



WWF

HINTERGRUND

D

2018



DAS BODEN-BULLETIN

LANDBAU IN ZEITEN DER ERDERHITZUNG

Das Boden-Bulletin: Landbau in Zeiten der Erderhitzung

Inhalt

I.	Einleitung.....	2
II.	Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft	2
III.	Warum der Boden für das Klima so wichtig ist.....	4
1.	Kohlenstoff im Boden.....	4
2.	Humusabbau und Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden.....	7
3.	Auswirkungen von Düngemitteln	8
4.	Klimaeffekte von Boden-Pflanzen-Systemen	9
IV.	Landwirtschaftliche Lösungsansätze in der Diskussion	10
1.	Ökolandbau und Agrarökologie	10
2.	Reduzierte Bodenbearbeitung.....	12
3.	Biokohle (biochar)	13
V.	Reflexion von Potenzialen und Grenzen	14
1.	4-Promille-Initiative für Kohlenstoffspeicherung im Boden.....	14
2.	Humusaufbau und seine Grenzen.....	17
VI.	Forderungen des WWF für eine klimafreundliche Bodenbearbeitung	18
	Quellenangaben	19

Impressum:

Herausgeber: WWF Deutschland, Reinhardtstraße 18, 10117 Berlin

Stand: August 2018

Autoren: Nikola Patzel und Birgit Wilhelm

Layout: Silke Roßbach

Kontakt: Lea Vranicar, Pressestelle WWF, Tel.: 030 311 777 467, lea.vranicar@wwf.de

Bildnachweis: Bene_A (istock)

I. Einleitung

Unsere Landwirtschaft ernährt uns. Und gleichzeitig befeuert sie die Erderhitzung und gefährdet so unsere Lebensgrundlage für morgen. Daran sind längst nicht nur die bekannten Methan-Rülpser zu vieler Rinder schuld. Die Böden weltweit enthalten etwa dreimal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre. Dieser organische Kohlenstoff steckt vor allem im Humus, der weltweit durch nicht nachhaltige Landwirtschaft zerstört wird und als CO₂ in der Atmosphäre landet. Hinzu kommt das extrastarke Treibhausgas Lachgas, das durch die unnötige Überdüngung mit Stickstoff entsteht – neben dem Nitrat, das ins Grundwasser sickert.

Landwirtschaft lebt von Böden, die je nach Region seit Tausenden oder Millionen Jahren mit natürlichen Ökosystemen entstanden sind. Fast ein Viertel der weltweit ursprünglich landwirtschaftlich genutzten Böden ist bereits schwer geschädigt oder im wahrsten Sinne des Wortes 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 rund 20 Tonnen. So machen die Menschen die Böden zum Treiber der Klimakrise, obwohl sie CO₂-Speicher sein könnten.

Mit unserem Report wollen wir zeigen, wie sich diese Dynamik umkehren lässt. Die 4%-Initiative hat dies schon 2015 bei der Klimakonferenz in Paris vorge-rechnet. Und schon heute zeigen engagierte Bäuerinnen und Bauern, wie sie uns nachhaltig ernähren können: Sie leisten einen Beitrag für den Bodenschutz und damit auch für das Klima. Dies muss endlich auch das vorrangige Ziel der nationalen und europäischen Agrarpolitik werden. Der Aufbau, die Erhaltung und Pflege von lebendigen Böden mit ihrer natürlichen Bodenfruchtbarkeit sollte zu einem effektiv geförderten Zentralwert der Agrarpolitik werden. Dann können viel mehr landwirtschaftliche Böden zum nachhaltigen Ernährer und gleichzeitig vom Heizkörper zum Schattenspender für unser Klima werden.

II. Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft

In Deutschland betrugen 2015 die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft etwa 67 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent, das sind 7,4 Prozent¹ der hiesigen Treibhausgasemissionen (THG). Emissionen durch Landnutzungs-änderungen (ca. 1,4 weitere Prozent) und auch alle Emissionen aus der Düngerherstellung und anderen landwirtschaftlichen Produktionsmitteln sind in dieser Kalkulation nicht enthalten (Osterburg et al. 2013).

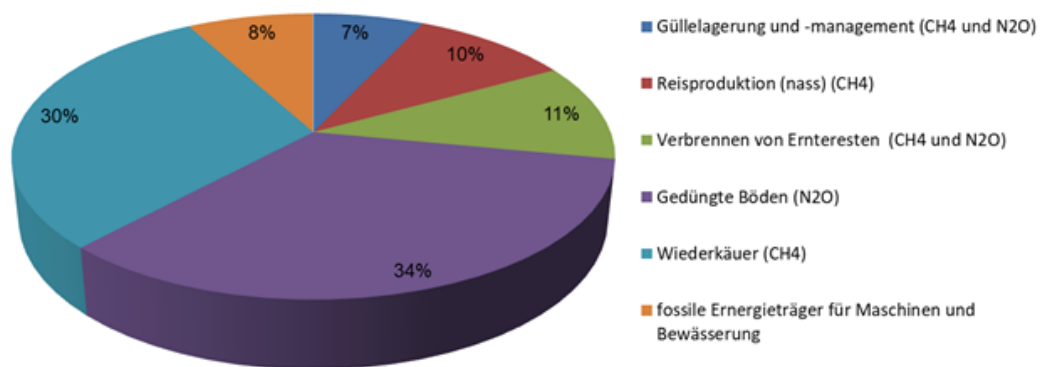
¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/8_tab_thg-emi-kat_2017-03-17_o.pdf
Hinweis: Die Aufteilung der Emissionen in dieser Tabelle entspricht der UN-Berichterstattung, **nicht** den Sektoren des Aktionsprogrammes Klimaschutz Deutschland. Die Gesamtemissionen sind aber identisch.

Im Rahmen des Klimaschutzplans 2050 wird für den Sektor Landwirtschaft in Deutschland eine Emissionsminderung von mindestens 31 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 1990² gefordert.

In der EU liegt der landwirtschaftliche Anteil an den CO₂-(Äquivalent-)Emissionen je nachdem, wie die Systemgrenze rund um Landwirtschaft gewählt wurde, 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 Jahre waren dabei nur ein Effekt zunehmender Externalisierungen, 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 extremen Mais-Dominanz zugunsten von etwas mehr Leguminosenanbau bewirken.

