



DAS BODEN-BULLETIN

LANDBAU IN ZEITEN DER ERDERHITZUNG

2. ÜBERARBEITETE AUFLAGE

Impressum

Herausgeber: WWF Deutschland, Reinhardtstraße 18, 10117 Berlin
Stand: Dezember 2019
Autoren: Nikola Patzel, Rolf Sommer, Michael Berger und Birgit Wilhelm
Redaktion: Thomas Köberich
Kontakt: michael.berger@wwf.de
Layout: Silke Roßbach (mail@silke-rossbach.de)
Produktion: Maro Ballach
Bildnachweis: Titel: Getty Images, S. 4: Getty Images, S. 8: Jakob Schererz / Bauckhof,
S. 12: Dr. Otto Ehrmann / Bildarchiv Boden, S. 36: Dr. Otto Ehrmann / Bildarchiv Boden,
S. 43: Michaela Braun / Bioland Bayern

2. aktualisierte und erweiterte Auflage

Inhalt

I.	Forderungen des WWF für eine klimafreundliche Bodenbewirtschaftung	5
II.	Einleitung	7
III.	Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft	9
IV.	Warum der Boden fürs Klima so wichtig ist	13
1.	Kohlenstoff im Boden	14
2.	Humusabbau und Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden	17
3.	Auswirkungen von Düngemitteln	19
4.	Lokale und regionale Klimaeffekte	22
V.	Landwirtschaftliche Lösungsansätze in der Diskussion	24
1.	Fruchtfolgegestaltung	24
2.	Ökolandbau und Agrarökologie	25
3.	Reduzierte Bodenbearbeitung	28
4.	Pflanzenkohle (biochar)	29
VI.	Reflexion von Potenzialen und Grenzen	31
1.	Die 4-per-Mille-Initiative für Kohlenstoffspeicherung im Boden	31
2.	Humusaufbau und seine Grenzen	33
3.	Humusaufbau und die Nachhaltigkeits-Entwicklungsziele der Vereinten Nationen	35
	Quellenangaben	37



I. Forderungen des WWF für eine klimafreundliche Bodenbewirtschaftung

Damit Böden zum Klimaschutz beitragen und uns nachhaltig ernähren können, muss Humus aufgebaut werden.

Fast ein Viertel der weltweit landwirtschaftlich genutzten Böden ist bereits geschädigt oder verwüstet. Gehen Böden und Bodenfruchtbarkeit verloren, gefährdet das nicht nur unsere Ernährungssicherheit, sondern befeuert auch die Erderhitzung. Schuld daran sind Treibhausgasemissionen, die durch Übernutzung und Degradation der Böden entstehen. Tatsächlich aber können lebendige landwirtschaftliche Böden einen positiven Effekt aufs Klima haben und eine nachhaltige Ernährung sicherstellen. Dazu müssen Böden geschützt und natürliche Bodenfruchtbarkeit wieder aufgebaut werden – in Deutschland, Europa und der Welt!

Wie wir im vorliegenden Report darlegen, sind dafür folgende Grundsätze zu beachten und ins Zentrum einer nationalen Bodenschutz- und Ackerbaustrategie und der gemeinsamen Agrarpolitik der EU zu stellen:

- 1. Förderung des Humusaufbaus** durch vielfältige und standortangepasste Fruchtfolgen und Untersaaten, durch Mischkulturen und eine biologische Stickstoff-Fixierung mit in die Fruchtfolgen integrierten Leguminosen.
- 2. Drastische Reduzierung des Einsatzes von synthetischem Stickstoffdünger.** Deutschland sollte sich zum Ziel setzen, langfristig auf synthetischen Stickstoffdünger weitgehend verzichten zu können.
- 3. Natur- und Umweltschutz** in der Landwirtschaft müssen sich auch finanziell **lohnen!** Schon heute machen sich einige Bäuerinnen und Bauern um den Boden-, Natur- und Klimaschutz verdient. Diese Leistungen sollten sich auch die nationale und europäische Agrarpolitik zum Vorbild nehmen, sie endlich zu ihren Zielen erklären und so die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Betriebe unterstützen. Dazu braucht es eine konsequente Ökologisierung der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union (GAP) mit besonderer Förderung standortangepasster Maßnahmen, die für Humusaufbau sorgen.

4. Der Anteil staatlicher **Forschungsgelder für** Themen rund um **Agrar-ökologie**, Ökologisierung der Landwirtschaft und natürliche Bodenfruchtbarkeit / -biologie muss mindestens auf den jeweiligen Flächenanteil des ökologischen Landbaus (zurzeit ca. 10 Prozent) erhöht werden. Begleitend ist es nötig, das vorhandene Wissen über den Erhalt und den Aufbau von Bodenfruchtbarkeit besser als bisher in die landwirtschaftlichen Lehrpläne, Ausbildungs- und Fortbildungsprogramme zu integrieren. Überhaupt sollte die Agrarökologie in der landwirtschaftlichen Ausbildung in den Vordergrund der Lehrpläne gerückt werden.
5. Die Grundsätze des **Ökologischen Landbaus** zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich auf vielfältige Weise positiv auf den Boden-, Umwelt- und Naturschutz auswirken. Damit die steigende Nachfrage nach biologisch erzeugten Produkten heimischer Herkunft gedeckt werden kann, braucht es einen Förderplan zur Ausweitung des ökologischen Landbaus auf zunächst 30 Prozent aller landwirtschaftlichen Böden in Deutschland bis 2030. Bei den aktuellen Flächenzuwachsraten würde der Anteil des Ökolandbaus dann etwa 20 Prozent betragen.
6. **Grünland** ist bekannt als **Kohlenstoffsенke** und Heimat für **Artenvielfalt**. Schon deshalb ist es geboten, artenreiches Grünland zu erhalten und zurückzugewinnen. Überdies ließen sich in Deutschland mit geschützten und renaturierten nassen Böden (**v. a. Mooren**) etwa 37 Millionen Tonnen CO₂ jährlich vermeiden.
7. Notwendig ist eine Reduzierung der **Gülleüberschüsse** in nitratbelasteten Gebieten durch deutlich verringerte Viehbestände und Bindung der Tierzahlen an die regional vorhandene Futterfläche (flächengebundene Tierhaltung mit maximal 1,5 Großvieheinheiten / Hektar auf Kreisebene).
8. Zu fördern ist der Aufbau von **Strukturelementen** in und um Agrarlandschaften, die die Wasseraufnahme- und Haltefähigkeit der Böden verbessern sowie **Hitze und Trockenheit** lokalklimatisch puffern. Dazu gehören eine fast **permanente Grünbedeckung** von Böden, mehr Gehölze (Agroforst, Hecken, Feldraine), wo möglich wieder mehr Feuchtgebiete, offene Wasserflächen und nicht beschleunigte Vorfluter (Auendynamik wieder zulassen).

II. Einleitung

Landwirtschaft ernährt die Menschheit. Zugleich trägt sie durch Treibhausgasemissionen zur Erderhitzung bei und gefährdet so unsere Lebensbedingungen. Landwirtschaft lebt von Böden, die je nach Region seit Tausenden oder Millionen Jahren in natürlichen Ökosystemen entstanden sind. Humusaufbau ist Teil der Bodenbildung und Kohlenstoff ist Hauptbestandteil des Humus. Dazu gehört auch das Bodenleben: Bakterien, Protisten, Pilze, kleinste und größere Würmer und Insekten, Pflanzenwurzeln usw. Sie erzeugen Humus im Ökosystem Boden, sie formen die Struktur und die ökologische Funktion des Bodens nach ihren Bedürfnissen um und sorgen so für natürliche Bodenfruchtbarkeit und Erosionsschutz.

Böden weltweit enthalten etwa 3–4-mal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre. Bedingt durch eine nicht nachhaltige Landnutzung löst sich dieser organisch gebundene Kohlenstoff im Boden im wahrsten Sinne des Wortes in Luft auf und landet als CO₂ in der Atmosphäre.

Landwirtschaft
lebt von Böden,
die seit Millionen
von Jahren in
natürlichen
Ökosystemen
entstanden sind.

Fast ein Viertel der weltweit landwirtschaftlich genutzten Böden ist bereits geschädigt oder buchstäblich verwüstet. Auf Ackerflächen in Deutschland gehen im Durchschnitt pro Jahr und Hektar 10 Tonnen fruchtbarer Boden durch Erosion und Humusabbau verloren. Im weltweiten Durchschnitt sind es sogar 20 Tonnen. Neben dem Verlust von fruchtbarem Oberboden und Bodenstruktur ist der oft nur indirekt sichtbare Verlust von Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit mindestens genauso alarmierend.

Wir verfeuern also nicht nur fossilen Kohlenstoff wie Kohle, Öl und Gas, sondern auch organischen Kohlenstoff aus dem Erdboden. Laut Bodenzustandsbericht der Bundesregierung von 2018 gehen in Deutschland pro Hektar Ackerland jedes Jahr durchschnittlich etwa 0,2 Tonnen reiner organischer Kohlenstoff (der Hauptbestandteil von Humus) verloren – und zwar auch noch aus Ackerböden, deren Umbruch von humusreicherem Grünland mehr als 60 Jahre zurückliegt (Jacobs et al. 2018: S. 176, 178). Das entspricht etwa 8 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen. Hinzukommt neben Methan (CH₄) das extrastarke Treibhausgas Lachgas (N₂O), das u. a. durch die Überdüngung mit Stickstoff entsteht, wenn organischer Stickstoff im Bodenhumus durch Mikroben abgebaut wird. Weiterer überschüssiger Stickstoff (mehr als die Pflanzen aufnehmen können) wird als Nitrat ins Grundwasser ausgeschwemmt. Laut Umweltbundesamt betrug der nationale Stickstoffüberschuss 2017 etwa 93 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr (UBA 2019¹, vgl. die Darstellung und Vorschläge bei Osterburg 2013: 69 ff.).

¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_indikator_stickstoffueberschuss_2019-07-11_0.pdf

Schätzungen gehen davon aus, dass weltweit je nach Region bereits zwischen 20 Prozent und 80 Prozent des organischen Kohlenstoffs im Boden abgebaut wurden, mit sprunghaftem Anstieg seit der Industrialisierung und exponentiellem Bevölkerungswachstum (Sanderman et al. 2017).

Die gute Nachricht: Die grüne Hülle der Erde kann sich ihren verlorenen Humus aus der Atmosphäre wieder zurückholen.

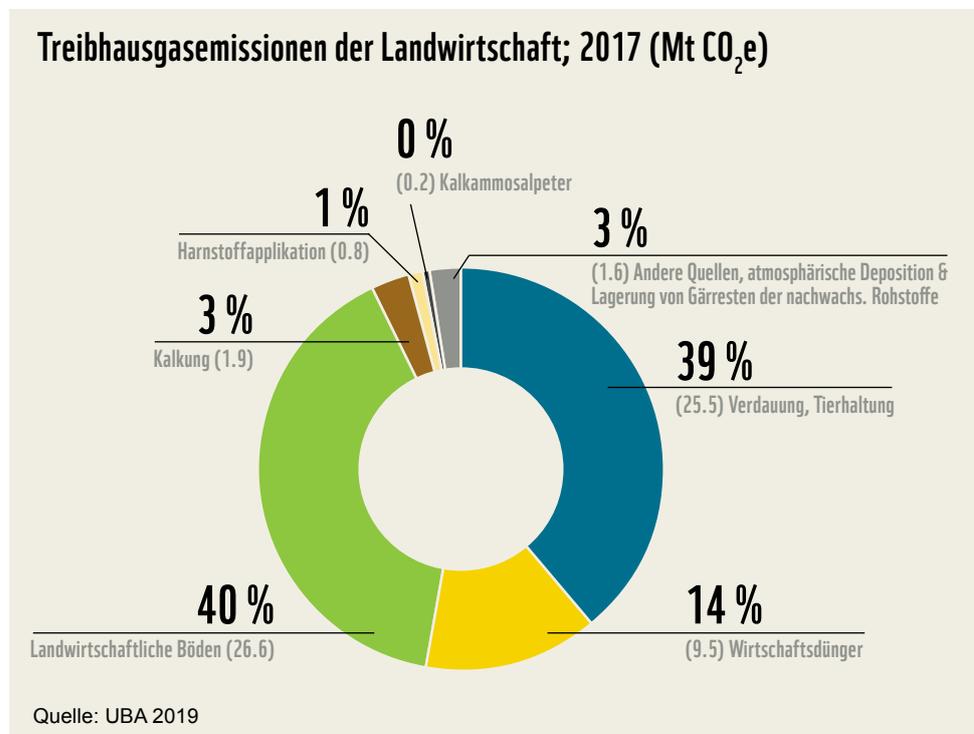
Mit unserem Report wollen wir zeigen, wie dies möglich ist. Schon heute beweisen engagierte Bäuerinnen und Bauern, wie sie uns **nachhaltig ernähren** können, ohne die Böden herunterzuwirtschaften. Sie sorgen für **Boden-, Natur- und Klimaschutz zugleich**. Diese großen Leistungen müssen endlich vorrangige Ziele der nationalen und europäischen Agrarpolitik werden und finanziell attraktiv werden. Der Aufbau, die Erhaltung und Pflege von lebendigen Böden mit ihrer natürlichen Bodenfruchtbarkeit müssen zu einem effektiv geförderten Ziel der Agrarpolitik werden. So könnten landwirtschaftliche Böden eine doppelte Funktion erfüllen: uns nachhaltig zu ernähren und gleichzeitig das Klima zu schützen.

Jede Landwirtschaft braucht ein großes und ortsspezifisches Wissen, damit Humus auf- statt abgebaut wird.



III. Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft

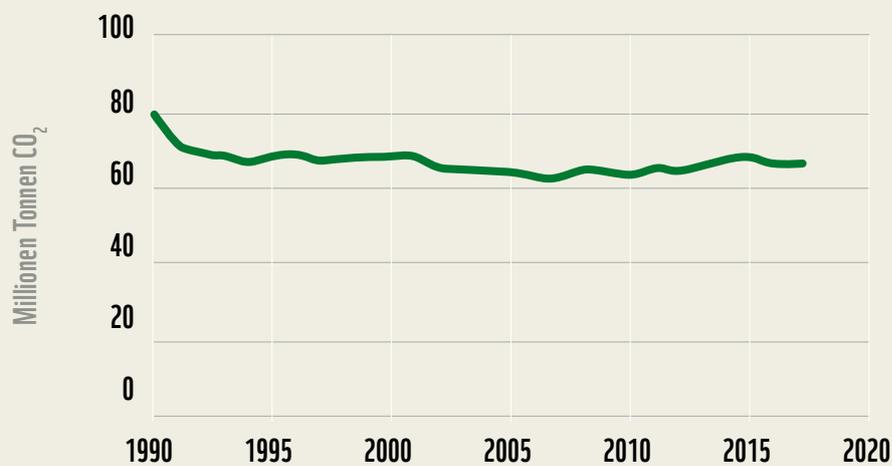
In Deutschland betragen die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft in 2017 rund 66 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent (CO₂e). Das sind 7,3 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2019).²⁾



Ausgasungen aus dem Boden, Methanemissionen durch Wiederkäuer und Stickstoffemissionen aus Wirtschaftsdüngern machen die direkten Emissionen der deutschen Landwirtschaft aus. Diese Emissionen erscheinen seit rund 25 Jahren als weitgehend stabil hoch.

