

# Potenziale der Kohlenstoffspeicherung im Boden

von Stefan Schwarzer

## Zusammenfassung

Der Beitrag des Bodens zum Klimawandel durch die Oxidation von Bodenkohlenstoff ist von ernst zu nehmender Bedeutung. Allerdings können Böden – und damit die Landwirtschaft – eine wichtige Rolle bei der Abschwächung des Klimawandels spielen. Durch verschiedene landwirtschaftliche Praktiken könnten wir dazu beitragen, große Mengen an Kohlendioxid aus der Luft im Boden zu speichern und gleichzeitig die Bodenfruchtbarkeit, die Pflanzengesundheit und ganze Ökosysteme zu regenerieren. Dies ist eine Win-Win-Lösung, die mehrere Vorteile bietet und eine hohe Aufmerksamkeit verdient.

## Einführung

Landwirtschaftliche Praktiken haben das Potenzial, Kohlenstoff im Boden und in den Pflanzen zu speichern und so zum Klimaschutz beizutragen, während sie gleichzeitig die Bodenfruchtbarkeit und die Kapazität zur Wasserspeicherung erhöhen, die Erträge und die Nährstoffversorgung verbessern, dürrerotolerante Böden schaffen, degradierte Anbauflächen und Weideländer wiederherstellen und die biologische Vielfalt fördern, mit positiven Auswirkungen auf die lokale Wirtschaft. Zusammen bilden diese eine Reihe von Lösungen, die auf breiter Front überzeugen.

Den industriellen Anbausystemen gelingt es, große Mengen an Lebensmitteln für den Weltmarkt zu produzieren. Jedoch führt dies zu zahlreichen negativen Auswirkungen wie z.B. einer signifikanten Bodenerosion<sup>1-8</sup>, Biodiversitätsverlust<sup>9-20</sup> und Verschmutzung von Gewässern<sup>21-23</sup>. Es fördert auch eine hohe Abhängigkeit

von der Agrarindustrie und ihren Produkten, führt zu einem hohen Süßwasser-<sup>22,24,25</sup> und Stickstoff-Fußabdruck<sup>26</sup>, und resultiert in bis zu 25% aller anthropogenen Treibhausgasemissionen<sup>27-30</sup>. Das Bevölkerungswachstum der Erde, der Klimawandel (mit zunehmendem Auftreten von Wetterextremen wie Dürren und Stürmen), die mögliche Verknappung von Mineräldüngern (wie Phosphor), die Bodenerosion und die Abnahme der Bodenfruchtbarkeit, die starke Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, der Rückgang der Bestäuber und andere Faktoren stellen insgesamt eine große Herausforderung für das gegenwärtige Agrarsystem dar.

Können alternative Ansätze zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit, die über ein vielseitiges Methodenset eingesetzt werden, die Bodenressourcen regenerieren und Win-Win-Lösungen schaffen, wie z.B. die Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden um den Klimawandel zu mildern? Eine ganze Reihe von neuen und innovativen Ansätzen für solche Zwecke werden auf den folgenden Seiten vorgestellt.

## Warum ist dieses Thema wichtig?

Die "Moderne" oder "industrielle" Landwirtschaft in den frühen Jahren des 21. Jahrhunderts steht wie oben beschrieben vor vielen Problemen und Herausforderungen. Eine der größten - wenn auch in unserer Gesellschaft weniger beachteten - Bedrohungen für die Menschheit und den Planeten ist der Verlust von Boden durch landwirtschaftliche Praktiken und damit der Bodenfruchtbarkeit (Abbildung 1): Die Empfindlichkeit der Böden, diese dünne Erdschicht, die die Grundlage für fast alles, was wächst und fast alles, was wir essen, ist, stellt



Abbildung 1: In Ländern mit kaltem Klima findet die Bodenerosion meist an der Oberfläche statt, kann aber auch Erosionsrinnen erzeugen (Foto aus Deutschland), wie sie in empfindlicheren Regionen stattfinden und große Mengen an Boden abwaschen. Foto: Stefan Schwarzer

die "Nachhaltigkeit" der industrialisierten Landwirtschaft in Frage.

In vielen Regionen der Erde nimmt die Bodenfruchtbarkeit seit Jahrzehnten ab, und große Mengen an fruchtbarem Boden wurden (und werden weiterhin) in Flüsse, Seen und Ozeane gespült - für immer verschwunden. Die Degradation von Böden führt zur Entstehung von Kohlendioxid, der durch die Oxidation der organischen Substanz des Bodens ("Soil organic matter", SOM, allgemein bekannt als "Humus") entsteht, und in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben wird. All dies hat erhebliche wirtschaftliche Auswirkungen.

Vierundzwanzig Milliarden Tonnen fruchtbarer Oberbodens, welche sich auf 12 Millionen Hektar ausdehnen,



Abbildung 2: Links: 10 Jahre Direktsaat mit Zwischenfrüchten und Rotationsweiden, 2,1% SOM. Rechts: Konventionell gepflügte Weizen-Brache-Weizen Rotation, 0,5% SOM. Beide Böden sind aus schluffigem Lehm im Abstand von 50 m. Foto: Michael Thompson

gehen jedes Jahr verloren <sup>2,8</sup>. Das entspricht einer Landfläche, die fast so groß ist wie Griechenland oder Malawi oder 192 Millionen Eisenbahnwaggons voller Erde - pro Jahr. Alleine in den USA entspricht dies 15,7 Tonnen/ha/a <sup>31,32</sup> und in Europa 2,5 Tonnen/ha/a fruchtbaren Ackerbodens <sup>7</sup>. "Insgesamt geht der Boden aus den landwirtschaftlichen Flächen zehn- bis vierzigmal schneller verloren als die Rate der Bodenbildung, was die Ernährungssicherheit der Menschheit gefährdet" <sup>8</sup>. Neben diesem Oberbodenverlust ist die immer weiter zunehmende Verschlechterung der landwirtschaftlichen Böden zu nennen. Fünfundzwanzig Prozent der Erdoberfläche sind bereits degradiert.

Ein Drittel des CO<sub>2</sub>, das zwischen 1850 und 1998 durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre freigesetzt wurde, stammt aus landwirtschaftlichen Aktivitäten <sup>33,34</sup>. Schätzungen liegen zwischen 133 Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) <sup>i</sup> seit Beginn der Landwirtschaft durch Verlust von organischem Bodenmaterial und Bodenerosion <sup>35-37</sup> und 379 GtC durch Waldrodung und Verbrennung <sup>38,39</sup>. 50-70% der Kohlenstoffvorräte im

Boden sind in kultivierten Böden verloren gegangen <sup>ii</sup> <sup>40,41</sup>. Die landwirtschaftlichen Flächen enthalten heute oft weniger als 2% SOM <sup>42</sup>, während zum Zeitpunkt der Umwandlung von Grasland oder Wäldern dieser 8-15% oder sogar mehr beträgt. Der Verlust von SOM hat mehrere negative Konsequenzen, eine davon ist die Erzeugung von CO<sub>2</sub> durch Oxidation des organischen Materials. Wenn große Teile dieses CO<sub>2</sub> vom Land und den Böden kommen - kann man diese auch irgendwie zurückgewinnen? Das heißt: Kann CO<sub>2</sub> im Boden oder in lebenden Organismen gespeichert werden und dazu beitragen, den Klimawandel zu mildern? Dies ist ein zentrales Thema, denn Wissenschaftler haben berechnet, dass eine umfassende terrestrische CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre durch gesteuerte Biomasse- und Bodenkohlenstoff-Sequestrierung erforderlich ist um die aktuell projizierte Temperaturzunahme zu vermeiden <sup>43-46</sup>.

## Was sind die Ergebnisse?

Die Menge an Kohlenstoff in der Atmosphäre beträgt 760 GtC und im biologischen Pool 560 GtC <sup>33,47</sup>. Global

für das Jahr 2010 schlug Sandermann vor, dass die weltweiten Bestände an organisch Gehalt im Boden ("soil organic content", SOC) <sup>iii</sup> 863, 1.824 und 3.012 GtC in den oberen 0,3 m, 1 m und 2 m Boden waren <sup>36</sup>. Nach der vom Internationalen Geosphären-Biosphärenprogramm (IGBP) als Ackerland eingestuft Fläche entspricht dies im Durchschnitt 62, 127 und 198 tC/ha.

Der durchschnittliche historische SOC-Verlust wird auf 20-30 tC/ha in Wäldern/Waldflächen und 40-50 tC/ha in Steppen/Savannen/Grünlandökosystemen geschätzt. Im Durchschnitt führt die Umwandlung von ursprünglichem Grasland in Ackerland zu einem Verlust von ca. 50% des SOC <sup>35,36</sup>.

Die bekannteste Initiative zur Kohlenstoffsequestrierung "4 pro 1000", die von der französischen Regierung auf der 21. Tagung der Konferenz der Vertragsparteien der UN Framework Convention on Climate Change (COP-21) ins Leben gerufen wurde, hat sich zum Ziel gesetzt, den Gehalt an SOC um jährlich 0,4% pro Jahr (oder 4 pro 1000) in allen Landnutzungsformen, einschließlich Wäldern, zu erhöhen. Diese Erhöhung würde sich auf die ersten 30-40 cm Oberboden beziehen, die sich auf

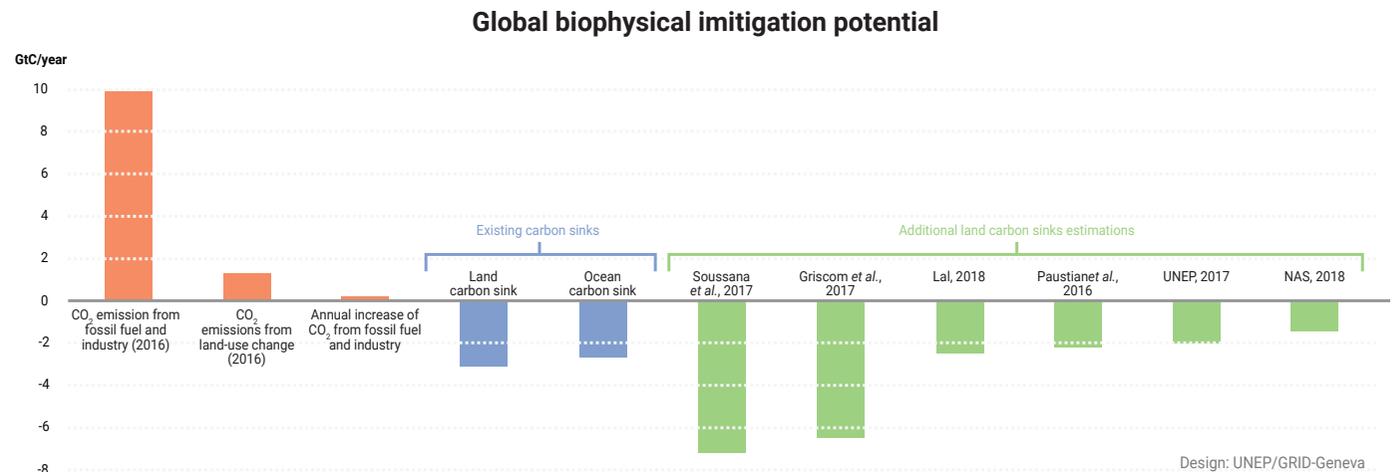


Abbildung 3: Kohlenstoffemissionen und globales Potenzial für die Kohlenstoffbindung in Böden und Vegetation - Schätzungen aus verschiedenen Quellen. Grafik: UNEP/GRID-Geneva

i 1 Gigatonne = 1'000'000'000'000 Kilograms; 1 GtC = 3.67 GtCO<sub>2</sub>  
 ii <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/239815/>  
 iii SOC ist eine Komponente von SOM, und wird gemeinhin berechnet als SOM \* 0.58

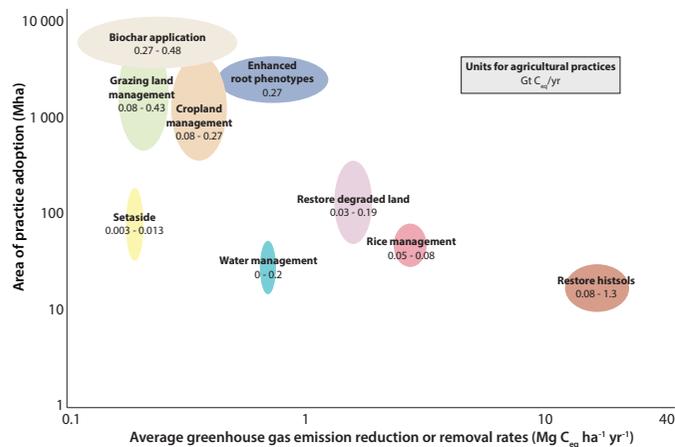


Abbildung 4: Globale Kohlenstoff-Sequestrierungspotentiale für verschiedene Methoden (die logarithmische Skalierung beachten), angepasst von <sup>53</sup>

690±90 (30 cm) und 860 (40 cm) GtC <sup>48</sup> summieren. Ein Anstieg von 0,4% würde somit 2,8 und 3,4 GtC in diesen Schichten pro Jahr sequestrieren. Der jährliche Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt weltweit ca. 0,2 GtC <sup>iv</sup>, und diese Speicherrate würde somit die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre im Laufe der Zeit verringern.