Der weltweite Anteil der Landwirtschaft an anthropogenen Treibhausgas-Emissionen liegt bei ca. 15 Prozent (ohne Landnutzungsänderungen) bis 30 Prozent (mit Landnutzungsänderungen).³⁴

**Quellen der direkten Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft
(Anteil an den direkten landwirtschaftlichen Emissionen weltweit)**



Quelle Grafik: Müller, 2012: 642

² <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/#c11681>

³ Diese Aufteilung auch entsprechend FAO (2014). – Es sind z.B. 10-15% nach Müller (2012) ohne Landnutzungsänderungen, 25-30% nach Czyżewski & Kryszak (2018), IPCC sagte 2015: 24%, Liebig et al. (2012) hatten 20% geschätzt.

⁴ https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/Cool_Farming_Report_Final_o.pdf Greenpeace-Bericht von 2008: Bellarby, Foereid, Hastings und Smith 2008: Cool Farming: Climate Impacts of Farming and Mitigation Potential.

Durch menschliche Landnutzung verursachte Treibhausgas-Emissionen aus Böden (dies ist der Hauptbereich landwirtschaftlicher Emissionen) treten auf:

1. durch raschen Humusverlust nach neuer Landnahme (oftmals nach Brandrodung) als Agrarland
2. während einer Humus abbauenden Nutzung von Ackerland
3. durch die mit Düngung und Bearbeitung verursachten Methan- und Lachgas- Emissionen

Die Emissionen der Industrie und des Maschinengebrauchs kommen zusätzlich hinzu. Es ist also fast immer **die menschliche Bodennutzung, die den globalen Humusverlust (10-15 Prozent der anthropogenen Emissionen) und die Methan- und Lachgasemissionen (jeweils ca. 4-5 Prozent) bewirkt** (Müller 2012: 641 f.). Hinzu kommen die Emissionen für die Herstellung von synthetischen Stickstoffdüngern, die in der Regel dem globalen Posten Energieverbrauch zugerechnet werden und etwa 0,3-0,6⁵ Gt CO₂ pro Jahr betragen. Das entspricht weiteren 0,6 bis 1,2 Prozent der gesamten weltweiten THG-Emissionen.⁶ Gleichzeitig ist die Landwirtschaft weltweit unmittelbar von den Auswirkungen der Erderhitzung betroffen.

III. Warum der Boden für das Klima so wichtig ist

Die Böden der Welt enthalten (bis in 2 m Tiefe) etwa dreimal so viel organischen Kohlenstoff wie die Atmosphäre und drei- bis viermal so viel wie die oberirdischen Pflanzenkörper (Schmidt et al. 2011: 49, Lal 2014). Der im Boden vorkommende organische Kohlenstoff wurde von Pflanzen der Atmosphäre entnommen und durch Wurzelausscheidungen oder Pflanzenreste in den Boden eingebracht. Regenwürmer helfen dabei in vielen Böden kräftig mit, indem sie oberirdischen Pflanzenabfall in den Boden hineinziehen und dort verdauen. Jeglicher Kohlenstoff im Boden kann jederzeit wieder in die Atmosphäre abgegeben werden, ist also niemals definitiv im Boden gebunden.

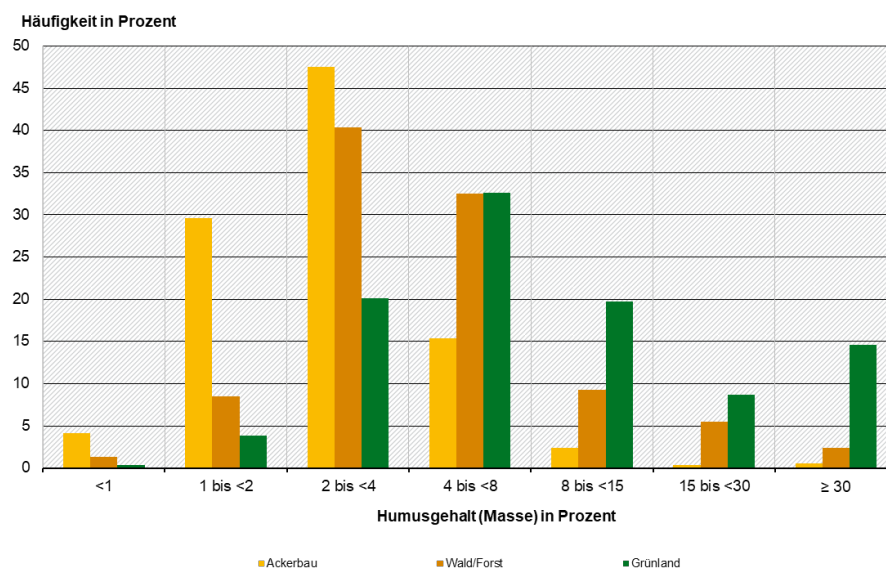
1. Kohlenstoff im Boden

Kohlenstoff ist der Hauptbestandteil des organischen Stoffes im Boden, zu dem alle lebenden und abgestorbenen Lebewesen (einschließlich Pflanzenbestandteile) im Boden sowie deren Umwandlungsprodukt Humus gehören. Landwirtschaftliche Böden enthalten weltweit in den oberen Schichten 0,5-10 Prozent organische Substanz, in

⁵ Die Umrechnung von CO₂ in C ist aufgrund ihrer Atommassen $3/11 \approx 0,273$, und umgekehrt von C auf CO₂ $11/3 \approx 3,67$. Im Klimadiskurs wird fast ausschließlich mit CO₂ bzw. dessen Wirkungsäquivalenten gerechnet, in wissenschaftlichen Kohlenstoffbilanzen meist mit C, also dem reinen Kohlenstoff.

⁶ Greenpeace 2008

Deutschland meist 1-4 Prozent (Düwel et al. 2007). Davon sind rund 65-90 Prozent Humus. Der Kohlenstoffanteil an der Humus-Masse im Boden liegt bei ca. 60 Prozent, der Kohlenstoffanteil der gesamten organischen Substanz im Boden liegt bei etwa 50 Prozent (hier mit deutlichen Schwankungen je nach frischem Eintrag). **Generell ist Grünland meist zwei- bis viermal humusreicher als Ackerland.** In Deutschland liegt der Humusgehalt in Böden mit enormer Streuung zwischen 2 Prozent bis über 30 Prozent an der Gesamtmasse (Düwel 2007). Tropische Böden haben oft nur eine sehr dünne Humusschicht.



