6	- 63 208,9	- 62 973,2	- 57 641,6	- 57 022,0
B. Ackerland¹⁾	15 910,3	16 310,0	16 353,9	16 989,6	17 173,0	17 054,0	17 304,1	17 114,0
C. Grünland	20 155,5	19 673,9	19 584,5	18 841,8	18 645,5	18 629,7	18 162,2	18 245,3
D. Feuchtgebiete	4 799,3	4 744,5	4 665,0	4 784,9	4 753,9	4 726,0	4 787,0	4 882,0
E. Siedlungen	3 840,9	3 873,1	4 014,4	3 980,3	4 372,4	4 428,1	5 033,0	4 467,2
G. Holzprodukte	- 2 990,1	- 1 698,9	- 2 246,1	- 1 782,9	- 1 803,6	- 2 404,1	- 5 930,5	- 4 150,5
Gesamt	- 17.774,6	- 17.497,3	- 21.029,3	- 19.315,9	- 20.067,8	- 20.539,4	- 18.285,9	- 16.463,9

Kohlendioxid (CO ₂)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
A. Wälder²⁾	- 59 908,7	- 60 814,6	- 63 812,5	- 62 541,6	- 63 619,3	- 63 384,9	- 58 069,7	- 57 454,1
B. Ackerland¹⁾	15 287,5	15 650,1	15 656,2	16 252,3	16 436,0	16 305,2	16 542,2	16 336,7
C. Grünland	18 920,5	18 437,9	18 347,1	17 603,2	17 401,4	17 387,3	16 921,5	17 006,8
D. Feuchtgebiete	4 282,0	4 225,9	4 145,1	4 263,9	4 217,7	4 185,8	4 242,9	4 333,8
E. Siedlungen	3 485,0	3 513,7	3 651,0	3 612,8	4 040,1	4 091,2	4 599,5	4 122,1
G. Holzprodukte	- 2 990,1	- 1 698,9	- 2 246,1	- 1 782,9	- 1 803,6	- 2 404,1	- 5 930,5	- 4 150,5
Gesamt	- 20.923,9	- 20.686,0	- 24.259,1	- 22.592,2	- 23.327,6	- 23.819,4	- 21.694,2	- 19.805,2

¹⁾ Entsprechend den IPCC Guidelines (Volume 3. Reference Manual, Kapitel 4.2, 4.87; CRF bedeutet Common Reporting Format) sind CO₂-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden unter LULUCF zu berichten.

Andererseits erlaubt der Summary Report 7A (Volume 1. Reporting Instructions, Tables.27) die Berichterstattung von CO₂-Emissionen und CO₂-Einbindungen aus landwirtschaftlichen Böden wahlweise im Sektor Landwirtschaft unter 4.D Landwirtschaftliche Böden oder im LULUCF-Sektor unter 5.B Ackerland. Deutschland hat sich für letzteres entschieden. Die Vertragsstaaten können sich frei entscheiden, wo sie diese Emissionen / Einbindungen berichten.

²⁾ Festlegung von CO₂ (Senke)

2.2. Waldböden

Laut dritter Bundeswaldinventur¹⁰ (2012) beläuft sich die ober- und unterirdische Biomasse sowie das Totholz in Deutschland zusammen auf ca. 1.169 Mio. Tonnen Kohlenstoff (C).

Laut zweiter Bundeswaldinventur (2002)¹¹ beträgt der geschätzte Kohlenstoffvorrat im Auflagehumus und im Mineralboden bis in 90 cm Tiefe ca. 1.321 Mio. Tonnen, was im Mittel einen Vorrat von ca. 119 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar bedeutet. Dabei sind nahezu zwei Drittel davon im Auflagehumus und im Oberboden (0-30 cm) gespeichert. Insgesamt speichern Böden unter Laubwald mehr Kohlenstoff als Böden unter Nadelwald.

Gegenüber früheren Bodenzustandserhebungen haben sich die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus nicht signifikant geändert, allerdings sind die C-Vorräte im Mineralboden, in dem bis zum Zeitpunkt der zweiten Bundeswaldinventur ein mittlerer jährlicher Anstieg von ca. 0,41 Tonnen pro Hektar zu verzeichnen war, deutlich angestiegen. Die bundesweit stärksten C-Zunahmen sind im norddeutschen Tiefland zu verzeichnen (sowohl Auflagehumus als auch Mineralbodenvorräte in 0-30 cm Tiefe).

In Berg- und Hügelländer nahmen die Vorräte im Auflagehumus überwiegend ab (auch Mineralbodenvorräte). Als Ausnahme ist das Alpenvorland zu nennen, wo die im Auflagehumus gespeicherten C-Vorräte zunahmen. Die Kalkstandorte der Schwäbischen Alb sowie der Frankenalb und des Oberpfälzer Jura zeigten eine deutliche Abnahme der C-Vorräte innerhalb der oberen 30 cm des Mineralbodens, ebenso wie im nördlich angrenzenden Neckarland. Als Erklärung für das auftretende Muster der Veränderungen werden verschiedene Argumente angebracht.

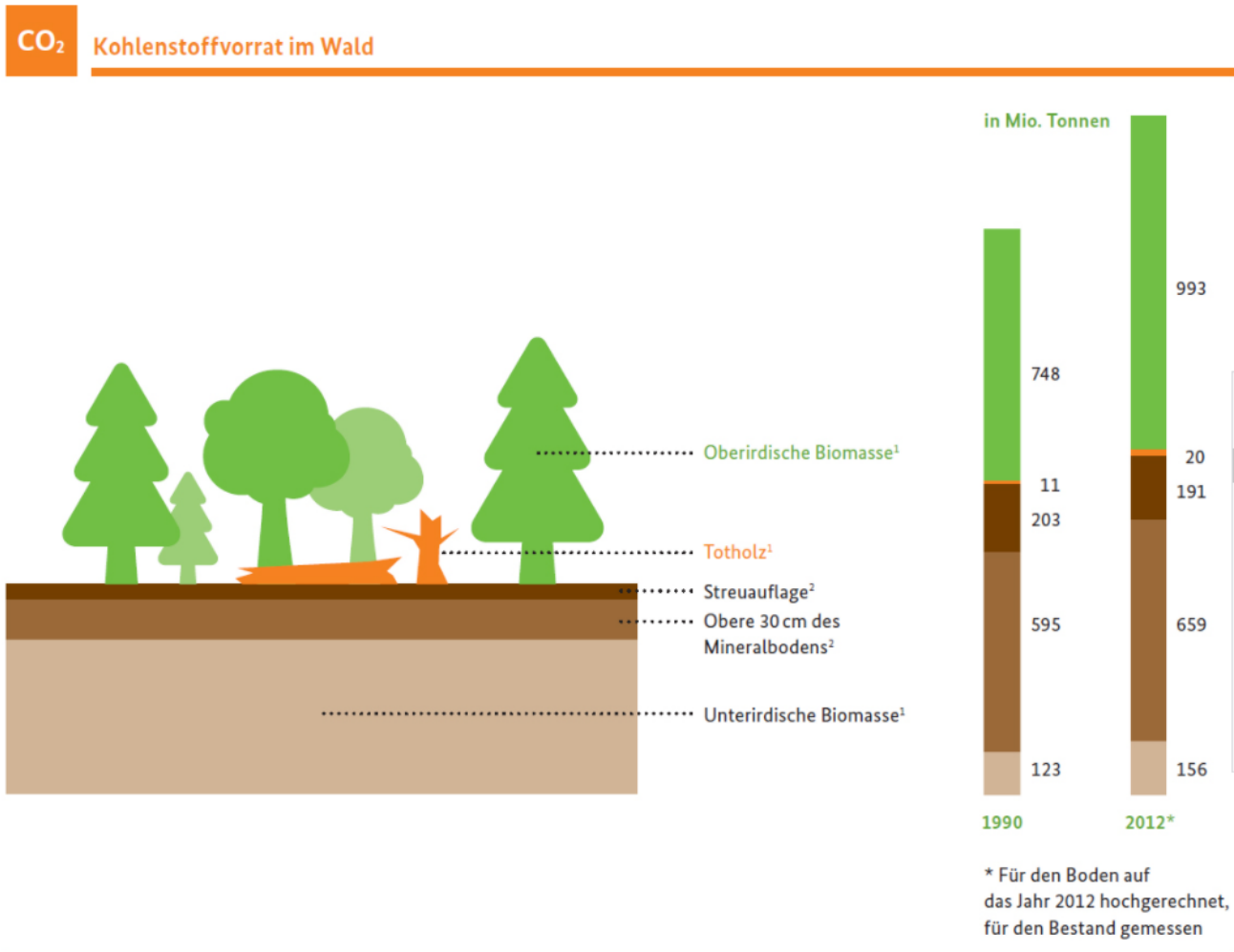
„Im Tiefland waren besonders die von Natur aus schwachen (alt)-pleistozänen Sandböden nach Übernutzung großflächig an organischer Substanz verarmt und die generelle Verbesserung der Standortsqualität durch bewusst bodenpflegliche Waldbewirtschaftung macht sich seit der ersten Bodenwaldinventur auf diesen degradierten Standorten besonders bemerkbar. Im Einzelfall ist aber davon auszugehen, dass weniger generelle als vielmehr lokal wirksame Prozesse für die Veränderungen der C-Gehalte ausschlaggebend sind. So können Zu- und Abnahmen der C-Vorräte sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden von Einflüssen wie Kalkung, Waldumbaumaßnahmen, klimabedingt zunehmendem Wassermangel oder durch die spezifische Wirkung regional unterschiedlicher N-Einträge abhängen.“¹²

Die nachfolgende Grafik von den Internetinformationsseiten der Bundeswaldinventur stellt das Kohlenstoffspeicherpotenzial von Wäldern dar:

10 <https://bwi.info/>.

11 <https://www.bundeswaldinventur.de/service/publikationen/artikel-und-verordnungen/>.