Ebenso wichtig ist jedoch die Tatsache, dass die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden zu vielfältigen Vorteilen führt, die den Ertrag von Kulturen und Weiden verbessern: (1) es erhöht die verfügbare Wasserkapazität, (2) es verbessert die Nährstoffversorgung der Pflanzen, (3) es stellt die Bodenstruktur wieder her und (4) minimiert das Risiko der Bodenerosion <sup>49</sup>. Der sichtbare Unterschied zwischen reichem Humus- und verarmten Böden ist auch für ungeübte Augen offensichtlich (Abbildung 2).

Die Einführung verbesserter agronomischer Praktiken kann zu relativen jährlichen SOC-Zunahmen führen, die oft weit über 0,4% liegen <sup>48,50-52</sup>, abhängig von den verwendeten Methoden und der vorhandenen Menge an Kohlenstoff im Boden, sowie von wirtschaftlichen Anreizen und vorhandenem Fachwissen.

Die Schätzungen für die Kohlenstoffsequestrierung durch verbesserte Praktiken variieren erheblich (Abbildung 3), da das Verständnis der Wechselwirkungen und insbesondere die Kenntnis des Verhaltens von Böden noch begrenzt ist. Verschiedene Studien zeigen theoretische Potenziale von 0,8 bis 8 GtC pro Jahr <sup>35,40,44,51,53-57</sup>, teilweise einschließlich Wiederaufforstungspraktiken, und erreichen bis zu 10 GtC/a zusätzlichen Kohlenstoffs auf landwirtschaftlichen Flächen <sup>41,55</sup>, während praktisch erreichbare Kohlenstoffsequestrierungsraten eher im unteren Bereich von 1,5 bis 2,5 GtC/a <sup>30,53,58</sup> anzusiedeln sein werden. Angesichts der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und der Industrie von 9,9 GtC plus 1,3 GtC aufgrund von Landnutzungsänderungen (z.B. Entwaldung) <sup>v 38</sup> sieht das Potenzial für die Kohlenstoffbindung durch regenerative landwirtschaftliche Praktiken vielversprechend aus, obwohl die Umsetzung solcher Praktiken mit unterschiedlichen sozialen, wirtschaftlichen, fachlichen und anderen Vorbehalten verbunden ist. Es bedarf der Finanzierung von und Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, politischen Entscheidungsträgern, Praktikern und einer Vielzahl anderer Interessengruppen. Die Kohlenstoffsequestrierung im Boden hat eine große, aber nicht unendliche Senkenkapazität und ist vor allem durch schlechtes Management reversibel. Die globalen Bemühungen, die Landnutzungspraktiken schrittweise zu ändern, sind schwer umzusetzen und reduzieren somit das theoretische Minderungspotenzial <sup>60</sup>.

Zu den landwirtschaftlichen Praktiken, die die SOC erhöhen können, gehören unter anderem Agroforstsysteme, die Verwendung von Zwischenfrüchten, die Nutzung von Pflanzenarten und -sorten mit größerer Wurzelmasse und tieferen Wurzeln, die Verwendung von stickstofffixierenden Hülsenfrüchten, die Integration von Tieren in das Anbausystem, eine breite Fruchtfolge, eine verbesserte Grünlandbewirtschaftung, das Zurücklassen von Ernteresten und Zusätze wie Kompost und Pflanzenkohle <sup>vi 44,45,48,51,53,55</sup> (Abbildung 4). Die Erhöhung des SOM und die entsprechende Anpassung der landwirtschaftlichen Praktiken erfordert ein

Verständnis für die grundlegend wichtigen **Zusammenhänge zwischen Pflanzen und Bodenleben** (Abbildung 5). Pflanzen interagieren intensiv mit einer Vielzahl von Mikroorganismen, insbesondere bestimmten Mikroben und Pilzen im Boden. In einem einzigen Gramm gesunden Bodens findet man 10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> Bakterien, 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> Pilze und eine Vielzahl anderes mikroskopischen Lebens <sup>61,62</sup>, welches das Wachstum und die Gesundheit der Pflanze sowie die Nährstoff- und Wasserspeicherung im Boden beeinflusst <sup>63-68</sup>. Das unterirdische sogenannte *Wood Wide Web* alias *www* <sup>69,70</sup> teilt Nährstoffe und Wasser mit der Pflanze, wie auch Signale von den Pflanzen, die die

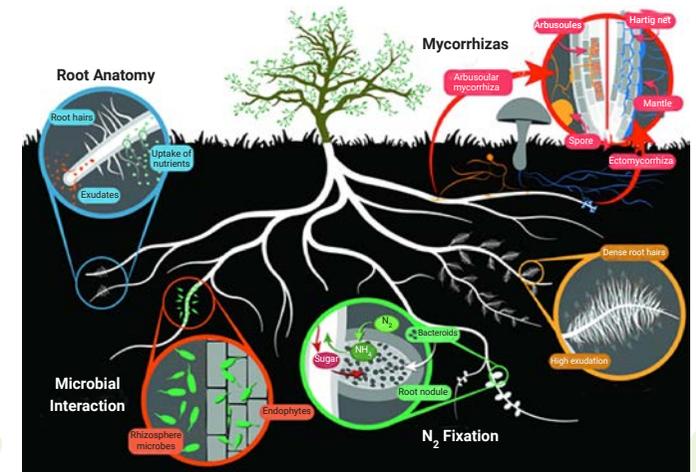


Abbildung 5: Viele Wechselwirkungen finden in der "Rhizosphäre" statt, der aktiven Zone, in der Wurzeln auf Bakterien und Pilze treffen. Zeichnung: Scott Buckley, Quelle: PlantsInAction

Abwehr gegen Insektenfresser und Blattnekrotrophiepilze <sup>vii 71,72</sup> beeinflussen. Pflanzen hingegen transferieren bis zu 50% ihrer Photosyntheseprodukte (im Wesentlichen Kohlenhydrate) über Wurzelexsudate <sup>viii</sup> mit diesem sehr vielfältigen Lebenssystem <sup>66,68,73-78</sup> und bilden damit eine komplexe natürliche Symbiose.

iv <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/17/data.htm>; Durchschnitt 2000-2017  
v Die gesamten Treibhausgasemissionen (also auch die Emission von Methan und anderen Gasen) ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) betragen 13 GtCe plus 4,1 GtCe aus LULUCF <sup>59</sup>  
vi Eine langzeitstabile Form von Holzkohle, die durch Pyrolyse von Biomasse hergestellt wird, siehe später in diesem Artikel.

Pflanzenvielfalt und mikrobielle Bodenvielfalt beeinflussen sich positiv<sup>68,79-83</sup> und unterstützen die Pflanzengesundheit und die Konzentration von Pflanzenmineralien<sup>84</sup>, was Pieterse zu der Aussage veranlasst: "Tatsächlich könnten Wurzeln und ihr pflanzengesundheitsförderndes Mikrobiom den Schlüssel zur nächsten grünen Revolution beinhalten"<sup>85</sup>. Während die Exkremente von Bakterien wie auch ihren toten Körpern einen wichtigen Teil des Kohlenstoffpools im Boden ausmachen, produzieren Mykorrhizen<sup>ix</sup> ein klebriges, kohlenstoffreiches Glykoprotein, das als "Glomalin" bekannt ist, welches für die Bodenstabilität und Wasserspeicherung entscheidend ist<sup>86,87</sup> und ein wichtiges Kohlenstoffreservoir bildet – Kohlenstoff, welcher aus der Atmosphäre gezogen wurde<sup>87,88</sup>. Darüber hinaus sind es die Wurzeln, die durch ihren Exsudatprozess den SOC um das 2,3-fache mehr erhöhen als der Kompostierungsprozess von toter oberirdischer Biomasse<sup>89,90</sup>.

Wie kürzlich in Sanderman<sup>36,91</sup> gezeigt, führt ein System mit einem höheren Kohlenstoffrücklauf zu einem Boden mit mehr Kohlenstoff, der mehr Nährstoffe an die Pflanze zurückgibt und die Pflanzenproduktivität erhöht. Eine höhere Menge an Nährstoffen im Boden führt zu einer Verringerung der benötigten Mengen an chemischen Düngemitteln. Chemischer Dünger ist eine der Hauptquellen für Treibhausgasemissionen in der konventionellen Landwirtschaft, sowohl durch die energieintensive Produktion als auch durch die daraus resultierende Reaktion von Mikroben<sup>92</sup>. Es ist wichtig zu wissen, dass LaCanne und Lundgren zu dem Schluss kamen, dass "der Gewinn [der regenerativen Anbausysteme] positiv mit der organischen Substanz des Bodens korreliert ist"<sup>93</sup>. Es überrascht nicht, dass, aufgrund von Verringerungen der Ökosystemleistungen und der damit verbundenen Bodenfruchtbarkeit ein Verlust von 1% des SOC zu einem gesellschaftlichen Verlust von Naturkapital in Höhe von etwa 163 \$/ha führen kann<sup>94</sup>. Eine andere Studie schätzte den gesellschaftlichen Wert von Kohlenstoff im Boden auf 120 \$ pro Tonne<sup>95</sup>.

Nachfolgend ist eine Liste von landwirtschaftlichen Praktiken, die helfen können, Kohlenstoff im Boden zu binden, obwohl detaillierte Daten über ihr Kohlenstoffspeicherungspotenzial manchmal noch begrenzt sind.