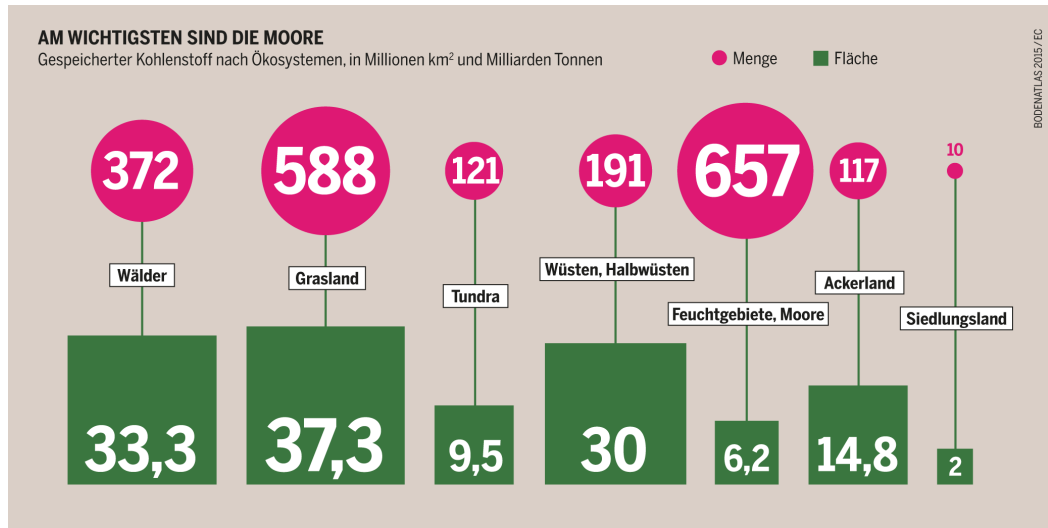
Häufigkeitsverteilung der Humusgehalte in Deutschland (Quelle: Düwel, 2008)⁷

Doch der Boden-Kohlenstoffgehalt nimmt fast überall ab, seit Landwirtschaft betrieben wird (u.a. Gattinger et al. 2012: 18226, Houghton 2002). Dieser Humusabbau und Bodenverlust durch Erosion war schon in Zeiten der Antike oft ein dramatischer Faktor (z.B. im Mittelmeerraum und Mesopotamien), und er wurde durch die Industrielle Revolution und Grüne Revolution⁸ der Landwirtschaft beschleunigt. Ändern sich die Umweltbedingungen eines Bodens, kann Bodenhumus sehr schnell abgebaut werden, selbst wenn seine Menge davor tausende Jahre stabil gewesen war (u.a. Schmidt et al 2011: 3). Lal (2013: 455) schätzt den **historischen Verlust von organischer Substanz in Böden durch Landwirtschaft und andere Degradation auf 50-80 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar**, was ein großer Teil des Ausgangsbestandes ist. **Die Differenz befindet sich nun größtenteils in der Atmosphäre.**

⁷ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_humusgehalte_2017-03-13_sw.pdf

⁸ Als „Grüne Revolution“ wurde seit den 1960er Jahren seitens ihrer Verfechter die Einführung nicht-lokaler „Hochleistungssorten“ in der Landwirtschaft, zusammen mit Pestiziden, Kunstdünger und verstärkter Maschinisierung, v.a. in sogenannten „Entwicklungsländern“ bezeichnet. Dieser Begriff wurde als eine Art „positiver Umsturz“ der bisherigen Agrarkulturen verstanden und begrifflich einerseits wertsetzend an die „Neolithische“ und „Industrielle Revolution“ angelehnt, andererseits in dieser Zeit des Kalten Krieges bewusst v.a. seitens der USA der „Roten Revolution“ durch kommunistische Bewegungen entgegengesetzt.

Landwirtschaft lebt in aller Regel von der Substanz, ist also nicht nachhaltig! Bei Ackerböden mit einem Gehalt von weniger als 3,5 Prozent organischer Substanz (bzw. weniger als 2 Prozent organischem Kohlenstoff C_{org}) in der oberen Schicht braucht es Maßnahmen zur Förderung und Aufbau des Humusgehalts.



Feuchtgebiete und Moore sind die Ökosysteme, die weltweit am meisten Kohlenstoff im Boden speichern.

Quelle: <https://www.boell.de/de/bodenatlas>

Die Klimawirkung von Moorboden-Verlusten ist besonders dramatisch:

Moore (20-90 Prozent organische Trockensubstanz) bedecken je nach Definition 2-3 Prozent der Landfläche, kohlenstoffreiche Feuchtböden im weiteren Sinne 13 Prozent. Ca. 5-13 Prozent dieser organischen Böden werden drainiert und bewirtschaftet und allein dies verursacht rund ein Drittel aller Kohlenstoffemissionen aus den landwirtschaftlichen Böden weltweit (Lal 2013: 450, Carlson et al. 2016).

Humusabbau durch Landnutzungsänderungen im weltweiten Durchschnitt (Guo & Gifford, 2002)

1. Graslandumbruch: 60 Prozent Humusausgasung (85 Prozent nach 30-50 Jahren)
2. Abholzung: 40 Prozent Humusausgasung
3. Plantagen statt Wiesland oder Naturwald: 10-13 Prozent Humusausgasung

2. Humusabbau und Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden

Humus wird im Wesentlichen durch die Bodenlebewesen biochemisch aufgebaut. Ein Humus-Abbau kann sowohl als rein chemische Oxidation als auch durch Mikroben erfolgen. **In jedem lebendigen Boden bestehen immer Aufbau- und Abbauprozesse zugleich, wobei aber ein Netto-Humusabbau in der Natur im wesentlich nur bei bestimmten Klimaänderungen 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 Bodenleben Klebstoffe (u.a. Mucopolysaccharide) und Haltenetze (Pilzfäden und Wurzeln). Diese biophysikalische Bodenstabilisierung ist auch ein sehr wichtiger Faktor zur Humuserhaltung. Die aktive Gestaltung von Drainage- und Belüftungssystemen u.a. durch Würmer ist entscheidend, um Fäulnisprozesse im Boden, die u.a. zu Lachgas- und Methanemissionen führen, sehr klein zu halten. Aus diesen Gründen ist eine Betrachtung von Kohlenstoff und Humus nur bei gleichzeitiger Betrachtung des Bodenlebens und dessen Beeinflussung durch Landwirtschaft sinnvoll.