12 Auskunft des Johann-Heinrich-von-Thünen-Instituts vom 15.6.2021.



¹Daten der Bundeswaldinventuren 1987, für die neuen Länder ergänzt aus dem Datenspeicher Wald, 2002 und 2012

²Bodenzustandserhebung im Wald

Quelle: Wellbrock, N. et al. (2014): Wälder in Deutschland speichern Kohlenstoff. AFZ-Der Wald, 18/2014 (geändert)

Daten zur Kohlenstoffspeicherung in Abhängigkeit vom Alter der Bäume konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gefunden werden.

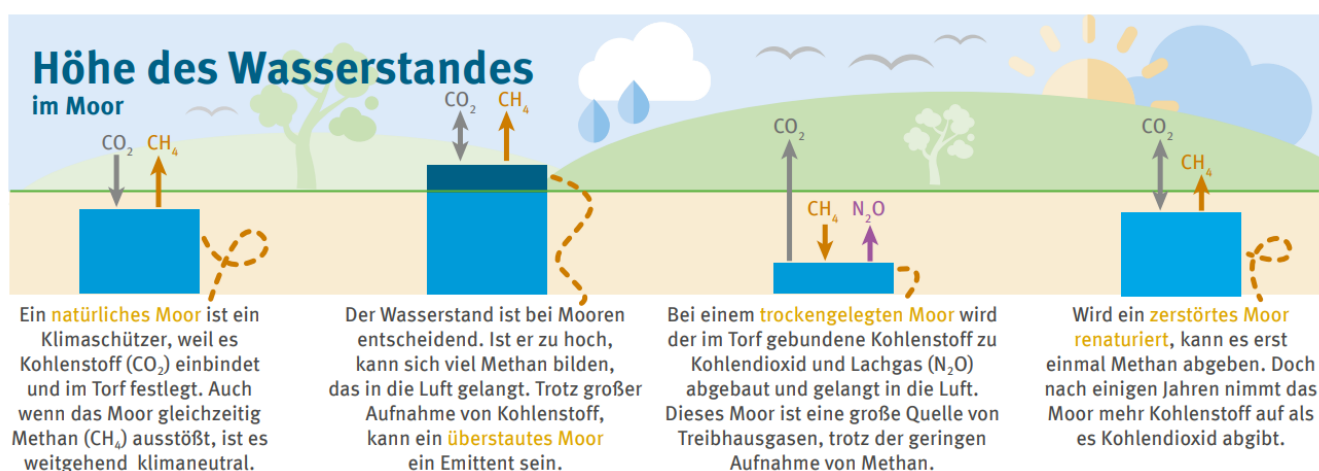
Vor dem Hintergrund der Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes am 12. Mai 2021 hat der „Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik“ am 22. Juni 2021 eine Stellungnahme mit dem Titel „Geplante Änderung des Klimaschutzgesetzes riskiert Reduktion der potenziellen Klimaschutzbeiträge von Wald und Holz“ veröffentlicht.¹³

13 Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (Hrsg.) (2021): Geplante Änderung des Klimaschutzgesetzes riskiert Reduktion der potenziellen Klimaschutzbeiträge von Wald und Holz. Stellungnahme. Berlin, 13 S.

Um die gewünschte Treibhausgas-Senkenleistung des Sektors „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Waldwirtschaft“ bis zum Jahr 2030 zu erreichen, müsste die Bilanz durch Vermeidung von THG-Emissionen oder Speicherung in den Ökosystemen um 45 Mio. t CO₂-Äquivalente jährlich reduziert werden, im Jahre 2040 wären das ca. 55 Mio. t CO₂-Äquivalente. Zur Ausgestaltung, wie die Minderungen erreicht werden sollten, mache das Klimaschutzgesetz keine Angaben.

2.3. Moore

In der letzten Eiszeit bildeten sich in Mitteleuropa Moore. Dabei wurden im wassergesättigten Milieu abgestorbene Pflanzenreste nicht vollständig zersetzt, da die Sauerstoffzufuhr fehlte. In Folge dessen kommt es zur Torfbildung. Lebendige Moore wachsen jährlich um ca. 1 cm in die Höhe. Außerdem wird im abgelagerten organischen Material Kohlenstoff für Jahrtausende gespeichert. Die Fähigkeit zur Speicherung von CO₂ hängt insbesondere vom Wasserstand ab. Die Deutsche Emissionshandelsstelle (Umweltbundesamt) hat 2020 eine Übersichtsinformation publiziert¹⁴, die die Abhängigkeit von CO₂-Emission vom Wasserstand grafisch darstellt:



Aufgrund der Fähigkeit effektiv Kohlenstoff zu binden, haben sich natürliche Moore im Laufe der Erdgeschichte zu großen Kohlenstoffspeichern entwickelt. Lediglich 3 % der terrestrischen Erdoberfläche sind mit Mooren bedeckt, binden aber in ihren Torfschichten ein Drittel des terrestrischen Kohlenstoffs. Dies ist etwa doppelt so viel wie die Wälder weltweit in ihrer Biomasse binden.¹⁵

„Für Deutschland wird davon ausgegangen, dass in Mooren genau so viel Kohlenstoff gespeichert ist wie in Wäldern, nämlich jeweils ca. ein Drittel der Kohlenstoffvorräte, obwohl Moore hier nur

¹⁴ https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/Factsheet_Moore.pdf?__blob=publication-file&v=6.

¹⁵ Parish, Sirin, Charman, Joosten, Minayeva, Silvius, Stringer (2008): Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre and Wetlands International.

ca. 4 % der Landfläche bedecken und Wälder ca. 30 %.¹⁶ Werden aber Moore trockengelegt und bewirtschaftet, so wird der Kohlenstoff freigesetzt.¹⁷

In Deutschland werden momentan schätzungsweise 70 % der Moore land- und forstwirtschaftlich genutzt, zumeist als Grünland (39-50 %), auch als Ackerland (19-32 %) und forstwirtschaftlich (14-15 %).¹⁸ Dabei werden die Moore fast immer entwässert.

„In Deutschland emittieren die Moorböden ca. 2,5 - 5 % der CO₂-Äquivalente der jährlichen Gesamtemissionen, aufgrund unangepasster Bewirtschaftung. Besonders hoch sind die Ausgasungen ackerbaulich genutzter, gepflügter und gedüngter Moore.“¹⁹ Ackerland auf entwässertem Moor trägt zu jährlichen Emissionen mit 37 Tonnen CO₂-Äq. pro Hektar bei, Grünland auf entwässertem Moor zu 29 Tonnen pro Hektar.“²⁰

Im Umweltgutachten des Umweltrates 2012 widmet sich ein Kapitel dem Zustand und Potenzial von Mooren.²¹ Hierin findet sich eine Abbildung, die die durch Moore bedingten Emissionen einiger ausgewählter Länder darstellt. Demzufolge steht Deutschland nach China und Polen an dritter Stelle der durch Moorflächen bedingten Emissionen.

16 [https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere Briefings/2019 Faktenpapier MoorklimaschutzMV Dez2019 fin korr2.pdf](https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere%20Briefings/2019%20Faktenpapier%20MoorklimaschutzMV%20Dez2019%20fin%20korr2.pdf).

17 Neben dem ehemals gespeicherten CO₂ entweicht auch zusätzlich Lachgas (N₂O), was noch klimaschädlicher wirkt als CO₂.

18 <https://www.moorwissen.de/de/moore/moornutzung/nutzungsarten.php>.

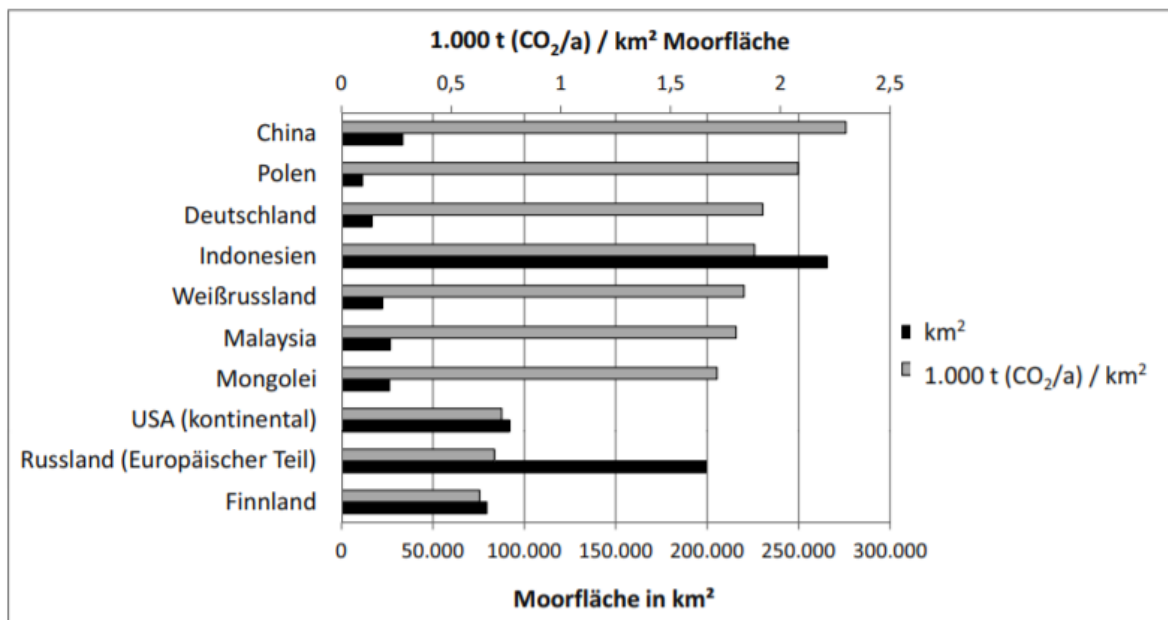
19 <https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/moorschutz/oekosystemleistungen.html>.

20 [https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere Briefings/2019 Faktenpapier MoorklimaschutzMV Dez2019 fin korr2.pdf](https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere%20Briefings/2019%20Faktenpapier%20MoorklimaschutzMV%20Dez2019%20fin%20korr2.pdf).