²⁾ www.umweltbundesamt.de/.../8_tab_thg-emi-kat_2019_0 im Quellenverz. – Hinweis: Die Aufteilung der Emissionen in dieser Tabelle entspricht der UN-Berichterstattung, nicht den Sektoren des Aktionsprogrammes Klimaschutz Deutschland. Die Gesamtemissionen sind aber identisch.

Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft



Quelle: UBA 2019

Nur zwischen 1990 und 1993, also mit dem Kollaps der deutschen Ackerbauindustrie der ehemaligen DDR, sanken die Treibhausgasemissionen signifikant von 79 Millionen Tonnen CO₂e auf 68 Millionen Tonnen CO₂e.³

In dieser Kalkulation nicht enthalten sind Emissionen durch Landnutzungsänderungen, aus der Herstellung von Düngemitteln und anderen landwirtschaftlichen Produktionsmitteln (wie Futtermittelimport, z. B. Soja) oder importierten Rohstoffen wie z. B. Palmöl.

Es wird geschätzt, dass die CO₂-Emissionen aus Böden in Deutschland – vor allem aus ehemaligen Moorböden mit hohem Humusgehalt – weitere 37 Millionen Tonnen CO₂ verursachen. Allein der Verbrauch von mineralischem Stickstoffdünger in Deutschland – 1,8 Millionen Tonnen / Jahr – trägt mit ca. 5,5 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr zusätzlich zu den Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft bei. Gemäß einem Hintergrundpapier zur Stickstoffdüngung (Geupel / UBA 2009) lag bis zum Jahr 1900 „die durchschnittliche landwirtschaftliche Stickstoff-Düngung in Deutschland bei unter 20 Kilogramm pro Hektar und Jahr (...). Bis Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts stiegen die eingesetzten Stickstoff-Mengen im Zuge der Intensivierung der Landwirtschaft auf durchschnittlich 220 kg ha⁻¹ a⁻¹ (...), und erreichten in Sonderkulturen und in Gebieten der Intensivtierhaltung Werte von über 300 kg ha⁻¹ a⁻¹ allein durch den Einsatz von Handelsdüngern“.

In der EU liegt der landwirtschaftliche Anteil an den CO₂e-Emissionen bei rund 10 bis 14 Prozent (Solazzo et al. 2016 bzw. Fellmann et al. 2012). Die in der EU-Statistik verzeichnete leichte Senkung landwirtschaftlicher Emissionen einiger

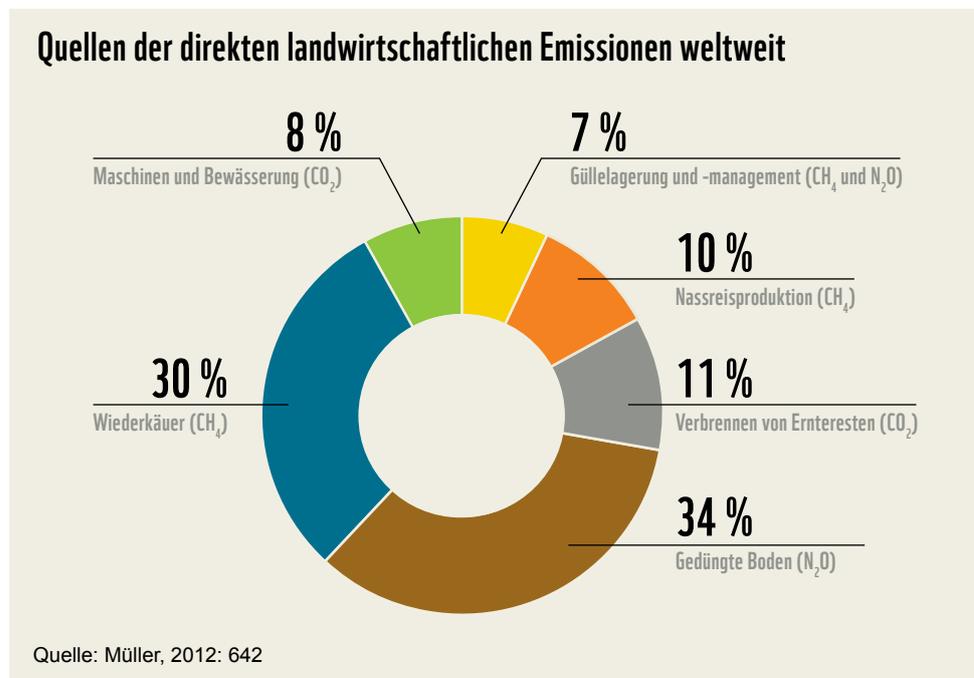
**Weltweit werden
37 Prozent der
Klimagasemissionen
der Landwirtschaft
zugeordnet.**

³ [www.umweltbundesamt.de\(...\)/2_abb_thg-emi-landwirtschaft-kat_2019_0](http://www.umweltbundesamt.de(...)/2_abb_thg-emi-landwirtschaft-kat_2019_0) im Quellenverz.

Jahre war dabei nur ein Effekt zunehmender Externalisierungen in andere Länder, während die tatsächliche THG-Intensität der EU-Landwirtschaft eher zunahm (Dace und Blumberga 2016).

Die optimistische Annahme im CLIMSOIL-Bericht der EU-Kommission von 2008 (S. 18), dass die Böden der EU netto 10 Prozent aller CO₂-Emissionen der EU aufnehmen würden, konnte nicht gehalten werden. Auch die „Greening“-Maßnahmen der EU-Agrarpolitik 2014-20 verfehlen nach Solazzo et al. (2016) ihre formulierten Klimaschutzziele (gut 5 Prozent Reduktion) fast vollständig, da sie keine gesamtheitlichen Wirkungen auf die Landwirtschaftsstrukturen haben (vgl. auch IFOAM-EU 2016: 20). Sie wirken vor allem in solchen Regionen punktuell positiv auf die THG-Bilanz, wo sie einen Rückgang einer Mais-Dominanz zugunsten von mehr Leguminosenanbau bewirken.

Im Rahmen des Klimaschutzplans 2050 möchte die Bundesregierung für den Sektor Landwirtschaft in Deutschland eine Emissionsminderung von mindestens 31 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 1990 erreichen; das ist prozentual weit weniger, als andere Sektoren beitragen sollen.



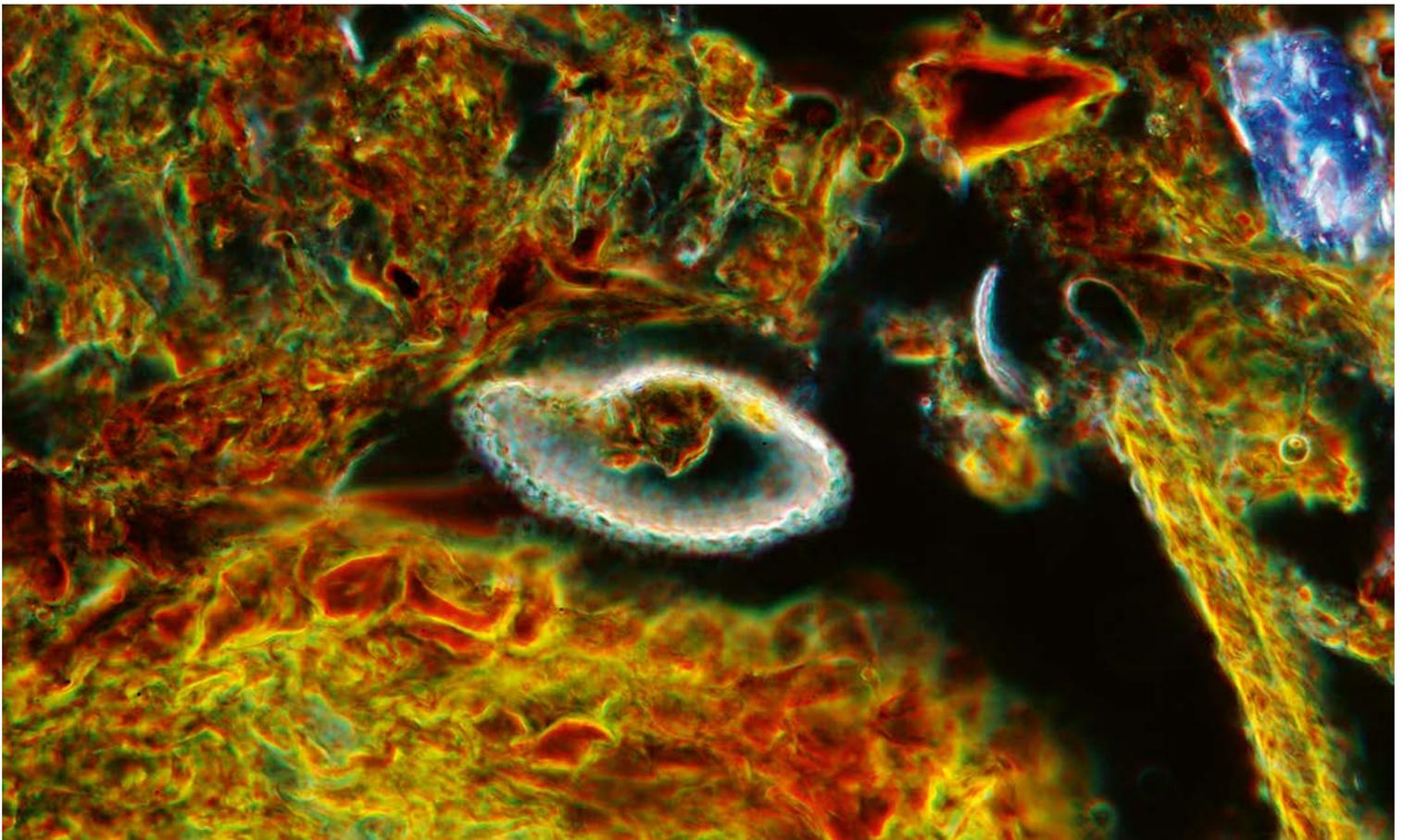
Weltweit beträgt der Anteil der Landwirtschaft an den anthropogenen Treibhausgasemissionen gegenwärtig ca. 27 Prozent ohne Landnutzungsänderungen bzw. 37 Prozent mit eingerechneten Landnutzungsänderungen (IPCC, 2019); Tendenz steigend (Tubiello et al. 2014 / FAO).

Treibhausgasemissionen aus Böden, die durch menschliche Nutzung herbeigeführt wurden (dies ist der Hauptbereich landwirtschaftlicher Emissionen) treten auf ...

- wenn nach Umwandlung in Agrar- bzw. Ackerland Humus verloren geht (oftmals nach Brandrodung / Abholzung oder Grünlandumbruch);
- wenn Weiden und Grasland überweidet oder anderweitig übernutzt werden (zu häufige Mahd, zu viel Gülle, extreme Artenverarmung, Zerfahren);
- wenn Ackerland humusabbauend genutzt wird (zum Beispiel durch zu enge Fruchtfolgen, keine Bodenbedeckung usw.);
- wenn Methan und Lachgas durch Düngung und Bodenbearbeitung verursacht werden.

Die Emissionen für die Herstellung von synthetischen Stickstoffdüngern betragen weltweit etwa 300–600 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr und werden in der Regel dem globalen Posten Energieverbrauch zugerechnet. Das entspricht mindestens weiteren 0,6 bis 1,2 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen (Greenpeace 2008).

Auch Einzeller wie dieses Schalentierchen sind im Boden sehr wichtig.



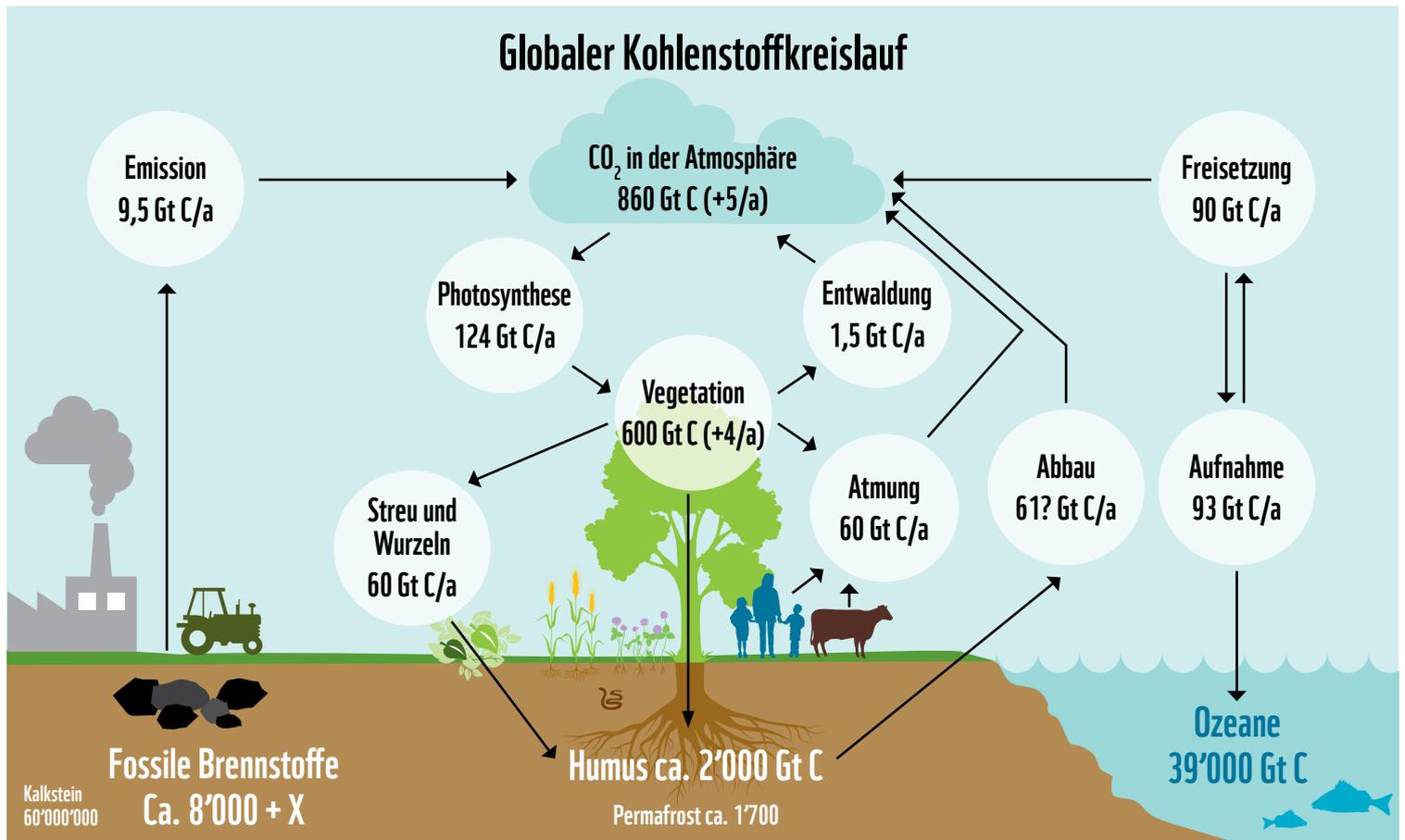
IV. Warum der Boden fürs Klima so wichtig ist

Die Böden der Welt enthalten etwa drei- bis viermal mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre und die Pflanzen.