Während die landwirtschaftlich genutzten Böden, meist selbst im Biolandbau, gegenwärtig ihre Kohlenstoffspeicher verringern und somit zur Erderhitzung beitragen, **hätten** sie dennoch auch **das Potenzial, netto Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufzunehmen und hierdurch die Erderhitzung zu bremsen.** In einer Aufbauphase können 10-20 Prozent eines Eintrags organischer Substanz in Humus transformiert werden (Hu et al. 2018). Nach Lal (2014: 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, was sehr hohe Ansprüche an die Landwirte stellt** (u.a. Müller 2012: 641).

Die Humusbildungsrate aus Pflanzenresten hängt auch deutlich davon ab, wie viel Stickstoff im Verhältnis zum Kohlenstoff in diesen enthalten ist (C/N-Verhältnis; García-Palacios et al. 2018). Mit leichtlöslichen Stickstoffdüngern zu sehr raschem Wachstum getriebene Kulturpflanzen ergeben weniger Humus und binden somit weniger C als normal wachsende Pflanzen im Boden. **Im Grünland ist der Humusgehalt aufgrund der dort besonders kohlenstoffreichen Pflanzenreste besonders hoch:** Bei optimaler Landwirtschaft ist Grünland sogar in der Lage, durch Humusaufbau die schädlichen Wirkungen der gegenwärtigen Methanentstehung in den Kühen komplett auszugleichen (Müller 2012: 646).

Störfaktoren für Humusaufbau

1. Mangelndes Futter fürs Bodenleben: kaum Erntereste, keine Zwischenfrüchte, kein organischer Dünger
2. Löslicher Dünger: v.a. Kunstdünger, zu viel Gülle und zu hoher Stickstoffgehalt der Erntereste
3. Mechanische Bodenbearbeitung und unbedeckter Boden

Förderfaktoren für Humusaufbau

1. Viel, stetiges, abwechslungsreiches Futter fürs Bodenleben: Wurzelabscheidungen, 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, die mit Abstand wichtigsten Ursachen für bodenbürtige Lachgasemissionen sind Stickstoffdünger (Woolf et al. 2018). Lachgas wirkt pro Masseinheit ca. 300-mal schädlicher auf das Klima als CO_2 . Lachgas ist ein Zwischenschritt beim Abbau von Nitrat (HNO_3 bzw. meist NaNO_3) zu ungefährlichem Stickstoff (N_2), Wasser (H_2O) und Salzen. Nitrat stammt meistens aus dem weltweit verbreitetsten künstlichen Düngestoff Ammoniumnitrat (NH_4NO_3), weitere große Mengen entstehen in Gülle oder auch bei tieferem Unterpflügen von Klee und anderen Leguminosen. Ob bei der Verwertung dieser Stoffe durch das Bodenleben überschüssiges Lachgas entsteht und in die Atmosphäre entweicht, hängt wesentlich von der Zusammensetzung und den Lebensbedingungen verschiedener Bakterienarten ab. Diese werden wiederum durch die Bewirtschaftung beeinflusst. Durch Bodeninhaltsstoffe wie Holzkohle („biochar“) kann die Lachgas-Freisetzung etwa halbiert werden (Cayuela et al. 2014, Krause et al. 2018). Gülle hingegen löst einen starken Lachgas-Schub aus, Bodenbearbeitung in den Bestand hinein auch (z.B. beim zu frühen Zwischenfruchtumbruch). Kompost löst keinen Lachgas-Schub aus (Krauss, Ruser et al. 2017). Nepalova et al. (2018) betonten, dass die Lachgasemissionen am stärksten von Stickstoffdünger abhängen (vgl. auch IFOAM-EU 2016). **Für die Lachgas-Verminderung wird man nicht darum herumkommen, den Einsatz von Stickstoffdüngern in der Landwirtschaft zu reduzieren und stattdessen den Anteil der Leguminosen in der Fruchtfolge zu erhöhen** (Cayuela et al. 2014: 5).

Methan (CH₄) entsteht im Boden dort, wo organisches Material vorhanden ist, aber kein Sauerstoff. Methan-Emissionspeaks treten auch direkt nach einer Gülle-Gabe auf und dauern so lange, bis die Gülle wieder von Sauerstoff durchdrungen ist (Krauss, Ruser et al. 2017). In der Landwirtschaft entsteht Methan sonst nur bei groben (leider weit verbreiteten) Bewirtschaftungsfehlern wie starker Bodenverdichtung durch zu schwere Maschinen und Überfahren bei Nässe; normal ist eine relevante Methanbildung nur in Nasskulturen, also v.a. beim Reisanbau. Methan wirkt pro Masseinheit ca. 25-30-mal stärker als Treibhausgas als CO₂.⁹

Wirkungen verschiedener Düngerarten

1. Gülle verursacht kurze Methan-Peaks, längere Lachgas-Peaks, Nitratauswaschung und schädigt in größeren Mengen die Bodenstruktur (Erosionsgefahr).
2. Mineralischer Stickstoffdünger fördert den Humusabbau (und Nitratbildung etc.).
3. Kompost und Mistkompost tragen stark zum Humusaufbau bei.
4. Gründüngung und Mulchen tragen stark zum Humusaufbau bei, wenn nicht zu stickstoffhaltig.

4. Klimaeffekte von Boden-Pflanzen-Systemen durch deren Gestaltung von Wasserkreisläufen

Zur Umweltproblematik in der Landwirtschaft gehört, dass Agrarflächen meist wesentlich schwächer in der Regulierung des regionalen Wasserhaushaltes (und Nährstoffhaushaltes) sind als natürliche, selbstorganisierte Ökosysteme (Ripl 2003: 1928). In der Folge wird es in Landwirtschaftsgebieten meist heißer, Wetterextreme und besonders Dürren nehmen zu und die Gesamtregenmenge sinkt im Vergleich zum Zustand mit natürlicher Vegetation. Anschauliche Beispiele dazu finden sich u.a. in Nordamerika und Europa (z.B. großflächiger Weizenanbau), Mittelamerika (z.B. Kaffee- und Bananenanbau in Monokultur), Südamerika (z.B. Sojaanbau), Westafrika (z.B. Kakaoanbau) und Südostasien (z.B. Palmölanbau).