21 [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01 Umweltgutachten/2012_2016/2012_06_04 Umweltgutachten HD.pdf?__blob=publicationFile](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_2016/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile).

Abbildung 7-1

Moorflächen und deren Emissionen je km² (zehn größte Emittenten)



SRU/UG 2012/Abb. 7-1; Datenquelle: JOOSTEN 2010

In dem Gutachten wird hinsichtlich der Problematik der Emissionen durch landwirtschaftlich genutzte Moorflächen konstatiert: „Die Umkehr dieses Trends, zum einen durch die Erhaltung noch intakter Moore und zum anderen durch die aktive Wiedervernässung genutzter Moorböden, ist damit ein Erfolg versprechendes und vergleichsweise kostengünstiges klimapolitisches Handlungsfeld mit einem großen Emissionsreduktionspotenzial.“²²

Im Auftrag des Bundesumweltministerium (BMU) hat das Bundesamt für Naturschutz (BfN) ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben initiiert, in dem fachliche Grundlagen für die Moorschutzstrategie der Bundesregierung²³ und für deren Umsetzung erarbeitet wurden. Eine Synopse dieses Vorhabens - erarbeitet vom Institut für Ländliche Strukturforchung (IfLS) an der Goethe-

22 Ebd., Seite 243.

23 <https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/moorschutz/fachliche-grundlagen-moorschutzstrategie.html>.

Universität Frankfurt am Main - liegt seit 2020 vor.²⁴ Parallel zur Erarbeitung der Moorschutzstrategie der Bundesregierung wird seit 2017 unter gemeinsamer Federführung von BMU und BMEL eine Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz erarbeitet.²⁵

Im Grundlagenpapier für eine Moorschutzstrategie der Bundesregierung des IfLS wird die Bedeutung von Mooren für den Klimaschutz erläutert. Bisher liege der Schwerpunkt bei Umsetzungsprojekten im Moorschutz v.a. im Naturschutz und dem Schutz noch „halbwegs“ intakter Moorflächen. Da Moorschutz vor dem Hintergrund Klimaschutz verstärkt umgesetzt werden sollte, würden in Zukunft zunehmend land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen betroffen sein. Aber auch bei der Unterhaltung und Planung von Infrastruktur müsse der Moorschutz berücksichtigt werden. Um bereits gesetzte Klimaziele zu erreichen und die Netto-THG Senkenfunktion des Sektors Landnutzung und Landnutzungsänderung zu sichern, müssten auch große Teile solcher Flächen bis zum Jahr 2050 vollständig oder zumindest teilweise vernässt sein. Eine Erhöhung des Wasserstandes bedeute eine Anpassung der momentan üblichen Flächennutzung und bringe in betroffenen Regionen strukturelle Änderungen mit sich. Dringlich sei sowohl ein Verschlechterungsverbot (Umbruchverbot für Grünland auf organischen Böden, Verbot oder Genehmigungspflicht von Drainageerneuerung bzw. -vertiefung, Verbot von Tiefenumbruch auf organischen Böden) als auch die Abschaffung von Hemmnissen für die Wiedervernässung.

Am Thünen-Institut für Agrarrelevante Klimaforschung wird an den Problemen der Entstehung von klimaschädlicher Treibhausgase infolge landwirtschaftlicher Nutzung von Moorböden geforscht. Eine allgemeinverständliche Einführung in die Erforschung effektiver Klimaschutzmaßnahmen durch Moorschutz wurde als Informationsschrift veröffentlicht und steht im Internet zur Verfügung.²⁶

2.4. Landwirtschaftlich genutzte Böden

Zunächst wird auf landwirtschaftlich genutzte Böden als Emissionsquelle eingegangen, im weiteren Verlauf des Kapitels seine Kohlenstoffbevorratende Kapazität hingegen dargestellt. Landwirtschaftlich genutzten Böden sind Emissionsquellen von klimarelevanten Gasen.

Neben der erhöhten Kohlendioxid (CO₂)-Freisetzung infolge von Landnutzung und Landnutzungsänderungen (Umbruch von Grünland- und Niedermoorstandorten) sowie der CO₂-Freisetzung durch die Anwendung von Harnstoffdünger und der Kalkung von Böden handelt es sich hauptsächlich um Lachgas²⁷-Emissionen. Mikrobielle Umsetzungen (sog. Nitrifikation und Denitrifikation) von Stickstoffverbindungen führen zu Lachgas-Emissionen aus Böden und entstehen

24 H. Nitsch und J. Schramek: [Grundlagen für eine Moorschutzstrategie der Bundesregierung \(bfn.de\):
https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landschaftsundbiotopschutz/Dokumente/SynopseMoorschutzstrategiefinal_2.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landschaftsundbiotopschutz/Dokumente/SynopseMoorschutzstrategiefinal_2.pdf).

25 <https://www.bmu.de/themen/natur-biologische-vielfalt-arten/naturschutz-biologische-vielfalt/moorschutz/>.

26 https://www.thuenen.de/media/ti-themenfelder/Wasser/Organische_Boeden/ForschungsReport_2-11-Moor.pdf.

27 Distickstoffmonoxid; N₂O.

vornehmlich aus der Umsetzung von Mineral- und Wirtschaftsdünger sowie der Umsetzung von Ernterückständen.

Das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) ist ein internationales Umweltabkommen mit dem Ziel, die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels abzumildern. Es wurde am 9. Mai 1992 verabschiedet und ist am 21. März 1994 in Kraft getreten. Die unterzeichnenden Staaten (derzeit 197) verpflichten sich, in regelmäßigen Abständen über ihre Treibhausgasemissionen zu berichten und Klimaschutzmaßnahmen umzusetzen. Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) eine Studie zu „Umweltauswirkungen der Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) in einem zukünftigen Klimaschutzabkommen“ unterstützt, das am Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut von 2012 bis 2015 durchgeführt wurde. Im Jahr 2016 erschien der Endbericht, mit Fokus auf den Waldsektor.²⁸ Im November 2013 erschienen „Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft“ im Rahmen eines Thünen-Reports.²⁹ Hierin werden Stand und Entwicklung der THG-Emissionen der Gruppen Landwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) anhand der Daten aus der nationalen Emissionsberichterstattung dargestellt:

„Die jährlichen THG-Emissionen der Quellgruppe 4 (Landwirtschaft) in Deutschland sind zwischen 1990 und 2010 von ca. 83 auf 67,5 Mio. t CO₂-äq. zurückgegangen: Dies entspricht einem Rückgang von knapp 19 % gegenüber 1990. Der Anteil der Quellgruppe 4 an den gesamten THG-Emissionen in Deutschland einschließlich LULUCF lag im Jahr 2010 bei 7,1 %. In der Quellgruppe LULUCF haben bis zum Jahr 2001 aufgrund der gestiegenen C-Vorräte in den Wäldern die Kohlenstofffestlegungen die Freisetzung aus anderen Flächennutzungen überwogen. Im Mittel der Jahre 1990 bis 2001 lag die Netto-Festlegung bei 27,7 Mio. t CO₂-äq. pro Jahr. Danach überstieg die Kohlenstofffreisetzung die Festlegungen. Im Jahr 2010 lag die jährliche THG-Emission der Quellgruppe LULUCF bei 17,5 CO₂-äq., dies entspricht 1,8 % an den gesamten THG-Emissionen in Deutschland. In der Kategorie Wald lag die Senkenwirkung im Jahr 2010 bei 25 Mio. t CO₂-äq. bzw. -2,6 % der gesamten THG-Emissionen in Deutschland einschließlich LULUCF. Die Emissionen aus Acker- und Grünlandnutzung betragen zusammen 37,5 Mio. t CO₂-äq. (3,9 % der Gesamtemissionen). Aus Feuchtgebieten und Siedlungen emittierten weitere 4,7 Mio. t CO₂-äq. (0,5 % der Gesamtemissionen).“³⁰

Hinsichtlich der Fähigkeit Kohlenstoff zu binden, finden sich Angaben in einer zusammenfassenden Darstellung, die vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf Basis der

28 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-15_lulucf-post2020_uba-abschlussbericht_final.pdf.

29 Osterburg B, et al. (2013): Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 158 p, Thünen Rep 11. https://literatur.thuenen.de/dig-bib_extern/dn052858.pdf.

30 Ebd., Seite 4.

Bodenzustandserhebung³¹ im Jahr 2018 publiziert wurde.³² Verfasst wurde die Schrift von Wissenschaftlern des Thünen-Instituts für Agrarklimaschutz. Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW), die vom Thünen-Institut durchgeführt wurde, ist die erste bundesweit einheitliche Inventur landwirtschaftlich genutzter Böden und ist in voller Länge im Internet abrufbar.³³

Hinsichtlich des Kohlenstoffvorrates in landwirtschaftlich genutzten Böden wird konstatiert³⁴:

„Die Vorräte an organischem Kohlenstoff zeigen einen deutlichen Zusammenhang mit der Landnutzung. Mineralböden unter Ackernutzung in Deutschland weisen in der Bodentiefe 0–30 cm im Mittel einen Vorrat an organischem Kohlenstoff von 61 t ha⁻¹ auf und haben damit 31 % weniger organischen Kohlenstoff als Böden unter Grünlandnutzung mit 88 t ha⁻¹. Bilanziert man das gesamte Bodenprofil bis in einen Meter Tiefe, erhöhen sich die mittleren Vorräte an organischem Kohlenstoff in Mineralböden auf 96 t ha⁻¹ für Ackerböden und 135 t ha⁻¹ für Böden unter 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.“³⁵

31 Informationsseite mit weiterführenden Verweisen: [Thünen-Institut: Bodenzustandserhebung Landwirtschaft \(BZE-LW\) \(thuenen.de\)](https://www.thuenen.de). Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) ist die erste bundesweit einheitliche Inventur landwirtschaftlich genutzter Böden.

32 Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): [Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands \(bmel.de\)](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.pdf;jsessionid=4599A701B3C1FDFA03B8FC6A65604D13.live832?__blob=publicationFile&v=10); November 2018. Abrufbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.pdf;jsessionid=4599A701B3C1FDFA03B8FC6A65604D13.live832?__blob=publicationFile&v=10.