Da das Pflügen des Bodens eine der wichtigsten Treiber für die Mineralisierung von SOM und Bodenerosion ist, kann sich die Umstellung auf **reduzierte oder pfluglose Bodenbearbeitungssysteme** positiv auf Bodenorganismen und SOC auswirken und bis zu 70% der Energie- und Kraftstoffkosten sowie der Maschineninvestitionen einsparen<sup>96,97</sup>. Unter den meisten Direktsaat-Systemen nimmt der Bodenkohlenstoff in der oberen Schicht (<10 cm Tiefe) zu; dies ist jedoch nicht der Fall in tieferen Schichten, wo der SOC teilweise abnimmt<sup>98-100</sup>. Dennoch zeigt die Forschung, dass die Aktivität sowohl der Bakterien und insbesondere der Pilze als auch die Bodenstruktur oft verbessert wird<sup>96,98,101-103</sup>. Die Direktsaat trägt zum Schutz der Böden bei, wird aber oft mit dem Einsatz von Herbiziden wie Glyphosat<sup>x</sup> kombiniert, die wiederum negative Auswirkungen auf die Bodenbiologie und andere lebende Organismen haben und die menschliche Gesundheit beeinträchtigen können<sup>104</sup>. Um von der Direktsaat zu profitieren und zusätzlichen Kohlenstoff zu speichern, muss diese Praxis in vielfältigere Agrarökosysteme integriert werden, wo z.B. Gründüngungsmischungen helfen, den Boden mit tief reichenden Wurzeln zu lockern, Kohlenstoff in diese Rhizosphäre zu übertragen, die Bodenaggregation zu stabilisieren und Unkräuter und Schädlinge zu unterdrücken<sup>42,105-108</sup>.

Zu den **Bewirtschaftungspraktiken**, mit denen zusätzlicher SOC mit einer Rate von bis zu 0,4 GtC pro Jahr gespeichert werden können<sup>109</sup>, gehören die Auswahl von **Kulturpflanzenarten und -varietäten** mit größerer Wurzelmasse und tieferen Wurzeln, die Verwendung von Fruchtfolgen mit größeren Kohlenstoff-Inputs, die Verwendung von Zwischenfrüchten während der Brachezeit, das Zurücklassen von Ernteresten auf dem Acker und Zusätze wie Kompost und Biokohle<sup>110</sup>.



Abbildung 6: Eine Untersaat hilft, den Boden zu schützen, die Bodenorganismen zu ernähren und Kohlenstoff in den Boden zu bringen. Foto: Andrew Howard

**Zwischenfrüchte** - der Anbau von Pflanzen während und für Ruhezeiten - und **Fruchtfolgen** können sowohl die Bodenfruchtbarkeit verbessern, indem sie den Boden bedecken, das Mikrobiom das ganze Jahr über füttern, Stickstoff im Boden durch stickstofffixierende Pflanzen und damit die SOM<sup>109</sup> erhöhen, die Bodenerosion reduzieren und Unkräuter sowie Schädlinge unterdrücken, wie viele Studien gezeigt haben<sup>111-116</sup>. Die Erhöhung der Vielfalt der Nutzpflanzenarten sowohl innerhalb einer Kultur als auch zwischen den Folgekulturen kann zu erheblichen wirtschaftlichen Gewinnen (höhere Erträge, weniger Pestizideinsatz) durch stark reduzierte Unkräuter und Insektenschädlinge führen, da dies das Angebot an natürlichen Feinden z.B. der Blattläuse<sup>xi</sup> positiv verändert<sup>55,117-119</sup>. **Pflanzenarten mit tiefen Wurzeln** (besonders hilfreich für Zwischenfrüchte) können alle folgenden Schlüsselrollen übernehmen: mehr Kohlenstoff sequestrieren, Pflugverdichtungen auflösen, den Untergrund zur zusätzlichen Nährstoffanreicherung nutzen, den Boden belüften, günstige Bedingungen für Regenwürmer und anderes Bodenleben schaffen und den Wurzeldurchmesser der Folgefrucht positiv beeinflussen<sup>66,68,120-122</sup>.

vii Ein Parasit, der seinen Wirt tötet und sich dann von der toten Materie ernährt.

viii Exsudate sind Flüssigkeiten, die oft reich an Kohlenhydraten sind, die von einer Pflanze über Wurzeln und andere Poren abgegeben werden.

ix Mykorrhiza ist eine symbiotische Verbindung zwischen Pilz und den Wurzeln einer Pflanze.

x Siehe den Foresight Brief #10 über Glyphosat

Die Häufigkeit von Regenwürmern ist ein wichtiger Indikator für die Bodenaktivität und die Bodengesundheit. Die Verbesserung der Bedingungen für ihre Aktivität ist entscheidend, da sie (Bio-)Poren graben, die helfen, den Boden zu belüften, Wasser zu infiltrieren und schnell

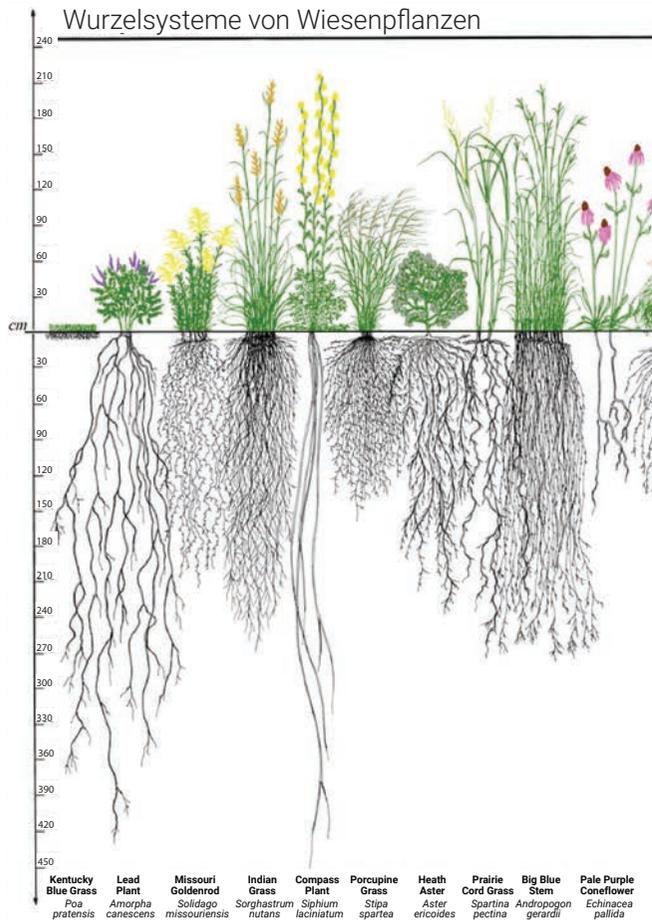


Abbildung 7: Einheimische Wiesenpflanzen entwickeln tiefe Wurzelsysteme, während das oft gepflanzte Kentucky Bluegrass (erstes links) sehr flach wurzelt. Da etwa 2/3 des SOM-Anstiegs von Wurzeln kommen, haben diese Pflanzen ein viel höheres Potenzial, Kohlenstoff tief im Boden zu speichern, während sie gleichzeitig Lebensraum und Nahrung für Insekten und Vögel bieten, vielseitiges und nährstoffreiches Material an Weidetiere liefern und den Boden schützen. Quelle & Colorierung: Conservation Research Institute & Heidi Natura

zu speichern, den Humusgehalt durch die Integration von organischem Material in den Boden und ihre nährstoffreichen Ausscheidungen zu erhöhen und helfen, den nährstoffreichen Untergrund zu erschließen<sup>64,113,123,124</sup>. Die Zurücklassen von **Ernteresten** und das **Mulchen** mit biologischem Material sind wichtige Ansätze zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit und des Bodenkohlenstoffs bei gleichzeitiger Begrenzung der Bodenerosion<sup>4,33,93,125-127</sup>.

Die **Mischkultur**, d.h. der gleichzeitige Anbau mehrerer Nutzpflanzen auf der gleichen Fläche, kann das Nettopflanzenwachstum erhöhen und so vermehrt Kohlenstoff im Boden absichern, die Erträge steigern und gleichzeitig das Unkraut verringern<sup>128-132</sup>. Geschätzte Zahlen für SOC sind jedoch selten: Cong et al. zeigen einen Anstieg der SOC in Streifenmischkultursystemen um  $4\% \pm 1\%$  im Vergleich zu normalen Fruchtfolgen<sup>133</sup> und Oelbermann modelliert einen Anstieg der SOC um 47% nach Jahren in der Mais/Sojabohnenstreifenrotation im Vergleich zu 21% und 2% Anstieg im Einzelkulturenanbau. Dies lässt sich durch eine größere Blattoberfläche, eine erhöhte Mykorrhiza-Aktivität, eine erhöhte Kommunikation und einen verstärkten Austausch über Wurzelnetzwerke und durch ergänzende Anforderungen an den Boden (die Pflanzenarten nutzen unterschiedliche Mineralstoffe und -mengen) erklären<sup>83,131,134-136</sup>.

**Untersaaten** (oder "lebender Mulch") (Abbildung 6) trägt zum Schutz des Bodens bei, wenn die Hauptkultur den Boden nicht vollständig bedeckt. Sie hilft, Unkräuter zu unterdrücken und kann (wenn z.B. Hülsenfrüchte verwendet werden) das Wachstum der Hauptkulturen fördern, da es der Kultur organischen Stickstoff liefert<sup>137-140</sup> und gleichzeitig SOC<sup>141</sup> erhöht.

Ein weiterer Faktor ist, dass in den Sommermonaten der gemäßigten Regionen die potentielle Photosyntheserate am höchsten ist. Mit der Reifung der Getreidekulturen wird diese Energie jedoch nicht in die Produktion von Kohlenhydraten umgesetzt. Wie ein Landwirt sagt: "Ich ernte Sonne! Ich möchte nie vergeudete Sonne auf



Abbildung 8: Das Mobgrazing verspricht ein wirkungsvolles Werkzeug zu sein, um die Bodenfruchtbarkeit und den Kohlenstoffgehalt im Boden schnell zu erhöhen. Foto: Tom Chapman

meinem Hof sehen!"<sup>xii</sup>. Da die Untersaat in dieser Zeit des Jahres weiterhin photosynthetische Produkte produziert, wird dem Boden weiterhin Kohlenstoff zugeführt, während sie Insekten und Vögeln Nektar, Pollen und Samen liefert und die biologische Schädlingsbekämpfung verbessert<sup>140,142-144</sup>.

Die Anwendung von **Kompost** auf Acker- und Grasflächen stimuliert sowohl ober- als auch unterirdisch NPP<sup>xiii</sup> und führt - auch wenn sie nur einmal angewendet wird - zu einer erhöhten Kohlenstoffakkumulation von 2-5 Mg C/ha in den Folgejahren<sup>145-147</sup>.

Es erhöht das Bodenleben durch die Pilze und Bakterien im Kompost selbst. Und es stimuliert die Bodenlebenaktivität während es gleichzeitig zusätzlichen Kohlenstoff und Nährstoffe in den Boden bringt, welches die Bodenstruktur und die Wasserspeicherkapazität verbessert.

**Einheimische Grasweiden:** Weiden werden oft regelmäßig mit niedrig wurzelnden Arten (in den USA z.B. Kentucky Bluegrass) und mit einer geringen Vielfalt an Gräsern kultiviert. Die "alten" Präriegebiete der USA (wie

xi Blattläuse sind kleine saftsaugende Insekten.

xii <https://www.youtube.com/watch?v=9yPjoh9YJMK>



Abbildung 9: Agroforstwirtschaft in Südfrankreich, wo erfolgreich Bäume und Ackerkulturen kombiniert wurden. Foto: Christian Dupraz (INRA)

auch Europas) bestanden jedoch aus einer Vielzahl einheimischer Pflanzen, von denen viele sehr tief in den Boden wurzelten - folglich Kohlenstoff einlagerten<sup>37,148</sup>. Während typische gesäte Gräser eine Tiefe von nicht mehr als 50 cm erreichen, reichen einheimische Pflanzen leicht mehrere Meter tief, wobei verschiedene Wurzelformen vorkommen (Abbildung 7).

