Bundesamt für Naturschutz

Bodenreport

Vielfältiges Bodenleben – Grundlage für Naturschutz und nachhaltige Landwirtschaft

Ein Blick unter den Tellerrand

Bodenreport

Vielfältiges Bodenleben – Grundlage für Naturschutz und nachhaltige Landwirtschaft

von

Moritz Nabel
Christian Selig
Johanna Gundlach
Henrike v. d. Decken
Manfred Klein
Beate Jessel

BfN Bodenreport:

Vielfältiges Bodenleben - Grundlage für Naturschutz und nachhaltige Landwirtschaft

Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstr. 110
53179 Bonn
Telefon: 0228 8491-0
E-Mail: presse@bfn.de
Internet: www.bfn.de

Autorinnen und Autoren: Moritz Nabel, Christian Selig, Johanna Gundlach, Henrike v.d. Decken, Manfred Klein, Beate Jessel

Unter Mitwirkung von: Daniel Wolf, Detlev Metzing, Sandra Balzer, Ursula Nigmann, Oliver Hendrischke

Titelbild: Bruno Glätsch

Der Blick auf einen scheinbar unbelebten intensiv bewirtschafteten Ackerboden verdeutlicht zentrale Aspekte dieses Reports: Die verlorene Sicht auf den Boden als Lebensraum sowie den Versuch die Ökosystemleistungen des Bodenlebens durch verschiedenste mehr oder weniger intensive Bewirtschaftungspraktiken zu ersetzen – beides ist mit dafür verantwortlich, dass heute wichtiges Wissen um die Vielfalt der Arten in Böden fehlt.

Alle verwendeten Bilder sind frei von Rechten. Freundlichen Dank für die Bereitstellung der Bilder über Pixabay an: Greg Newman, Magyar, Bruno Glätsch, Wolfgang Ehrecke, Franz W., darrenquigley32, lakewooducc, meineresterampe, Gerd Altmann, Manfred Richter, Franck Barske, armennano, pixamart, Benjamin Brandt, Wolfgang Ehrecke, Dirk Schumacher, Fritz_the_Cat, Beate, Siggy Nowak, Katrin Schulz, Claudia Martinez, Ulrike Leone, snarlingbunny, Hans Braxmeier, Karsten Lamprecht und Myriam Zilles

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)

Gedruckt auf: 100 % Recyclingpapier

DOI 10.19217/rep211

Bonn, Bad Godesberg, Januar 2021, 1. Auflage

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 6

Böden – Eine Blackbox der Artenvielfalt im Dienste des Naturhaushalts 8

Was lebt im Boden? Ein kurzer Überblick 10

Bedeutung des Bodenlebens im Naturhaushalt der Kulturlandschaft 13

Verknüpfung ober- und unterirdischer Biodiversität 13

Zerkleinern, Zersetzen, Mineralisieren 14

Bodengefüge 14

Regulierung von Schaderregern 15

Nähr- und Schadstoffmanagement 15

Klimaschutz 16

Frühwarnsystem, Bioindikatoren 17

Zustand und Gefährdung des Bodenlebens 19

Pestizide 19

Mineralische Düngung 20

Versauerung 22

Sonstige Schadstoffe 22

Bodenbearbeitung, Bodenverdichtung und Erosion 23

Klimawandel 24

Bodenverlust und Flächendruck 25

Förderung des Bodenlebens 27

Boden pflegen 27

Landschaftsdiversifizierung 31

Integrierter Pflanzenschutz 32

Integriertes Nährstoffmanagement 33

Zielgenaue Applikationstechnik 34

Bodenmarkt regulieren 35

Lebensraum Boden erforschen, monitoren und schützen 36

Rechtliche Grundlagen 36

Politische Verpflichtungen 38

Förderung und Finanzierung 39

Maßnahmenübersicht zur Förderung des Bodenlebens 44

Literaturverzeichnis 46

Zusammenfassung

Der vorliegende Report fokussiert auf das Bodenleben in landwirtschaftlich genutzten Böden, insbesondere unter ackerbaulicher Nutzung. Er zeigt auf, dass ein diverses und aktives Bodenleben nicht nur grundlegender und bislang häufig ausgeblendeter Bestandteil des Naturhaushaltes ist, sondern auch maßgebliche Grundlage für eine nachhaltig betriebene Landbewirtschaftung.

Unterirdisches und oberirdisches Leben sind durch Nahrungsnetze stark miteinander verbunden. Die von Bodenorganismen erbrachten Ökosystemleistungen wie Stoffumwandlungsprozesse, Förderung der Bodenstruktur sowie ihr Beitrag zu Wasserhaushalt und Pflanzengesundheit schaffen die essentielle Grundlage des Pflanzenwachstums und der Landwirtschaft – einen fruchtbaren Boden *(Kapitel: Bedeutung des Bodenlebens)*.

Die heute auf großer Fläche dominierende intensive und rationalisierte Landwirtschaft beeinträchtigt den Lebensraum Boden mitsamt dem Bodenleben erheblich und versucht den damit einhergehenden Verlust natürlicher Prozesse teils durch vermehrten Einsatz von Technik und Agrochemie zu kompensieren. Mineralische Düngemittel, synthetische Pflanzenschutzmittel und weitere Stoffeinträge akkumulieren sich im Boden und schädigen die dort lebenden und wirkenden Organismen. Auch der Einsatz von immer intensiverer und schwererer Landtechnik verdichtet und verändert das Bodengefüge in einem Maße, in dem es vielen Bodenlebewesen keinen angemessenen Lebensraum mehr bietet *(Kapitel Zustand und Gefährdung des Bodenlebens)*.

Es besteht die Gefahr, dass speziell im Boden lebende Arten aussterben, bevor sie taxonomisch erfasst und beschrieben wurden. Da das Bodenleben auch in der Wissenschaft lange unterhalb des Blickfeldes blieb und die Arten hier meist klein und hoch divers sind, sind erst ein Prozent der im Boden lebenden Arten erfasst. In Diversität und Biomasse überschreitet das Bodenleben mit ca. 15 Tonnen pro Hektar in den gemäßigten Breiten die des oberirdischen Lebens deutlich (*Kapitel Was lebt im Boden)*. Die Bodenorganismen, die bereits seit längerem in den bundesweiten Roten Listen geführt werden, zeigen jedoch bereits den gleichen deutlich negativen Trend, der für die oberirdische Diversität in Agrarlandschaften festgestellt wird (*Kapitel Zustand und Gefährdung des Bodenlebens)*. Um noch bestehende Wissensdefizite zu schließen, muss die Forschung zur Erfassung von Bodenorganismen und deren Ökosystemleistungen weiter ausgebaut werden (*Kapitel Förderung des Bodenlebens*).