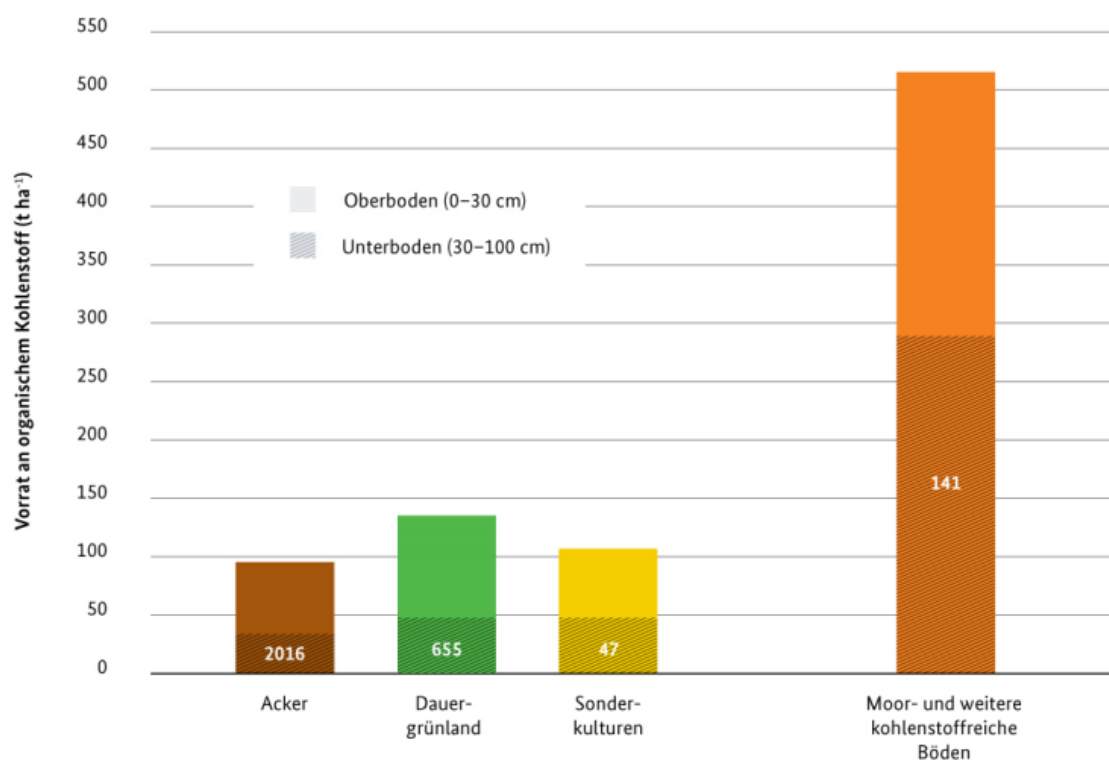
33 Weiterführende Hinweise siehe: [Thünen-Institut: Bodenzustandserhebung Landwirtschaft \(BZE-LW\) \(thuenen.de\)](https://www.thuenen.de).

34 Seite 16 f in: Hrsg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): [Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands \(bmel.de\)](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.pdf;jsessionid=4599A701B3C1FDFA03B8FC6A65604D13.live832?__blob=publicationFile&v=10); November 2018. Abrufbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.pdf;jsessionid=4599A701B3C1FDFA03B8FC6A65604D13.live832?__blob=publicationFile&v=10.

35 Zur exakten Berechnungsweise des Kohlenstoff- und Stickstoffvorrates siehe Seite 28 in: https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Thuenen_Report_64_final.pdf.

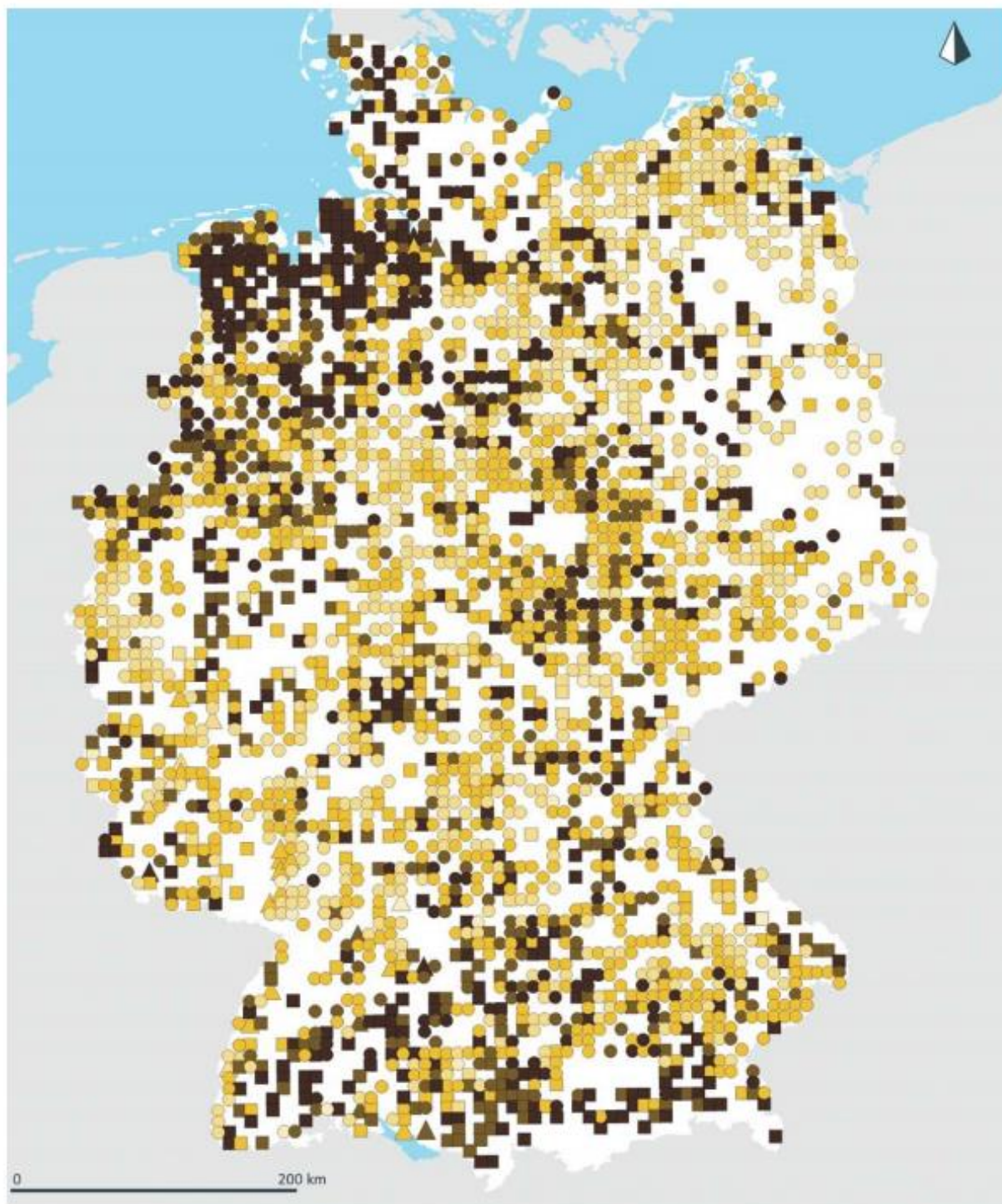
Diese Ergebnisse werden grafisch wie folgt präsentiert:

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.