Die **Verknüpfung von Tieren und Ackerbau**, d.h. die Verwendung von Tieren zum Weiden von Zwischenfrüchten oder Stoppeln, schafft Synergien zwischen den Systemkomponenten, die die Widerstandsfähigkeit und Nachhaltigkeit verbessern und gleichzeitig mehrere Ökosystemfunktionen erfüllen können. Es kann sowohl die SOM als auch den wirtschaftlichen Ertrag steigern, die landwirtschaftlichen Produktionssysteme diversifizieren, die Dürrebeständigkeit verbessern und die Bodenerosion verringern<sup>115,149-153</sup>. Die Verwendung von Tieren zum Weiden von Zwischenfrüchten oder Stoppeln verbessert nicht nur den Boden durch die bakterien- und nährstoffreichen Exkrememente, sondern kann gleichzeitig den Einsatz von Herbiziden (wie Glyphosat) ersetzen. Colin Seis' (Box 1) "Getreide-Weide-Mischkultursystem" (pasture cropping) geht

noch einen Schritt weiter und kombiniert mehrjährige Weiden mit dem Anbau einjähriger Kulturen und liefert beeindruckende Ergebnisse in Bezug auf die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden (9 tC/ha/a für die Jahre 2008-2010), die Biodiversität und die Erträge<sup>154-156</sup>.

Eine verbesserte **Bewirtschaftung des Grünlandes** wie niedrigere Besatzdichten, verschiedene Arten der Rotations- oder Kurzzeitbeweidung, saisonale Beweidung, Einbeziehung von Hülsenfrüchten und einer Vielzahl von Pflanzen kann zu einer Sequestrierung von bis zu 1,8 GtC jährlich führen<sup>37,41,45,48,49,53</sup>. Dies gilt insbesondere für die **adaptive Multi-Paddock-(AMP)-Beweidung** [oder **ganzheitliches Weidemanagement** oder **Mobgrazing**, (Abbildung 8)], bei der die Herden in einer eher kleinen Parzelle für eine sehr kurze Zeitspanne (in der Regel von einem halben Tag bis zu 2-3 Tagen) grasen, bevor sie zur nächsten Parzelle geführt werden, während diese nun nach der Beweidung mehrere Wochen bis Monate regenerieren kann. Im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Weideansatz, bei dem

die Nettoauswirkungen der Kohlenstoffreduzierung durch  $N_2O$ - und  $CH_4$ -Emissionen der Tiere und ihrer Exkrememente aufgewogen werden können, gibt es neue Forschungsarbeiten und eine zunehmende Zahl von Praktikern, die von wachsenden SOM-Werten, zunehmender Bodenfruchtbarkeit und Biomasse und zunehmender Pflanzenvielfalt berichten. Unter Berücksichtigung der Methanemissionen der Tiere kommt man immer noch zu einem Nettogewinn an Kohlenstoff<sup>41,157,158</sup>, was "darauf hindeutet, dass die AMP-Beweidung das Potenzial hat, Treibhausgasemissionen durch die Kohlenstoffsequestrierung im Boden auszugleichen"<sup>159</sup>.

Die **Agroforstwirtschaft**, d.h. die absichtliche Integration von Bäumen und Sträuchern in Acker- und Tierhaltungssysteme (Abbildung 9), kann vielfältige ökologische, wirtschaftliche und soziale Vorteile bringen. Es kann SOC erhöhen<sup>160,161</sup> und zwischen 0,2 und 5,3 GtC pro Jahr in Böden sequestrieren<sup>48,55,162</sup> (ohne dass der im Holz gebundenen Kohlenstoff berücksichtigt ist), mit der höchsten Kohlenstoffsequestrierung in den

### Box 1: Erfolgsgeschichten

**Gabe Brown** ist ein prominenter konventioneller Landwirt in den USA, der seine Farm, die früher auf einem monokulturellen Modell basierte, zu einem produktiven Betrieb mit steigendem Humusgehalt (von <2% in den frühen 90er Jahren auf >6% in jüngster Zeit), Wasserspeicherkapazität und abnehmendem Herbizideinsatz gemacht hat. Er nutzt eine weite Fruchtfolge, diversifizierte Zwischenfruchtmischungen, hat das Vieh über einen ganzheitlichen Weidemanagementplan in sein Anbausystem integriert und das Pflügen seiner Felder eingestellt.

**Colin Seis** ist ein australischer Viehzüchter, bekannt für sein "Getreide-Weide-Mischkultursystem" (pasture cropping) - eine innovative Landmanagement-Methode, die es ermöglicht, einjährige Kulturen opportunistisch auf ruhenden mehrjährigen Wiesen oder Weiden anzubauen, deren Wettbewerbsfähigkeit vorübergehend durch Weidegang und/oder selektive Herbizide unterdrückt wurde, um das erfolgreiche Wachstum einjähriger Kulturen zu ermöglichen.<sup>xv</sup>

**Joel Salatin** ist ein bekannter nordamerikanischer Landwirt, der intensiv das "Mobgrazing" nutzt, erweitert um ein "Follower-System", d.h. ein System, bei dem verschiedene Tiere wie Kühe, Schafe, Hühner und Truthähne je nach Futterbedarf einander folgen können. Seine Bodenfruchtbarkeit nahm stark zu und steigerte gleichzeitig beträchtlich die Pflanzenvielfalt auf seinen Wiesen.<sup>xvi</sup>

xiii NPP = Netto-Primärproduktivität; die Nettomenge an  $CO_2$ , die von der Vegetation in einem bestimmten Gebiet aufgenommen wird und die die Produktivität der Pflanze beschreibt.

xv <http://www.pasturecropping.com/articles>

xvi <http://www.polyfacefarms.com>



Abbildung 10: Agroforstwirtschaftssystem in Frankreich. Foto: Raymond Sauvaire (MAP)

Tropen und Subtropen<sup>162,163</sup>. Es erhöht auch die Biodiversität, stabilisiert den Boden, verbessert die Wasserinfiltration und diversifiziert die Erträge der Landwirte<sup>164,165</sup>. Agroforstwirtschaftliche und konservierende landwirtschaftliche Ansätze in Subsahara-Afrika und tropischen Ländern zeigten, dass oft deutlich größere Steigerungen des Bodenkohlenstoffs als 0,4% erreichbar sind, während sie gleichzeitig einen höheren wirtschaftlichen und ökologischen Wert erbringen<sup>125,163,166</sup>. Das Hinzufügen von Bäumen zu landwirtschaftlichen Klimaschutzmaßnahmen wie der konservierenden Landwirtschaft oder dem holistischen Weidemanagement kann die Kohlenstoffsequestrierungsraten um das 5-10-fache und die Kohlenstoffbestände im Boden um das 3-10-fache erhöhen<sup>167</sup>.

Intensive **Silvopasture**-Systeme – in denen Bäume, Tiere und Weiden kombiniert werden – können entwickelt werden, um SOC zu erhöhen<sup>168</sup> und eine Nettoabscheidung (also die Methanproduktion der Tiere

eingerechnet) von 4-12 tC/ha/a zu erreichen, während gleichzeitig die Produktion von Fleisch und Milch auf derselben Fläche erhöht wird<sup>163,169</sup>. Naranjo et al. fanden heraus, dass die Emissionen von Nutztieren einem Viertel bis zur Hälfte des im Boden und in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs entsprachen<sup>170</sup>.

Die **Aufforstung** (»afforestation«) kann durch die Umwandlung von marginalen und degradierten (landwirtschaftlichen) Böden in Wälder und mehrjährige Landnutzung den SOC und den lebenden Kohlenstoffpool (Holz) verbessern und hat viele weitere Vorteile (Nahrung durch den Einsatz von Nuss- oder Obstbäumen, Fasern, Treibstoff, Mulch, reduzierte Bodenerosion, erhöhte Wasserinfiltration). Die Größenordnung und die Rate der Kohlenstoffbindung bei der Aufforstung hängt von Klima, Bodenart, Gehölzarten und Nährstoffmanagement ab

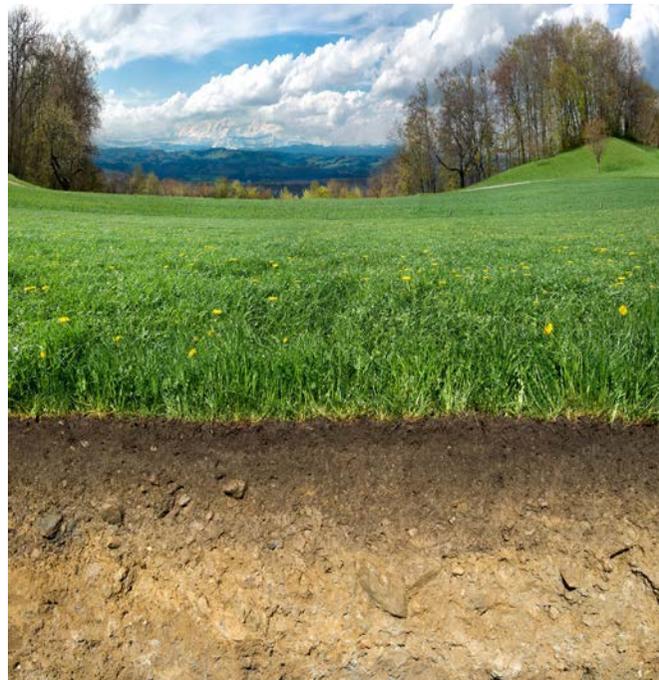


Abbildung 11: Der dünne Horizont des fruchtbaren Bodens, der die Grundlage für die Fruchtbarkeit auf unserem Planeten ist. Foto: Agroscope (Gabriela Brändle, Urs Zihlmann), LANAT (Andreas Chervet)

## Box 2

Die **fünf Prinzipien der Kohlenstoffspeicherung** im Boden und der regenerativen Landwirtschaft basieren auf dem Prinzip "Wie die Natur es macht". Die Natur hat Hunderttausende von Jahren "Forschung und Entwicklung" hinter sich, einschließlich dessen, was funktioniert hat, was nicht funktioniert hat und was verschwunden ist. Was funktioniert, ist bekannt und gegenwärtig. Lasst uns von der Natur lernen:

1. Die Bodenoberfläche immer schützen
2. Bodenstörungen minimieren
3. Eine hohe Vielfalt an Pflanzen und Tieren nutzen
4. Lebendige Pflanzen-Wurzel-Netzwerke erhalten
5. Tiere in den Ackerbau integrieren

<sup>33,48,163,171,172</sup>. McKinsey & Company schätzte, dass bis 2030 weltweit 0,27 GtC pro Jahr in Böden und Biomasse durch Aufforstungen gebunden werden könnte<sup>173</sup>. Bäume haben ein ausgedehntes Wurzelsystem, das tief in den Boden hineinwachsen kann<sup>121,174</sup> und Kohlenstoff aus der Wurzel ist wahrscheinlich die wichtigste Quelle für die Speicherung von SOC<sup>57,122</sup>. Die Aufforstung kann jedoch nicht auf Kosten der Anbauflächen erfolgen, da sie die Ernährungssicherheit gefährden könnte.

**Wiederbewaldungsmaßnahmen** (»reforestation«) haben ebenfalls ein großes Potenzial und könnten weltweit 1-2,7 GtC/Jahr binden<sup>29,48,55,55,175</sup>. Durch die Auswahl von mehrjährigen Lebensmittel produzierenden Sträuchern und Bäumen, könnte die globale Nahrungsmittelproduktion verbessert werden. Weltweit ist das Kohlendioxid-Sequestrierungspotenzial durch Aufforstung und Wiederbewaldung signifikant und wurde auf 1-3,2 GtC pro Jahr geschätzt<sup>30,48</sup>, 4 GtC allein durch tropische Aufforstung<sup>176</sup> und bis zu 7,6 GtC<sup>55</sup>.