Ursache für die schwache Regulierung des Wasserhaushaltes ist die geringere Wasserhaltefähigkeit und geringere Verdunstung auf den meisten Agrarflächen im Vergleich zu Steppen, kleinräumigen Agrarlandschaften, Agroforstsystemen oder Wäldern. 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 Wasserhaltefähigkeit nehmen Dürrezeiten mit Trockenstress zu.

⁹ 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).

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 und können daher großräumige Ökosysteme zumindest teilweise vor dem Zusammenbruch aufgrund der Erderhitzung bewahren**, sowie generell die ökologischen Anpassungszeiten ausdehnen (Ripl 2003 und 2013).

IV. Landwirtschaftliche Lösungsansätze in der Diskussion

Die Bedeutung der Fruchtfolgen für Natur-, Umwelt und Klimaschutz ist vielen Akteuren von Boden-und-Klima-Diskussionen ziemlich unbekannt. Vielfältige Fruchtfolgen stellen ausreichend stetige und vielseitige Nahrung für das Bodenleben bereit, sie sorgen für eine fast kontinuierliche Bodenbedeckung ohne sogenannte Schwarzbrachen mit nacktem, ungeschütztem Boden und fördern somit den Humusaufbau und die natürliche Bodenfruchtbarkeit.

1. Ökolandbau und Agrarökologie

Ökolandbau ist in der EU und zum Teil weltweit ein gesetzlich geregeltes Anbausystem mit definierten Richtlinien (z.B. 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 nichtbiologisch bewirtschaftete Böden (Gattinger et al. 2012: 18226). Der Grund ist, dass der Humusabbau vermindert und der Humusaufbau 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.

Viele Praktiken des Ökolandbaus finden sich auch im vielfältigen Bereich „agrarökologischer“ Landwirtschaftsweisen, die in verschiedenen Weltregionen und von verschiedenen Interessensgruppen jedoch recht unterschiedlich verstanden werden. Auch der CLIMSOIL Bericht der EU Kommission von 2008 bestätigte früh ein Potenzial zur Kohlenstoffsenkung in der Landwirtschaft durch Extensivierung (wie weniger Düngemittel, weniger Pestizide, geringerer Maschineneinsatz ...), Anbau von Untersaaten, Erhalt und Verbesserung von Grünland, und vor allem in erweiterten Fruchtfolgen.

Durch den höheren Anteil organischer Substanzen im Biolandbau werden Regenwürmer, Pilze und Mikroorganismen im Boden stark gefördert. **Biolandbau hat etwa 30-85 Prozent mehr Mikroorganismen im Boden als chemisch dominierter. Dies korreliert positiv mit dem Gesamtkohlenstoffgehalt im Boden.** Außerdem ist die Vielfalt der Mikroorganismen größer. Das vermindert generell Emissionen, weil die 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.).

Kommt im Biolandbau noch eine reduzierte Bodenbearbeitung dazu, ist die Regenwurmdichte nach Kuntz et al. (2013: 257-9) um zwei- bis dreimal höher, verdoppelt sich die Population von Pilzen und Einzellern (Protozoen) und nimmt die gesamte Mikrobienmasse um die Hälfte zu. 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).

Rolle der Lebensvielfalt im Boden

1. Biolandbau hat etwa 30-85 Prozent mehr Mikroorganismen im Boden als chemisch dominierter, und hat auch 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 wesentlich höher. Das verbessert die Nährstoffnutzung und vermindert die Emissionen.

Für wie groß man das Potenzial des Biolandbaus in Sachen Erderwärmungsbremse einschätzt, hängt im Wesentlichen davon ab, ob man mit den besten Spitzenwerten oder mit dem Mittelmaß aller heutigen Biobetriebe rechnet. Nach der Berechnung von IFOAM EU (2016: 41) würde **eine sofortige hundertprozentige Umstellung der EU-Landwirtschaft auf Bio-Standard bis 2030 zu einer Reduktion der landwirtschaftlichen Emissionen in der EU um 35 Prozent führen.** Eine sofortige Umstellung der Hälfte der Fläche brächte 17 Prozent Reduktion bis 2030, eine linear-graduelle Umstellung der Hälfte der Fläche bis 2030 eine Reduktion von 8-9 Prozent.

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 **für einige Jahrzehnte eine Kohlenstoffspeicherung von 1650 kg CO₂ pro Hektar und Jahr erreichbar**, und zusätzlich könnten durch verminderte Lachgasemissionen dauerhaft das Äquivalent von rund **500 kg CO₂ pro Hektar und Jahr eingespart werden** (Gattinger et al. 2012 und Skinner et al. 2014: 561), was umgerechnet in reinen Kohlenstoff dann 450 kg C plus 136 kg C-Äquivalent = 586 kg entspräche, also etwa 0,6 Tonnen. Das entspräche dem Ziel der unten beschriebenen 4-Promille-Initiative zur CO₂-Neutralisierung durch Humusaufbau (siehe Kap. IV). Die Lachgas-Emissionen sind im Biolandbau im gemessenen Durchschnitt um 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 das Wesentliche. Die in agrarpolitischen Diskussionen oft verwendete Einheit Emissionen pro Marktfruchtertrag je Hektar bedürfte einer Diskussion im größeren agrarstrukturellen Kontext.

In der Agrarökologie wird der Boden zusammen mit Pflanzen und Tieren einschließlich Menschen als Ökosystem verstanden. Im Kern wird in der Agrarökologie versucht, Landwirtschaft aus der Ökosystemperspektive zu betrachten und so zu betreiben, dass dort ähnliche Kräfte wirken können wie bei der Bildung und Selbsterhaltung natürlicher Ökosysteme. Darum sind auch für diesen Ansatz humusaufbauende Maßnahmen, eine Förderung des Bodenlebens, vielfältige Fruchtfolgen, Untersaaten, kein 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.

2. 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 schützt durch ungestörtere Bodenbedeckung vor Erosion**.

In frühen wissenschaftlichen Forschungsprojekten wurden mögliche Kohlenstoffspeicherkapazitäten durch eine reduzierte Bodenbearbeitung untersucht und dabei herausgefunden, dass die Kohlenstoffspeicherung langfristig nicht höher als in konventioneller Bodenbearbeitung sei (Baker 2007, Blanco-Canqui 2008).