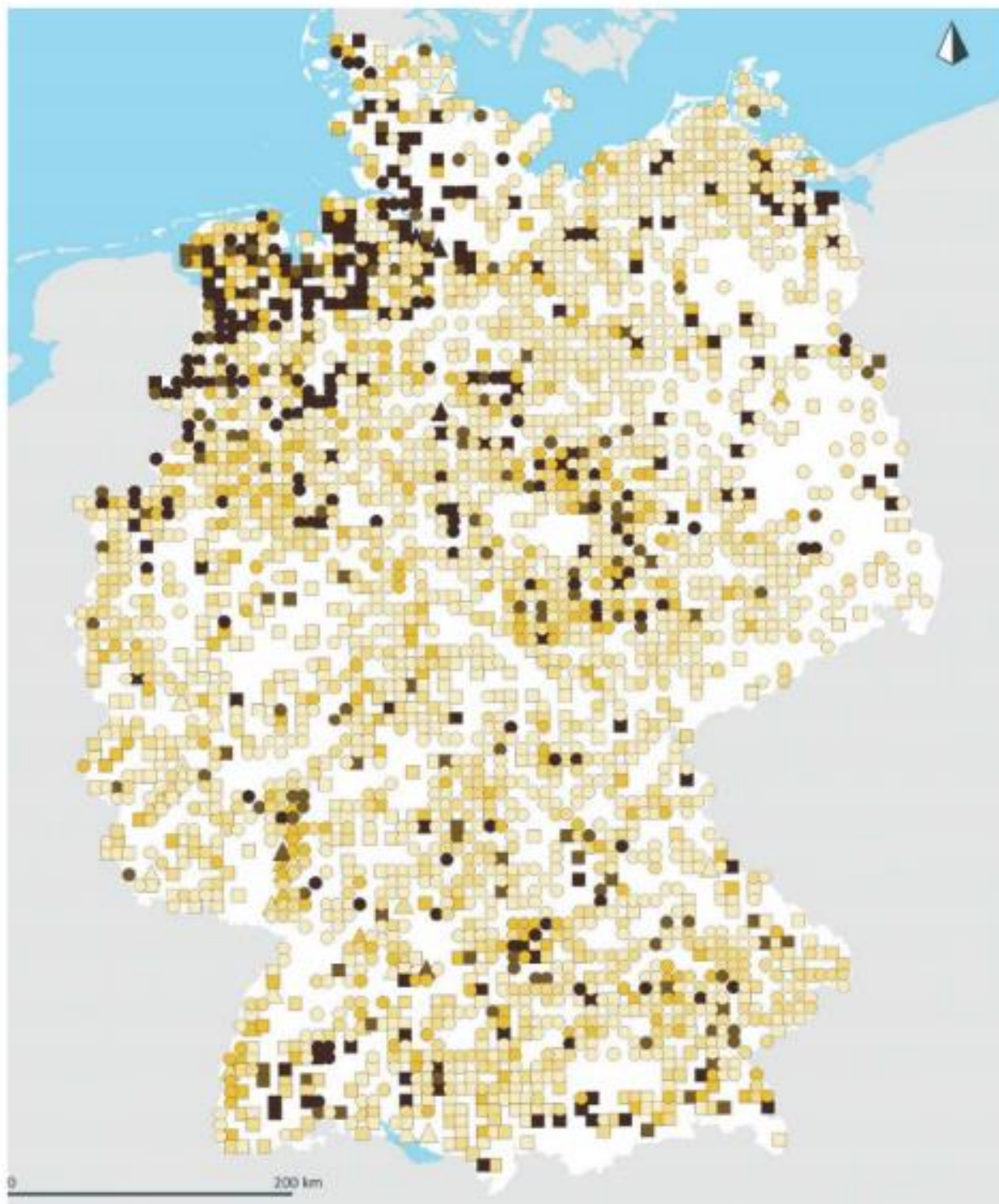


Daneben zeigen sich deutlich Unterschiede je nach geografischer Lage in Deutschland. Die Vorräte an organischem Kohlenstoff sind sowohl im Oberboden wie in den Unterböden besonders in Nordwestdeutschland ausgeprägt:

KARTE 2: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Oberböden (0–30 cm). Stand August 2018. Die Symbole differenzieren die Landnutzungsarten Acker, Dauergrünland und Sonderkulturen (z. B. Wein, Obstbau, Hopfen).



KARTE 3: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Unterböden (30–100 cm). Stand August 2018. Die Symbole differenzieren die Landnutzungsarten Acker, Dauergrünland und Sonderkulturen (z. B. Wein, Obstbau, Hopfen).

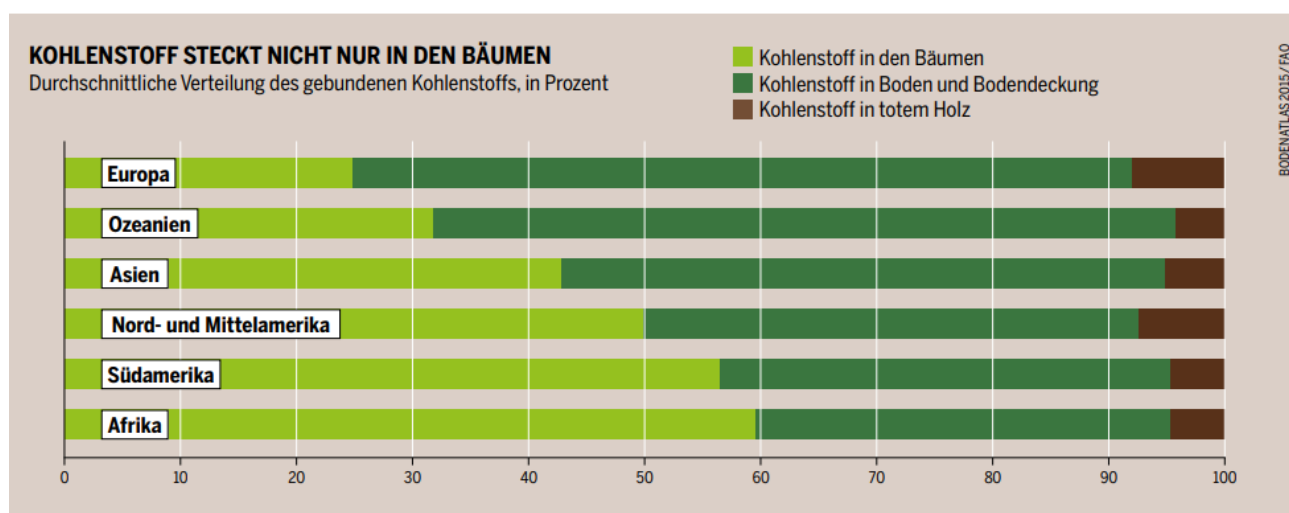


- Vorrat an organischem Kohlenstoff (t ha⁻¹)
- | | | |
|---------|---------|-----------------|
| ○ < 30 | ● 70–90 | ○ Acker |
| ○ 30–50 | ● >90 | □ Dauergrünland |
| ○ 50–70 | | △ Sonderkultur |

3. Populärwissenschaftliche Darstellungen

3.1. Bodenatlas 2015

Der Bodenatlas 2015 wurde als Kooperationsprojekt von der Heinrich-Böll-Stiftung, Institute for Advanced Sustainability Studies, Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland und Le Monde diplomatique erstellt. Hierin werden verschiedene umweltrelevante Themen zu Böden erläutert. Ein Kapitel (16: Der große Kohlenpeicher) widmet sich dem Potenzial von Böden als Speicher für Kohlenstoffverbindungen. Dabei wird deutlich, dass die Speicherkapazität von Böden insbesondere in Europa eine Rolle spielt. Hier wird im weltweiten Vergleich besonders viel Kohlenstoff im Boden gesammelt.³⁶ Europa emittiert viel mehr Treibhausgase, als es bindet. Zugleich sinkt aber die Qualität der Böden und damit auch seine Speicherkapazität.



3.2. Max Planck Gesellschaft

Im Forschungsbericht 2011 hat das Max-Planck-Institut für Biogeochemie eine Informationsschrift zu Kohlenstoffspeicherung in Böden veröffentlicht.³⁷

Hierin wird allgemeinverständlich erläutert, wo Kohlenstoff im Boden zu finden ist, Beispiele für offene Forschungsfragen benannt und Methoden genannt, mittels derer an der Frage des Alters,

36 Bodenatlas 2015: https://www.boell.de/sites/default/files/bodenatlas2015_iv.pdf?dimension1=ds_bodenatlas. Seite 16.

37 Schrumpf, M.; Trumbore, S.: Unser wichtigster Kohlenstoffspeicher: Wie der Boden als dünne Haut der Erde globale Stoffkreisläufe und das Klima beeinflusst; in: Forschungsbericht 2011 - Max-Planck-Institut für Biogeochemie; https://www.mpg.de/4705567/Kohlenstoffspeicher_Boden#:~:text=B%C3%B6den%20sind%20der%20gr%C3%B6%C3%9Fte%20terrestri-sche,f%C3%BCr%20den%20Klimawandel%20von%20Bedeutung.

der Verweilzeiten des Kohlenstoffs im Boden und der zugrundeliegenden geochemischen Prozesse geforscht werden kann.

3.3. Spektrum der Wissenschaft

Im Onlineangebot der populärwissenschaftlichen Zeitschrift „Spektrum der Wissenschaft“ finden sich verschiedene Artikel zur CO₂-Speicherung in Böden.

In einem 2018 erschienenen Artikel („Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken?“)³⁸ werden verschiedene Senken von Ozeanen, Böden und Wäldern beschrieben, ihr Potenzial zur CO₂-Speicherung dargestellt und auf bestehende Probleme und Gefährdungen hingewiesen.

In einem 2019 erschienenen Artikel³⁹ wird auf die Problematik der Freisetzung von CO₂ durch Mikroorganismen im Boden eingegangen. Landökosysteme gäben immer mehr Kohlendioxid aus den Böden ab. Das liege an einer zunehmenden Stoffwechselaktivität von Mikroben. Dies wiederum könne langfristig die Auswirkungen des Klimawandels verschärfen.

Ein 2016 erschienener Artikel thematisiert die Folgen der Entwässerung von Mooren hinsichtlich einer erhöhten Brandgefahr und der steigenden Emissionen.⁴⁰

3.4. Umweltbundesamt

Das Umweltbundesamt bietet auf seiner Internetpräsenz verschiedene Informationsschriften zum Thema Böden und Klimawandel.

- „Anpassung: Handlungsfeld Boden“: Hier werden Anpassungsmaßnahmen vorgestellt, die darauf abzielen, den Boden vor Erosion, Humusverlust und anderen klimabedingten Risiken zu schützen.⁴¹
- „Boden beobachten und bewerten“: Diese Seite bietet einen Überblick über die wichtigsten Projekte auf Bundesebene zum Schutz der Böden.⁴²

38 R. Knauer: Wie viel Kohlendioxid kann die Erde noch schlucken? Spektrum.de; 24.04.2018; <https://www.spektrum.de/news/kohlenstoffdioxid-kann-in-waeldern-und-meeren-gespeichert-werden-aber-wie-lang/1561156>.

39 K. Ogle: Mikroorganismen im Boden setzen mehr CO₂ frei; Spektrum.de; 16.01.2019; <https://www.spektrum.de/magazin/boeden-setzen-immer-mehr-kohlendioxid-frei/1614978>.

40 D. Lingenhöhl: Wenn Moore zu Zunder werden; Spektrum.de; 27.06.2016; <https://www.spektrum.de/news/wenn-moore-zu-zunder-werden/1414720>.

41 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-boden>.

42 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/boden-schuetzen/boden-beobachten-bewerten#boden-dauerbeobachtung>.