Der Schaden, der mit dem Verlust im Boden lebender Arten für den Naturhaushalt, aber auch für die Landwirtschaft einher geht ist enorm. Die Kosten für eine technische Umsetzung wichtiger Funktionen des Bodens und der darin wirkenden Organismen werden für die EU auf 38 Mrd. € pro Jahr geschätzt. Gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels kann das Bodenleben einen großen Beitrag zur Klimaanpassung leisten, indem es den Landschaftswasserhaushalt stabilisiert und Wild- wie auch Kulturpflanzen resistenter gegen Trockenstress macht. Auch können einige Bodenarten als Bioindikatoren dienen, die es erlauben frühzeitig auf verän-

derte Umweltbedingungen zu reagieren *(Kapitel: Bedeutung des Bodenlebens)*.

Die Förderung des Bodenlebens muss stärker als Aufgabe des Naturschutzes verankert und als zentrales Element der Bodenfruchtbarkeit wieder zum integrierten Produktionsziel der Landwirtschaft werden. Dazu stehen prinzipiell zahlreiche Maßnahmen zur Verfügung. Diese sollten stets auf Standort und Bodentyp bezogen sein, da jeder Boden einem individuellen Artenspektrum seinen Lebensraum bietet. Die hier angeführten Maßnahmen beziehen sich vor allem auf intensiv genutzte Ackerbauregionen und sollen sich im Sinne des integrierten Pflanzenbaus für Landwirtinnen und Landwirten und Landwirte langfristig auszahlen. So wird ein gemeinsamer Weg von Naturschutz und Landwirtschaft zum Schutze des Bodenlebens aufgezeigt. (*Kapitel Förderung des Bodenlebens).*

Der Schutz des Bodens sowie der darin lebenden und wirkenden Organismen soll zum integrierten Produktionsziel erklärt werden um die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu steigern. Konservierende Bodenbearbeitungsverfahren sowie eine Anbaudiversifizierung durch erweiterte Fruchtfolgen, Kulturpflanzendiversität und der Anbau von Zwischenfruchtmischungen legen hier die Grundlage. Die Leitsätze des Integrierten Pflanzenschutzes müssen befolgt werden und die Stärkung der natürlichen Schädlingsregulation gegenüber synthetischen Pflanzenschutzmitteln Vorrang erhalten. Das Nährstoffmanagement sollte sich gleichzeitig am Boden und an den Kulturpflanzen orientieren. So müssen Nährstoffe in ausgeglichenem Maße zur Versorgung des Bodenlebens und im Gedanken der Kreislaufwirtschaft vorrangig in organischer Form ausgebracht werden. Verunreinigungen von Düngemitteln durch Medikamentenrückstände, Schwermetalle oder Mikroplastik sind auszuschließen.

Da sich viele der vorgestellten Maßnahmen für die Landbewirtschaftenden erst langfristig auszahlen, ist die Neuausrichtung hin zu einer nachhaltigeren Bodenbewirtschaftung mit entsprechenden Fördermaßnahmen zu untermauern. Um das Wissen um den Wert des Bodenlebens in die Praxis zu bringen, sind zunächst Ausbildungsinhalte und die landwirtschaftliche Beratung um den Aspekt der Bodenbiodiversität zu erweitern. Fördergelder der nationalen und europäischen Agrarpolitik (GAP) müssen stärker an gesellschaftliche Leistungen wie den Schutz von Umwelt- und Naturschutz gebunden werden. Spezielle Programme zur Förderung des Schutzes von Böden und den darin lebenden Organismen sind in Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen sowie Definitionen zum „Guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand“ (GLÖZ) zu integrieren (*Kapitel Förderung des Bodenlebens*).

Die vorgestellten Maßnahmen weisen zahlreiche Synergien zwischen dem allgemeinen Schutz von Biodiversität und Umwelt sowie den positiven Effekten auf die Bodenfruchtbarkeit und damit das Ertragspotential landwirtschaftlich genutzter Böden auf. Dies macht deutlich, dass der Schutz des Bodenlebens als ein gemeinsames Anliegen von Landwirtschaft und Naturschutz begriffen werden muss.

Böden – Eine Blackbox der Artenvielfalt im Dienste des Naturhaushalts

Unzählige Organismen wirken im Untergrund, fördern die Bodenfruchtbarkeit und bereiten somit auch den Boden für die Erzeugung von qualitativ hochwertigen landwirtschaftlichen Produkten, aber auch für ein diverses Leben an der Bodenoberfläche.

Die Artenzahl der Bodenorganismen ist bisher noch kaum erfasst, jedoch ist bereits klar, dass die Diversität der Bodenorganismen die der über der Bodenoberfläche lebenden Organismen um ein Vielfaches übersteigt [51]. Sie ist notwendig für funktionsfähige Stoffkreisläufe sowie das Belüften und Stabilisieren der Böden und schafft so ein fruchtbares Substrat auf dem vitale und damit widerstandsfähige Kultur- und Wildpflanzen gedeihen können. Sollten Kulturpflanzen von für sie schädlichen Organismen befallen werden, so befinden sich unter den Bodenorganismen auch natürliche Gegenspieler der für die Pflanzen schädlichen Organismen. Eine erfolgreiche Bewirtschaftung von Acker- und Grünlandflächen ohne die Unterstützung dieser verborgenen Helfer wäre nicht möglich. Viele Bodenorganismen sind ihrerseits auf landwirtschaftlich genutzte und geprägte Lebensräume angewiesen.
Ein Abhängigkeitsverhältnis, das sich über Jahrhunderte herausgebildet hat und die Landbewirtschaftung lange Zeit prägte.

Die Intensivierung in der Landwirtschaft setzte die Beziehung zwischen Bodenleben und Bodenbewirtschaftung in ein neues Verhältnis [41]. Es wurde versucht die Ökosystemleistungen des Bodenlebens teils durch vermehrten Einsatz von Maschinentechnik, Pflanzenschutzmitteln und synthetischen Düngemitteln zu ersetzen. Gleichzeitig nahm das Bewusstsein um die Bedeutung der essentiellen Ökosystemleistungen des Bodenlebens in Teilen der Praxis und Ausbildung der Landwirtschaft ab. Die Erhaltung und Förderung des Bodenlebens wurde weit hinter andere Produktionsziele wie der kurzfristigen Ertragsmaximierung angestellt. Dies hat bis heute drastische Auswirkungen auf die gesamte oberirdische und unterirdische Biodiversität und trägt maßgeblich zu deren Verlust bei [105].