**Wiederherstellung der Histosole:** Moore (mit Böden, die "Histosole" genannt werden) sind sehr reich an organischer Substanz und speichern große Mengen des weltweiten terrestrisch-biologischen Kohlenstoffpools<sup>177</sup>. Während die Kohlenstoffvorräte durch Entwässerung und

Bodenbearbeitung teilweise abgebaut wurden, besteht ein erhebliches Potenzial zur Vermeidung zusätzlicher Kohlenstoffverluste sowie der Kohlenstoffsequestrierung durch deren Rückführung<sup>172,178</sup>. Die langfristigen Sequestrierungsraten in Histosolen reichen von 0,3 - 1,3 GtC weltweit<sup>53,55,57,179</sup>. Die Wiederherstellung von Histosolen bedeutet jedoch, dass der Anbau eingestellt wird, was einen schwierigen Kompromiss zwischen der Nahrungsmittelproduktion und anderen Ökosystemdienstleistungen (z.B. Klimaregulierung, Schutz der biologischen Vielfalt) bedeutet.

**Pflanzenkohle**, hergestellt durch Pyrolyse<sup>xiv</sup> aus Biomasse, ist eine langzeitstabile Form der Holzkohle. Pflanzenkohle hat mehrere Vorteile, von denen viele noch nicht verstanden sind. Es ist beständig gegen Zersetzung<sup>180,181</sup> und kann organische Stoffe, die dem Boden zugeführt werden, stabilisieren<sup>182</sup>. Pflanzenkohle kann auch langfristige Kohlenstoffpools im Boden bilden<sup>183</sup>, die weltweit bis zu 0,5 GtC/Jahr<sup>48,53,55,55,184</sup> und im extremen, wenn auch unrealistischen Fall bis zu 8,3 GtC<sup>48</sup> sequestrieren. Die Nutzung von Pflanzenkohle bietet eine Reihe von Vorteilen für die Bodenfruchtbarkeit und die Bodenqualität, wie z.B. der Förderung von Pilz- und Bakterienwachstum, verbesserte Wasser- und Nährstoffretention, verminderte Folgen von Krankheitserregern<sup>185,186</sup>, erhöhte Bodenporosität und höhere Ernteerträge bei Vorkompostierung<sup>187,188</sup>. Die großflächige Verwendung von Pflanzenkohle würde jedoch große Mengen von Biomasse erfordern und kann in der Umsetzung herausfordernd sein<sup>189-191</sup>.

## Was wurde/wird getan?

Die Initiative 4p1000 ist die prominenteste und politisch aktivste Bewegung, um das Thema Kohlenstoffsequestrierung in Kombination mit agroökologischen Praktiken voranzutreiben. Diese Initiative, die von Frankreich im Dezember 2015 auf der COP-21 ins Leben gerufen wurde, besteht darin, alle freiwilligen Interessengruppen des öffentlichen

und privaten Sektors (lokale, regionale und nationale Regierungen, Unternehmen, Handelsorganisationen, NRO, Forschungseinrichtungen usw.) im Rahmen des Aktionsplans von Lima-Paris (LPAP) zusammenzuführen. Fast 40 Länder und über 320 Institutionen und Organisationen weltweit haben sich dieser Bewegung angeschlossen. Die Initiative 4p1000 bietet einen Raum für die kooperative Interaktion zwischen Wissenschaftlern, politischen Entscheidungsträgern und Praktikern, um sicherzustellen, dass die Aktionen wissenschaftlich fundiert sind. Die Initiative ist auf politischer Ebene sehr aktiv und fördert die Wissenschaft, da sie auch ein Forschungsprogramm zur Unterstützung der Ziele der Initiative vorgeschlagen hat. Darüber hinaus arbeitet Regeneration International, eine Kooperation von mehr als 150 Unternehmen, Landwirten und Institutionen, an der Sensibilisierung und dem wissenschaftlichen Wissen in diesem Bereich sowie auf der Anwendungsseite.

Inzwischen sind weltweit kleine Fortschritte zu beobachten: "Die australische Koalitionsregierung investiert 450 Millionen Dollar in ein Regional Land Partnership Program und 134 Millionen Dollar in ein Smart Farms Program zur Verbesserung der Bodengesundheit. Die Regierung von Andhra Pradesh hat einen Scale-Out-Plan aufgelegt, um bis 2024 6 Millionen Betriebe/Landwirte auf 100% chemikalienfreie Landwirtschaft umzustellen. Das Programm ist ein Beitrag zu den Zielen der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung. In diesem Jahr wird dem britischen Parlament ein neuer Gesetzentwurf vorgelegt, der erstmals Maßnahmen und Ziele zur Erhaltung und Verbesserung der Gesundheit der Böden im Vereinigten Königreich vorschreibt."<sup>xvii</sup> Es gibt auch auf praktischer und wissenschaftlicher Ebene andere Initiativen, die das Bewusstsein der Landwirte schärfen und sie zusammenbringen, und staatliche Gelder in neue Ansätze investieren sowie die Auswirkungen der Kohlenstoffbindung im Boden und die Auswirkungen auf die Fruchtbarkeit von Boden und Pflanzen genauer untersuchen.

Die Umsetzung der oben genannten Methoden in die

Praxis ist natürlich eine Herausforderung, da sie viel Wissen erfordert und an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden müssen. Einige dieser Bemühungen werden mehrere Jahre lange beharrliche Umsetzung erfordern, um zuverlässige Ergebnisse nachzuweisen und die Einwände wegen finanzieller Risiken und anderer Kritiken durch die konservativere Landwirtegemeinschaft zu beseitigen. Es gibt bereits eine kleine, wenn auch wachsende Zahl von Landwirten, die diese Techniken mit Erfolg anwenden. Die Chancen steigen, dass andere folgen werden. Das Interesse an Feldtagen dieser innovativen Landwirte steigt weltweit stetig an.

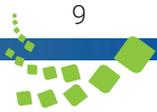
Es muss festgestellt werden, dass die Zahlen über das Potenzial der Kohlenstoffsequestrierung sehr unterschiedlich sind, während fast jede Woche neue Untersuchungen zusätzliche, manchmal widersprüchliche Informationen zum Rätsel liefern. Einige der geäußerten Kritikpunkte betreffen die Dauerhaftigkeit von SOC durch schlechtes Landmanagement, kollidierende Nutzung von Ernterückständen, Wettbewerb zwischen natürlicher Wiederherstellung und Anbau von Lebensmitteln, mangelnde Kommunikation und Expertise darüber, wie die unterschiedlichen Praktiken und nicht vorhandenen Anreize und Governance für diese Ansätze übernommen werden können.

## Was sind die Auswirkungen auf die Politik?

Eine wichtige Schlussfolgerung dieses Foresight Briefes ist, dass nur eine Kombination von Ansätzen helfen kann, den Klimawandel zu mildern. Aber noch wichtiger ist, dass er im Großen und Ganzen zeigt, wie landwirtschaftliche Praktiken, die die organische Substanz des Bodens erhöhen, eine verbesserte Lebensmittelproduktion, eine größere biologische Vielfalt,

xiv Die Pyrolyse ist ein Verfahren, das auf jedes organische (kohlenstoffbasierte) Produkt angewendet werden kann, wobei das Material unter Ausschluss von Sauerstoff hohen Temperaturen ausgesetzt wird.

xvii <https://regenerationinternational.org/2018/07/27/33-ways-regenerative-agriculture-movement-growing/>



eine verbesserte Wasserspeicherung und Dürresistenz sowie andere wichtige Ökosystemdienstleistungen unterstützen und in Wirklichkeit eine Win-Win-Lösung für Landwirte und die Gesellschaft als Ganzes bieten (Abbildung 12). Die derzeitigen Strukturen, die das "industrialisierte Agrarsystem" stützen, sind komplex und gut etabliert und umfassen Landwirte, Maschinen- und Chemikalienhersteller, Märkte und Handel, Steuern und Subventionen, niedrige Verbraucherpreise und andere Faktoren. Eine breite Umsetzung der oben beschriebenen Ansätze kann nur mit aktiver Unterstützung der Regierungen erreicht werden, während die Entwicklung der regenerativen Agrarbewegung derzeit überwiegend von unten nach oben erfolgt<sup>192</sup>.

Obwohl viele der oben genannten Praktiken mit Kosten verbunden sind, werden einige davon tatsächlich Einnahmen und Kosteneinsparungen bringen<sup>57</sup>. Die Kosten, die wir bereit sind, für sie zu zahlen, bestimmen die Menge an Kohlenstoff, die aus der Atmosphäre

zurückgezogen wird. Die Preisschilder variieren, deuten aber darauf hin, dass mit 20-100 US\$ pro Tonne Kohlenstoff ein guter Teil des technischen Potenzials der Kohlenstoffsequestrierung erreicht werden könnte<sup>30,55,173</sup>.

Um zur Förderung von Praktiken zur Erhöhung der SOM beizutragen, sollten die folgenden Querschnittsmaßnahmen für politische Entscheidungsträger Vorrang haben<sup>30,192,194,194-198</sup>.

- **Bekämpfung der Bodendegradation und Unterstützung der Landregeneration:** Landwirtschaftliche Praktiken haben die Bodenfruchtbarkeit verringert und große Teile der Landoberfläche degradiert. Angesichts der regenerativen Kräfte der Natur können solche Flächen mit dem richtigen Wissen wieder hergestellt werden.
- **Förderung agro-ökologischer Praktiken, die die Menge an SOM erhöhen, und Bezahlung der Landwirte für die Speicherung von Kohlenstoff im Boden:** Eine kleine, aber wachsende Anzahl von Landwirten nutzt eine

Vielzahl neuer, innovativer Methoden, die die Natur als Vorbild für die Verbesserung der SOM und damit auch viele anderer "Ökosystemdienstleistungen" nutzen. Diese bewährten Verfahren sollten unterstützt, kommuniziert und, wenn erfolgreich, weit verbreitet werden, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene.