- „Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft“: Es wird die Auswirkung von Landnutzung und Forstwirtschaft auf den Kohlenstoffzyklus und die klimawirksame CO₂-Speicherungskapazität dargestellt.⁴³
- „Peatlands, Forests and the Climate Architecture: Setting Incentives through Markets and Enhanced Accounting“: In der Studie, die im Auftrag der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) im UBA erstellt wurde, werden Schutzmaßnahmen für Moore auf internationaler Ebene formuliert.⁴⁴

4. Wissenschaftliche Literatur

Eine Auswahl wissenschaftlicher Literatur zum Thema der Speicherung von organischem Kohlenstoff in verschiedenen Böden wurde auf folgende Weise zusammengestellt:

Zunächst wurde ausgehend von der oben zitierten allgemeinverständlichen Darstellung der Max Planck Gesellschaft⁴⁵ aus dem Jahr 2011 nach Publikationen derselben Arbeitsgruppe (Susan E. Trumbore; Max-Planck-Institut für Biogeochemie) jüngerer Datums gesucht. Diese beschäftigen sich mit der Problematik der Speicherung von CO₂ in verschiedenen Bodentypen. Des Weiteren sind in Deutschland insbesondere die Institute für Agrarklimaschutz⁴⁶ und Waldökosysteme⁴⁷ am Thünen-Institut spezialisiert auf Fragen der klimawirksamen Auswirkung verschiedener Bodennutzungsarten. Daher wurden wissenschaftliche Publikationen dieser beiden Abteilungen durchsucht. Als dritter Ansatz wurde in der lebenswissenschaftlichen Literatur-Datenbank PubMed Central⁴⁸ in Hinblick auf Übersichtsartikel (Reviews) zur Thematik der CO₂-Speicherung im Boden recherchiert. Im Folgenden werden ausgewählte Artikel aus diesen Recherchen (dem Erscheinungsdatum nach geordnet) kurz dargestellt. Es handelt sich dabei nicht durchgehend um Forschungsartikel, sondern auch um Übersichtsartikel, Informationsartikel und Meinungen, die von Wissenschaftlern der entsprechenden Disziplinen verfasst wurden.

43 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung>.

44 <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/peatlands-forests-the-climate-architecture-setting>.

45 Max-Planck-Gesellschaft: Unser wichtigster Kohlenstoffspeicher: Wie der Boden Wie der Boden als dünne Haut der Erde globale Stoffkreisläufe und das Klima beeinflusst; von Schrumpf, M., Trumbore, S.; Forschungsbericht 2011 - Max-Planck-Institut für Biogeochemie; https://www.mpg.de/4705567/Kohlenstoffspeicher_Boden.

46 <https://www.thuenen.de/de/ak/>.

47 <https://www.thuenen.de/de/wo/>.

48 PubMed Central (PMC) ist ein kostenloses Volltextarchiv für biomedizinische und lebenswissenschaftliche Zeitschriftenliteratur bei der National Library of Medicine der U.S. National Institutes of Health (NIH/NLM): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>.

M.W.I. Schmidt et al. (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property.⁴⁹

Dieser Artikel erschien 2011 in der renommierten Zeitschrift Nature als „Perspective“-Artikel. Dies sind Artikel, die ein Forum bieten, wissenschaftliche Ideen zu diskutieren. Sie sind insgesamt vorausschauender, teilweise auch spekulativer als Übersichtsartikel (Reviews). Ziel ist die Anregung von wissenschaftlichen Diskussionen und Experimenten. Ebenso wie Übersichtsartikel durchlaufen diese Artikel ein Begutachtungssystem.

Global gesehen enthält die organische Bodensubstanz mehr als dreimal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre oder die terrestrische Vegetation. Auf der anderen Seite ist allerdings bekannt, dass es organische Bodensubstanzen gibt, die über Jahrtausende hinweg bestehen bleiben, andere hingegen bereits nach kurzer Zeit zersetzt werden. Da man den Grund bislang nicht kennt, ist es schwierig, Vorhersagen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Speicherung von Kohlenstoff im Boden zu treffen. Neuere Experimente hätten gezeigt, dass die Stabilität der Zusammensetzung des Bodens nicht allein durch die molekulare Zusammensetzung determiniert sei. Verschiedene Umwelt- und biologische Einflüsse spielen eine entscheidende Rolle. In diesem Artikel werden Möglichkeiten aufgezeigt, mittels dieser Erkenntnisse verbesserte Vorhersagen der Reaktion der organischen Bodensubstanz auf die globale Erwärmung zu erhalten. Zwei wesentliche Probleme sind dabei, dass momentan physikalische und chemische Eigenschaften der Bodenstruktur nicht ausreichend erfasst werden und dass die wichtigsten Stabilisierungsmechanismen je nach Bodentyp und topografischer Lage räumlich variierten. Mögliche experimentelle Ansätze umfassen u.a. die Nachverfolgung von Prozessen und Stoffumsetzungen (pathways and fluxes) und die verantwortlichen biologischen Grundlagen, die Verwendung von integrativen computergestützten Datenbanken und das Studium der Mechanismen in globalen Ökosystemmodellen.

T.A. Onti (2012): Soil Carbon Storage⁵⁰

Bei dieser Publikation handelt es sich um einen Artikel, der im Rahmen des Nature Education Knowledge Projekts der „Nature Publishing Group“ veröffentlicht wurde.⁵¹

In dem Artikel wird die Speicherung von organischem Boden-Kohlenstoff als Folge von Wechselwirkungen zwischen den dynamischen ökologischen Prozessen der Photosynthese, Zersetzung und Bodenatmung beschrieben. Menschliche Aktivitäten hätten zum einen dazu geführt, dass der Gehalt von organischem Kohlenstoff im Boden gesunken sei, zum anderen ein globaler Klimawandel zu beobachten sei. In Zukunft gebe es die Chance, dass durch menschliches Eingreifen in

49 Schmidt, M., Torn, M., Abiven, S. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature 478, 49–56 (2011). <https://doi.org/10.1038/nature10386>.

50 Ontl, T. A. & Schulte, L. A. (2012) Soil Carbon Storage. Nature Education Knowledge 3(10):35.

51 Das Knowledge Project ist eine Sammlung von Artikeln zu einer Vielzahl von Themen, geschrieben von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen. Die Artikel sind im Archiv der Nature Publishing Group verfügbar, allerdings ist das Projekt nicht mehr aktiv. [<https://www.nature.com/scitable/knowledge/>.]

Form von spezifischen Landnutzungsmustern und Landbewirtschaftungsstrategien vor dem Hintergrund eines erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehalts und einer höheren Temperatur die Speicherung von organischem Kohlenstoff in Böden erhöht werde.

M. Wiesmeier et al. (2013): Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) – Implications for carbon sequestration⁵²

Die gemäßigten Waldböden Mitteleuropas gelten als wichtiger Pool für organischen Kohlenstoff im Boden (SOC). Ihnen wird oftmals ein hohes Potenzial für die Sequestrierung von Kohlenstoff zugeschrieben. In einem 2013 in „Forest Ecology and Management“ erschienenen Forschungsartikel analysieren die Wissenschaftler Daten zur Speicherfähigkeit von Waldböden. Hierzu wurde in Walddatensatz von 596 Bodenprofilen in Bayern erhoben.

Die Wissenschaftler berechnen einen medianen⁵³ Gesamt-organischen Boden-Kohlenstoff-Vorrat von 9,8 kg m², der im Vergleich zu vielen anderen Erhebungen in Mitteleuropa niedriger ausfiel. Das Klima fungiere dabei als steuernder Parameter, wobei die Vorräte in kühlen, feuchten Gebirgsregionen höher ausfielen und eine starke Abnahme in Gebieten mit höheren Temperaturen zu verzeichnen sei. **Keine signifikanten Unterschiede der gesamten Speicherung wurden zwischen Laub-, Nadel- und Mischwäldern gefunden.** Allerdings speicherten Nadelwälder etwa 35 % des gesamten organischen Boden-Kohlenstoffs in der organischen Schicht, die anfällig für menschliche Störungen, Waldbrände und steigende Temperaturen sei.

Im Gegensatz dazu speicherten Misch- und Laubwälder den größten Teil des SOCs in dem Mineralboden. Außerdem zeigten diese beiden Waldtypen unveränderte oder sogar leicht erhöhte mineralische Vorräte bei höheren Temperaturen, während die Vorräte in Mineralböden unter Nadelwäldern deutlich geringer waren.

Die Autoren schließen daraus, dass Misch- und Laubwälder für die C-Sequestrierung vorteilhafter seien als Nadelwälder. Eine verstärkte Einbindung von Laubbaumarten in ausgedehnten Nadelwäldern Bayerns würde erhebliche SOC-Verluste als Folge steigender Temperaturen im Zuge des Klimawandels verhindern.

A. Wiesmeier et al. (2014): Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation⁵⁴

Wie bereits in der Arbeit aus dem Jahr 2013 (s.o.) wurden in dieser Arbeit verschiedene Bodenarten in Südostdeutschland (Bayern) hinsichtlich ihres Potenzials Kohlenstoff zu speichern untersucht (516 Bodenprofile).

52 M. Wiesmeier et al. (2013): Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) – Implications for carbon sequestration; Forest Ecology and Management 295 (2013) 162-172.

53 Der Median bezeichnet einen statistischen Lageparameter: Derjenige Wert, so das 50% der Daten oberhalb und 50% der Daten unterhalb dieses Wertes liegen.

54 A. Wiesmeier et al. (2014): Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation; Global Change Biology (2014) 20, 653–665, doi: 10.1111/gcb.12384.

Hierzu wurde der organische Kohlenstoffgehalt im Boden in Schluff- und Tonfraktionen bestimmt, um eine Abschätzung für das Kohlenstoff-Sequestrationspotenzial zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass Ackerböden einen niedrigen C-Sättigungsgrad (Kohlenstoffsättigungsgrad) von etwa 50 % aufwiesen und erhebliche Mengen an zusätzlichem Kohlenstoff speichern können. Ein relativ hohes C-Sequestrationspotenzial wurde auch für Grünlandböden ermittelt. Im Gegensatz dazu wiesen Waldböden ein geringes C-Sequestrationspotenzial auf, da sie nahezu C-gesättigt waren.

Obwohl nach Ansicht der Autoren das Erreichen der gesamten geschätzten C-Speicherkapazität unrealistisch sei, könnte eine verbesserte Bewirtschaftung von Ackerflächen erheblich zur CO₂-Minderung beitragen. Außerdem bringe die Erhöhung der organischen Kohlenstoff-Vorräte im Boden einen zusätzlichen Nutzen in Bezug auf eine verbesserte Bodenfruchtbarkeit und landwirtschaftliche Produktivität.

S. Trumbore et al. (2015): Forest health and global change⁵⁵

In der Zeitschrift Science ist 2015 ein Übersichtsartikel zur Waldgesundheit und dem globalen Wandel erschienen.