Die Böden der Welt enthalten (bis in 2 m Tiefe) etwa drei- bis viermal mehr organischen Kohlenstoff als die Atmosphäre und drei- bis viermal mehr als die oberirdische Pflanzenbiomasse (Schmidt et al. 2011: 49, Lal 2013). Der im Boden vorkommende organische Kohlenstoff wurde von Pflanzen (und in weit geringerem Maße von grünen Einzellern) der Atmosphäre entnommen und durch Wurzel- ausscheidungen oder Vegetationsreste in den Boden eingebracht. Regenwürmer und andere Bodentiere helfen dabei in vielen Böden kräftig mit, indem sie oberirdische Pflanzenreste in den Boden hineinziehen und dort verdauen. Aber: **Aller Kohlenstoff im Boden kann jederzeit wieder in die Atmosphäre abgegeben werden**, ist also niemals definitiv im Boden gebunden. Besonders frischer Humus ist noch ziemlich instabil.⁴

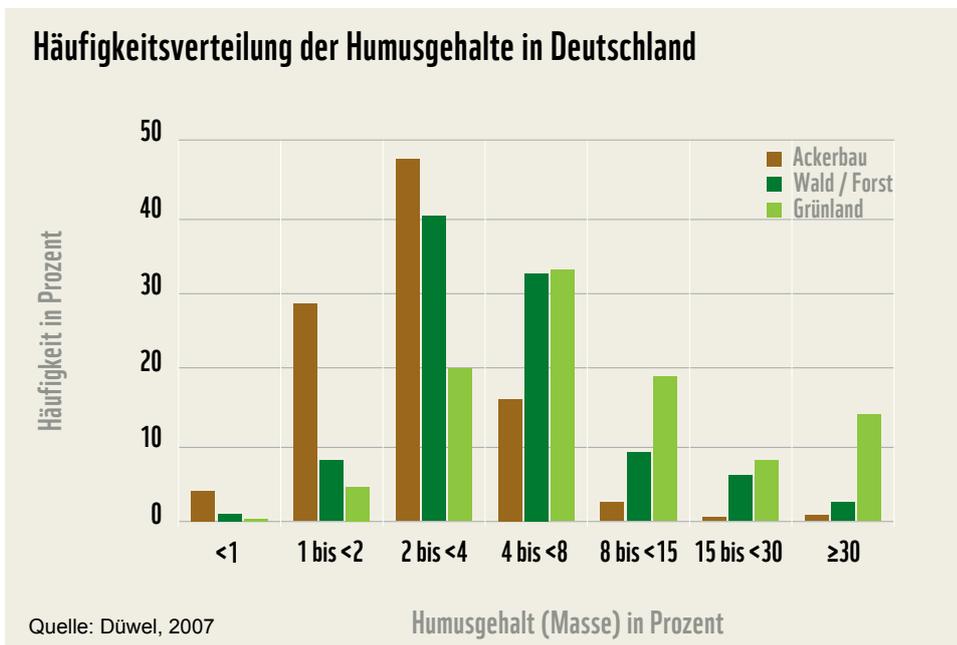
Vegetation und Böden werden von Landwirtschaft stark beeinflusst, sie sind entscheidend wichtig für den globalen Kohlenstoffhaushalt. Gt = Gigatonne, C/a = Kohlenstoff/Jahr

⁴ CO₂ enthält 27,2 Prozent Kohlenstoff (C; der Rest ist Sauerstoff). Dieser Faktor (*0,272) wird für die Umrechnung von CO₂ in reine Kohlenstoffäquivalente benutzt. Umgekehrt gerechnet, von C auf CO₂ ist durch diesen Faktor zu teilen oder, alternativ, mit 3,67 zu multiplizieren. Im Klimadiskurs wird fast ausschließlich mit CO₂ bzw. dessen Wirkungsäquivalenten gerechnet (CO₂e), in wissenschaftlichen Kohlenstoffbilanzen meist mit C, also dem reinen Kohlenstoff.



1. Kohlenstoff im Boden

Kohlenstoff bildet das Kerngerüst organischer Stoffe. Im Boden gehören hierzu alle lebenden und frisch abgestorbenen Lebewesen (einschließlich Pflanzenbestandteile und tote Kleintiere) sowie deren Umwandlungsprodukt Humus. Landwirtschaftliche Böden enthalten in den oberen Schichten ($\sim <1$ m) meist zwischen 0,5 und 10 Prozent⁵ organische Substanz mit enormer Streuung, mit in Einzelfällen bis über 30 Prozent (Düwel et al. 2007). **Generell ist Grünland humusreicher als Ackerland;** in Deutschland um etwa 32 Prozent mehr als in ackerbaulich genutzten Mineralböden. Dabei sind auch Ackerböden nach Grünlandumbruch eingerechnet, die im Durchschnitt noch 25 Prozent mehr Humus haben als andere Äcker (Vos et al. 2019). Tropische Böden haben oft nur eine sehr dünne Humusschicht und entsprechend fragile Nährstoffpools und -kreisläufe.



Grünland wird häufig umgebrochen, um den Status des Ackerlandes erhalten zu können. Diese letztlich regulatorische Vorgabe schadet dem Humuserhalt und -aufbau beträchtlich.

⁵ Hier sind Gewichtsprozent gemeint, d.h. Gramm organische Substanz pro 100 g Boden. Neuerdings wird dies in der Fachliteratur eindeutiger gemacht und zudem Bezug auf 1 kg Boden genommen (g/kg).

Eine
Landwirtschaft,
die nur von
der Substanz
lebt, ist nicht
nachhaltig.

Eine Studie aus den USA zeigte (Spawn et al. 2019), dass dort von 2008–2012 alleine drei Millionen Hektar Land in landwirtschaftliche Nutzung genommen wurden, davon fast 90 Prozent Grasland und der Rest Savannen und Wald. Dies führte zu einer Ausgasung von etwa 55 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar binnen weniger Jahre. Die Beweggründe dafür waren die Zurücknahme von Schutzbestimmungen bei gleichzeitig ökonomisch verstärktem Nutzungsdruck.

Jüngste umfangreiche Untersuchungen in den Tropen, in diesem Falle im östlichen Afrika, ergaben, dass Böden im westlichen Kenia zwischen 30 und 50 Prozent des ursprünglichen Kohlenstoffgehalts im Oberboden (0–20 cm) über einen Zeitraum von 15–75 Jahren nach Umwandlung der ursprünglichen Waldflächen verloren haben. Im äthiopischen Hochland waren dies 43–62 Prozent (Sommer et al. 2018).

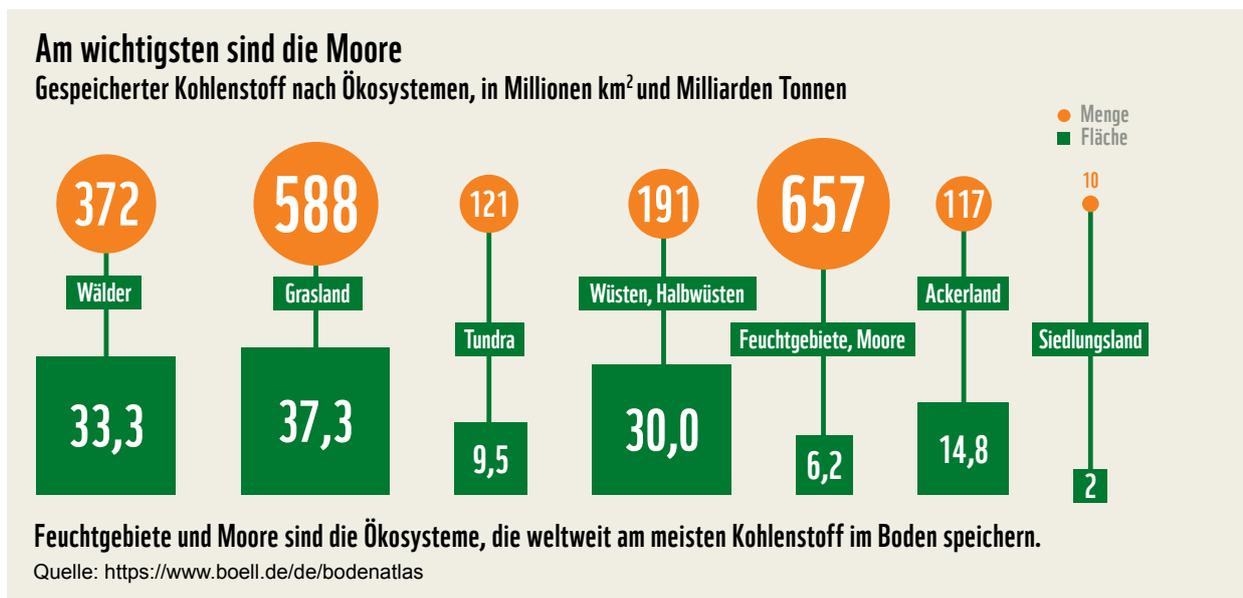
Die Befunde zeigen: Der Boden-Kohlenstoffgehalt nimmt in der Regel überall dort ab, wo Landwirtschaft betrieben wird (Houghton 2002; Gattinger et al. 2012: 18226, Sanderman et al. 2017). Eine Landwirtschaft, die die Bedürfnisse des Bodenlebens unberücksichtigt lässt und Ertrag ohne ausgleichenden Bodenaufbau gewinnen will, lebt im Grunde von der Substanz und ist nicht nachhaltig.

Humusabbau sowie allgemeiner Bodenverlust durch Erosion kennt man bereits aus der Antike, z. B. im Mittelmeerraum und in Mesopotamien. Gleichmaßen überliefert sind die Gegenmaßnahmen, u. a. durch Anbau spezieller Mischkulturen oder die Einführung von Überschwemmungswirtschaft, z. B. in Mittelamerika oder Ägypten. Beschleunigt wurde der historisch bekannte Humusabbau durch die Industrielle Revolution und die Grüne Revolution⁶ der Landwirtschaft. Ändern sich die Umweltbedingungen eines Bodens, baut der Boden womöglich Humus ab, selbst wenn dessen Anteil Tausende Jahre stabil war.

Für das menschliche Auge gehen diese Abbauprozesse so langsam voran, dass ihre negativen Folgen für Ernteerträge von Landwirten oft nicht kausal mit dem Verlust von Bodenfruchtbarkeit durch Humusabbau in Verbindung gebracht werden. Im Gegenteil: Erzielte Ertragszuwächse durch über Jahrzehnte gesteigerte, signifikante Inputs mineralischen Düngers und vermehrten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln werden dann als Beweis dafür herangezogen, dass mit dem Boden doch alles in Ordnung sein müsse.

⁶ Als „Grüne Revolution“ wurde seit den 1960er Jahren die Einführung nicht lokaler „Hochleistungssorten“ in der Landwirtschaft, zusammen mit Pestiziden, Kunstdünger und verstärkter Mechanisierung, v. a. in Entwicklungsländern, bezeichnet.

Vereinfacht gesagt, benötigen die Ackerböden hierzulande Maßnahmen zur Förderung und zum Aufbau des Humusgehalts, wenn der Gehalt organischer Substanz in der oberen Schicht weniger als 3,5 Prozent (bzw. weniger als 2 Prozent organischer Kohlenstoff) beträgt.



Die Klimawirkung von Moorboden-Verlusten ist besonders dramatisch:

Moore enthalten 20–90 Prozent organische Trockensubstanz und bedecken 2–3 Prozent der Landfläche; kohlenstoffreiche Feuchtböden im weiteren Sinne 13 Prozent. Ca. 5–13 Prozent dieser organischen Böden sind drainiert und bewirtschaftet. Dies allein verursacht rund ein Drittel aller Kohlenstoffemissionen aus den landwirtschaftlichen Böden weltweit (Lal 2013: 450, Carlson et al. 2016, Xu et al. 2018, Minasny et al. 2019).

Einige Messwerte für **Humusabbau durch Landnutzungsänderungen** (Guo & Gifford, 2002, Don et al. (2011), Nyawira et al. (2016), De Stefano & Jacobson 2017)

1. Graslandumbruch: 60 Prozent Humusausgasung (85 Prozent nach 30–50 Jahren)
2. Abholzung: (25–40 Prozent Humusausgasung; ca. -25 Prozent bei Primärwald zu Agroforst, -12 Prozent bei Umstellung zu Grasland, -9 Prozent zu Sekundärwald)
3. Plantagen statt Wiesland oder Naturwald: 10–13 Prozent Humusausgasung

2. Humusabbau und Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden

Im Grünland
ist der
Humusgehalt
besonders
hoch.

Auf landwirtschaftlich genutzten Böden entsteht Humus aus Pflanzenresten (Wurzeln, Blätter, Stroh), organischem Dünger (v. a. Mulch, Kompost und Mist) und wird im Wesentlichen durch die Bodenlebewesen biochemisch aufgebaut. Doch hängt die Humusbildungsrate aus Pflanzenresten auch davon ab, wie viel Stickstoff im Verhältnis zum Kohlenstoff in ihnen enthalten ist (C/N-Verhältnis; García-Palacios et al. 2018). Im Grünland ist der Humusgehalt besonders hoch. Dies liegt am permanenten und sehr hohen Bodenbedeckungsgrad mit sehr guter Versorgung des Bodenlebens durch Spross- und Wurzelreste sowie einem für Humusaufbau besonders geeigneten weiten C/N-Verhältnis. Zudem zeigt artenreiches Grünland (aber nur dieses!) eine **Bodendurchwurzelung in Wurzelstockwerken**, die der in Monokulturen überlegen ist und somit besonders zum Humusaufbau in der ganzen durchwurzelten Bodentiefe beiträgt. Unter optimalen Bedingungen konnte gezeigt werden, dass Grünland sogar in der Lage ist, durch Humusaufbau die schädlichen Klimawirkungen der gegenwärtigen Methanentstehung in den darauf weidenden Kühen komplett auszugleichen (Müller 2012, Chang et al. 2015).

Neben veränderbaren Humusbildungsfaktoren gibt es aber auch solche, die weitgehend unveränderbar bleiben. Dazu gehört die sogenannte Textur der Böden (mineralische Korngrößenverteilung), hier besonders ihr Tongehalt (Piikki et al. 2019). Tonhaltige Böden können mehr Humus bilden als sandige Böden. Grund sind organomineralische Bindungsprozesse, die sogenannte Tonmineral-Humuskomplexe ergeben: Humuspartikel lagern sich dabei fest an Tonpartikel an und sind so besser vor mikrobiellen Abbau geschützt. Intensive mechanische Bearbeitung kann diese Komplexe zerstören, mit anschließendem Abbau von organischer Substanz.

Humus kann sich durch rein chemische Oxidation oder durch Mikroben abbauen. **In jedem lebendigen Boden bestehen immer Aufbau- und Abbauprozesse zugleich**, wobei ein Netto-Humusabbau in der Natur längerfristig meist nur durch Veränderungen des Klimas vorkommt. Die Verweilzeit von Humus im Boden ist eine Folge seiner Wechselwirkung mit dem Bodenleben (v. a. Bodentiere, Mikroben, Pilze und Wurzeln) und dem gesamten Ökosystem (Schmidt et al. 2011: 53).