- **Agrarökologie und ganzheitliche Ernährungssystem-Ansätze in Politik, Bildung und Forschung populär machen:** Das holistische Denken in den oben genannten Methoden kann als Paradigmenwechsel im landwirtschaftlichen Bereich betrachtet werden, der einen sofortigen Durchbruch jedoch erschwert. Das Wissen über diese agroökologischen Ansätze sollte durch Politik, Bildung und Forschung gefördert werden, um einen schnelleren und effizienteren Übergang zu ermöglichen.
- **Verbesserung des Wissens, der Kommunikation, der Ausbildung und der Vernetzung von/für PraktikerInnen zur Verbesserung des SOM, der nachhaltigen Boden-**

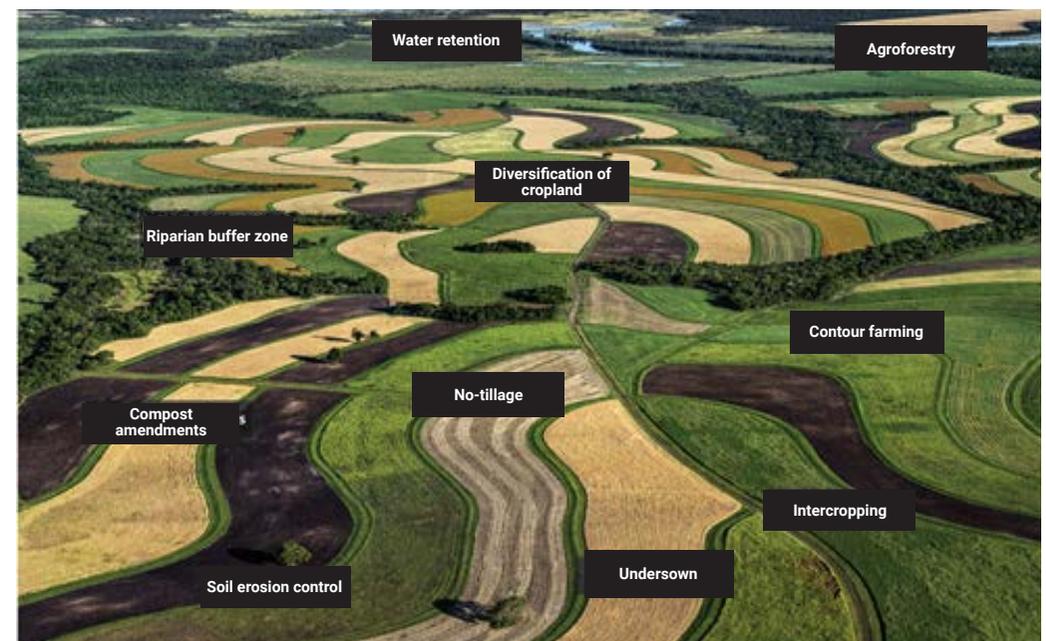
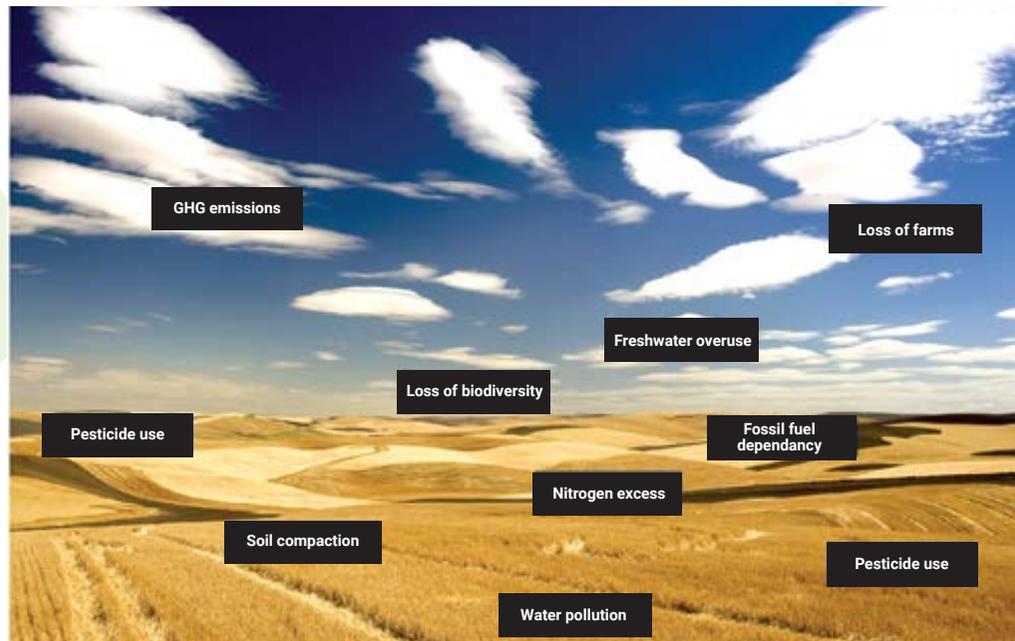


Abbildung 12: Probleme im Zusammenhang mit der industriellen Landwirtschaft und Vorzüge der regenerativen Landwirtschaft. Design: UNEP/GRID-Geneva, Foto (rechts): Luis Franke

Goal	Objective	Impact from increased SOC
	No poverty	Increase farm income
	End hunger	Enhance quantity and quality of food
	Good health	Produce nutritious food
	Gender equality	Improve crop productivity of women farmers
	Clean water and sanitation	Improve water quality
	Economic growth	An engine of economic development
	Reduce inequalities	Enhance and sustain farm productivity
	Responsible consumption	Reduce input of water, nutrients and energy by decreasing losses
	Climate action	Sequester carbon and mitigate climate change
	Life on land	Increase activity and species diversity of soil biota

Abbildung 13: Förderung der Nachhaltigkeitsziele durch Management der Bodengesundheit <sup>48,56,193</sup>.

**bewirtschaftung und der agroökologischen Praktiken und Ansätze:** Die Verbreitung dieses Wissens erfolgt derzeit über lokale Initiativen und kleine regionale bis internationale Netzwerke. Regierungen und andere Institutionen sollten diese Brücken zu einer neuen Zukunft der Landwirtschaft unterstützen.

- **Unterstützung der Land- und Forstwirtschaft als Sektoren, die potenziell zur Eindämmung des Klimawandels beitragen können:** Land- und

Forstwirtschaft können wichtige Bereiche für den Klimaschutz sein, da sie die Fähigkeit haben, große Mengen an Kohlenstoff im biophysikalischen Bereich zu speichern und gleichzeitig wichtige Vorteile für unsere Gesellschaft bieten (Abbildung 13).

- **Unterstützung von Kampagnen zur Erhaltung und zur Wiederbelebung von Böden, wie SaveOurSoils und 4p1000.org:** Es gibt mehrere internationale Initiativen, die sich für die Förderung dieses Themas im Rahmen der politischen Agenda einsetzen. Die prominente Initiative "4p1000" wird von fast 40 Ländern und vielen internationalen und nationalen Institutionen und Organisationen unterstützt.
- **Konzentration nicht nur auf die Ertragsmengen, sondern auch auf andere "Ökosystemdienstleistungen", zu denen die Landwirte beitragen können (Kohlenstoffbindung, Klimaregulierung, Wasserspeicherung und -filtration, Erosionsschutz, Biodiversität, nährstoffreiche Lebensmittel und andere):** Unser derzeitiges System betrachtet hauptsächlich den Parameter "Ertrag pro Hektar" als Erfolgsindikator und vernachlässigt andere wichtige Faktoren nachhaltiger Praxis. Diese sollten durch Bildung stärker in den Fokus gerückt werden.
- **Sukzessive Umstrukturierung von Subventionen für fossile Energien und agrochemische Erzeugnisse, um eine Diversifizierung der agroökologischen Praktiken zu fördern:** Die derzeitige Praxis der industriellen Landwirtschaft ist stark von Inputs abhängig und bedroht die zugrundeliegende Basis des eigenen Produktionssystems – Boden, Biodiversität, Wasser und Klima. Eine Verlagerung des Schwerpunkts auf diversifizierte agroökologische Praktiken kann dazu beitragen, genau die Ressourcen zu fördern, von denen wir für die Produktion vielfältiger und gesunder Lebensmittel abhängen.
- **Mitwirken für die Öffnung des Emissionshandels und/oder Impulse für neue Sektoren wie Landwirtschaft und Agroforstwirtschaft:** Obwohl der Erfolg des existierenden Emissionshandels begrenzt ist, sollte eine Integration der Land- und Forstwirtschaft in

bestehende Systeme und die Anpassung dieser zur Förderung regenerativer Praktiken, die die Kohlenstoffsequestrierung unterstützen, ein wichtiger Bestandteil der politischen Agenda sein.

- **Entwicklung von Strategien für die Bereitstellung landwirtschaftlicher Produkte, die eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung durch öffentliche Aufträge fördern, wo dies angemessen ist:** Der Übergang zu nachhaltigen Bodenbewirtschaftungspraktiken kann in den ersten Jahren die Kosten erhöhen und/oder die Erträge für den Landwirt verringern. Da das derzeitige Wirtschaftsmodell die Degradation des Landes meist nicht in den Produktionskosten berücksichtigt, sollte der Landwirt Unterstützung von Regierungen, Märkten und Verbrauchern erhalten, um geeignete Anbaumethoden zu entwickeln.
- **Verbesserung der Forschung für Methoden der Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden, um Wissen zur Unterstützung von Maßnahmen zu generieren:** Best Practices müssen identifiziert, überwacht, verifiziert, darüber berichtet und mit wissenschaftlich fundierten harmonisierten Protokollen und Standards gefördert werden, um die zuverlässige Kenntnis erfolgreicher Ansätze zu erhöhen.

Das Potenzial für die Kohlenstoffbindung in Böden durch die Landwirtschaft kann eine wichtige Rolle bei



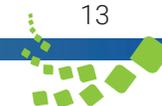
Abbildung 14: Die Integration von Nutztvieh schafft Synergien zwischen den Systemkomponenten. Foto: Franzluebbers/USDA

der Eindämmung des Klimawandels spielen. Obwohl die kalkulierten Werte zwar wichtige Beiträge darstellen, ist die realistische Möglichkeit, alle diese Techniken auf globaler Ebene in kurzer Zeit in die Praxis umzusetzen, jedoch etwas eingeschränkt. Da die Vorteile der regenerativen Landwirtschaft jedoch so vielfältig sind, wie die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und der Pflanzengesundheit, die Speicherung größerer Wassermengen, die Verringerung der Bodenerosion, die Verbesserung der biologischen Vielfalt, die Gewährleistung besserer Resultate für Kleinbauern und viele andere, sollte ein übergreifendes Interesse an Investitionen in regenerative landwirtschaftliche Methoden bestehen.