Der Rückgang der biologischen Vielfalt oberhalb des Bodens ist inzwischen in der breiten öffentlichen Diskussion angelangt und wird mehrheitlich als gesellschaftliche Herausforderung anerkannt [14]. Studien über den Insektenrückgang dokumentierten beispielsweise einen gebietsweisen Rückgang von bis zu 75 Prozent der Insektenbiomasse in den vergangenen 30

Jahren [46] und einen Artenrückgang um ein Drittel in den vergangenen 10 Jahren [93] und legen einen Zusammenhang zur Landnutzung nahe. Die Datenlage zur Bodenbiodiversität ist jedoch auf allen ihrer Ebenen (genetische Diversität, Artenvielfalt, Vielfalt an Lebensräumen) spärlich. Dennoch bestätigt sich auch hier in verschiedenen Untersuchungen ein negativer Trend in der Artenzahl [6–8, 88], nicht zuletzt, weil oberirdische und unterirdische Biodiversität stark miteinander vernetzt sind [52]. Der Boden stellt aufgrund der hohen Diversität ein besonderes genetisches Reservoir und damit Schutzgut dar [99]. Wissensdefizite zur Biodiversität in insbesondere landwirtschaftlich genutzten Böden müssen dringend abgebaut werden [40] um auch hier dem Artenrückgang entgegen zu steuern. Maßnahmen dies zu erreichen sind teils weit entwickelt und bekannt.

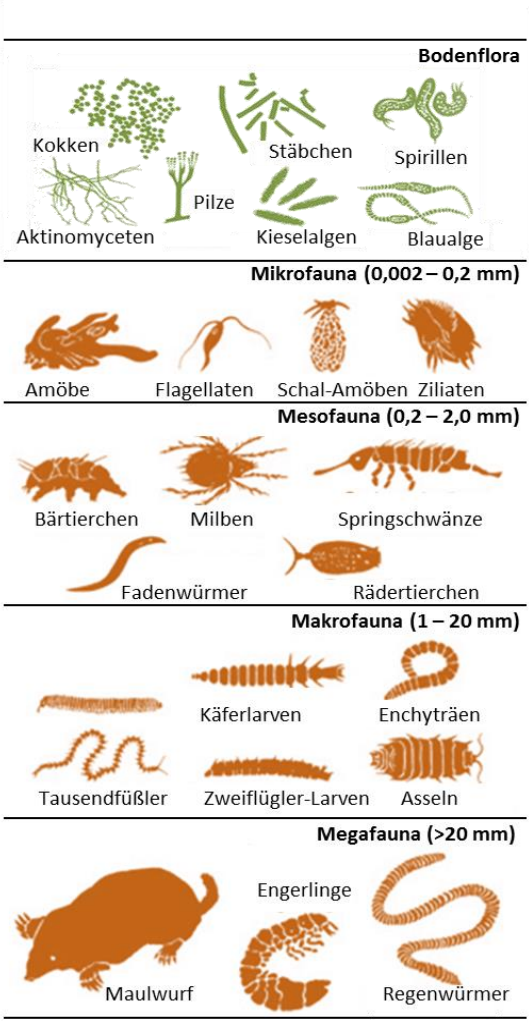
Der Landbewirtschaftung kommt im Bereich der Bodenbiodiversität eine Schlüsselrolle zu, da sie über ihre Art und Intensität der Bewirtschaftung direkten Einfluss auf über die Hälfte der Bodenfläche Deutschlands ausübt. Vielfältige landwirtschaftliche Maßnahmen können das Bodenleben und damit auch die Biodiversität in der Agrarlandschaft allgemein positiv beeinflussen. Ganz im Sinne eines integrierten Pflanzenbaus würde sich eine gesteigerte Achtung vor und Investition in das Bodenleben über gesteigerte Bodenfruchtbarkeit auch in gesteigerten und stabileren Ertragspotentialen der Böden widerspiegeln und sich somit langfristig für Landwirtschaft und Naturschutz auszahlen.

Dieser Report nimmt das Bodenleben in landwirtschaftlich genutzten Böden mit einem Fokus auf Ackerland in den Blick. Dabei ist zu beachten, dass die Vielfalt des Bodenlebens maßgeblich durch die Vielfalt an Böden als typische Habitate geprägt wird. Unterschiedliche Habitate verfügen dabei über eine jeweils spezifische standortangepasste Vielfalt auch des Bodenlebens. Die in diesem Report vorgestellten Maßnahmen verstehen sich daher als Bestandteile eines Baukastens aus dem standort- und bodentypangepasste Elemente ausgewählt werden sollten. Insbesondere magere Grenzertragsstandorte beherbergen auf der Artebene teils nur eine geringe Diversität – dafür jedoch eine hoch spezifische, die auch als solche erhalten und gefördert werden sollte. Die Bewahrung der Vielfalt an Böden bietet somit die Grundlage für ein diverses und aktives Bodenleben, das mit seinen Ökosystemleistungen Landwirtinnen und Landwirten dabei unterstützt stabile und qualitativ hochwertige Ernten einzufahren.