Wälder sind derzeit aufgrund des Klimawandels, Luftverschmutzung und neuen Schädlingszusammensetzungen Einflüssen ausgesetzt, denen sie zu früheren Zeiten nicht begegnen mussten. Es ist essentiell zu verstehen, an welchen Stellen Schwellenwerte überschritten werden und ggf. irreversible Schäden auftreten. Um dies zu verstehen, werden in diesem Übersichtsartikel verschiedene Fragen formuliert und knapp der wissenschaftliche Stand zusammengefasst. Hierbei werden Methoden vorgestellt, mittels derer der Zustand des Waldes und seiner Gesundheit gemessen werden kann. Sodann werden vermutete Zeitspannen vorgestellt, in welchem Ausmaß und in welcher Zeitspanne Wald-Gesundheit wieder hergestellt werden kann. Es werden Beispiele für verschiedene Belastungen und Störungen, die sich auf Wälder auswirken aufgeführt. Abschließend wird auf Möglichkeiten eingegangen, wie global der Zustand der Wälder beobachtet und überwacht werden kann.

R. Amundson et al. (2018): Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool⁵⁶.

In diesem Kommentarartikel („Opinion“) wird argumentiert, warum die Speicherfähigkeit von Kohlenstoff im Boden ein schwer zu definierendes Mittel zur Eindämmung des Klimawandels darstellt. Daher eigneten sich - so die Autoren - Maßnahmen zur CO₂-Speicherung in Böden nicht, um den Klimawandel zu beheben. Sie stellten lediglich ein wichtiges Mittel dar, menschliches Leben zu schützen, da Böden eine Vielzahl von Funktionen haben, die für das Leben essenziell seien.

55 S. Trumbore et al. (2015): Forest health and global change; Science 21 Aug 2015: Vol. 349, Issue 6250, pp. 814-818. <https://DOI:10.1126/science.aac6759>.

56 R. Amundson et al. (2018): Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool, PNAS November 13, 2018 115 (46) 11652-11656; <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>.

Fast 10.000 Jahre kultivierter Landwirtschaft hätten den globalen Bodenkohlenstoff um 116 Gigatonnen reduziert. Dies sei eine Menge, die mehr als einem Jahrzehnt der derzeitigen industriellen Emissionsraten entspreche.

Der Vorschlag, dass durch veränderte landwirtschaftliche Techniken ein großer Teil dieses Kohlenstoffs in den domestizierten Böden wiederhergestellt werden könne und somit ein bedeutendes Instrument zur Abschwächung des Klimawandels zur Verfügung stehe, sei nicht umsetzbar und zu optimistisch. In vier Kapiteln argumentieren die Autoren, warum sei zu dieser Schlussfolgerung kommen.

- *Wissenschaft und die Stakeholder:* Gerade Landwirte seien in den USA sehr konservativ. Sie seien nicht der Meinung, dass der Mensch einen substantiellen Anteil am Klimawandel habe, seien besorgt über eine zunehmende staatliche klimapolitische Regulierung und zeigten sich skeptisch gegenüber Experten, die keine Landwirte seien. Kulturelle Barrieren bestünden gegenüber akademischen Umweltwissenschaftlern. Die Kommunikation von Umweltrisiken zwischen ihnen und Landwirten gestalte sich schwierig. Insgesamt sei die Akzeptanz der gegenwärtigen staatlichen Programme zur Bodengesundheit extrem gering: Nur 2 bis 5 % der Ackerflächen in den USA erhielten Mittel aus den beiden größten Naturschutzprogrammen der USA. Zusätzlich seien Farmen oftmals aufgrund ihres Umsatzes von einer staatlichen Förderung ausgeschlossen.
- *Politische und wirtschaftliche Herausforderungen:* Eine substanzielle Ausweitung der Kohlenstoffbindung auf US-amerikanischem Ackerland werde durch verschiedene Faktoren behindert. Dies seien zum einen hohe Transaktionskosten, einschließlich Forschung und Planung auf Seiten der Landwirte, sowie damit verbundene Investitionen auf Seiten der Landwirte in neue Ausrüstung, Infrastruktur, Arbeit und Management. Des Weiteren bestünde Forschungsbedarf in verschiedenen Fragestellungen der Kohlenstoff-Bindung. Allerdings sei diese Forschung teuer. Es fehle auch an technischer Unterstützung für Landwirte. Zudem bestehe auf Seiten der Landwirte erhebliche Vorbehalt gegenüber Datenschutzrechtlichen Fragen und staatlichen Vorschriften.
- *Physikalische Grenzen:* Die anthropogene Erwärmung setze eine positive Rückkopplungsschleife mit dem Bodenkohlenstoff in Gang. Bodenmikroben, die auf die steigende Temperatur reagierten, wandelten in erhöhtem Maße Kohlenstoff in Kohlendioxid um. Daher bestünden Zweifel, in welchem Ausmaß diese Rückkopplung in den nördlichen Breiten CO₂ freisetze. Zudem werde dies auch auf Ackerlandböden sich bemerkbar machen. Es könnte sein, dass die Boden-Klima-Rückkopplung das Ausmaß des maximalen Kohlenstoffspeicherpotenzials aller Böden um einen ungewissen Betrag reduzieren werde.
- *Abschwächung versus Anpassung:* Zwar sei es tatsächlich möglich, dass Böden in gewissem Maße Kohlenstoff zurückgewinnen könnten. Dies dürfe aber nicht dazu führen, dass hierin zu viel Hoffnung gelegt werde und andere klimapolitische Maßnahmen weiter verzögert würden.

E. Grüneberg et al. (2019): Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in German Forest Soils⁵⁷

In einem Fachbuchbeitrag aus dem Jahr 2019 werden die Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsänderungen in deutschen Waldböden dargestellt.

Waldböden spielen eine wichtige Rolle im aktiven Kohlenstoff (C)-Kreislauf der terrestrischen Ökosysteme, da sie ein Drittel des globalen organischen Kohlenstoffs speichern. Daher wird die Sequestrierung von atmosphärischem Kohlenstoff in Böden als möglicher Beitrag zur Minderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration diskutiert. Es wird davon ausgegangen, dass die Kohlenstoffdynamik in Waldökosystemen ein Ergebnis sowohl von Umwelt- als auch von menschlich verursachten Faktoren ist.

Deutschlands Waldböden enthielten - so die Autoren - in der organischen Schicht und im Mineralboden bis 90 cm Tiefe im Mittel $117,1 \pm 1,7 \text{ Mg}^{58} \text{ C ha}^{-1}$ ⁵⁹, die seit dem ersten deutschen Waldbodenbericht⁶⁰ um $0,75 \pm 0,09 \text{ Mg C}$ pro Hektar und pro Jahr signifikant zugenommen hätten, was zu einer Gesamtzunahme von $11,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ führe. Die Analysen zeigten eine Variation der Kohlenstoffvorräte in der organischen Schicht, die besonders von der Baumart bestimmt werde. Organische Schichten unter Laubbäumen speicherten weniger Kohlenstoff als unter Nadelbäumen, während die Baumarteneffekte auf die Kohlenstoffvorräte des Mineralbodens vergleichsweise weniger ausgeprägt seien. Die Kohlenstoffvorräte des Bodens wurden außerdem von den Standortbedingungen beeinflusst. Eine effektive Auswahl von Baumarten in Kombination mit spezifischen Standortbedingungen könne daher das Kohlenstoffspeicherpotenzial von Böden erhöhen. In dem Artikel wird von Ergebnissen der Forschergruppe berichtet, wonach spezifische Auswirkungen der Stickstoffdeposition und der Waldkalkung sich verändernd auf Kohlenstoffvorräte auswirkte. Der zusätzliche Stickstoff habe das Potenzial, die Sequestrierung von Kohlenstoff durch eine Steigerung der Produktivität und Akkumulation von organischer Bodensubstanz durch erhöhte Streuproduktion zu erhöhen, während die Kalkung die Bodenatmung in Abhängigkeit von verschiedenen Umweltbedingungen sowohl stimulieren als auch hemmen könne. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass weitere Forschungen notwendig seien, um die wichtigsten Faktoren zu identifizieren, die den Umsatz der organischen Bodensubstanz in Bezug auf die Auswirkungen anthropogener Effekte, wie Waldbestandsmanagement, Kalkung oder atmosphärische Stickstoffdeposition insbesondere auf die Dynamik der mikrobiellen Gemeinschaften sowie auf die Rekalzitanz⁶¹ und Stabilisierung der organischen Bodensubstanz beeinflussen.

57 E. Grüneberg et al. (2019): Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in German Forest Soils; Status and Dynamics of Forests in Germany. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol 237. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_6

58 Mg Magnesium

59 Megagramm Kohlenstoff pro Hektar.

60 Wolff B, Riek W (1996) Deutscher Waldbodenbericht 1996-Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987-1993. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, Germany.

61 Strukturchemische Stabilität von organischen Verbindungen.

J. Loisel et al. (2020): Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink.⁶²

In der Zeitschrift Nature Climate Change ist 2020 ein Analyse-Artikel Auswirkungen der klimatischen Veränderungen auf die globale Kohlenstoffsенke „Torf“ erschienen.

In Prognosen des zukünftigen Klimawandels seien noch immer Moore trotz ihrer besonderen Bedeutung als Kohlenstoffsенke nur unzureichend oder gar nicht enthalten. Ziel des Artikels ist aufzuzeigen, dass es in Hinblick auf die Kohlenstoffsенkefunktion von Mooren noch zahlreiche offene Forschungsfragen gibt. Diese seien grundlegend für das Verständnis der Interaktionen zwischen Moor, Kohlenstoffspeicher und Klima.