In Versuchen auf Böden, die bereits viele Jahre nach ökologischen Richtlinien bewirtschaftet wurden, wurde aber nicht nur in der obersten Bodenschicht (Fließbach et al. 2017), sondern auch übers gesamte Bodenprofil gesehen eine leichte Erhöhung des Humusgehalts gemessen, die besonders auf tonigen Böden auch

stark (ca. 8 Prozent nach 13 Jahren) ausfallen kann (Krauss et al. 2017). Necpalova et al. (2018) fanden für die Schweiz die stärksten Reduktionen von bodenbürtigen Lachgas-, Methan- wie auch CO₂-Emissionen durch das Ersetzen von synthetischen Dünger durch organischen Dünger, von Gülle durch Mistkompost und von stark mechanisierter durch reduzierte Bodenbearbeitung. Die Potenziale dieser Einzelmaßnahmen zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen wurden für die Schweiz mit etwa 10-30 Prozent gemessen oder geschätzt. **Die Kombination von Bio-landbau und reduzierter Bodenbearbeitung brächten rund 130 Prozent Reduktion, sodass in den Böden eine Umkehr von der Emissionsquelle zur -Senke stattfindet.**

Feng et al. (2018) fanden in einer globalen Meta-Analyse zum Reduzierungspotenzial von Lachgas- und Methan-Emissionen 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. Aus dem weiten Spektrum von etwa minus 30% bis plus 30% fanden sie eine durchschnittliche knapp signifikante positive Wirkung von 6,6%. Auch **bei konservierender Bodenbearbeitung kommt es also sehr auf die Umstände an, wie u.a. Fruchtfolge, Pestizid- und Düngereinsatz, um die ökologische Gesamtwirkung beurteilen zu können.** Ein Direktsaatsystem mit systematischem, mehrmaligen Glyphosateinsatz auf Grund von gentechnisch veränderten Pflanzen kann zwar zu Verbesserungen bei Einzelfaktoren im Boden führen, ist aber aufgrund seiner ökologischen Gesamtbilanz nicht förderwürdig.

3. Biokohle (biochar)

Durch Biokohle wird die Hälfte des zu ihrer Herstellung verwendeten organischen Kohlenstoffes fixiert, was mehr ist als die oben zitierten 10-20 Prozent bei einer Verrottung im Boden (Woof et al. 2018). Die mittlere Verweildauer von Kohlenstoff in Biokohle im Boden ist mindestens 100 Jahre, oft auch über 500 Jahre (Woof et al. 2018). Über diese direkte Kohlenstoff-Einlagerung hinaus hat Pflanzenkohle auch weitere wichtige klimarelevante Wirkungen: Biokohle reduziert – ab etwa einem Schwellenwert von 10 Tonnen pro Hektar – die Lachgas-Emissionen um die Hälfte, bei einigen Böden auch über 90 Prozent (Woof et al. 2018). Sie verlangsamt den Abbau organischen Materials und fördert damit die Humusentstehung.

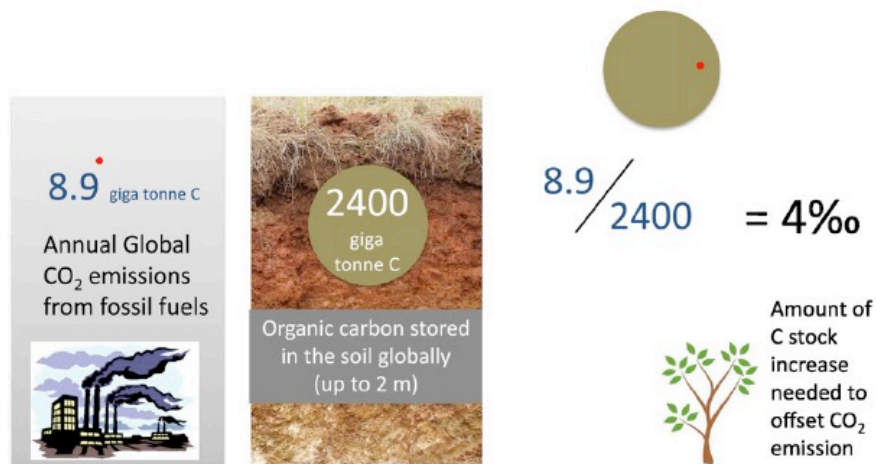
Sie fördert das Pflanzenwachstum (besonders auf geschädigten Böden) und bringt über das gesteigerte Pflanzenwachstum weiteren Kohlenstoff in den Boden (positive Rückkopplung). Sie vermindert die Nährstoffauswaschung und führt dadurch zu einem geringeren Düngerbedarf. Sie erhöht die Wasserhaltefähigkeit des Bodens, vermindert dadurch den Bewässerungsbedarf und verbessert die Stabilität der Ernten. Die bei der Pyrolyse (Verkohlung) freiwerdenden Holzgase können aufgefangen und wie Bio- oder Erdgas eingesetzt werden und dadurch fossile Brennstoffe ersetzen (Woolf et al. 2018). Natürlich hat auch die Biokohle ihre Probleme, sowohl bei der Herstellung (z.B. polyzyklische Aromate) als auch bei ihrer Ausbringung (zu viel oder falsche Sorten können zu auch zu viele Nährstoffe binden). Neben der aktuellen wissenschaftlichen Literatur zeigen aber auch jahrtausendlange Erfahrungen z.B. von natürlichen Steppenbränden oder von menschengemachter Schwarzerde (terra preta) im Amazonasbecken, dass hier für die Landwirtschaft sehr wertvolle Potenziale vorhanden sind.

V. Reflexion von Potenzialen und Grenzen

1. 4-Promille-Initiative für Kohlenstoffspeicherung im Boden

Dieses Konzept wurde im Dezember 2015 bei der COP21 in Paris als freiwillige Zielvereinbarung von 39 Regierungen und mehr als 190 internationalen Institutionen und NGOs unterschrieben (Soussana et al. 2018). Es besagt, dass wenn der weltweite Gehalt organischen Kohlenstoffs der Böden um jährlich 4 Promille (0,4 Prozent) stiege, sämtliche anthropogenen klimarelevanten Kohlenstoff-Emissionen vollständig kompensiert werden könnten.