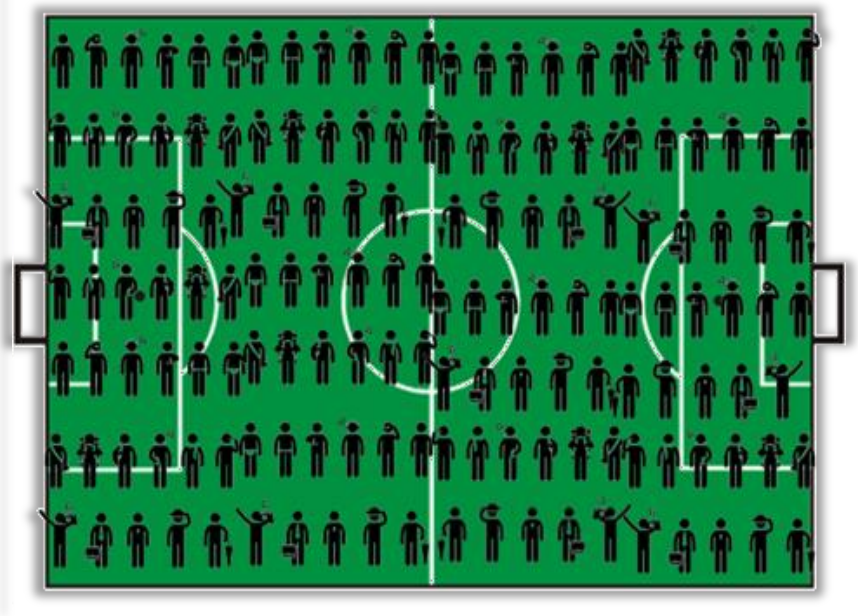
Was lebt im Boden?
Ein kurzer Überblick

Eine klare Abgrenzung von oberirdischem und unterirdischem Leben ist nicht möglich, da viele Arten in beiden Bereichen leben und diese somit verbinden. Am anschaulichsten verdeutlichen dies Pflanzen, da sie mit ihren Wurzeln viele Meter tief in den Boden reichen können, ihren Spross jedoch weit über den Boden hinausstrecken [20, 110]. Viele oberirdisch lebende Tiere nutzen den Schutz des Bodens zur Eiablage oder zur Überwinterung, bewegen sich aber hauptsächlich auf bzw. oberhalb der Bodenschicht. Unzählige Arten verbringen jedoch ihren gesamten Lebenszyklus unterhalb der Oberfläche.

Eine Einteilung der Bodenlebewesen wird entweder anhand der Artzugehörigkeiten, anhand der Organismengröße oder ihrer Funktionen im Ökosystem Boden vorgenommen [57]. Zu diesen funktionellen Gruppen gehören als erstes Primärproduzenten, beispielsweise Pflanzen und Algen, die die Energie des Sonnenlichts über die Photosynthese in energiereicher



Die größten Gruppen des Bodenlebens in den gemäßigten Breiten, veränderte Darstellung nach IVA 2005.

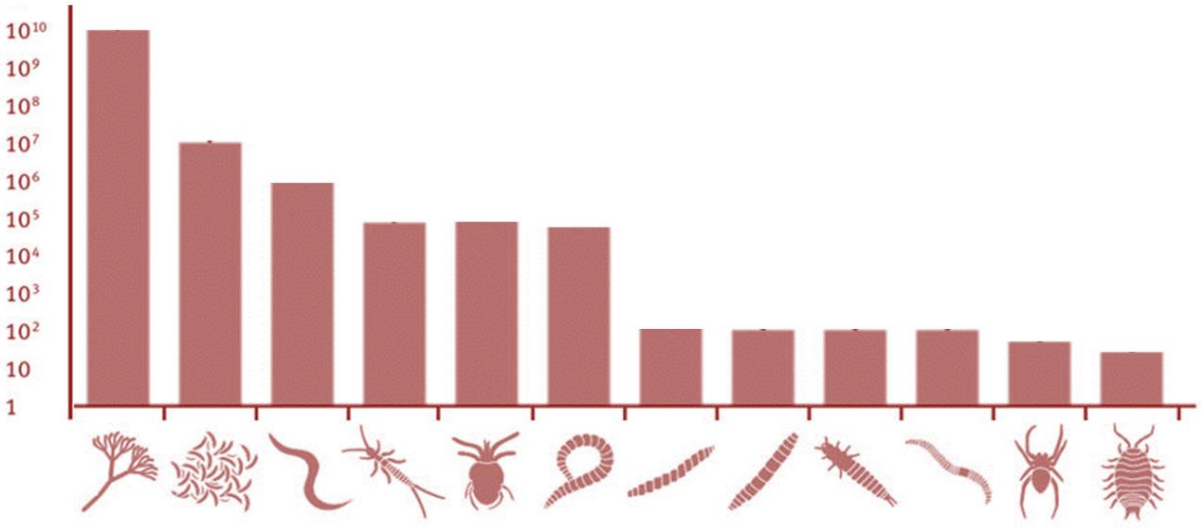


160 Personen auf einem Fußballfeld entsprechen in etwa dem Gewicht der Bodenlebewesen unter derselben Fläche: 11 Tonnen.

Biomasse speichern können und so allen weiteren Organismengruppen zugänglich machen. Unterstützt werden sie dabei unter anderem von symbiontischen Organismen wie etwa Mykorrhizapilzen oder stickstofffixierenden Rhizobakterien. Zerkleinerer und Mixer wie Regenwürmer nehmen energiereiches organisches Material auf, zerkleinern es oder verfrachten es in tiefere Bodenschichten, wo es von mineralisierenden Mikroorganismen abgebaut wird und die enthaltenen Nährstoffe wieder dem Kreislauf zugeführt werden. Daneben agieren räuberische Organismen auf verschiedenen Ebenen des Nahrungsnetzes und sorgen so dafür, dass alle Organismengruppen in optimalem Wachstumszustand und damit für das Gesamtökosystem produktiven Verhältnissen zueinander stehen [103]. Zusätzlich dienen Böden für Pflanzen als Diasporenbank, in der unzählige Samen teils jahrelang gut konserviert werden, bis es zur Keimung kommt [20, 81]. All diese Organismen bilden dabei ein stark verwobenes Netz, mit dem auch das oberirdische Leben verbunden ist [52, 73].

Die Anzahl der Individuen und Arten, aber auch die Biomasse an Bodenorganismen, kann dabei weit über dem liegen, was an oberirdischem Leben auf derselben Fläche zu finden ist. Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen kann die Biomasse der Bodenorganismen zusammen 15 Tonnen pro Hektar betragen [113]. Umgerechnet würde das auf die Fläche eines Fußballfeldes das Äquivalent von 160 Personen bedeuten.

Trotz der großen Bedeutung der Bodenorganismen für die verschiedenen Funktionen der Ökosysteme sind auch aus Sicht der Wissenschaft noch große Teile des Bodenlebens unter der Oberfläche verborgen. So ist der Anteil der noch nicht taxonomisch erfassten Organismen im Boden besonders hoch [103]. Es wird geschätzt dass weltweit 75 % der Regenwurm-, 50 % der Ameisen- und 50 % der Milbenarten noch nicht beschrieben sind. Noch ausgeprägter ist dies bei den Bodenmikroorganismen der Fall. Hier sind, wie beispielsweise bei den Pilzen, erst maximal 6 % der Organismen bekannt [4, 77]. Es wird davon ausgegangen, dass weltweit lediglich 1 % der Bodenmikroorganismen taxonomisch erfasst und beschrieben sind [73].