## Bibliography

- Amundson, R. *et al.* Soil and human security in the 21st century. *Science* **348**, 1261071–1261071 (2015).
- FAO & ITPS. Status of the World's Soil Resources. 94 (2015).
- García-Ruiz, J. M. *et al.* A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology* **239**, 160–173 (2015).
- Govers, G., Merckx, R., van Wesemael, B. & Van Oost, K. Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *SOIL* **3**, 45–59 (2017).
- IPBES. *Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. 44 (IPBES Secretariat, 2018).
- Montgomery, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **104**, 13268–13272 (2007).
- Panagos, P. *et al.* The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ. Sci. Policy* **54**, 438–447 (2015).
- Pimentel, D. & Burgess, M. Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture* **3**, 443–463 (2013).
- Biesmeijer, J. C. *et al.* Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* **313**, 351–354 (2006).
- Biodiversity International. *Mainstreaming Agrobiodiversity in Sustainable Food Systems: Scientific Foundations for an Agrobiodiversity Index*. (2016).
- Butler, S. J., Vickery, J. A. & Norris, K. Farmland Biodiversity and the Footprint of Agriculture. *Science* **315**, 381–384 (2007).
- Chamberlain, D. E., Fuller, R. J., Bunce, R. G. H., Duckworth, J. C. & Shrubbs, M. Changes in the abundance of farmland birds in relation to the timing of agricultural intensification in England and Wales. 18 (2000).
- Donald, P. F., Green, R. E. & Heath, M. F. Agricultural intensification and the collapse of Europe's farmland bird populations. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **268**, 25–29 (2001).
- Habel, J. C. *et al.* Butterfly community shifts over two centuries. *Conserv. Biol.* **30**, 754–762 (2016).
- Habel, J. C. & Schmitt, T. Vanishing of the common species: Empty habitats and the role of genetic diversity. *Biol. Conserv.* **218**, 211–216 (2018).
- Hallmann, C. A. *et al.* More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE* **12**, e0185809 (2017).
- Robinson, R. A. & Sutherland, W. J. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. (2002).
- The Royal Society for the Protection of Birds, (RSPB). State of Nature 2016. UK-Report. (2016).
- van Elsen, T. Species diversity as a task for organic agriculture in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* **77**, 101–109 (2000).
- Van Swaay, C. A. M. & *et al.* The European Butterfly Indicator for Grassland species: 1990-2015. (2016).
- Mateo-Sagasta, J., Zadeh, S. M., Turrall, H. & Burke, J. *Water pollution from agriculture: a global review - Executive summary*. (FAO, 2017).
- Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. Global Gray Water Footprint and Water Pollution Levels Related to Anthropogenic Nitrogen Loads to Fresh Water. *Environ. Sci. Technol.* **49**, 12860–12868 (2015).
- Moss, B. Water pollution by agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **363**, 659–666 (2008).
- Hoekstra, A. Y. & Mekonnen, M. M. The water footprint of humanity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109**, 3232–3237 (2012).
- Water for a sustainable world*. (UNESCO, 2015).
- Rockström, J. *et al.* A safe operating space for humanity. *Nature* **461**, 472–475 (2009).
- Carlson, K. M. *et al.* Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nat. Clim. Change* **7**, 63–68 (2017).
- Frank, S. *et al.* Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? *Environ. Res. Lett.* **12**, 105004 (2017).
- Climate Change 2013: the physical science basis ; Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge Univ. Press, 2014).
- UNEP. The Emissions Gap Report 2017. (2017).
- Lal, R., Reicosky, D. C. & Hanson, J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.* **93**, 1–12 (2007).
- Sullivan, P. Sustainable Soil Management. *Soil Systems Guide*. (2004).
- Lal, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **70**, 103–116 (2004).
- Houghton, R. A. & Nassikas, A. A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015: Carbon Emissions From Land Use. *Glob. Biogeochem. Cycles* **31**, 456–472 (2017).
- Lal, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Glob. Change Biol.* **24**, 3285–3301 (2018).
- Sanderman, J., Hengl, T. & Fiske, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **114**, 9575–9580 (2018).
- Teague, W. R. *et al.* The role of ruminants in reducing agriculture's carbon footprint in North America. *J. Soil Water Conserv.* **71**, 156–164 (2016).
- Le Quéré, C. *et al.* Global Carbon Budget 2016. *Earth Syst. Sci. Data* **8**, 605–649 (2016).
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L. & Jackson, R. B. The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **44**, 593–622 (2013).
- Zomer, R. J., Bossio, D. A., Sommer, R. & Verchot, L. V. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Sci. Rep.* **7**, (2017).
- Machmuller, M. B. *et al.* Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nat. Commun.* **6**, 6995 (2015).
- Beste, A. What is Europe's agriculture doing to the soil. (2018).
- Boysen, L. R. *et al.* The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal: THE LIMITS OF TERRESTRIAL CARBON REMOVAL. *Earths Future* **5**, 463–474 (2017).
- Lal, R. Beyond COP 21: Potential and challenges of the '4 per Thousand' initiative. *J. Soil Water Conserv.* **71**, 20A-25A (2016).
- Lal, R. Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. *BioScience* **60**, 708–721 (2010).
- IPCC. Global Warming of 1.5 °C. (2018).
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P. & Goulding, K. W. T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *Eur. J. Soil Sci.* **62**, 42–55 (2011).
- Soussana, J.-F. *et al.* Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil Tillage Res.* (2017). doi:10.1016/j.still.2017.12.002
- Lal, R. Beyond Copenhagen: mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration. *Food Secur.* **2**, 169–177 (2010).
- Assad, E. D. *et al.* Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. 20 (2013).
- Minasny, B. *et al.* Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* **292**, 59–86 (2017).
- Stockmann, U. *et al.* The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.* **164**, 80–99 (2013).
- Paustian, K. *et al.* Climate-smart soils. *Nature* **532**, 49–57 (2016).
- NAS & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. (National Academies Press, 2018). doi:10.17226/25259
- Griscom, B. W. *et al.* Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **114**, 11645–11650 (2017).
- Lal, R. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* **5**, 212–222 (2016).
- Smith, P. *et al.* Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **363**, 789–813 (2008).
- Fuss, S. *et al.* Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environ. Res. Lett.* **13**, 063002 (2018).
- Olivier, J., Peters, J. A. H. & Schure, K. M. *Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions - 2017 Report*. gr (2017).
- Sommer, R. & Bossio, D. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *J. Environ. Manage.* **144**, 83–87 (2014).
- Pershina, E. *et al.* Comparative Analysis of Prokaryotic Communities Associated with Organic and Conventional Farming Systems. *PLOS ONE* **10**, e0145072 (2015).
- Hoorman, J. & Islam, R. Understanding Soil Microbes and Nutrient Recycling. (2010). Available at: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-16>. (Accessed: 5th December 2018)
- Babikova, Z. *et al.* Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack. *Ecol. Lett.* **16**, 835–843 (2013).
- Bardgett, R. D. & van der Putten, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* **515**, 505–511 (2014).
- Cao, Z., Li, D. & Han, X. The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement. *Shengtai Xuebao/Acta Ecol. Sin.* **31**, 4741–4748 (2011).
- Eisenhauer, N. *et al.* Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Sci. Rep.* **7**, 44641 (2017).
- Humphreys, C. P. *et al.* Mutualistic mycorrhiza-like symbiosis in the most ancient group of land plants. *Nat. Commun.* **1**, 103 (2010).
- Steinauer, K., Chatzinotas, A. & Eisenhauer, N. Root exudate cocktails: the link between plant diversity and soil microorganisms? *Ecol. Evol.* **6**, 7387–7396 (2016).
- Helgason, T., Daniell, T. J., Husband, R., Fitter, A. H. & Young, J. P. W. Ploughing up the wood-wide web? *Nature* **394**, 431–431 (1998).
- Giovannetti, M. *et al.* At the Root of the Wood Wide Web: Self Recognition and Nonself Incompatibility in Mycorrhizal Networks. *Plant Signal. Behav.* **1**, 1–5 (2006).
- Johnson, D. & Gilbert, L. Interplant signalling through hyphal networks. *New Phytol.* **205**, 1448–1453 (2015).

72. Leake, J. *et al.* Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Can. J. Bot.* **82**, 1016–1045 (2004).
73. Bradford, M. A., Keiser, A. D., Davies, C. A., Mersmann, C. A. & Strickland, M. S. Empirical evidence that soil carbon formation from plant inputs is positively related to microbial growth. *Biogeochemistry* **113**, 271–281 (2013).
74. Jones, C. Mycorrhizal fungi powerhouse of the soil. *Evergr. Farming Mag. Sept. Ed.* (2009).
75. Jones, C. E. Liquid carbon pathway unrecognised. *Aust. Farm J.* **8**, 15–17 (2008).
76. Leigh, J., Hodge, A. & Fitter, A. H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material. *New Phytol.* **181**, 199–207 (2009).
77. Kuzyakov, Y. & Domanski, G. Carbon input by plants into the soil. Review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **163**, 421–431 (2000).
78. Pausch, J. & Kuzyakov, Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Glob. Change Biol.* **24**, 1–12 (2018).
79. Lange, M. *et al.* Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nat. Commun.* **6**, (2015).
80. Lehman, R. *et al.* Understanding and Enhancing Soil Biological Health: The Solution for Reversing Soil Degradation. *Sustainability* **7**, 988–1027 (2015).
81. Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. & Batten, K. M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**, 555 (2006).
82. Thakur, M. P. *et al.* Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. *Glob. Change Biol.* **21**, 4076–4085 (2015).
83. van der Heijden, M. G. A. *et al.* Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* **396**, 69–72 (1998).
84. Burghelea, C. *et al.* Mineral nutrient mobilization by plants from rock: influence of rock type and arbuscular mycorrhiza. *Biogeochemistry* **124**, 187–203 (2015).
85. Pieterse, C. M. J. *et al.* Induced Systemic Resistance by Beneficial Microbes. *Annu. Rev. Phytopathol.* **52**, 347–375 (2014).
86. Bedini, S. *et al.* Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biol. Biochem.* **41**, 1491–1496 (2009).
87. Pal, A. & Pandey, S. Role of Glomalin in Improving Soil Fertility: A Review. *Int. J. Plant Soil Sci.* **18** (2014).
88. Haddad, M. J. & Sarkar, D. Glomalin, a newly discovered component of soil organic matter: Part I Environmental significance. *Environ. Geosci.* **10**, 91–98 (2003).
89. Jackson, R. B. *et al.* The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **48**, 419–445 (2017).
90. Kätterer, T., Bolinder, M. A., Andrén, O., Kirchmann, H. & Menichetti, L. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* **141**, 184–192 (2011).
91. Sanderman, J., Creamer, C., Baisden, W. T., Farrell, M. & Fallon, S. Greater soil carbon stocks and faster turnover rates with increasing agricultural productivity. *SOIL* **3**, 1–16 (2017).
92. Shcherbak, I., Millar, N. & Robertson, G. P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 9199–9204 (2014).
93. LaCanne, C. E. & Lundgren, J. G. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ* **6**, e4428 (2018).
94. Brady, M. V. *et al.* Valuing Supporting Soil Ecosystem Services in Agriculture: A Natural Capital Approach. *Agron. J.* **107**, 1809 (2015).
95. Lal, R. Societal value of soil carbon. *J. Soil Water Conserv.* **69**, 186A–192A (2014).
96. Friedrich, T. & Kassam, A. No-till Farming and the Environment: Do No-Till Systems Require More Chemicals? *Outlooks Pest Manag.* **23**, 153–157 (2012).
97. Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. & Kienzie, J. Overview of the Worldwide Spread of Conservation Agriculture. (2015).
98. Mäder, P. & Berner, A. Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renew. Agric. Food Syst.* **27**, 7–11 (2012).
99. Meurer, K. H. E., Haddaway, N. R., Bolinder, M. A. & Kätterer, T. Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach. *Earth-Sci. Rev.* **177**, 613–622 (2018).
100. Powlson, D. S. *et al.* Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nat. Clim. Change* **4**, 678–683 (2014).
101. Cooper, J. *et al.* Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* **36**, (2016).
102. Mathew, R. P., Feng, Y., Githinji, L., Ankumah, R. & Balkcom, K. S. Impact of No-Tillage and Conventional Tillage Systems on Soil Microbial Communities. *Appl. Environ. Soil Sci.* **2012**, 1–10 (2012).
103. van Groenigen, K.-J. *et al.* Abundance, production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Soil Biol. Biochem.* **42**, 48–55 (2010).
104. Schwarzer, S. Alternatives for the use of glyphosate. (2018).
105. Ashford, D. L. & Reeves, D. W. Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crops. *Am. J. Altern. Agric.* **18**, 37–45 (2003).
106. Böhler, D. & Dierauer, H. Messerwalze statt Glyphosat. *LOP* **5**, 39–43 (2017).
107. Finney, D. M. & Kaye, J. P. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *J. Appl. Ecol.* **54**, 509–517 (2017).
108. Islam, R. & Reeder, R. No-till and conservation agriculture in the United States. An example from the David Brandt farm, Carroll, Ohio. in *International Soil and Water Conservation Research* (2014).
109. Poeplau, C. & Don, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* **200**, 33–41 (2015).
110. Soussana, J.-F. *et al.* Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil Tillage Res.* (2017). doi:10.1016/j.still.2017.12.002
111. Barbieri, P., Pellerin, S. & Nesme, T. Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Sci. Rep.* **7**, (2017).
112. Ding, G. *et al.* Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma* **130**, 229–239 (2006).
113. Fageria, N. K., Baligar, V. C. & Bailey, B. A. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **36**, 2733–2757 (2005).
114. Masilionyte, L. *et al.* Effect of cover crops in smothering weeds and volunteer plants in alternative farming systems. *Crop Prot.* **91**, 74–81 (2017).
115. Sanderson, M. A. *et al.* Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop–livestock systems. *Renew. Agric. Food Syst.* **28**, 129–144 (2013).
116. Sarrantonio, M. & Gallandt, E. The Role of Cover Crops in North American Cropping Systems. *J. Crop Prod.* **8**, 53–74 (2003).
117. Döring, T. F. *et al.* Weeds in Organic Fertility-Building Leys: Aspects of Species Richness and Weed Management. *Org. Farming* **3**, (2017).
118. Lundgren, J. G., McDonald, T., Rand, T. A. & Fausti, S. W. Spatial and numerical relationships of arthropod communities associated with key pests of maize. *J. Appl. Entomol.* **139**, 446–456 (2015).
119. Lundgren, J. G. & Fausti, S. W. Trading biodiversity for pest problems. *Sci. Adv.* **1**, e1500558–e1500558 (2015).
120. Han, E., Kautz, T. & Köpke, U. Precrop root system determines root diameter of subsequent crop. *Biol. Fertil. Soils* **52**, 113–118 (2016).
121. Pierret, A. *et al.* Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research. *Ann. Bot.* **118**, 621–635 (2016).
122. Rasse, D. P., Rumpel, C. & Dignac, M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant Soil* **269**, 341–356 (2005).
123. Bardgett, R. D., Wardle, D. A. & Yeates, G. W. Linking above-ground and below-ground interactions: how plant responses to foliar herbivory influence soil organisms. *Soil Biol. Biochem.* **30**, 1867–1878 (1998).
124. Reeves, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* **43**, 131–167 (1997).
125. Corbeels, M., Cardinael, R., Naudin, K., Guibert, H. & Torquebiau, E. The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil Tillage Res.* (2018). doi:10.1016/j.still.2018.02.015
126. Köpke, U., Athmann, M., Han, E. & Kautz, T. Optimising Cropping Techniques for Nutrient and Environmental Management in Organic Agriculture. *Sustain. Agric. Res.* **4**, 15 (2015).
127. Sulc, R. M. & Franzluebbers, A. J. Exploring integrated crop–livestock systems in different ecoregions of the United States. *Eur. J. Agron.* **57**, 21–30 (2014).
128. Martin-Guay, M.-O., Paquette, A., Dupras, J. & Rivest, D. The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Sci. Total Environ.* **615**, 767–772 (2018).
129. Raseduzzaman, M. & Jensen, E. S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *Eur. J. Agron.* **91**, 25–33 (2017).
130. Verret, V. *et al.* Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Res.* **204**, 158–168 (2017).
131. Walder, F. *et al.* Mycorrhizal Networks: Common Goods of Plants Shared under Unequal Terms of Trade. *PLANT Physiol.* **159**, 789–797 (2012).
132. Oelbermann, M. *et al.* Estimating soil carbon dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems using the Century model. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **180**, 241–251 (2017).
133. Cong, W.-F. *et al.* Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Glob. Change Biol.* **21**, 1715–1726 (2015).
134. Mäder, P., Edenhofer, S., Boller, T., Wiemken, A. & Niggli, U. Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biol. Fertil. Soils* **31**, 150–156 (2000).
135. van der Heijden, M., Wiemken, A. & Sanders, I. R. Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and resource distribution between co-occurring plant. (2003).
136. Brooker, R. W. *et al.* Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytol.* **206**, 107–117 (2015).