Das Bodenleben tut sehr viel zum nachhaltigen Erhalt der eigenen Lebensgrundlage. Zur Bodenstabilisierung, also dem sogenannten Lebendverbau zu Krümeln und damit einem Schutz vor Erosion und Mineralisierung, produziert das Boden-

leben Klebstoffe (u. a. Mucopolysaccharide), Schutzdecken (u. a. durch Protisten / Bodenalgeln) und Haltenetze (Pilzfäden und Wurzeln). Diese biophysikalische Bodenstabilisierung ist ein sehr wichtiger Faktor zur Humuserhaltung (Vos et al. 2019). Die aktive Gestaltung von Drainage- und Belüftungssystemen u. a. durch Würmer ist entscheidend, um anaerobe Prozesse im Boden, die u. a. zu Lachgas- und Methanemissionen führen, klein zu halten.

Aus den genannten Gründen ist eine Betrachtung von Kohlenstoff und Humus nur bei gleichzeitiger Betrachtung des Bodenlebens und dessen Beeinflussung durch die Landwirtschaft sinnvoll.

Während in **landwirtschaftlich genutzten Böden**, meist selbst im Biolandbau, die Kohlenstoffspeicher allmählich verloren gehen und so zur Erderhitzung beitragen, **besitzen** sie eigentlich **das Potenzial, Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufzunehmen und dadurch die Erderhitzung zu bremsen**. In einer Bodenaufbauphase können 10–20 Prozent des Eintrags organischer Substanz in Humus transformiert werden (Hu et al. 2018). Nach Lal (2013: 105) müssten etwa 10 Prozent der jährlichen Photosyntheseleistung im Boden verbleiben, um alle Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger auszugleichen. **Zur Realisierung solcher Potenziale müssten jedoch gegenwärtige Ackerbautechniken massiv verändert werden** (u. a. Müller 2012: 641).

Wie ein Einstieg in einen umweltfreundlicheren Ackerbau und den (Wieder-) Aufbau von Humus gelingt, hat der WWF in seiner Ackerbaustudie „Vielfalt auf den Acker!“ 2019 dargestellt. Durch Erweiterung der Fruchtfolgen auf mindestens vier Kulturarten, den Anbau von Zwischenfrüchten und eine Reduktion von Pflanzenschutzmitteln und Stickstoffdüngern ließen sich etwa 300 kg bis 500 kg Kohlenstoffanreicherung im Boden pro Hektar und Jahr realisieren. Auf die gesamten ackerbaulich genutzten Böden (11,7 Millionen Hektar) Deutschlands hochgerechnet, würde sich so ein CO₂-Minderungspotenzial von mindestens 12,7 Millionen Tonnen CO₂ aufsummieren. Das entspricht fast einem Fünftel der momentanen Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft (66 Millionen Tonnen CO₂e, s. o.).

Landwirtschaftlich genutzte Böden besitzen das Potenzial, Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufzunehmen und die Erderhitzung zu bremsen.

Störfaktoren für Humusaufbau

1. Mangelndes Futter fürs Bodenleben: kaum Erntereste, keine Zwischenfrüchte, kein organischer Dünger.
2. Zu hoher Stickstoffeintrag in Form von leicht löslichen Düngemitteln (Mineraldünger, Gülle) oder zu hoher Stickstoffgehalt in den Ernteresten.
3. Intensive mechanische Bodenbearbeitung und unbedeckter Boden.

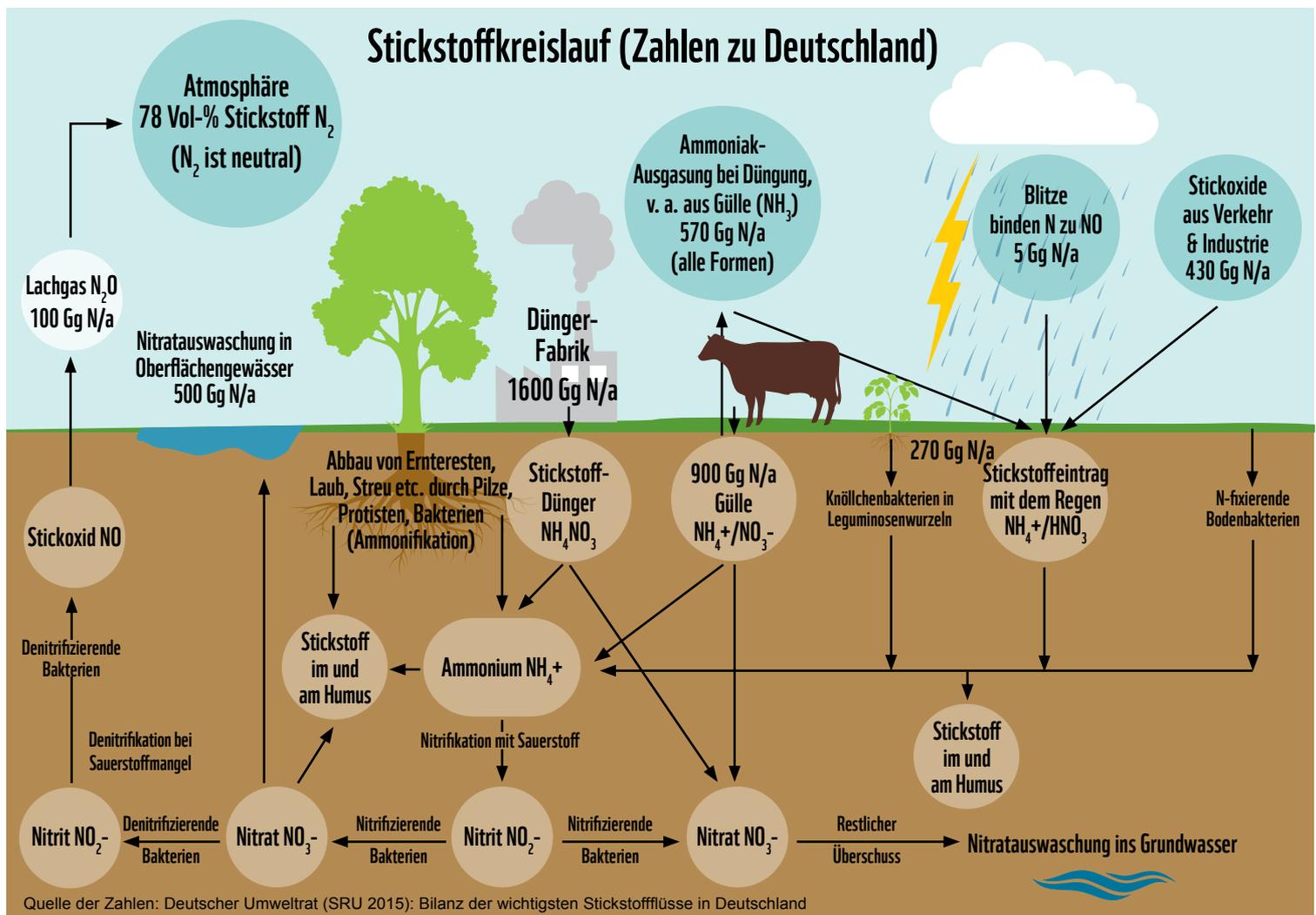
Förderfaktoren für Humusaufbau

1. Viel, stetiges, abwechslungsreiches Futter fürs Bodenleben: Wurzel-
ausscheidungen, Tiefendurchwurzelung, Gründüngung, Kompost, Mist.
2. Weitgehende Bodenbedeckung und gutes Mikroklima.
3. Relativ ungestörte Selbstorganisation der Bodenstruktur (reduzierte
Bodenbearbeitung).

3. Auswirkungen von Düngemitteln

Die mit Abstand größte Quelle des starken Treibhausgases **Lachgas (N_2O)** ist der Boden. Lachgas wirkt pro Masseinheit ca. 300-mal schädlicher auf das Klima als CO_2 . Es bewirkt zudem den Abbau der Ozonschicht und hat in dieser Hinsicht die Nachfolge der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) angetreten (Ravishankara et al. 2009).

Kunstdünger überfrachtet das natürliche Stickstoffsystem, was Ökosysteme und Umwelt schädigt.



Lachgas ist ein Zwischenschritt bzw. -produkt beim Abbau von Nitrat (NO_3^-) zu elementarem Stickstoff (N_2). Es kann aber auch entstehen, wenn Ammonium (NH_4^+) zu Nitrat umgewandelt wird. Beide Prozesse werden mikrobiell gesteuert, d.h., verschiedene hochspezialisierte Bakterien und Archaeen im Boden wandeln Stickstoffverbindungen um.

Lachgasemissionen liegen in natürlichen Ökosystemen meist weit unter einem Kilogramm pro Hektar und Jahr oder sind gar nicht nachweisbar. **Erst mit dem erhöhten Einsatz von Stickstoffdünger werden Lachgasemissionen zu einem echten Problem**, d.h., die mit Abstand wichtigste Ursache für bodenbürtige Lachgasemissionen sind Stickstoffdünger (Woolf et al. 2018).

Insgesamt überstieg 2010 die industrielle Herstellung (Haber-Bosch-Verfahren) reaktiven Stickstoffs (NH_3) zu Düngezwecken den natürlichen Eintrag von Stickstoff in die Böden um das Doppelte (Ciais et al. 2013). Das stört den natürlichen globalen Stickstoffkreislauf, mit negativen Folgen auch für die Biodiversität.

Wohl hauptsächlich, weil der Biolandbau ohne leicht lösliche synthetische Stickstoffdünger auskommt, wurden in einem Schweizer Langzeitversuch um 40 Prozent geringere N_2O -Emissionen als im kunstgedüngten Landbau gemessen. Doch auch hier gilt: Dosis und Zeitpunkt machen die Wirkung. Und so bleiben Lachgas-Peaks nach Klee gras-Unterpflügen auch im Biolandbau ein Problem (Skinner et al. 2019).

Ob bei der Verwertung von Stickstoff durch das Bodenleben Lachgas entsteht und in die Atmosphäre entweicht, hängt neben der Witterung (vor allem Bodenfeuchte und -temperatur) von der Zusammensetzung und den Lebensbedingungen verschiedener Bakterienarten und komplexerer Einzeller (Protisten) ab. Diese werden von der Bewirtschaftung beeinflusst. Ein Ausbringen großer Mengen von Gülle hat einen starken Lachgasschub zur Folge; ganz abgesehen davon, dass Ammoniak (NH_3) in die Luft entweicht. Ähnliches gilt für Bodenbearbeitung in den Bestand hinein (z. B. bei zu frühem Zwischenfruchtumbruch). Kompost baut sich nicht so schnell ab und löst keinen solchen Schub aus (Krauss, Ruser et al. 2017). Das heißt: Lachgasemissionen hängen neben der Stickstoffmenge am stärksten von der Art des Stickstoffdüngers ab (Necpalova et al. 2018, vgl. auch IFOAM-EU 2016).

Um Lachgasemissionen zu reduzieren, muss der Einsatz von Stickstoffdünger in der Landwirtschaft reduziert und stattdessen der Anteil der Leguminosen in der Fruchtfolge erhöht werden (Cayuela et al. 2014: 5).

**Mineralische
Stickstoffdünger
können sich
negativ auf den
Humuserhalt,
bzw. -aufbau
auswirken.**

In nutztierstarken Regionen wird dies nicht ohne eine flächengebundene Tierhaltung möglich sein, d. h. einer Abstockung der Tierbetriebe, deren große Bestände Futter- und damit Nährstoffimport voraussetzen. Dort werden systematisch massive Stickstoffüberschüsse erwirtschaftet. Es fällt so viel Wirtschaftsdünger (d. h. vorwiegend Gülle) an, dass daraus ein Problem wird, für dessen Beseitigung – d. h. den Abtransport in entlegene, tierarme Regionen („Gülletourismus“) – Landwirte viel Geld bezahlen.

Methan (CH₄) wirkt als Treibhausgas pro Masseinheit ca. 25–30-mal stärker als CO₂⁷. Es entsteht im Boden, wo organisches Material vorhanden ist, aber kein Sauerstoff. Methan-Emissionspeaks treten z. B. nach einer Güllegabe auf und dauern so lange, bis die Gülle bzw. der Boden wieder von Sauerstoff durchdrungen ist (Krauss, Ruser et al. 2017). Im Ackerbau entsteht Methan sonst nur bei groben (leider weitverbreiteten) Bodenbewirtschaftungsfehlern wie starker Bodenverdichtung durch zu schwere Maschinen und Überfahrten bei Nässe. Eine relevante Methanbildung besteht auch in Nasskulturen, also v. a. beim Reisanbau.

Umweltwirkungen verschiedener Düngerarten

1. Gülle verursacht kurze Methan- und Ammoniak-Peaks, längere Lachgas-Peaks, Nitratauswaschung und schädigt in größeren Mengen die Bodenstruktur (Erosionsgefahr).
2. Nitrat aus entsprechend „formuliertem“ mineralischem Stickstoffdünger kann leichter ausgewaschen werden und so ins Grundwasser gelangen.
3. Im Übermaß und insbesondere ohne Kombination mit organischem Dünger angewendet, kann Mineral-Stickstoffdünger humusabbauend wirken, also das Humusgleichgewicht negativ beeinflussen (Lal et al. 2007; Kotschi 2013).
4. Kompost und Mistkompost tragen zum Humusaufbau bei.

⁷ Bei Methan wie auch bei anderen Spurengasen als Treibhausgasen können die Berechnungen je nach Kalkulation von atmosphärischen Wechselwirkungen, Aerosolbildung u. Ä. etwas unterschiedlich ausfallen. Siehe z. B. Shindell et al. (2009).

5. Neben den direkten Wirkungen von viel löslichem Stickstoff aus Gülle oder Kunstdünger bestehen auch systemische Effekte durch eine Verschiebung in der mikrobiellen Lebensgemeinschaft des Bodens und deren funktioneller Biodiversität, mit Folgen für Bodenstruktur und Bodenfunktionen.
6. Nährstoffe wie Phosphor und Schwefel sowie Spurenelemente werden in verschiedenen Anbausystemen und ihren Düngerformen unterschiedlich berücksichtigt und sie sind, besonders markant in alten tropischen Böden, auch relevant für den Humusaufbau.
7. Neben der Wurzelmasse der Hauptkultur tragen Gründüngung und Mulchen zum Humusaufbau bei; über die Höhe des Aufbaus entscheiden verschiedene weitere Faktoren (Menge, Klima, Feuchte, C/N-Verhältnis, Bodenbearbeitungstechnik usw.).