Individuenzahlen einiger Bodenorganismengruppen unter einem Quadratmeter Boden. V.l.n.r.: Pilze, Algen, Fadenwürmer, Springschwänze, Milben, Kleinringelwürmer, Tausendfüßer, Zweiflüglerlarven, Käfer/-Larven, Regenwürmer, Spinnen und Asseln, veränderte Darstellung nach UBA 2015.

Bedeutung des Bodenlebens im Naturhaushalt der Kulturlandschaft

Der Boden ist in gewisser Weise Verdauungs-, Speicher- und Immunsystem vieler Landökosysteme. Nach Berechnungen der Europäischen Kommission würden sich die Kosten für eine technische Umsetzung aller wichtigen Funktionen des Bodens und der darin wirkenden Organismen auf 38 Mrd. € pro Jahr beziffern [26]. Die an den zugrunde liegenden Ökosystemleistungen beteiligte Diversität an Bodenorganismen schafft dabei die essentielle Grundlage für das oberirdische Leben und speziell die Landbewirtschaftung: Einen fruchtbaren Boden.

Charles Darwin widmete sich Ende des 19. Jahrhunderts ausgiebig dem Bodenleben und kam zu einem eindeutigen Fazit:

„Man kann wohl bezweifeln, ob es noch viele andere Tiere gibt, welche eine so bedeutungsvolle Rolle in der Geschichte der Erde gespielt haben wie diese niedrig organisierten Geschöpfe.“

Charles Darwin [21]

Die ober- und unterirdische Biodiversität ist direkt über Nahrungsnetze, aber auch indirekt über Stoffkreisläufe verknüpft. Ein vielfältiges Bodenleben ist daher auch Grundlage der für uns sichtbaren Biodiversität an der Bodenoberfläche.

Nur auf fruchtbaren Böden können vitale Kulturpflanzen gedeihen, die auch ohne intensiven Einsatz synthetischer Pflanzenschutzmittel langfristig hohe und stabile Erträge liefern. Ein Verlust der Bodenfruchtbarkeit kann durch keine Art der Bodenbearbeitung oder Düngung ausgeglichen werden [49]. Schonende Bodenbearbeitung und ausgeglichene Düngegaben können Bodenlebewesen jedoch unterstützen und damit die Bodenfruchtbarkeit fördern.

Verknüpfung ober- und unterirdischer Biodiversität

Die Ökosystemleistungen des Bodenlebens bilden die Grundlage für die Photosyntheseleistung der oberirdischen Pflanzenvielfalt, mit der diese Sonnenlicht in energiereiche Biomasse umwandelt. Die durch Bodenorganismen geleisteten Stoffwechselprozesse schließen Stoffkreisläufe und machen essentielle Nährstoffe für Pflanzen zugänglich. Die damit gebildete Pflanzenbiomasse stellt wiederum die Grundlage eines weit gesponnenen Nahrungsnetzes dar [111]. Bodenorganismen sind Bestandteil dieses Nahrungsnetzes, das in enger Verbindung mit den oberirdisch lebenden Arten steht. Diese nutzen den Boden zusätzlich, teils zum Überwintern, zur Eiablage, oder während des Larvenstadiums [20, 52]. Pflanzenarten überstehen ungünstige Perioden mit ihren Überdauerungsorganen wie Rhizomen und Zwiebeln oder auch Samen im Boden [81]. Eine hohe Diversität an unterirdischem Leben ist daher auch eine der Grundlagen einer hohen Biodiversität an der Bodenoberfläche – und umgekehrt.

Durch die enge Verknüpfung von ober- und unterirdischer Biodiversität wirkt sich der Schutz des unterirdischen Lebens langfristig auch positiv auf die gesamte biologische Vielfalt aus. Die Böden in den gemäßigten Breiten bieten den Lebensraum mit der höchsten Dichte an verschiedenen Arten. Die Diversität der dortigen Böden übersteigt die des oberirdischen Lebens um ein Vielfaches [51]. Für den Naturschutz muss das Bodenleben als

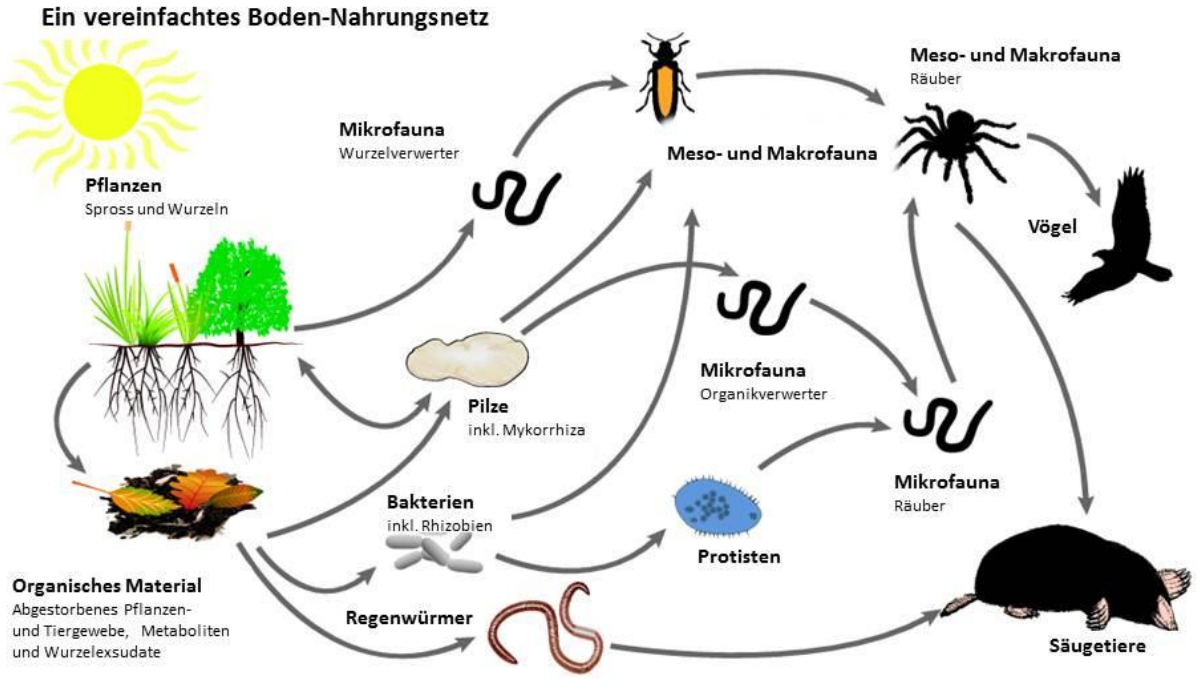
zentrales Element von Nahrungsnetzen und Stoffkreisläufen in Ökosystemen sowie als Reservoir bisher kaum erfasster genetischer Vielfalt ein zentrales Schutzgut darstellen.