Für die Kalkulation wurde die gegenwärtige anthropogene Emissionsrate von 8,9 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr durch die wissenschaftliche Schätzung von 2400 Gigatonnen Kohlenstoff in allen terrestrischen Böden weltweit geteilt: $8,9/2400 = 0,004$ (gerundet von 0,0037). Pro Hektar Landboden umgerechnet entspräche dem ein Durchschnittsbestand von organischem Kohlenstoff von 161 Tonnen pro Hektar, welcher jährlich um 0,6 Tonnen pro Hektar gesteigert werden müsste. Diese Beträge sind im Landbau insofern realistisch, als sie den heutigen Durchschnittswerten sehr guter fachlicher Praxis entsprechen, sie können sogar noch deutlich höher ausfallen (Minasny et al. 2017, Soussana et al. 2018).



Berechnungsgrundlagen der 4-Promille-Initiative. Quelle: Minansy et al. 2017

Allerdings basiert die 4-Promille-Kalkulation auf sämtlichen Böden der Erde, nicht nur den landwirtschaftlich genutzten, sondern auch z.B. Mooren und Sandwüsten. Wird diese **Strategie nur auf den landwirtschaftlich genutzten Böden umgesetzt**, die je nach Definition etwa 3,9-4,9 Milliarden Hektar umfassen, **ergibt sich bei einer Steigung von jährlich 4 Promille eine Kompensation von noch 25-35 Prozent der weltweiten fossilen Emissionen** (also ca. 2,7 der 8,9 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr) (Minasny et al. 2017: 77).

Die Potenziale verschiedener Landnutzungsänderungen für eine Kohlenstoffspeicherung werden von Minasny et al. (2017) und Lal 2014 (letzte beide Zeilen) wie folgt eingeschätzt:

Kohlenstoffeinsparungsmaßnahmen	Tonnen C pro Hektar und Jahr (in CO ₂ /ha/Jahr umgerechnet)
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)

Das hieße, wenn man es hochskalieren könnte: Sowohl durch Landnutzungsänderungen als auch durch eine verbesserte landwirtschaftliche Praxis ließe sich die Forderung erfüllen, den organischen Kohlenstoffgehalt aller landwirtschaftlichen Böden um jährlich 4 Promille oder mehr (etwa 0,5-1 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar nach Lal 2013) zu erhöhen.

Da Humusschutz und -aufbau sowie auch andere ins System integrierte organische Kohlenstoffarten (v.a. Biokohle, aber auch Nährhumus und löslicher organischer Kohlenstoff) in Böden **unter so vielen Gesichtspunkten Vorteile haben, sollte diese Strategie auf jeden Fall bei Klimaschützern im obersten Bereich ihrer Prioritätenliste 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 zu verlieren haben. Was den Humus-Aufbau betrifft, so haben eine vermehrte Umwandlung von Ackerland in Wiesland, in Agroforstsysteme und Wald die größten Aufbau-Potenziale (Müller 2012: 645, Minasny et al. 2017: 79); gleichzeitig sollten alle Möglichkeiten des Humusaufbaus **bei jedem Ackerboden** genutzt werden.

Weitere Hinweise: Beim Umgang mit der politischen 4‰-Forderung ist unbedingt zu beachten, dass diese sich auf den Gesamtkohlenstoffgehalt aller Böden weltweit bezieht, also ihren Zweck nicht allein durch Umsetzung im Agrar- oder gar nur Ackerland voll erfüllen könnte. Da gleiche Steigerungsmengen in Prozent außerdem umso höher erscheinen, je niedriger der Ausgangsgehalt ist, auf den sich die Prozentwerte beziehen (z.B. in degradierten Böden), ist logisch und sollte aus Klimaschutzsicht das Augenmerk auf die jeweiligen absoluten Zahlen schärfen.

Unter der grenzwertig hohen, aber noch vertretbaren Annahme, dass der C-Gehalt von landwirtschaftlich genutzten Böden¹⁰ dem weltweiten Durchschnitt aller Böden entspricht, müsste der jährliche Kohlenstoffanstieg in diesen Böden bei 1,2 % liegen, um die weltweiten C-Emissionen auszugleichen (vgl. Minasny et al. 2017: 61, 77, 82).¹¹

Bezieht man diese Rechnung wiederum nur auf Ackerland, das 30-35% der landwirtschaftlichen Fläche einnimmt, wäre der prozentuale Zuwachsbedarf noch wesentlich höher, um sämtliche weltweit anthropogenen C-Emissionen (8,9 Gt C/Jahr) zu neutralisieren. Das zeigt: Humusaufbau im Ackerbau alleine könnte das nicht schaffen, Grünland und positive Landnutzungsänderungen wären unbedingt auch einzubeziehen.

¹⁰ Weltweit 49 km² davon 65-70% Grünland und 30-35% Ackerland

¹¹ 0,4% (4‰) bei 149 km² (weltweite Landfläche) verlangt 1,2 % bei 49 km² (weltweite Landwirtschaftsfläche).

2. Humusaufbau und seine Grenzen

Kohlenstoffspeicherung in landwirtschaftlichen Böden kann eine essentielle Hilfe zur Überwindung der gegenwärtigen ernststen Klimakrise sein. Die dafür notwendigen Maßnahmen sind überwiegend bereits bewährt und **bringen einen Mehrfachnutzen: Erhaltung von Biodiversität und von langfristiger Bodenfruchtbarkeit in Kombination mit Klimaschutzwirkungen auf mehreren Ebenen.** Um nicht naiv zu sein und um Missverständnissen vorzubeugen, müssen hier aber auch Schwierigkeiten und Begrenzungen genannt werden:

Jeder Kohlenstoffgewinn in Böden ist stets prekär, weil er bei erneuten Nutzungsänderungen durch Abbau oder Erosion verloren gehen kann, schneller als er gewonnen wurde (Müller 2012: 645). Böden enthalten gegenwärtig zwar viel mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre und sie haben auch ein großes weiteres CO₂-Speicherpotenzial, doch sind die Herausforderungen bei der Realisierung dieser Möglichkeiten sehr groß, weil für großflächige Wirkungen ganze Landwirtschaftssysteme fundamental verändert werden müssten. Zu beachten ist auch die zeitliche Dynamik von Humusaufbau: Bei den heute gängigen Praktiken kommen Ackerböden relativ schnell an Sättigungsgrenzen: Nach 10 Jahren sinkt die Kohlenstoff-Aufnahmerate und nach 20 Jahren ist eine weitere Kohlenstoff-Nettoaufnahme in den meisten Fällen nicht mehr nachweisbar (Gattinger et al. 2012: 18227); mit Ausnahme allerdings von Biokohle-Verfahren, die zu Anreicherungen organischen Kohlenstoffs in Ackerböden auch über hunderte Jahre führen können. Bei Grünland geht langfristige Anreicherung einfacher.