4. Lokale und regionale Klimaeffekte

Zur Klimawirkung der Landwirtschaft gehört auch, dass große, ausgeräumte Agrarflächen ohne Strukturelemente wie Hecken, Bäume und Feuchtbereiche den **regionalen Wasserhaushalt** wesentlich schwächer regulieren als natürliche, selbstorganisierte Ökosysteme (Ripl 2003: 1928). In der Folge wird es in großräumigen „Agrarsteppen“ im Vergleich zum Zustand mit natürlicher Vegetation meist heißer. Anschauliche Beispiele dazu finden sich u. a. in Nordamerika und Europa (z. B. großflächiger Weizenanbau), Mittelamerika (z. B. Kaffee- und Bananananbau in Monokultur), Südamerika (z. B. Sojaanbau), und Westafrika und Südostasien (z. B. Palmölanbau).

Menschliche Eingriffe haben bereits auf allen bewohnten Kontinenten Ökosysteme großräumig kollabieren lassen, mit dramatischen Folgen auch für Böden und Klimagashaushalt. Beispiele aus ariden Zonen sind am ehemaligen Lop-Nor-See (Tarimbecken) und am ehemaligen Aralsee (Wüstenbildung wegen Wasserentnahme zur Bewässerung) zu finden und in ehemaligem Steppenland Afghanistans und Irans (Halbwüsten statt Grasland wegen Überweidung und Eingriffen im Wassereinzugsgebiet). In mediterran-semiariden Zonen sind großflächige Wälder zusammengebrochen und Grasländer verschwunden, beispielsweise in Ländern rund ums Mittelmeer (Abholzung und Übernutzung seit der Antike), sowie in der ehemals waldbedeckten Großlandschaft Cedarberge in Westsüdafrika (Abholzung).

**Naturnahe
Agrarökosysteme
können sich
positiv auf das
lokale Klima
auswirken.**

Dramatische Folgen hätte ein ökologischer Zusammenbruch des

Amazonas-regenwaldbeckens. Zwar gab es trockenere Jahre und Brände dort schon immer, gehäuft zuletzt während der höheren Globaltemperaturen um 900–1200 n. Chr. Die treten nun vermehrt wieder auf (Marengo & Espinoza 2015, Jiménez-Muñoz et al. 2016). Klimamodelle zeigen für den Osten und Südosten des Amazonasbeckens, für insgesamt 2/3 von dessen Fläche, die Gefahr einer Negativspirale zwischen Wald- und Wasserverlust mit teilweisem Übergang in eine Savannenvegetation (Duffy et al. 2015). In diesem durch die Erderhitzung gefährdetsten Bereich gibt es auch die meisten Abholzungen, was das Eintreten eines Kippeffektes stark beschleunigen dürfte. Als ‚**Kippeffekt**‘ wird in diesem Zusammenhang beschrieben, wenn Ökosysteme ihre Belastungs- und Regenerationsgrenzen überschreiten, sodass sie zusammenbrechen und sie durch andere Ökosysteme abgelöst werden: z. B. Steppe statt Regenwald, Halbwüste statt Steppe. Diese Kippeffekte sind immer auch mit starken regionalen Klimaänderungen verbunden und können auch globale Wirkungen zeigen.

Die schwache Regulierung des Wasserhaushaltes im Agrarland hat ihre Ursache in der geringeren Wasserspeicherung und Verdunstung der meisten Agrarräume, vergleicht man sie mit Steppen, kleinräumigen Agrarlandschaften, Agroforstsystemen oder Wäldern. Das liegt am wechselnden Pflanzenbestand mit zu geringen Höhen- und Wurzelstockwerken, am Bodenzustand und an z. T. langen Zeiten, in den es an Pflanzenbewuchs fehlt. Durch die geringere Verdunstung verringert sich der Wärmetransport von oberflächennahen Luftschichten in die höhere Atmosphäre und damit die natürliche Selbstkühlung der grünen Erdoberfläche. Durch die geringere Wasserspeicherung, zusammen mit fehlendem Schatten und Windschutz, nehmen Dürrezeiten mit Trockenstress zu. In mediterranen Ländern, in Zentralasien und allgemein in ehemaligen Regenwaldgebieten der zentralen wie auch der temperierten Tropen ist dieser Effekt besonders stark zu beobachten. Umgekehrt bilden **möglichst naturnahe Agrarökosysteme effektive Temperatur-Dämpfungsglieder in der Landschaft. Sie können großräumige Ökosysteme zumindest teilweise vor dem Zusammenbruch aufgrund der Erderhitzung bewahren** sowie generell die ökologischen Anpassungszeiten ausdehnen (Ripl 2003 und 2013).

V. Landwirtschaftliche Lösungsansätze in der Diskussion

Eine Untersuchung von Agrar-Innovationen in 79 Ländern hat herausgefunden (Groverman et al. 2019), dass eine Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie zwar Vorteile für die technische Effizienz (u. a. Arbeitsrationalisierung) bringe, jedoch meist mit ökologischen Nachteilen verbunden sei. Eine staatlich geförderte Forschung und Beratung sei besonders in Schwellenländern ökologisch vorteilhafter, wobei in den untersuchten Ländern meist mehr auf Technik als auf Ökologie geachtet werde. Eine Grundvoraussetzung für den Erfolg sei die örtliche Anpassung, nie ein „one size fits all“-Ansatz.

Nachfolgend werden einige perspektivisch interessante Lösungsansätze vorgestellt, mit Schwerpunkt auf den ökologisch notwendigen Wirkungen zur Bewahrung des Bodens und eines (Wieder-)Aufbaus von Humus und starken Lebensgemeinschaften im Boden. Bei der lokalen Anpassung und Kombinierung müssen soziale, ökonomische und kulturelle Aspekte Berücksichtigung finden. Da echter Fortschritt im Umgang mit dem Boden immer ein jeweils konkreter und lokaler ist, muss er zwingend zum Ort und dessen Natur passen.

1. Fruchtfolgegestaltung

Unter dem Begriff Fruchtfolge versteht man die zeitliche Abfolge verschiedener Kulturarten auf demselben Boden, sodass nicht immer dasselbe hintereinander angebaut wird. Dabei gilt der alte Grundsatz, Blattfrüchte (z. B. Kartoffeln, Rüben) und Halmfrüchte (Getreide) abzuwechseln und auch stickstoffmehrende und stickstoffzehrende Feldfrüchte alternierend anzubauen, um unausgeglichenen Nährstoffentzug zu vermeiden und einem Schädlingsbefall vorzubeugen. Breite Fruchtfolgen, das sind solche mit relativ langen Abfolgen unterschiedlicher Feldfrüchte, entfalten positive Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit und zur Vermeidung bodenbürtiger Krankheiten. Die Bedeutung der Fruchtfolgen für Natur-, Umwelt und Klimaschutz ist vielen Akteuren von Boden- und Klima-Diskussionen überraschend unbekannt. Vielfältige, in der Fachsprache „weit“ genannte Fruchtfolgen bieten dem Bodenleben stetige und vielseitige Nahrung. Sie bringen eine fast kontinuierliche Bodenbedeckung, ohne sogenannte Schwarzbrachen mit nacktem, ungeschütztem Boden, und fördern den Humusaufbau und die natürliche Bodenfruchtbarkeit (Poepflau & Don 2015). Abgesehen von der klassischen Fruchtfolge sind auch Untersaaten und Mischkulturen im Anbau wichtig, um Vielfalt und stetige Grünbedeckung auf die Äcker zurückzubringen.

**Vielfältige
Fruchtfolgen
fördern
Humusaufbau
und natürliche
Boden-
fruchtbarkeit.**

Die Ackerbaustudie des WWF „Vielfalt auf den Acker!“ betrachtet, wie sich Fruchtfolgen im konventionellen Ackerbau auswirken, und berechnet, wie sich Humus- und Stickstoffsalden verbessern, wenn Fruchtfolgen erweitert und weniger Pestizide und Stickstoffdünger aufs Feld kommen. Dabei zeigt sich, dass besonders der Einbezug von Klee gras oder Luzerne gras in die Fruchtfolge zu einem schnellen Aufbau von Humus führen kann. **Klee gras ist in der Lage, bei optimalen Bedingungen pro Hektar in einem Jahr mindestens 5 Tonnen Wurzelmasse in den oberen 30–60 cm Boden aufzubauen.** Viel Wurzelwachstum (de Notaris et al. 2019) macht Klee gras nicht nur zu einem wirksamen Humusaufbaufaktor, sondern aufgrund des hohen Vorfruchtwertes auch zu einem interessanten Fruchtfolgeglied. Mit ihrer Fähigkeit, durch Knöllchenbakterien Luftstickstoff zu binden, sind Kleearten einschließlich Luzerne natürliche Stickstofflieferanten und ermöglichen eine Reduktion des externen Düngemitelesinsatzes. Um breitere Fruchtfolgen für Landwirte wirtschaftlich attraktiv zu machen, muss der Anbau von heimischen Futtermitteln, aber auch von Getreidekulturen wie Hafer, Roggen oder Dinkel, von Öl- und Faserpflanzen oder auch der Anbau von Kräutern und Heilpflanzen stärker gefördert werden.

2. Ökolandbau und Agrarökologie

Ökolandbau ist in der EU und zum Teil weltweit ein gesetzlich und über Verbände geregeltes Anbausystem mit definierten Richtlinien, z. B. dem Verbot von synthetischen Stickstoffdüngern und chemisch-synthetischen Pestiziden. Im weltweiten Vergleich enthalten biologisch bewirtschaftete Böden im Durchschnitt 3,5 Tonnen pro Hektar mehr Kohlenstoff als nicht biologisch bewirtschaftete Böden (Gattinger et al. 2012: 18226). Der Grund ist, dass Humusabbau vermindert und -aufbau stärker gefördert wird. Ein höherer Kohlenstoffeintrag aus den Pflanzen in den Boden gehört zu den Merkmalen dieses Anbausystems (Gattinger et al. 2012: 18229). Dies liegt auch am höheren Anteil von Leguminosen innerhalb einer vielfältigeren Fruchtfolge, in der besseren Bodenbedeckung durch Beikräuter und Zwischenfrüchte und in besserer Aufnahme und Humifizierung von Ernteresten in den Boden im biologischen Landbau.

Praktiken des Ökolandbaus finden sich auch im vielfältigen Bereich „agrarökologischer“ Landwirtschaftsweisen, die insgesamt jedoch recht unterschiedlich verstanden werden.

Die **Agrarökologie** versteht den Boden zusammen mit Pflanzen und Tieren einschließlich der Menschen als **Ökosystem**. Im Kern wird in der Agrarökologie versucht, die gesamte Landwirtschaft aus der Ökosystemperspektive zu betrachten

und so zu gestalten, dass ähnliche Kräfte und Regulationen wirken können wie bei der Bildung und Selbsterhaltung natürlicher Ökosysteme. Darum sind hier auch humusaufbauende Maßnahmen, eine Förderung des Bodenlebens, vielfältige Fruchtfolgen, Untersaaten, Vermeidung von Grünlandumbruch, Zwischenfrüchte – ähnlich wie im Ökolandbau – entscheidend für den Erfolg. In diesem Sinne kann die flächendeckende Umsetzung agrarökologischer Maßnahmen ebenso zur Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Boden beitragen.

Der CLIMSOIL-Bericht der EU-Kommission von 2008 bestätigte früh das Potenzial zur Kohlenstoffemissionssenkung in der Landwirtschaft durch Extensivierung (weniger Düngemittel, weniger Pestizide, geringerer Maschineneinsatz), Anbau von Untersaaten, Erhalt und Aufwertung von Grünland, und vor allem in weiten Fruchtfolgen. Czyżewski & Kryszak (2018) errechneten für Industrie- und Schwellenländer positive Klimawirkungen für verminderten landwirtschaftlichen Maschinen- und Chemieeinsatz. Der höhere und stetigere Eintrag organischer Substanzen im Biolandbau kommt Regenwürmern, Pilzen und Mikroorganismen im Boden zugute. Der Verzicht auf Fungizide und andere Pestizide begünstigt dies. Im **Biolandbau gibt es etwa 30–85 Prozent mehr Mikroorganismen im Boden als im intensiv konventionellen Landbau. Dies korreliert positiv mit dem Gesamtkohlenstoffgehalt im Boden.** Außerdem ist die Vielfalt der Mikroorganismen größer. Das vermindert generell Emissionen, weil die funktionell breit vorhandenen Mikroorganismen Nahrung besser aufnehmen und also Nährstoffe besser im System festhalten können (Lori et al. 2017, Fließbach et al. 2007).

Die bessere Humusbildungsrate im Biolandbau kann nicht nur durch den höheren Anteil von organischen Düngern erklärt werden, sondern eben auch durch die bessere Humusbilanz organischer Erntereste (García-Palacios et al. 2018). Dieser Befund gilt unabhängig von Klimazonen und Kulturarten weltweit (ebd.).

Im Biolandbau gibt es etwa 30–85 Prozent mehr Mikroorganismen im Boden als in der konventionellen Landwirtschaft.

Rolle der Lebensvielfalt im Boden

1. Biolandbau hat etwa 30–85 Prozent mehr Mikroorganismen im Boden als chemisch dominierter Landbau und einen höheren Anteil an Regenwürmern.
2. Mikroorganismen und Regenwürmer stehen in Zusammenhang mit höherem Humusgehalt.
3. Die Artenzahlen und die ökologisch-funktionelle Biodiversität sind im Biolandbau deutlich höher. Das verbessert die Nährstoffnutzung und vermindert die Emissionen.

Kommt im Biolandbau noch eine reduzierte Bodenbearbeitung dazu, ist die Regenwurmdichte zwei- bis dreimal höher, verdoppeln sich die Populationen von Pilzen und Einzellern (Protozoen) und nimmt die gesamte mikrobielle Biomasse um die Hälfte zu (Kuntz et al. 2013: 257-9). Auch die Zunahme von Pilzen, die durch verminderte Bodenbearbeitung und den Eintrag von Ernteresten in den Boden gefördert wird, hilft, die organische Substanz im Boden zu stabilisieren und zu vermehren. Die Anreicherung organischer Substanz findet vor allem im Oberboden statt, aber auch über die ganze Profiltiefe eines Bodens können je nach Fall Zunahmen festgestellt werden (Krauss et al. 2017). In Versuchen auf Böden, die man viele Jahre nach ökologischen Richtlinien bewirtschaftet hatte, wurde nicht nur in der obersten Bodenschicht, sondern auch über das gesamte Bodenprofil gesehen eine leichte Erhöhung des Humusgehalts gemessen (Fließbach et al. 2017), die auf tonigen Böden auch besonders stark (ca. 8 Prozent nach 13 Jahren) ausgeprägt sein kann (Krauss et al. 2017).

Für wie groß man das Potenzial des Biolandbaus in Sachen Erderhitzungsbremse einschätzt, hängt im Wesentlichen davon ab, ob man mit den besten Spitzenwerten oder mit dem Mittelmaß aller heutigen Biobetriebe rechnet.

Nach einer Berechnung von IFOAM EU (2016: 41) würde eine **hundertprozentige Umstellung der EU-Landwirtschaft auf Biostandard bis 2030 zu einer Reduktion der landwirtschaftlichen Emissionen in der EU um 35 Prozent führen.**

Nach Gattinger (2012: 18230) würde das kumulierte Einsparpotenzial einer weltweiten Umstellung auf Biolandbau für den Zeitraum 2010–2030 13 Prozent zum weltweit erforderlichen Emissionsrückgang beitragen, um die Erderhitzung dauerhaft unter 2 Grad halten zu können. Durch Umstellung auf den heute durchschnittlich praktizierten Biolandbau wäre demnach **für einige Jahrzehnte eine Kohlenstoffspeicherung von knapp einer halben Tonne Kohlenstoff pro Hektar und Jahr erreichbar.** Zusätzlich ließe sich durch verminderte Lachgasemissionen dauerhaft das Äquivalent von rund **500 kg CO₂e pro Hektar und Jahr einsparen** (Gattinger et al. 2012 und Skinner et al. 2014: 561).