Zerkleinern, Zersetzen, Mineralisieren

Organisches Material, etwa Pflanzenreste, Kadaver, Exkremente sowie Wurzelsäfte, bilden die Energiequelle des Bodenlebens. Bevor diese Substrate zu Nährboden für Krankheitskeime werden können, werden sie von einem Netz von Bodenorganismen verwertet. Größere Organismen wie zum Beispiel Regenwürmer zerkleinern grobes Material zunächst oder ziehen es unter die Erde. Regenwürmer können dabei bis zu 12 Kilogramm Erde pro Quadratmeter verlagern [113]. So vergrößert sich die Oberfläche des Materials, es wird im Boden gleichmäßig temperiert und feucht gehalten und bietet so optimale Bedingungen für mikrobiellen Abbau [73]. Am Abbau eines Buchenblattes etwa können mehr als 908 verschiedene Bakterien- und 225 verschiedene Pilzarten beteiligt sein [84]. Räuberische Bodenlebewesen halten dabei die unterschiedlichen Arten in einem ausgeglichenen und somit produktiven Verhältnis und in einem für den Abbau optimalen Wachstumsbereich [113]. Die Organismen schließen im organischen Material gebundene Pflanzennährstoffe wie Stickstoff, Phosphor oder Nährsalze auf. Diese können dann von Pflanzen über die Wurzeln wieder aufgenommen werden und bilden schließlich die Grundlage allen tierischen Lebens.

Bodengefüge

Ein fruchtbarer Boden ist weit mehr als eine Ansammlung von durch geologische Prozesse entstandenen Gesteinskrümeln und toter organischer Substanz. Durch die Aktivitäten der Mikroorganismen bei der Verarbeitung organischen Materials entstehen zunächst organische Säuren, die das Ausgangsgestein weiter verwittern



Ein vereinfachtes Boden-Nahrungsnetz, veränderte Darstellung nach EU EC/JRC 2016. Unterirdische- und überirdische Biodiversität sind durch Nahrungsnetzte eng verwoben.

lassen und so für Bodenneubildung sorgen [73]. Zum Ende der mikrobiellen Verwertungskette entstehen meist Huminstoffe. Diese gehen mit Tonmineralen feste Verbindungen zu Ton-Humus-Komplexen ein. Erst diese Verbindungen erlauben die Entstehung eines Bodengefüges. Verbunden mit den Gängen der Regenwürmer kann so ein Bodenkörper entstehen, der Wasser schnell aufnimmt, dieses - sowie darin gelöste Nährstoffe - lange hält und zudem gut belüftet ist. Wild-, aber auch Kulturpflanzen durchwurzeln solche fruchtbaren Böden sehr dicht und wachsen zu vitalen und widerstandsfähigen Pflanzen heran. Gerade in Zeiten des Klimawandels erhöht dies die Widerstandsfähigkeit von Kulturpflanzenbeständen etwa gegen Trockenheit [109].

Regulierung von Schaderregern

Die hohe Diversität an Bodenorganismen beinhaltet viele Organismen, die in der Landwirtschaft als Schädlinge gelten, jedoch auch deren natürliche Gegenspieler. Ein diverses Bodenleben reguliert sich effektiv selbst [39] und hält sich auf diese Weise in einem produktiven Optimum [113]. Der Boden, der sich direkt im Einflussbereich von Pflanzenwurzeln befindet, die sogenannte Rhizosphäre, beherbergt eine besonders hohe Diversität an Mikroorganismen, die in einem direkten Verhältnis zur Pflanze stehen [60]. Pflanzen geben in die Rhizosphäre gezielt Zucker oder organische Säuren ab, um die für sie hilfreichen Bodenorganismen zu versorgen [103]. Darunter gibt es Bodenlebewesen, die Pflanzen weniger anfällig gegenüber Schaderregern werden lassen [3]. Natürlich vorkommende Mikroben können zum Beispiel antibiotisch wirkende Substanzen produzieren und so auch Wurzeln von Kulturpflanzen schützen [20]. Zusätzlich produzieren einige der Mikroorganismen hormonähnliche Stoffe, die das Pflanzenwachstum stimulieren und Trockenstress vorbeugen [48].

Der Maulwurf leistet einen großen Beitrag zum Schutz von Kulturpflanzen. Er vertreibt kulturschädigende Nager und vertilgt große Mengen an Insektenlarven.

Nähr- und Schadstoffmanagement

Weitere Produkte des mikrobiellen Abbaus organischer Substanz sind Stoffe, die im Kreislauf gehalten werden und von den Pflanzenwurzeln wieder aufgenommen werden können. Nährstoffe, die nicht sofort von Organismen aufgenommen werden, können sich an Ton-Humus-Komplexe binden und werden so vor einer Auswaschung in tiefere, für Wurzeln unzugängliche Bodenschichten oder in das Grundwasser bewahrt. Ein fruchtbarer Boden erfüllt daher auch eine wichtige Funktion als Puffer für den Landschaftswasserhaushalt und Nährstoffe, aus dem sich die Pflanzen bei Bedarf versorgen, und minimiert somit Verluste.

Im Boden gibt es auch symbiontische Organismen, die wichtige Aufgaben im Nährstoffmanagement übernehmen. Rhizobien sind Bodenbakterien, die den für Pflanzen unzugänglichen Luftstickstoff binden können und ihnen verfügbar machen. So kann der Bedarf an mit hohem Energieaufwand produzierten mineralischen Stickstoffdüngern in Pflanzenkulturen erheblich reduziert werden [69]. Drei Prozent des weltweiten Energiebedarfs werden zur Produk-

Mykorrhizapilze erweitern das Wurzelgeflecht von Kulturpflanzen und erhöhen die Verfügbarkeit von essentiellen Pflanzennährstoffen.

tion von synthetischen Stickstoffdüngern eingesetzt [115].