137. Brust, J., Gerhards, R., Karanisa, T., Ruff, L. & Kipp, A. Warum Untersaaten und Zwischenfrüchte wieder Bedeutung zur Unkrautregulierung in Europäischen Ackerbausystemen bekommen. *Gesunde Pflanz.* **63**, (2011).
138. Gerhards, R. Weed Suppression Ability and Yield Impact of Living Mulch in Cereal Crops. *Agriculture* **8**, 39 (2018).
139. Deguchi, S. *et al.* White clover living mulch increases the yield of silage corn via arbuscular mycorrhizal fungus colonization. *Plant Soil* **291**, 291–299 (2007).
140. Hartwig, N. L. & Ammon, H. U. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* **50**, 688–699 (2002).
141. Poepplau, C., Aronsson, H., Myrbeck, Å. & Kätterer, T. Effect of perennial ryegrass cover crop on soil organic carbon stocks in southern Sweden. *Geoderma Reg.* **4**, 126–133 (2015).
142. Schmidt, N. P., O'Neal, M. E. & Singer, J. W. Alfalfa Living Mulch Advances Biological Control of Soybean Aphid. *Environ. Entomol.* **36**, 416–424 (2007).
143. Pfeiffer, A., Silva, E. & Colquhoun, J. Living mulch cover crops for weed control in small-scale applications. *Renew. Agric. Food Syst.* **1**, 1–9 (2015).
144. Germeier, C. U. Wide Row Spacing and Living Mulch: New Strategies for Producing High Protein Grains in Organic Cereal Production. *Biol. Agric. Hortic.* **18**, 127–139 (2000).
145. Ryals, R. & Silver, W. L. Effects of organic matter amendments on net primary productivity and greenhouse gas emissions in annual grasslands. *Ecol. Appl.* **23**, 46–59 (2013).
146. Ryals, R., Eviner, V. T., Stein, C., Suding, K. N. & Silver, W. L. Grassland compost amendments increase plant production without changing plant communities. *Ecosphere* **7**, e01270 (2016).
147. Ryals, R., Hartman, M. D., Parton, W. J., DeLonge, M. S. & Silver, W. L. Long-term climate change mitigation potential with organic matter management on grasslands. *Ecol. Appl.* **25**, 531–545 (2015).
148. Fisher, M. J. *et al.* Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* **371**, 236–238 (1994).
149. Bonaudo, T. *et al.* Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur. J. Agron.* **57**, 43–51 (2014).
150. Franzluebbers, A. & Stuedemann, J. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil Tillage Res.* **100**, 141–153 (2008).
151. Franzluebbers, A. J. & Stuedemann, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop–livestock system in the southeastern USA. *Eur. J. Agron.* **57**, 62–70 (2014).
152. Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F. & Dedieu, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* **190**, 4–8 (2014).
153. Russelle, M. P., Entz, M. H. & Franzluebbers, A. J. Reconsidering Integrated Crop–Livestock Systems in North America. *Agron. J.* **99**, 325 (2007).
154. Jones, C. Carbon that counts. (2011).
155. Seis, C. Pasture cropping as a means to managing land. (2006).
156. Glover, J., Duggan, J. & Jackson, L. A novel perennial pasture and winter wheat conservation agriculture intercrop system for central USA Glover J1, Duggan J2, Jackson L3 1 Science and Technology Policy Fellow, U. 4 (2011).
157. Teague, W. R. *et al.* Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agric. Ecosyst. Environ.* **141**, 310–322 (2011).
158. Teague, R. & Barnes, M. Grazing management that regenerates ecosystem function and grazingland livelihoods. *Afr. J. Range Forage Sci.* **34**, 77–86 (2017).
159. Stanley, P. L., Rowntree, J. E., Beede, D. K., DeLonge, M. S. & Hamm, M. W. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agric. Syst.* **162**, 249–258 (2018).
160. Cardinale, B. J. *et al.* Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **104**, 18123–18128 (2007).
161. De Stefano, A. & Jacobson, M. G. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agrofor. Syst.* (2017). doi:10.1007/s10457-017-0147-9
162. Shi, L., Feng, W., Xu, J. & Kuz'yakov, Y. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degrad. Dev.* **29**, 3886–3897 (2018).
163. Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J. & Nayak, D. R. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agric. Ecosyst. Environ.* **254**, 117–129 (2018).
164. Lovell, S. T. *et al.* Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agrofor. Syst.* 1–19 (2017). doi:10.1007/s10457-017-0087-4
165. Sun, Y. *et al.* An Ecologically Based System for Sustainable Agroforestry in Sub-Tropical and Tropical Forests. *Forests* **8**, 102 (2017).
166. Sun, Y. *et al.* An Ecologically Based System for Sustainable Agroforestry in Sub-Tropical and Tropical Forests. *Forests* **8**, 102 (2017).
167. Toensmeier, E. *Perennial Staple Crops and Agroforestry for Climate Change Mitigation. Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and Food Sovereignty*, (2018).
168. Cardinael, R. *et al.* Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* **236**, 243–255 (2017).
169. Montagnini, F., Ibrahim, M. & Murgueitio Restrepo, E. Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. (2013).
170. Naranjo, J. F., Cuartas, C. A. & Murgueitio, E. Greenhouse gases in intensive silvopastoral systems with *Leucaena leucocephala* in Colombia. 12 (2012).
171. Laganière, J., Angers, D. A. & Paré, D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* **16**, 439–453 (2009).
172. Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* **123**, 1–22 (2004).
173. McKinsey & Company. Pathways to a low carbon economy. (2009).
174. Cardinael, R. *et al.* Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant Soil* **391**, 219–235 (2015).
175. Ni, Y., Eskeland, G. S., Giske, J. & Hansen, J.-P. The global potential for carbon capture and storage from forestry. *Carbon Balance Manag.* **11**, (2016).
176. Houghton, R. A., Byers, B. & Nassikas, A. A. A role for tropical forests in stabilizing atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nat. Clim. Change* **5**, 1022–1023 (2015).
177. Zedler, J. B. & Kercher, S. Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **30**, 39–74 (2005).
178. Page, S. E. & Hooijer, A. In the line of fire: the peatlands of Southeast Asia. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **371**, 20150176 (2016).
179. Mitsch, W. J. *et al.* Wetlands, carbon, and climate change. *Landsc. Ecol.* **28**, 583–597 (2013).
180. Lehmann, J., Czimeczik, C., Laird, D. & Sohi, S. Stability of biochar in soil. in *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* 235–282 (Taylor and Francis, London, UK, 2015).
181. Zimmermann, A. R. & Gao, B. The Stability of Biochar in the Environment. in *Biochar and Soil Biota* (Taylor & Francis Group, 2013).
182. Weng, Z. (Han) *et al.* Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. *Nat. Clim. Change* **7**, 371–376 (2017).
183. UNEP. *The Emissions Gap Report 2016*. 86 (United Nations Environment Programme, 2016).
184. Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J. & Joseph, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.* **1**, 1–9 (2010).
185. Lehmann, J. *et al.* Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biol. Biochem.* **43**, 1812–1836 (2011).
186. Hagemann, N., Kammann, C. I., Schmidt, H.-P., Kappler, A. & Behrens, S. Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. *PLOS ONE* **12**, e0171214 (2017).
187. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M. & Bastos, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* **144**, 175–187 (2011).
188. Kammann, C. I. *et al.* Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Sci. Rep.* **5**, (2015).
189. Werner, C., Schmidt, H.-P., Gerten, D., Lucht, W. & Kammann, C. Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5 °C. *Environ. Res. Lett.* **13**, 044036 (2018).
190. Lehmann, J. & Joseph, S. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. (Taylor & Francis Ltd, 2015).
191. Smith, P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Glob. Change Biol.* **22**, 1315–1324 (2016).
192. Padel, S. *et al.* Transitions to Agroecological Systems: Farmers' Experience. 81 (2018).
193. Frank, S., Havlik, P., Soussana, J.-F., Wollenberg, E. & Obersteiner, M. The potential of soil organic carbon sequestration for climate change mitigation and food security. (2017).
194. FAO. *The future of food and agriculture: trends and challenges*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017).
195. Frison, E. From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. (2016).
196. *Agriculture at a crossroads*. (Island Press, 2009).
197. IPES-Food. From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. (2016).
198. Tschamtké, T. *et al.* Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biol. Conserv.* **151**, 53–59 (2012).

## Autor:

Stefan Schwarzer, UN Environment / GRID-Geneva und Universität in Genf.

## Reviewers:

Scientific Committee 4p1000.org, Bob Rees, Lydia-Stella Koutika, Lini Wollenberg

## Kontakt:

stefan.schwarzer@unepgrid.ch

charles.sebukeera@un.org