Die Lachgasemissionen sind im Biolandbau im gemessenen Durchschnitt um etwa 15 Prozent pro Fläche geringer. Bei sehr guter Praxis sind es rund 40 Prozent weniger (Skinner et al. 2015). Für den Boden und das Klima sind die Emissionen pro Fläche und global das Wesentliche. Die in agrarpolitischen Diskussionen oft verwendete Einheit „Emissionen pro Marktfruchtertrag je Hektar“ ignoriert zu viele Elemente und bedürfte einer Diskussion im größeren agrarstrukturellen Kontext.

3. Reduzierte Bodenbearbeitung

Reduzierte, oftmals pfluglose Bodenbearbeitung bedeutet, dass die natürlichen Bodenstrukturen weit weniger maschinell überprägt werden als bei der üblichen Intensität von Bodenbearbeitung. Dies **ist in der Regel förderlich fürs Bodenleben und die Krümelstruktur und schützt in Verbindung mit einer kontinuierlichen Bodenbedeckung vor Erosion.**

Viele Untersuchungen zu Kohlenstoffspeicherkapazitäten durch reduzierte Bodenbearbeitung zeigen jedoch, dass die Kohlenstoffspeicherung über die gesamte Bodentiefe gesehen langfristig nicht höher als in konventioneller Bodenbearbeitung ist, da eher eine Konzentration von Humus in den oberen Zentimetern erfolge (Baker 2007, Blanco-Canqui 2008, vgl. die Debatte in der Zeitschrift *nature climate change* zwischen Powlson et al. und Neufeldt et al. 2014 / 15).

Necpalova et al. (2018) fanden in der Schweiz die stärksten Reduktionen von bodenbürtigen Lachgas-, Methan- wie auch CO₂-Emissionen beim Ersetzen von synthetischem durch organischen Dünger, von Gülle durch Mistkompost und von stark mechanisierter durch reduzierte Bodenbearbeitung. Die Potenziale dieser Einzelmaßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen wurden in der Schweiz mit jeweils etwa 10–30 Prozent gemessen oder geschätzt. **Die Kombination von Biolandbau und reduzierter Bodenbearbeitung brächte demnach eine rund 130-prozentige Emissionsreduktion**, also eine Netto-speicherung.

Feng et al. (2018) fanden in einer globalen Metaanalyse zum Reduzierungspotenzial von Lachgas- und Methanemissionen durch reduzierte Bodenbearbeitung jeweils riesige Ergebnisstreuungen, die auf die entscheidende Bedeutung des konkreten landwirtschaftlichen Einzelfalles mit seinen Fruchtfolgen und seinem Umgang mit Ernteresten usw. hinweisen. Bei einem weiten Spektrum von etwa minus 30 Prozent bis plus 30 Prozent fanden sie eine durchschnittliche knapp signifikante positive Wirkung von 6,6 Prozent. Auch **bei konservierender Bodenbearbeitung kommt es auf die Umstände an, u. a. Fruchtfolge, Pestizid- und Düngereinsatz, um die ökologische Gesamtwirkung beurteilen zu können.**

Im Umkehrschluss gilt: Ein Direktsaatsystem in Monokultursystemen mit systematischem Totalherbizideinsatz kann zwar je nach Bedeckungsgrad Erosionsschutz bieten, erfüllt aber kaum die Hoffnungen auf Humusaufbau und Förderung des Bodenlebens.

Die Kombination von Biolandbau und weniger Bodenbearbeitung kann ein Königsweg zum Humus(wieder)-aufbau sein.

In einem agrarökologischen bzw. Ökolandbau-Kontext können reduzierte und minimierte Bodenbearbeitungstechniken rundum stimmige und wertvolle Beiträge auf allen Ebenen leisten, sie sind aber handwerklich sehr anspruchsvoll. Doch auch in ökologischem Kontext wäre eine Polarisierung von „pflügen oder nicht pflügen“ nicht zielführend, da unzählige, zum Teil neue, sinnvolle Techniken dort dazwischenliegen, zum Beispiel im Bereich flachen Unterschneidens und nur oberflächlichen Einarbeitens von Zwischenfrüchten / Spontanwuchs oder Ernteresten.

4. Pflanzenkohle (biochar)

Werden Pflanzenstoffe wie beispielsweise Holzschnitzel aus Hecken oder Schwachholz, (Nuss-)Schalen, Hülsen oder Maisspindeln zu Pflanzenkohle verarbeitet, wird ca. die Hälfte des im Ausgangsmaterial enthaltenen organischen Kohlenstoffes als elementare Kohle fixiert. Das ist mehr als die 10–20 Prozent (Hu et al. 2018) bei einer Verrottung desselben Materials im Boden (Woolf et al. 2018). Die mittlere Verweildauer von Kohlenstoff in Pflanzenkohle im Boden ist mindestens 100 Jahre, oft auch über 500 Jahre (Woolf et al. 2018).

Über diese direkte Kohlenstoffeinlagerung hinaus hat Pflanzenkohle auch weitere klimarelevante Wirkungen: Es wurde gezeigt, dass Pflanzenkohle – aber erst ab etwa einem Schwellenwert von 10 Tonnen Trockenmasse pro Hektar – die Lachgasemissionen um die Hälfte reduzieren kann, bei einigen Böden auch über 90 Prozent (Woolf et al. 2018). Sie verlangsamt den Abbau organischen Materials und fördert damit den Humusaufbau (positive Rückkopplung). Infolge natürlicher Steppenbrände, auch menschengemachter Brände rund um bronzezeitliche Siedlungen, **kennt man Kohle als Bestandteil von Schwarzerden und ähnlichen sehr fruchtbaren Böden** (Gehrt et al. 2002, Knicker 2011). Viel diskutiert wurde der Anteil von Kohle bei Entstehung sehr fruchtbarer dunkler Kulturböden („terra preta“) im Amazonasgebiet.

Pflanzenkohle wirkt ähnlich wie Tonpartikel. Sie vermindert bzw. verzögert die Nährstoffauswaschung, indem sie die Nährstoffe an der Oberfläche dieser Kohlepartikel bindet. Das führt zu einer effizienteren Nährstoffausnutzung und verringert den Düngerbedarf. Je nach Mengen im Boden verbessert die Pflanzenkohle die Wasserhaltefähigkeit des Bodens (vor allem von sandigen Böden), vermindert den Bewässerungsbedarf und verbessert die Stabilität der Ernten. Die bei der Pyrolyse (Verkohlung) frei werdenden Holzgase können aufgefangen und wie Bio- oder Erdgas eingesetzt werden und dadurch fossile Brennstoffe ersetzen (u. a. Woolf et al. 2018).

Aber Pflanzenkohle bringt einige Probleme. Die Herstellung benötigt Rohstoffe, die nur selten in ausreichenden Mengen vorhanden sind. In tropischen Ländern kann dies zu äußerst kritischen Situationen führen, wenn Agrarrohstoffe generell knapp sind und anderweitig (Tierfutter, Brennmaterial) benötigt werden oder wenn zur Herstellung Bäume abgeholzt werden. Die Herstellung erfordert Fachwissen und kostet Arbeitszeit. Womöglich werden giftige Stoffe und Gase freigesetzt, z. B. polyzyklische Aromate. Eine falsche Anwendung kann zu Nährstofffestlegung und anschließendem Nährstoffmangel führen. Gegen Ammoniak-Ausgasung aus Rindergülle und Hühnermist nutzt eingemischte Kohle wenig bis nichts (Gronwald et al. 2018). Vor allem in tonreichen Böden ist oft kein dem Aufwand nur annähernd entsprechender Vorteil erkennbar.

Zu diesen Fragen entsteht zurzeit viel wissenschaftliche Literatur, sodass in einigen Jahren aufgrund etwas längerer Versuchsreihen die Wirkungen und Nebenwirkungen von anthropogen ausgebrachter Pflanzenkohle in Boden-Ökosysteme besser einzuschätzen sein werden.

Zugleich ist diese „Biokohle“-Diskussion ein paradigmatischer Fall von Dekontextualisierung eines Einzelements landwirtschaftlicher Praxis mit dem Ziel, einfache und global anwendbare technische Lösungen für komplexe Probleme der Naturbeziehung zu finden (Bezerra et al. 2016). Hier ist bei allem Interesse auch Vorsicht geboten.

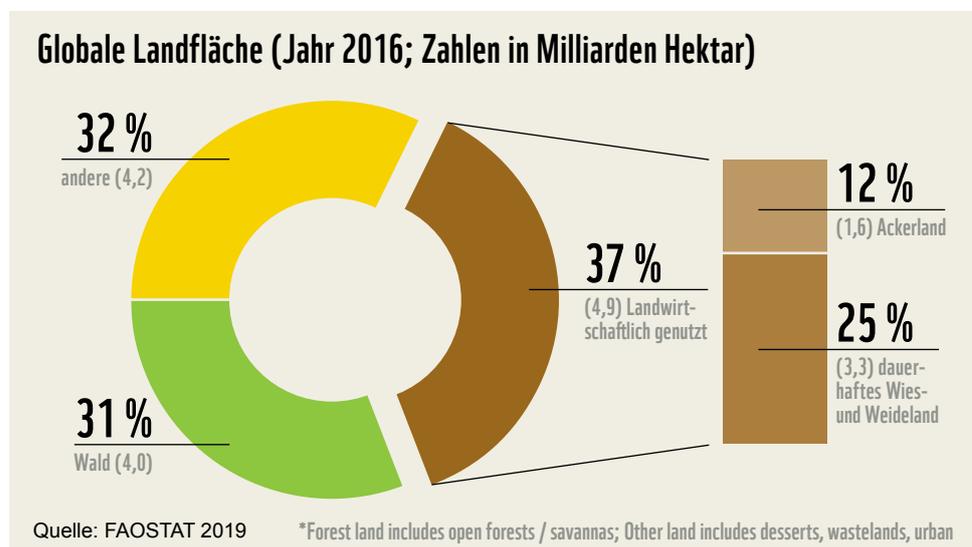
VI. Reflexion von Potenzialen und Grenzen

1. Die 4-per-Mille-Initiative für Kohlenstoffspeicherung im Boden

Das 4-per-Mille-Konzept (4p1000) wurde im Dezember 2015 bei der Klimakonferenz in Paris als **freiwillige Zielvereinbarung** von 39 Regierungen und mehr als 190 internationalen Institutionen und NGOs unterschrieben (Soussana et al. 2018). Sie besagt, dass, wenn der Gehalt organischen Kohlenstoffs der Böden um weltweit (!) insgesamt jährlich 4 Promille (0,4 Prozent) stiege und gleichzeitig alle CO₂-Emissionen durch Landnutzungswandel (Entwaldung usw.) auf netto null gedrosselt werden könnten, sämtliche anthropogenen klimarelevanten Kohlenstoffemissionen kompensiert werden könnten.

Für die im Jahr 2015 vorgestellte Kalkulation wurde die damalige anthropogene CO₂-Emissionsrate von 8,9 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr durch die wissenschaftliche Schätzung von 2.400 Gigatonnen Kohlenstoff in allen terrestrischen Böden weltweit geteilt: $8,9 / 2.400 = \sim 0,004$ (Minasny et al. 2017; Soussana et al. 2018).

Bei einer globalen Landfläche von rund 13 Milliarden Hektar (Abbildung unten), ergäbe sich so eine notwendige C-Festlegung von jährlich 0,68 t C/ha (= 8,9 / 13). Diese Beträge sind im Landbau insofern erreichbar, als dass sie den heutigen Durchschnittswerten sehr guter (ambitionierter) fachlicher Praxis entsprechen, sie können sogar noch deutlich höher ausfallen.



Aber „nur“ 4,9 Milliarden Hektar unserer Landfläche werden landwirtschaftlich genutzt, und könnten – hypothetisch gesprochen – zeitnah (bzw. mittel- bis langfristig) im Rahmen eines globalen 4p1000 Marshallplans in eine C-Senke umgewandelt werden. Um dennoch die 4p1000-Ziele zu erreichen, müssten sich die Massen der Kohlenstofffestlegung in landwirtschaftlichen Böden auf beachtliche 1.8 t C / ha / Jahr erhöhen. Das ist weltweit und mit momentanen vertretbaren Möglichkeiten des Bodenmanagements unrealistisch (Sommer und Bossio, 2014). Das zeigen auch andere Abschätzungen der Potenziale verschiedener Landnutzungsänderungen für eine Kohlenstoffspeicherung (Minasny et al. 2017 und Lal 2013).

Maßnahmen	Tonnen C pro Hektar und Jahr; Werte in Klammern: CO₂ pro Hektar u. Jahr
Wiederbewaldung	0,6 (2,2)
Umstellung auf Grünland	0,5 (1,8)
Organische Düngung	0,5 (1,8)
Einarbeitung von Ernteresten	0,35 (1,3)
Reduzierte Bodenbearbeitung	0,3 (1,1)
Verbesserte Fruchtfolgen	0,2 (0,73)
Wiedervernässung feuchter Böden	0,5–1 (1,8-3,7)
Regeneration schwer geschädigter Böden	0,2–0,8 (0,73-2,9)

Beim Umgang mit der politischen 4 %-Forderung ist also unbedingt zu beachten, dass diese sich auf den Gesamtkohlenstoffgehalt aller Böden weltweit bezieht, somit ihren Zweck nicht allein durch Umsetzung im Agrar- oder gar nur Ackerland voll erfüllen könnte.

Eine wissenschaftliche Überprüfung solcher Fortschritte (oder Misserfolge) braucht aber außer den oft widersprüchlichen Fernerkundungsdaten auch möglichst flächendeckende Im-Feld-Untersuchungsprogramme (Gibbs & Salmon 2015).

Trotzdem: Da **Humusschutz** und -aufbau sowie andere organische Kohlenstoffverbindungen (Nährhumus, lösliche Wurzelausscheidungen, Pflanzenkohle) in Böden unter zahlreichen Gesichtspunkten Vorteile haben, **sollte diese Strategie im oberen Teil der Prioritätenliste zu Maßnahmen des Klimaschutzes stehen.**

Was den Schutz vor Abbau betrifft, so haben die Erhaltung und Renaturierung nasser Böden (Moore, Riede, sumpfige Uferzonen) unter Klimaschutz-Gesichtspunkten Priorität, weil sie am meisten Kohlenstoff pro Fläche zu verlieren haben. Betrachtet man den Humusaufbau, so hat eine vermehrte Umwandlung von Ackerland in Wiesland, in Agroforstsysteme und Wald die größten Aufbaupotenziale (Müller 2012: 645, Minasny et al. 2017: 79); gleichzeitig sollten alle Möglichkeiten des Humusaufbaus **bei jedem Ackerboden und im Wiesland** genutzt werden.