Mykorrhizapilze ergänzen das Wurzelgeflecht vieler Wild- und Kulturpflanzen und unterstützen diese bei einer ausreichenden Versorgung mit Nährstoffen und Wasser. Besonders die stark an Bodenpartikel gebundenen Phosphate werden den Wurzeln oft erst durch diese Pilze zugänglich. Im Gegenzug erhalten die symbiontischen Organismen von den Pflanzen zuckerhaltige Substanzen als Energiequelle [10]. Ebenfalls von Mikroorganismen im Boden produzierte hormonähnliche Substanzen können den Nährstoff- und Vitamingehalt von Erntegütern positiv beeinflussen und so auch die Lagerfähigkeit erhöhen [86].

Neben den für das Pflanzenwachstum wichtigen Nährstoffen finden sich in landwirtschaftlichen Böden auch Schadstoffe, etwa Rückstände bzw. Abbauprodukte von Pestizidanwendungen oder durch Gülle ausgebrachte Medikamentenrückstände aus der Tierhaltung. Diese können ins Grundwasser gelangen und Komplikationen bei der Trinkwasseraufbereitung verursachen [95]. Auf Grund der hohen Bevölkerungsdichte in Deutschland, der intensiven Landbewirtschaftung und dem hohen Pro-Kopf-Wasserverbrauch ist die Abhängigkeit von der Wasseraufbereitung durch Bodenorganismen hierzulande besonders hoch [16]. Fruchtbare Böden mit hoher Aktivität des Bodenlebens können diese Schadstoffe an Ton-Humus-Komplexe binden, vor Auswaschung ins Grundwasser schützen und zum Teil sogar mikrobiell abbauen [61, 95].

Klimaschutz

Der Klimawandel wirkt sich erheblich auf die landwirtschaftliche Produktion, aber auch auf die Biodiversität des Bodenlebens aus. In den gemäßigten Breiten werden steigende Temperaturen die für den Pflanzenbau geeignete Wachstumsphase zwar potentiell verlängern und Erträge so theoretisch steigern, jedoch stellen ebenfalls mit dem Klimawandel einhergehende häufigere und längere Dürrephasen sowie Extremwetterereignisse wie Starkregen ein großes Risiko für die künftige Ertragsstabilität und Biodiversität dar [54, 55].

Ertragreiche Landbewirtschaftung wird in Zukunft nur auf Böden möglich sein, die in der Lage sind, genügend Wasser für längere Dürrephasen zu speichern und Kulturpflanzen damit zu versorgen. Gleichzeitig muss das Bodengefüge eine hohe Infiltrationsleistung aufweisen, um die großen Wassermengen von Starkregenereignissen schnell aufzunehmen, und somit den Verlust von Oberboden durch Wassererosion zu vermeiden. Andernfalls drohen die Ernten zu verdorren oder mit dem Regen fortgeschwemmt zu werden. Das Bodenleben stabilisiert das Bodengefüge, durch Ton-Humus Komplexe und erhöht die Wasserinfiltration sowie die Wasserhaltekapazität von Böden und leistet so einen wichtigen Beitrag zum Landschaftswasserhaushalt (siehe hierzu Kapitel „Bodengefüge“)

Die Landbewirtschaftung ist für 13 % der Kohlendioxid-, 44 % der Methan- und 82 % der Lachgasemissionen in Deutschland verantwortlich und trägt damit selbst erheblich zum Klimawandel bei [54]. Landwirtschaftlich genutzte Böden können

jedoch bei entsprechendem Management auch als potentielle Kohlenstoffsenke fungieren und klimaschädliches Kohlendioxid aus der Atmosphäre binden. Mit 2,5 Milliarden Tonnen stellen landwirtschaftlich genutzte Böden den größten terrestrischen Speicher für organisch gebundenen Kohlenstoff in Deutschland [58] dar. Dem Bodenleben kommt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle zu. Von Wurzeln, Pilzhyphen und von Bodenlebewesen produzierte zuckerhaltige Substanzen stabilisieren das Bodengefüge und schaffen so eine Bodenmatrix, die Kohlenstoff dauerhaft aufnehmen und halten kann [73]. Zudem bilden streuabbauende Bodenorganismen Huminstoffe und weitere stabile Kohlenstoffformen, die sich für eine langfristige Festlegung in der Bodenmatrix eignen. Darüber hinaus verhindern methanotrophe, das heißt methanabbauende und denitrifizierende, das heißt stickoxidabbauende Bodenbakterien in gut belüfteten Böden, bevorzugt in Regenwurmgängen, dass die klimaschädlichen Gase Methan und Lachgas in die Atmosphäre gelangen. Diese würden dort eine 25 beziehungsweise 298 mal klimaschädlichere Wirkung als Kohlenstoffdioxid entfalten [73, 94]. Durch Drainierung von besonders kohlenstoffreichen Moorböden kann jedoch auch das Gegenteil erreicht werden. Durch die Änderung des Bodenmilieus von anaeroben zu aeroben Bedingungen kann es zu Verlusten von bis zu 7,5 Tonnen Bodenkohlenstoff pro Hektar und Jahr kommen [101].

Frühwarnsystem, Bioindikatoren

Treten Umweltbelastungen auf, reagieren Bodenorganismen besonders schnell und sensibel, da sie oft in direkten Kontakt etwa mit Schadstoffen geraten. Bodenorganismen können daher als Bioindikatoren fungieren. Ein bereits erprobtes Beispiel ist der Regenwurmindikator. Regenwürmer finden sich in fast allen Böden, abgesehen von Permafrost und Wüstenböden [78]. Sie reagieren sensibel auf Schwermetalle, Änderungen im Säurehaushalt oder auf Verunreinigungen mit Schadstoffen, da sie durch ihre Schleimschicht in direktem Austausch mit der Bodenmatrix stehen und Boden auch direkt in ihren Verdauungstrakt aufnehmen. So kann ein Abwandern von Regenwürmern von einer belasteten Fläche ein Indikator für eine Schwermetallbelastung oder auch Verunreinigung mit organischen Schadstoffen sein [73]. Dem Naturschutz bietet dies die Möglichkeit frühzeitig Maßnahmen zum verstärkten Schutz betroffener Ökosysteme zu ergreifen um negative Auswirkungen auf die gesamte Biodiversität abzuwenden.

Regenwürmer reagieren besonders sensibel auf Schadstoffeinträge in den Boden und sind daher ein geeigneter Bioindikator.