In dem Analyse-Artikel werden verschiedene Veränderungsfaktoren benannt, die die globale Kohlenstoffbilanz von Mooren beeinflussen:

- (1) Temperatur: Ein Ansteigen der Temperatur kann zu einer höheren Pflanzenproduktivität führen. Außerdem kann mehr Torf abgebaut werden oder es kommt zu Zersetzungreaktionen und damit Kohlenstoffverlust. Allerdings ist der Einfluss von Temperatur nur unter gleichzeitiger Beurteilung der Feuchtigkeit zu bewerten.
- (2) Atmosphärische Verschmutzung: Der Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen Böden fördert die Pflanzenproduktion und beschleunigt die Zersetzung von Torf. Wissenschaftler haben einen Schwellenwert vorgeschlagen, jenseits dessen Torfmoos nicht mehr mit verwurzelten Pflanzen (Sträuchern) konkurrieren kann. Das Überschreiten dieser Schwelle würde dazu führen, dass es zu einer Veränderung der Pflanzenzusammensetzung kommt.
- (3) Meeresspiegel: Steigt der Meeresspiegel schnell an, werden Torfgebiete überflutet. Ein moderater Anstieg hingegen wird von Torfgebieten abgepuffert.
- (4) Feuer: Torfbrand führt zu einem direkten Verlust der Pflanzen im Moor. Nach einem Torfbrand kann sich der Kohlenstoffhaushalt schnell erholen, da die Pflanzenproduktion steigt. Allerdings führen trockenere Bedingungen zu häufigen Bränden, was dazu führen kann, dass die Erholungsphase nicht mehr ausreichend lang ist.
- (5) Permafrost⁶³: Aggradation⁶⁴ verlangsamt die Torfakkumulation und konserviert bestehende Ablagerungen. Degradation kann zum Kollaps und zur Wiederbefeuchtung führen, was die Pflanzenproduktion anregt und zu großen CH₄ Emissionen führen kann. Wenn das Schmelzwasser abfließt, wird eine verstärkte Torfzersetzung erwartet.

62 Loisel, J., Gallego-Sala, A.V., Amesbury, M.J. et al. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. Nat. Clim. Chang. 11, 70-77 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>.

63 „Von Permafrost oder Dauerfrostboden sprechen Forscher, sobald die Temperatur des Bodens in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null Grad Celsius liegt.“ (<https://www.awi.de/im-fokus/permafrost/permafrost-eine-einfuehrung.html>).

64 Natürliche Ablagerung mineralischer Sedimente (vor allem Kies, Sand und Schluff) als Ausgangsprozess für die Entstehung ebener, relativ gut entwässerter Landschaften.

- (6) Feuchtigkeit: Feuchtigkeit ist eine Voraussetzung für Torfentwicklung. Oberflächennässe und der Feuchtigkeitshaushalt sind ausschlaggebend für die Zusammensetzung der Pflanzengemeinschaften, die sich wiederum auf das Verhältnis von CO₂ gegenüber CH₄ auswirken. Der Feuchtigkeitshaushalt hängt direkt von den Temperaturbedingungen ab.
- (7) Landnutzung: Entwässerung, die Umwandlung von Mooren sowohl für Landwirtschaft als auch Forstwirtschaft und die Ernte führen zu einem Verlust der Fähigkeit, Kohlenstoff zu speichern. Infolge einer verstärkten Torfzersetzung kommt es auch zu Kohlenstoffverlusten an die Atmosphäre.

A.P. Walker et al. (2020): Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂⁶⁵

In der Zeitschrift „New Phytologist“ erschien 2021 ein Übersichtsartikel, in dem Argumente dafür zusammengetragen werden, dass durch die Zunahme von CO₂ die terrestrische Kohlenstoffsenke aufgrund der Aktivität von Pflanzen zunehmen könnte.

Zunächst würde eine Erhöhung der CO₂-Konzentration dazu führen, dass eine verstärkte Photosynthese stattfindet. Allerdings ist hierzu auch eine erhöhte Wasseraufnahme nötig. Hierdurch wird das Pflanzenwachstum angetrieben, die Biomasse der Vegetation und die organische Substanz im Boden erhöht und Kohlenstoff aus der Atmosphäre in terrestrische Ökosysteme übertragen. Aber dieses System an sich und die Reaktionen von Ökosystemen auf Veränderung sind sehr komplex. Ziel des Artikels ist es, die Literatur abzubilden, die derartige Reaktionen beschreibt.

Die Autoren fassen ihre Argumentation wie folgt zusammen. Es sei sehr wahrscheinlich, dass verschiedene Pflanzenwachstumsparameter in den letzten Jahrzehnten angestiegen seien. Worumher weniger Klarheit besteht, sei die Frage in welcher Größenordnung dies auf iCO₂⁶⁶ zurückzuführen sei. Hierzu müssten verschiedenste Datenarten integriert betrachtet werden; dies umfasse Probenahmen, aber auch Modelldaten. Insgesamt sei es aber sehr wahrscheinlich, dass die Zunahme der terrestrischen Kohlenstoffspeicherung als Folge von iCO₂ in der Zukunft abnehmen werde. Dies wiederum bedeute einen beschleunigten Klimawandel.

Wiesmeier et al. (2020): Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios⁶⁷

Die internationale Initiative "4 pro 1000" (kurz: 4p1000) wurde von Frankreich am 1.12.2015 auf der COP 21⁶⁸ ins Leben gerufen. Ziel der Initiative ist es, aufzuzeigen, dass die Landwirtschaft

65 A.P. Walker et al. (2020): Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂; New Phytologist; Volume 229, Issue 5 p. 2413-2445; <https://doi.org/10.1111/nph.16866>.

66 „Increasing CO₂ from fossil fuel emissions and land-use change“

67 Wiesmeier et al. (2020): Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios; Geoderma 369 (2020) 114333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114333>.

68 UN-Klimakonferenz in Paris 2015.

und insbesondere die landwirtschaftlichen Böden eine entscheidende Rolle spielen können, wenn es um Ernährungssicherheit und Klimawandel geht. Eine Wachstumsrate von 4‰ pro Jahr (0,4%) in den ersten 30-40 cm des Bodens würde die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten deutlich reduzieren.⁶⁹

In dieser Arbeit gehen die Wissenschaftler der Frage nach, in welchem Umfang das 4p1000-Ziel für Südostdeutschland realisierbar ist. Unter der Annahme einer Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff von 276 Tg⁷⁰, die derzeit in den oberen 40 cm der landwirtschaftlichen Böden in Bayern (Ackerland und Grünland) gespeichert sind, entspräche das 4 pro 1000-Ziel einer jährlichen Kohlenstoffbindung von 1,1 Tg.

Die Autoren konstatieren, dass das 4p1000-Ziel für Bayern nicht realisierbar sei. Das Gesamtpotenzial der betrachteten Verfahren zur Sequestrierung von Kohlenstoff führe zu Erhöhungen von 0,3 bis 0,4 Tg organischem Kohlenstoff pro Jahr, was etwa 1‰ der derzeitigen SOC-Vorräte entspreche. Die Ausweitung von Deckfrüchten und Agroforstwirtschaft seien als die vielversprechendsten Optionen zur Erhöhung des SOC in landwirtschaftlichen Böden identifiziert worden. Obwohl nur etwa 1,5 % der jährlichen Treibhausgas-Emissionen Bayerns kompensiert würden, sei dies ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz.

Die Autoren schlussfolgern, dass die erwarteten positiven Auswirkungen einer Erhöhung des Bestandes an organischem Kohlenstoff im Boden einen wichtigen Effekt auf die Nährstoff- und Wasserspeicherung, Bodenerosion, Biodiversität und Ernährungssicherheit hätten und damit entscheidend seien für die Anpassung an den Klimawandel.

I. Fekete et al. (2021): How will a drier climate change carbon sequestration in soils of the deciduous forests of Central Europe?⁷¹

In diesem Forschungsartikel, der 2021 in der Zeitschrift "Biogeochemistry" erschienen ist, gehen die Autoren der Frage nach, wie sich ein trockener Klimawandel auf die Kohlenstoffspeicherung in Böden der Laubwälder Mitteleuropas auswirken könnte. Die globale Erwärmung geht an vielen Orten einher mit einem zunehmenden Mangel an Wasser.

Es zeigt sich, dass die Klimavariablen „mittlerer jährlicher Niederschlag“ (MAP) sowie „mittlere Temperatur im Juli/(MAP)“ stark korreliert sind mit der CO₂-Bindung in Böden.

69 <https://www.4p1000.org/>.

70 Tg=Teragramm.

71 Fekete, I., Berki, I., Lajtha, K. et al. How will a drier climate change carbon sequestration in soils of the deciduous forests of Central Europe?. *Biogeochemistry* 152, 13–32 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00728-w>.

Um die Auswirkungen der Veränderungen dieser Klimavariablen genauer zu studieren, untersuchen die Autoren bodenbiologische Prozesse und Veränderungen in der Speicherung von organischem Kohlenstoff an 30 ungarischen Eichenwaldstandorten im Karpatenbecken⁷². Hierzu wurden Bodenparameter und -prozesse in drei Waldkategorien verglichen und leiten die folgenden Ergebnisse ab.

- (1) Die biologische Aktivität des Bodens war in den trockensten Wäldern signifikant geringer.
- (2) Die Umsatzzeiten im feuchten Boden sind schneller als in trockenen. Auch Enzymaktivitäten und Pilzbiomasse deuten auf kürzere Umsatzzeiten in Verbindung mit schnelleren Abbauprozessen in den Böden feuchter Wälder hin.
- (3) In den Böden trockener Wälder reichern sich mehr chemisch stabile Verbindungen an.

Insgesamt deuteten die Ergebnisse darauf hin, dass die vorhergesagte Klimatrocknung dazu führe, dass die Kohlenstoffspeicherung im Boden in mitteleuropäischen Laubwäldern sich erhöhe. Allerdings sei auf der anderen Seite auch zu erwarten, dass ein Temperaturanstieg die Umsatzrate in gemäßigten Klimazonen erhöhe, wenn die Wasserverfügbarkeit ausreichend groß sei. Dies wiederum würde zu einer Verringerung der Kohlenstoffspeicherung im Boden führen. Dadurch werde eine detaillierte Prognose der Auswirkung von Klimaveränderungen auf Bodeneigenschaften erschwert.