Zieht man die derzeit wahrscheinlichen Sättigungsgrenzen in Betracht, dann kann Kohlenstoffspeicherung in Böden den CO₂-Anstieg der Atmosphäre nur vorübergehend vermindern (Müller 2012: 643, Lal 2004: 113 f.). **Um sich trotz allem dem viel größeren Potenzial der landwirtschaftlichen Böden zur Kohlenstoffspeicherung anzunähern, müssten die herausragend erfolgreichen Methoden für ihre Klimazone endlich durch Politik und Praxis umgesetzt werden. Dies wäre letztlich einfacher erreichbar, als nicht-nachhaltige Landwirtschaft erhalten zu wollen.** Bereits das Zwischenstadium zwischen Abbau und Wiederaufbau von Humus wird einen spürbar vermindernenden Effekt auf die Erderhitzung bringen: wenn also die Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft gestoppt und der Kohlenstoffgehalt in den Böden weltweit stabilisiert werden!

VI. Forderungen des WWF für eine klimafreundliche Bodenbearbeitung

Eine wesentliche Leitlinie für eine klimafreundliche Landwirtschaft ist es, den Humusaufbau im Acker- und Grünland zu fördern. Als erster Schritt wäre es schon ein Erfolg, wenn der Humusgehalt unter Bewirtschaftung nicht weiter sinken würde. Aufbauend auf den vorangegangenen Ausführungen sind dafür folgende Grundsätze zu beachten und in das Zentrum der Ackerbaustrategie zu stellen:

1. Förderung des Humusaufbaus durch vielfältige und standortangepasste Fruchtfolgen und Untersaaten sowie auch Mischkulturen und eine biologische Stickstoff-Fixierung durch in die Fruchtfolgen integrierter Leguminosen.
2. Reduzierung des Einsatzes von synthetischen Stickstoffdüngern mit dem Ziel, keine synthetischen Düngemittel mehr zu verwenden.
3. Ausweitung und Förderung des ökologischen Landbaus und agrarökologischer Maßnahmen für Humusaufbau in Böden.
4. Erhalt und Rückgewinnung von Grünland.
5. Investitionen in den Schutz und die Renaturierung nasser Böden (v.a. Moore).
6. Deutliche Reduzierung der Viehbestände und Bindung der Tierzahlen an die betrieblich oder regional vorhandene Futterfläche (Flächengebundene Tierhaltung mit also max. 1,4-2 GV/ha).
7. Berücksichtigung des lokalen und regionalen Klimaeffekts von Boden-Pflanzen-Systemen durch die Förderung naturnaher landwirtschaftlich genutzter Ökosysteme (z.B. Agroforstsysteme, Permakulturen, Wasserrückhaltestrukturen in der Landschaft) mit höherer Wasserhaltefähigkeit und somit höherer Verdunstung.

Quellenangaben

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

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.

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.

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

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

Cayuela, M.L.; L. van Zwieten, B.P. Singh, S. Jeffery, A. Roiga, M.A. 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.

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.

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

FAO (2014): Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. 1990-2011 Analysis.

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; Maike 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, Katarina Hedlund, Sandra Lavorel, Nicolas Legay, Martina Lori, Paul Mäder, Laura B. Martínez-García, Pedro Martins da Silva, Adrian Muller, 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.

Greenpeace (2008): Greenpeace-Bericht von 2008: Bellarby, Foereid, Hastings und Smith 2008: Cool Farming: Climate Impacts of Farming and Mitigation Potential. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/Cool_Farming_Report_Final_O.pdf

Guo, L.B.; R.M. 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):298–313.

Teng Hu, 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.

Krause, Hans-Martin; Roman Hüppi, Jens Leifeld, Mohamed El-Hadidi, Johannes Harter, Andreas Kappler, Martin Hartmann, Sebastian Behrens, Paul Mäder, Andreas Gattinger (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 Lori, Reiner Ruser, Torsten Müller, Sabine Zikeli, Sabine Gruber, Wilhelm Claupein, Paul Mäder und Andreas Gattinger (2017): Reduzierte Bodenbearbeitung im Biolandbau – Klimaaspekte. In: *Agrarforschung Schweiz* 8 (6): 226–231.

Krauss, Maike; Reiner Ruser, Torsten Müller, Sissel Hansen, Paul Mäder, Andreas Gattinger (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, M.; A. Berner, A. Gattinger, J.M. Scholberg, P. Mäder and L. 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 (2013): Soil carbon management and climate change. In: *Carbon Management* (2013) 4(4), 439–462.

Lenka, Sangeeta; Narendra Lenka, Veerasamy Sejian, Monoranjan Mohanty (2015): Contribution of Agriculture Sector to Climate Change. S. 37-48 in: V. Sejian et al. (eds.), *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation*, 37
DOI 10.1007/978-81-322-2265-1_Springer India.

Liebig, Mark; Alan Franzluebbers, Ronald Follett (2012): <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780123868978?via%3Dihub> (book).

Lori, Martina; Sarah Symnacziki, Paul Mäder, Gerlinde De Deyn, Andreas Gattinger (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>

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 Stolbovoy,

Uta Stockmann, Yiyi Sulaeman, Chun-Chih Tsui, Tor-Gunnar Vågen, Bas vanWesemael, Leigh Winowiecki (2017): Soil carbon 4 per mille. In: *Geoderma* 292 (2017): 59–86.

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.

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.

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.

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; Krauss, M., Hansen, S., Mayer, J., Mäder, P. und Gattinger, A. (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.

Soussana, Jean-Francois; Suzanne Lutfalla, Fiona Ehrhardt, Todd Rosenstock, Christine Lamannab, Petr Havlik, Meryl Richards, Eva (Lini) Wollenberg, Jean-Luc Chotte, 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/j.still.2017.12.002>.

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.

**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.

wwf.de | info@wwf.de

Unterstützen Sie den WWF

IBAN: DE06 5502 0500 0222 2222 22

Bank für Sozialwirtschaft Mainz

BIC: BFSWDE33MNZ

WWF Deutschland

Reinhardtstraße 18

10117 Berlin | Germany

Tel.: +49(0)30 311 777 700

Fax: +49(0)30 311 777 888

info@wwf.de | wwf.de