Eine umfassende Analyse nationaler Klimaschutzpolitiken zeigte, dass die Klimarelevanz der Landwirtschaft in der Regel nur dann mitbeachtet wird, wenn es um Maßnahmen mit auch anderweitigem Nutzen und ohne Verminderung der Erträge geht (Hönle et al. 2018). Untersucht wurden hier die EU-28 und 45 weitere Länder: Drei Viertel der Länder zeigten 2005–2014 keine Verbesserungen bei den landwirtschaftlichen Emissionen. Auch die EU zeigte nur wenig Ambitionen, wirklich etwas zu tun.

2. Humusaufbau und seine Grenzen

Kohlenstoffspeicherung in landwirtschaftlich genutzten Böden kann essenzieller Bestandteil bei einer Strategie zur Überwindung der gegenwärtigen Klimakrise sein. Die dafür notwendigen Maßnahmen haben sich überwiegend bewährt und **erbringen zugleich Mehrfachnutzen: die Erhaltung von Biodiversität, von langfristiger Bodenfruchtbarkeit und Sicherung der Lebensmittelversorgung in Kombination mit Klimaschutzwirkungen auf mehreren Ebenen.** Die Frage, wie wichtig Bodenkohlenstoff v. a. aus Humusaufbau zur Minderung der menschengemachten Erderhitzung werden kann, ist in der Wissenschaft umstritten und hängt mehr von politischen Faktoren ab als von wissenschaftlichen und messtechnischen Unsicherheiten und Herausforderungen (Powlson et al. 2014, Sommer Bossio 2014, Sanderman et al. 2017, Batjes 2018, Piiki et al. 2019, Zomer et al. 2019). Um Missverständnissen vorzubeugen, müssen hier eben auch Schwierigkeiten und Grenzen benannt werden:

Jede Form der Speicherung von Kohlenstoff in Böden ist prekär, weil er bei Nutzungsänderungen oder durch Erosion verloren gehen kann. (Müller 2012: 645). Böden enthalten zwar viel mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre und sie besitzen auch ein großes CO₂-Speicher- bzw. -Rückgewinnungspotenzial. Dieses Potenzial langfristig auszuschöpfen erfordert jedoch große Anstrengungen und politischen Willen, da für großflächige Wirkungen **Landwirtschaftssysteme fundamental verändert werden müssten.**

Zu beachten ist auch die zeitliche Dynamik des Humusaufbaus. Bei den heute gängigen Praktiken erreichen Ackerböden relativ schnell ihre Sättigungsgrenzen. Das bedeutet, ein Humusaufbau ist in den ersten Jahren am stärksten, danach wird der jährliche Zuwachs kleiner und meist stabilisiert sich dann der Humusgehalt auf einem etwa gleichbleibenden neuen Niveau. Wo dieses neue Gleichgewicht liegt, hängt von allen klimatischen, bodenbezogenen und Bewirtschaftungsparametern ab. Untersuchungen zeigen: Nach 10 Jahren sinkt die Kohlenstoff-Aufnahmerate und nach rund 20 Jahren ist eine weitere Kohlenstoff-Nettoaufnahme in den meisten Fällen nicht mehr nachweisbar (Gattinger et al. 2012: 18227). Dem Humusaufbau setzen physikalische, chemische und biologische Rahmenbedingungen Grenzen, wie etwa der örtliche Wasserhaushalt und das Temperaturregime, die ökologische Nischenbreite und die Biodiversitätsausstattung einer Region sowie nicht zuletzt die Bodeneigenschaften wie Textur, Tiefe und Auswaschungsgrad. Auch der Einsatz von Pflanzenkohle kommt ans Ende seiner Möglichkeiten, wenn er sich ökologisch nicht mehr integrieren lässt. Dennoch muss immer der Einzelfall betrachtet werden. So sind unter Umständen auch längeranhaltende Steigerungen über die allgemein festgestellten Sättigungsgrenzen hinaus praktisch möglich.

Kohlenstoffspeicherung in Böden kann den CO₂-Anstieg der Atmosphäre wahrscheinlich nur vorübergehend kompensieren (Lal 2004: 113 f., Müller 2012: 643, Zomer et al. 2019). Um trotz allem das Potenzial landwirtschaftlicher Böden zur Kohlenstoffspeicherung annähernd auszuschöpfen, müssten erfolgversprechende Methoden standortspezifisch betrachtet und umgesetzt werden. Bereits ein Stopp des Humusabbaus wird einen spürbar vermindernden Effekt auf die Erderhitzung bringen, wenn es gelingt, gleichzeitig die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft drastisch zu reduzieren und den Kohlenstoffgehalt in den Böden weltweit zu stabilisieren.

Um das Potenzial landwirtschaftlicher Böden zur Kohlenstoffspeicherung auszuschöpfen, müssten erfolgversprechende Methoden standortspezifisch betrachtet und umgesetzt werden.

3. Humusaufbau und die Nachhaltigkeits-Entwicklungsziele der Vereinten Nationen

Alle Vorschläge dieses Boden-Bulletins sollen dazu beitragen, die **Entwicklungsziele der Vereinten Nationen (der sustainable development goals SDG) zu erreichen**. Dies sind Ziel 2 („nachhaltige Landwirtschaft fördern“) mit Unterziel 2.4 „Bodenqualität schrittweise verbessern“ und ausführlich Ziel 15: „Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern, Wälder nachhaltig bewirtschaften, Wüstenbildung bekämpfen, Boden-degradation beenden und umkehren und dem Verlust der biologischen Vielfalt ein Ende setzen.“ Im Unterziel 15.3 wird gefordert: „Bis 2030 die Wüstenbildung bekämpfen, die geschädigten Flächen und Böden einschließlich der von Wüstenbildung, Dürre und Überschwemmungen betroffenen Flächen sanieren und eine Welt anstreben, in der die Landverödung neutralisiert wird.“ Weitere Bezüge bestehen zu den Zielen 1 (Armut beenden), 3 (gesundes Leben), 6 (nachhaltiges Wassermanagement), 7 (nachhaltige Energie), 11 (ökologische Stadt-Land-Verbindungen), 12.8 (Lebensweise in Harmonie mit der Natur) und natürlich Ziel 13: Bekämpfung des Klimawandels!

Die deutsche Bundesregierung hat sich unter anderem in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie 2016 ff., in der Naturschutz-Offensive 2020 und im Klimaschutzplan 2050 verbindlich dazu bekannt.

Im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes haben sich Lorenz & Lal (2016, 2019) ausführlich mit der Frage beschäftigt, ob organischer Bodenkohlenstoff ein zentraler Statusindikator für Bodendegradation sein kann und Fortschritte im Sinne der SDGs erbringt. Sie kamen zum Schluss, dass C_{org} „gegenwärtig lediglich als konzeptioneller Indikator“ tauglich (Lorenz & Lal 2016: 12). Als solcher eigne er sich besser für die Kommunikation als für die Wissenschaft, weil die Messverfahren zu uneinheitlich und die Wirkungszusammenhänge noch zu wenig klar in ihrer Kausalität erkennbar seien. 2019 bezeichneten dieselben Autoren C_{org} dann als einen der „signifikanten universellen Indikatoren“ für Bodendegradation und geeignet für das Erreichen von mindestens der Hälfte der SDGs. Er müsse aber als zentraler Wert durch andere Indikatoren des Bodenzustands ergänzt werden.

Der WWF will seinen Teil dazu beitragen, dass diese Nachhaltigkeitsziele tatsächlich erreicht werden. Dabei setzt er sich dafür ein, dass Landwirte besser honoriert werden, die entsprechende Maßnahmen zum Bodenschutz und Humusaufbau umsetzen. Boden ist mehr als ein Substrat. Ein gesunder Boden, der im

Stande ist, Wasser und Nährstoffe aufzunehmen und sie an die Pflanzen abzugeben, dessen Struktur stabil genug ist, Erosionen zu widerstehen, der unser Grundwasser vor Verunreinigungen schützt und Lebensraum für Tiere und Pflanzen bietet, ist Grundlage jeden Lebens an Land. Der Schutz dieser Lebensgrundlage darf nicht kurzfristigem wirtschaftlichen Gewinn geopfert, sondern muss als langfristige Investition in die Zukunft gesehen werden. **Erst eine landwirtschaftliche Praxis, die auch das Bodenleben fördert, kann landwirtschaftliche Böden zum nachhaltigen Ernährer und gleichzeitig vom Heizkörper zum Schattenspender für unser Klima werden lassen.**

Natürliche Bodenstruktur wird von Bodenleben geschaffen, hier zum Beispiel eine Regenwurmlosung.



Quellenangaben

Baker, John; Tyson Ochsner, Rodney Venterea, Timothy Griffis (2007): Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (1-5).

Batjes, Niels (2018): Technologically achievable soil organic carbon sequestration in world croplands and grasslands. *Land Degradation and Development* 2018: 1-8, DOI: 10.1002/ldr.3209.

Bezerra, Joana; Esther Turnhout, Isabel Melo Vasquez, Tatiana Francischinelli Rittl, Bas Arts & Thomas W. Kuyper (2016): The promises of the Amazonian soil: shifts in discourses of Terra Preta and biochar. In: *Journal of Environmental Policy & Planning*, DOI: 10.1080/1523908X.2016.1269644.

Blanco-Canqui, Humberto; Rattan Lal (2008): No-Tillage and Soil-Profile Carbon Sequestration: An On-Farm Assessment. *SSSAJ Volume 72 Number 3 May-June*: 693-701.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019): Statistischer Monatsbericht Kap. A Nährstoffbilanzen und Düngemittel, Nährstoffbilanz insgesamt von 1990 bis 2017 (MBT-0111260-0000). Wiedergegeben auf https://www.umwelt-bundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_indikator_stickstoffueberschuss_2019-07-11_0.pdf

Carlson, Kimberly; James Gerber, Nathaniel Mueller, Mario Herrero, Graham MacDonald, Kate Brauman, Petr Havlik, Christine O'Connell, Justin Johnson, Sassan Saatchi and Paul West (2016): Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. In: *nature climate change* (online), 21 November 2016, DOI: 10.1038/NCLIMATE3158.

Cayuela, Maria Luz.; Lukas van Zwieten, Bhupinder Pal Singh, Simon Jeffery, Asunción Roig, Miguel Sánchez-Monedero (2014): Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 191 (2014) 5-16.

Chang, Jinfeng; Philippe Ciais, Nicolas Viovy, Nicolas Vuichard, Benjamin Sultan, Jean-François Soussana (2015): The greenhouse gas balance of European grasslands. *Global Change Biology* 21(10). DOI: 10.1111/gcb.12998.

Ciais, Philippe; Jean-François Soussana, Nicolas Vuichard, Sebastiaan Luysaert, Axel Don, Ivan Janssens, S. Piao, 1, Rene Dechow, Juliette Lathière, Fabienne Maignan, Martin Wattenbach, P. Smith, Christoph Ammann, A. Freibauer, E. D. Schulze (2010): The greenhouse gas balance of European grasslands. *Biogeosciences Discuss.*, 7(4), 5997–6050, doi:10.5194/bgd-7-5997-2010

Ciais, Philippe, Christopher Sabine, Govindasamy Bala, Laurent Bopp, Victor Brovkin, Josep Canadell, Abha Chhabra, Ruth DeFries, James Galloway, Martin Heimann, Christopher Jones, Corinne Le Quéré, Ranga B. Myneni, Shilong Piao, Peter 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*.

CLIMSOIL Bericht Dezember 2008: EU Kommission http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf

Czyżewski, Bazyl; Łukasz Kryszak (2018): Impact of different models of agriculture on greenhouse gases (GHG) emissions: A sectoral approach.

Dace, Elina; Dagnija Blumberga (2016): How do 28 European Union Member States perform in agricultural greenhouse gas emissions? It depends on what we look at: Application of the multi-criteria analysis. In: *Ecological Indicators* 2016.

De Notaris, Chiara; Jørgen Eivind Olesen, Peter Sørensen, Jim Rasmussen (2019): Input and mineralization of carbon and nitrogen in soil from legume-based cover-crops. Nutrient Cycling in Agroecosystems. Doi 10.1007/s10735-019-10026-z.

De Stefano, Andrea; Michel G. Jacobson (2017): Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. In: Agroforestry Systems, DOI: 10.1007/s10457-017-0147-9.

Don, Axel; Jens Schumacher, Annette Freibauer (2011): Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks – A meta-analysis. Global Change Biology 17(4):1658–1670. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x

Duffy, Philip; Paulo Brando, Gregory Asner, Christopher Field, (2015): Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences 112(43) DOI: 10.1073/pnas.1421010112.

Düwel, Olaf; Clemens Siebner, Jens Utermann, Friedrich Krone (2007): Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands. Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR/UBA.

Fellmann, Thomas; Ignacio Pérez Domínguez, Peter Witzke and Diti Oudendag (2012): Mitigating GHG emissions from EU agriculture – what difference does the policy make? Selected Paper prepared for presentation at the International Association of Agricultural Economists (IAAE) Triennial Conference, Foz do Iguaçu, Brazil, 18–24 August, 2012.

Feng, Jinfei; Fengbo Li, Xiyue Zhou, Chunchun Xu, Long Ji, Zhongdu Chen, Fuping Fang: Impact of agronomy practices on the effects of reduced tillage systems on CH₄ and N₂O emissions from agricultural fields: A global meta-analysis. In: PLoS ONE 13(5): e0196703. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196703>.

Fließbach, Andreas; Maïke Krauss, C. Maurer, Hansueli Dierauer, Paul Mäder (2017): Reduzierte Bodenbearbeitung reichert Humus und mikrobielle Biomasse oberflächlich an. Vortrag bei: 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Campus Weihenstephan, Freising-Weihenstephan, 7.–10. März 2017.

García-Palacios, Pablo; Andreas Gattinger, Helene Bracht-Jørgensen, Lijbert Brussaard, Filipe Carvalho, Helena Castro, Jean-Christophe Clément, Gerlinde De Deyn, Tina D’Hertefeldt, Arnaud Foulquier, Katarína Hedlund, Sandra Lavorel, Nicolas Legay, Martina Lori, Paul Mäder, Laura B. Martínez-García, Pedro Martins da Silva, Adrian Müller, Eduardo Nascimento, Filipa Reis, Sarah Symanczik, José Paulo Sousa, Rubén Milla (2017): Crop traits drive soil carbon sequestration under organic farming. Journal of Applied Ecology 2018: 1-10.

Gattinger, Andreas; Adrian Müller, Matthias Haeni, Colin Skinner, Andreas Fließbach, Nina Buchmann, Paul Mäder, Matthias Stolze, Pete Smith, Nadia El-Hage Scialab-bad, and Urs Niggli (2012): Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. Proceedings of the National Academy of Sciences (US) 109(44): 18226-18231.

Gehrt, Ernst; Michael Geschwinde, Michael Schmidt (2002): Neolithikum, Feuer und Tschernosem – oder: Was haben die Linienbandkeramiker mit der Schwarzerde zu tun? In: Archäologisches Korrespondenzblatt 32: 21–30.

Geupel, Markus; Jering, Frey, Gohlisch, Lambrecht, Jaschinski, Koppe, Mönch, Mäder, Nissler, Strogies, Mathan, Schneider, Mohaupt, Glante, Dominik, Mauscherning, Schulz, Hummel, Kacsóh, Trukenmüller, Graff, Spranger, Augustin, Neumann, Hofmann, Bernicke, Plickert, Beckers, Behnke, Brahner, Weiss, Butz, Herrmann, Fricke, Galander (UBA, 2019): Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoff-Emissionsminderungsstrategie.

Gibbs, Holly; Meghan Salmon (2015): Mapping the world’s degraded lands. Applied Geography 57: 12–21.

- Greenpeace bzw. Bellarby, Foereid, Hastings und Smith (2008): Cool Farming: Climate Impacts of Farming and Mitigation Potential. <https://www.green-peace.de/sites/www.greenpeace.de/files/Cool Farming Report Final 0.pdf>
- Gronwald, M.; M. Helfrich, A. Don, R. Fuß, R. Well, H. Flessa (2018): Application of hydrochar and pyrochar to manure is not effective for mitigation of ammonia emissions from cattle slurry and poultry manure. In: *Biology and Fertility of Soils*. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1273-x>.
- Groverman, Christian; Tesfamichael Wossen, Adrian Müller, Karin Nichterlein (2019): Eco-efficiency and agricultural innovation systems in developing countries: Evidence from macro-level analysis. *PLoS ONE* 14 (4): e0214115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214115>
- Guo, Lanbin; Roger Gifford (2002): Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. In: *Global Change Biology* 8 (2002): 345–360.
- Houghton, Richard (2002): The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B* 51(2): 98–313.
- Knicker, Heike (2011): Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments. *Quaternary International* 243: 251–263.
- Hönle, Susanna; Claudia Heidecke und Bernhard Osterburg (2018): Climate change mitigation strategies for agriculture: an analysis of nationally determined contributions, biennial reports and biennial update reports. In: *Climate Policy*, DOI: 10.1080/14693062.2018.1559793.
- Hu, Teng; Peter Sørensen, Jørgen Eivind Olesen (2018): Soil carbon varies between different organic and conventional management schemes in arable agriculture. *European Journal of Agronomy* 94 (2018) 79-88.
- IFOAM EU (2016): Organic farming, climate change mitigation and beyond. Reducing the environmental impacts of EU agriculture. Report together with FiBL.
- Intergovernmental panel on climate change IPCC 2019: Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers.
- Jacobs, Anna; Heinz Flessa, Axel Don, Arne Heidkamp, Roland Prietz, René Dechow, Andreas Gensior, Christopher Poeplau, Catharina Riggers, Florian Schneider, Bärbel Tiemeyer, Cora Vos, Mareille Wittnebel, Theresia Müller, Annelie Säurich, Andrea Fahrion-Nitschke, Sören Gebbert, Rayk Hopfstock, Angélica Jaconi, Hans Kolata, Maximilian Lorbeer, Johanna Schröder, Andreas Laggner, Christian Weiser, Annette Freibauer (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Johann Heinrich von Thünen-Institut Braunschweig, Thünen Report 64, DOI:10.3220/REP1542818391000.
- Jiménez-Muñoz, Juan; Cristian Mattar, Jonathan Barichivich, Andrés Santamaría-Artigas, Ken Takahashi, Yadvinder Malhi, José A. Sobrino, Gerard van der Schrier (2016): Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific Reports* September 2016, DOI: 10.1038/srep33130.
- Knicker, Heike (2011): Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments. *Quaternary International* 243: 251–263.
- Kotschi, Johannes (2013): A soiled reputation. Adverse impacts of mineral fertilizers in tropical agriculture. Published by Heinrich Böll Foundation and WWF Germany.

- Krause, Hans-Martin; Roman Hüppi, Jens Leifeld, Mohamed El-Hadidi, Johannes Harter, Andreas Kappler, Martin Hartmann, Sebastian Behrens, Paul Mäder, Andreas Gättinger (2018): Biochar affects community composition of nitrous oxide reducers in a field experiment. *Soil Biology and Biochemistry* 119 (2018): 143–151.
- Krauss, Maike; Frédéric Perrochet, Martina Lori¹, Reiner Ruser, Torsten Müller, Sabine Zikeli, Sabine Gruber, Wilhelm Claupein, Paul Mäder und Andreas Gättinger (2017): Reduzierte Bodenbearbeitung im Biolandbau – Klimaaspekte. In: *Agrarforschung Schweiz* 8 (6): 226–231.
- Krauss, Maike; Reiner Ruser, Torsten Müller, Sissel Hansen, Paul Mäder, Andreas Gättinger (2017): Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley – winter wheat cropping sequence. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 239 (2017) 324–333.
- Kuntz, Marianne; Alfred Berner, Andreas Gättinger, Johannes Scholberg, Paul Mäder and Lukas Pfiffner (2013): Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming. *Pedobiologia* 56(4-6): 251–260.
- Lal, Rattan (2004): Agricultural activities and the global carbon cycle. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70: 103–116.
- Lal, Rattan; Maldan Suleimenov, Bobby Stewart, David Hansen (2007): Climate Change and Terrestrial Carbon Sequestration in Central Asia.
- Lal, Rattan (2013): Soil carbon management and climate change. In: *Carbon Management* (2013) 4(4), 439–462, DOI: 10.4155/cmt.13.31
- Lorenz, Klaus; Rattan Lal, Knut Ehlers (2019): Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations' Sustainable Development Goals. In: *Land Degradation and Development* 2019 (30): 824–838; DOI 10.1002/ldr.3270
- Lorenz, Klaus; Rattan Lal (2016): Soil Organic Carbon – An Appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework? UBA-Text 77/2016.
- Lori, Martina; Sarah Symnack¹, Paul Mäder, Gerlinde De Deyn, Andreas Gättinger (2017): Organic farming enhances soil microbial abundance and activity: a meta-analysis and meta-regression. *PLoS ONE* 12(7): e0180442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442>
- Marengo, Jose; Juan Espinoza (2015): Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal on Climatology*. Published online in wileyonlinelibrary.com, DOI: 10.1002/joc.4420.
- Minasny, Budiman; Brendan Malone, Alex McBratney, Denis Angers, Dominique Arrouays, Adam Chambers, Vincent Chaplot, Zueng-Sang Chen, Kun Cheng, Bhabani Das, Damien Field, Alessandro Gimona, Carolyn Hedley, Suk Young Hong, Biswapati Mandal, Ben Marchant, Manuel Martin, Brian McConkey, Vera Leatitia Mulder, Sharon O'Rourke, Anne Richer-de-Forges, Inakwu Odeh, José Padarian, Keith Paustian, Genxing Pan, Laura Poggio, Igor Savin, Vladimir Stolbovov, Uta Stockmann, Yiyi Sulaeman, Chun-Chih Tsui, Tor-Gunnar Vagen, Bas van Wesemael, Leigh Winowiecki (2017): Soil carbon 4 per mille. In: *Geoderma* 292 (2017): 59–86.
- Minasny, Budiman; Örjan Berglund, John Connolly, Carolyn Hedley, Folkert de Vries, Alessandro Gimona, Bas Kempen, Darren Kidd, Harry Lilja, Brendan Malone, Alex McBratney, Pierre Roudier, Sharon O'Rourke, Rudiyanto, José Padarian, Laura Poggio, Alexandre ten Caten, Daniel Thompson, Clint Tuve, Wirastuti Widyatmanti (2019): Digital mapping of peatlands – A critical review. In: *Earth-Science Reviews* 196 (2019) 102870.

- Müller, Adrian (2012): Agricultural land management, carbon reductions and climate policy for agriculture. *Carbon Management* 3(6): 641–654.
- Necpalova, Magdalena; Juhwan Leea, Colin Skinner, Lucie Büchi, Raphael Wittwer, Andreas Gattinger, Marcel van der Heijden, Paul Mäder, Raphael Charles, Alfred Berner, Jochen Mayer, Johan Six (2018): Potentials to mitigate greenhouse gas emissions from Swiss agriculture. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 265 (2018): 84–102.
- Nyawira, Sylvia; Julia Nabel, Axel Don, Victor Brovkin, Julia Pongratz (2016): Soil carbon response to land-use change: evaluation of a global vegetation model using observational meta-analyses. *Biogeosciences*, 13, 5661–5675, 2016. www.biogeosciences.net/13/5661/2016, doi:10.5194/bg-13-5661-2016
- Osterburg, Bernhard; Sebastian Rüter, Annette Freibauer, Thomas de Witte, Peter Elsasser, Stephanie Kätsch, Bettina Leischner, Hans Marten Paulsen, Joachim Rock, Norbert Röder, Jörn Sanders, Jörg Schweinle, Johanna Steuk, Heinz Stichnothe, Wolfgang Stümer, Johannes Welling, Anne Wolff (2013): Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen-Report Nr. 11.
- Piikki, Kristin; Mats Söderström, Rolf Sommer, Mayesse Da Silva, Sussy Munial, Wuletawu Abera (2019): A Boundary Plane Approach to Map Hotspots for Achievable Soil Carbon Sequestration and Soil Fertility Improvement. *Sustainability* 2019, 11, 4038; doi:10.3390/su11154038.
- Poepflau, Christopher; Axel Don (2014): Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 200 (2015) 33–41. Ravishankara Akkihebbal; John Daniel, Robert Portmann (2009): Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*. 2009 Oct 2;326(5949):123-5. doi: 10.1126/science.1176985.
- Powelson, David S; Clare Stirling, Mangi Jat, Bruno Gerard, Cheryl Pal, Pedro Sanchez, Kenneth Cassman (2014): Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. In: *Nature Climate Change* 2014 (4): 678–683. DOI: 10.1038/nclimate2292
- Ripl, Wilhelm (2003): Water: the blood-stream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 358: 1921–1934.
- Ripl, Wilhelm (2013): Warum Wasser für Land und Landwirtschaft wegweisend ist. Im Gespräch mit dem Gewässerforscher Wilhelm Ripl. *Kultur und Politik* 3/2013: 18–20.
- Sanderman, Jonathan; Tomislav Hengl and Gregory Fiske (2017): Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS* 114 (36): 9575–9580, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1706103114.
- Schmidt, Michael; Margaret Torn, Samuel Abiven, Thorsten Dittmar, Georg Guggenberger, Ivan Janssens, Markus Kleber, Ingrid Kögel-Knabner, Johannes Lehmann, David Manning, Paolo Nannipieri, Daniel Rasse, Steve Weiner, and Susan Trumbore (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478(7367): 49–56.
- Shindell, Drew; Greg Faluvegi, Dorothy Koch, Gavin Schmidt, Nadine Unger, Susanne Bauer (2009): Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. In: *Science* 326 (5953): 716-8.
- Skinner, Colin; Andreas Gattinger, Maike Krauss, Hans-Martin Krause, Jochen Mayer, Marcel G. A. van der Heijden, Paul Mäder (2019): The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions. *Scientific Reports* 9:1702 doi.org/10.1038/s41598-018-38207-w.

Skinner, Colin; Maike Krauss, Sissel Hansen, Jochen Mayer, Paul Mäder und Andreas Gattinger (2015): Emission und Aufnahme von Lachgas und Methan durch Ackerböden in der Fruchtfolgesequenz Kunstwiese – Silomais unter konventioneller und biologischer Bewirtschaftung. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Beitrag archiviert unter <http://orgprints.org/view/projects/int-conf-wita-2015.html>

Skinner, Colin; Andres Gattinger, Adrian Müller, Paul Mäder, Andreas Fließbach, Matthias Stolze, Reiner Ruser, Urs Niggli (2014): Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – A global meta-analysis. In: *Science of the Total Environment* 468-469 (2014): 553–563.

Solazzo, Roberto; Michele Donati, Licia Tomasi, Filippo Arfini (2016): How effective is greening policy in reducing GHG emissions from agriculture? Evidence from Italy. In: *Science of The Total Environment* 573:1115–1124.

Sommer, Rolf; Deborah Bossio (2014): Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal of Environmental Management* 144: 83–87.

Sommer Rolf; Mayesse da Silva, Sylvia Nyawira, Wuletawu Abera, Lulseged Tamene, Tesfaye Yaekob, Job Kihara, Kristin Piikki, Mats Söderström, Andrew J. Margenot (2018): Soil carbon under current and improved land management in Kenya, Ethiopia and India – Dynamics and sequestration potentials. Working Paper. CIAT Publication No. 475. International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Nairobi, Kenya. 46 p. Available at: <https://hdl.handle.net/10568/98859>

Soussana, Jean-Francois; Suzanne Lutfalla, Fiona Ehrhardt, Todd Rosenstock, Christine Lamannab, Petr Havlik, Meryl Richards, Eva (Lini) Wollenberg, Jean-Luc Chottee, Emmanuel Torquebiau, Philippe Ciais, Pete Smith, Rattan Lal (2018): Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 – soils for food security and climate' initiative. In: *Soil & Tillage Research* (2017), <https://doi.org/10.1016/i.still.2017.12.002>.

Spawn, Setz; Tyler Lark and Holly Gibbs (2019): Carbon emissions from cropland expansion in the United States. In: *Environ. Res. Lett.* 14 (2019) 045009 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0399>

Tubiello, Francesco; Mirella Salvatore, Rocío Cándor Golec, Alessandro Ferrara, Simone Rossi, Riccardo Biancalani, Sandro Federici, Heather Jacobs, Alessandro Flammini (2014): Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. 1990-2011 Analysis. FAO Statistics Division Working Paper Series ESS/14-02

UBA (2019): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2017 (Stand 01/2019). Zitierte Seiten auf https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/8_tab_thg-emi-kat_2019_0.pdf (Tabelle) und https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_thg-emi-landwirtschaft-kat_2019_0.pdf (Diagramm). Abgerufen im Oktober 2019.

Vos, Cora; Axel Don, Eleanor Hobley, Roland Prietz, Arne Heidkamp, Annette Freibauer (2019): Factors controlling the variation in organic carbon stocks in agricultural soils of Germany. *European Journal of Soil Science* 70: 550–564. DOI: 10.1111/ejss.12787

Woolf, Dominic; Johannes Lehmann, Annette Cowie, Maria Luz Cayuela, Thea Whitman, and Saran Sohi (2018): Biochar for Climate Change Mitigation. Navigating from Science to Evidence-Based Policy. In: Rattan Lal and B. A. Stewart: *Soil and Climate*. CRC Press in Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York.

Xu, Jiren; Paul Morris, Junguo Liua, Joseph Holden (2018): PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. In: *Catena* 160 (2018) 134–140.

Zomer, Robert; Deborah Bossio, Rolf Sommer, Louis Verchot (2019): Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Scientific Reports* 7: 15554, DOI:10.1038/s41598-017-15794-8

Unverdichtete Böden
erlauben natürliche
Tiefendurchwurzelung.





Unser Ziel

Wir wollen die weltweite Zerstörung der Natur und Umwelt stoppen und eine Zukunft gestalten, in der Mensch und Natur in Einklang miteinander leben.

Unterstützen Sie den WWF

IBAN: DE06 5502 0500 0222 2222 22

Bank für Sozialwirtschaft Mainz

BIC: BFSWDE33MNZ

WWF Deutschland

Reinhardtstr. 18

10117 Berlin | Germany

Tel. +49 (0)30 311 777 700

Fax: +49 (0)30 311 777 888