Zustand und Gefährdung des Bodenlebens

Beschrieben sind weltweit rund 1,38 Millionen. Tierarten, über 330.000 Pflanzenarten und über 100.000 Pilzarten [31]. Die Zahl der noch nicht wissenschaftlich erfassten Organismen liegt aber noch deutlich höher. Nach dem Bericht des Weltbiodiversitätsrates sind rund eine Million Arten vom Aussterben bedroht [23]. Speziell Bodenorganismen sind bisher verhältnismäßig wenig erforscht und erfasst. Der Trend der in Deutschland über die bundesweiten Roten Listen der Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands erfasst wird, zeigt jedoch eine deutlich negative Richtung: 37 % der Regenwurmarten, 22 % der Asselarten, 24 % der Doppelfüßerarten, 7 % der Hundertfüßer, 35 % der Laufkäferarten sowie 25 % der Großpilze sind hier als gefährdet aufgeführt [6, 7, 88]. Gerade im Bereich der Bodenorganismen ist das Risiko, dass Arten verschwinden, bevor diese überhaupt entdeckt und beschrieben wurden groß.

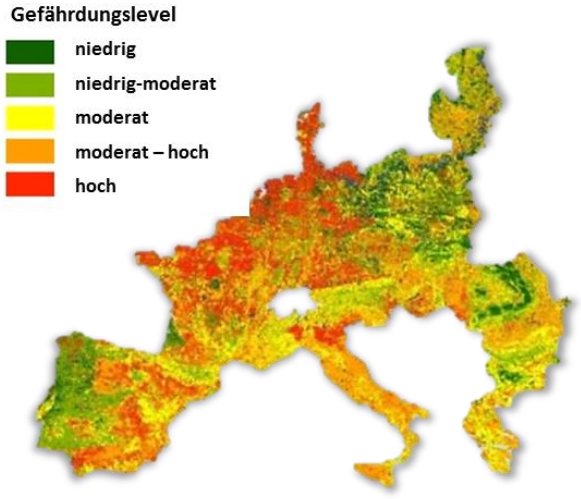
Auch für Gefäßpflanzen, die mit ihren Wurzeln im Boden verankert sind oder deren Samen im Boden überdauern, zeigt die Rote Liste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands, dass die Gefährdung ihrer Vielfalt weiter zugenommen hat: 28 % der Arten sind bestandsgefährdet, 2 % (65 Arten) sind bereits ganz verschwunden [8]. Besonders gefährdet sind insbesondere Arten, die auf landwirtschaftliche Flächen spezialisiert sind [68].

Steigende Erträge durch Düngung und Züchtung haben den potenziellen Rückgang der Erträge durch fortschreitenden Verlust der Bodenbiodiversität und damit auch der Bodenfruchtbarkeit aus dem Blickfeld gerückt. In den letzten Jahren stagnieren die Ertragszuwächse jedoch und schon bald könnten sich die Folgen der eingebüßten Bodenfruchtbarkeit zeigen. Die Gründe für diese Rückgänge sind vielfältig, lassen sich aber speziell für die Bodenorganismen auf eine intensive Nutzung des Bodens eingrenzen [35]. Anstatt die Bodenbiodiversität und ihre essentiellen Ökosystemleistungen zu erhalten und zu fördern, wurde teilweise versucht, diese durch synthetische Dünge- und Pflanzenschutzmittel sowie tiefe, wendende Bodenbearbeitung zu ersetzen.

Enge Fruchtfolgen oder gar Monokulturen funktionieren nur mit einem hohen Einsatz von Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln und einer intensiven Bodenbearbeitung, mit weitreichenden Folgen für das gesamte Agrarökosystem inklusive der Biodiversität in den landwirtschaftlich genutzten Böden [82].

Pestizide

Zum Schutz der Ackerkulturen vor Schädlingen kommen in der konventionellen Landwirtschaft Pflanzenschutzmittel in nahezu jeder Kultur zum Einsatz und dies meist mehrfach in der Vegetationszeit. Auch im ökologischen Landbau werden etwa BT- oder Kupferpräparate verwendet. In landwirtschaftlich genutzten Böden kommen die verschiedenen eingesetzten



Gefährdung des Bodenlebens in Europa, veränderte Darstellung nach EU EC/JRC 2016.

Pestizide zusammen und reichern sich teilweise an [20, 96]. Durch die so auftretende Kombinationswirkung verschiedener Mittel treten zusätzliche letale und subletale Effekte auf Bodenorganismen auf, die in den Zulassungsverfahren der Einzelsubstanzen in der Regel nicht berücksichtigt werden [30, 80].

Mikroorganismen können Pestizidrückstände im Boden abbauen, jedoch entstehen bei diesem Abbau zunächst Zwischenprodukte (Metabolite), die immer noch sehr hohe oder teils sogar höhere Wirksamkeit als die Ausgangssubstanzen haben [98].

Wie gesteigerte Nährstoffgaben durch Düngung, können auch Pflanzenschutzmittelanwendungen zur Folge haben, dass die Biodiversität auch im Boden abnimmt und sich das Artenspektrum verschiebt. Einzelne Arten können davon profitieren, weshalb die Auswirkungen von Pflanzenschutz-mittelanwendungen bei einfachen Messungen der Biomasse von Bodenlebewesen nicht zwingend sichtbar werden. Eine klare Verschiebung des Artenspektrums konnte für alle drei Hauptgruppen von Pestiziden in einer Vielzahl von Studien nachgewiesen werden. Bei Herbiziden belegten 80 %, bei Fungiziden 87 % und bei Insektiziden sogar 95 % der Studien eine deutliche Verschiebung des Artenspektrums [83].

Bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln auf noch junge Kulturpflanzen landet ein großer Teil des Wirkstoffes direkt auf dem Boden.

Insektizide wirken nicht nur selektiv auf die Schadorganismen der Kulturpflanzen, sondern gegebenenfalls auch auf andere Organismen wie Springschwänze (Collembolen) im Boden [36]. Fungizide wirken auch auf Bodenpilze, die die Kulturpflanzen nicht befallen [20]. Besonders bedeutend sind dabei systemisch wirkende Pflanzenschutzmittel, die zunächst von der Kulturpflanze über die Wurzel aufgenommen werden müssen und daher im Boden höhere Konzentrationen erreichen. Das Wissen um die Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf Bodenorganismen ist dringend ausbaubedürftig, da bisher kein gesetzlich vorgeschriebenes Monitoring für Pflanzenschutzmittel oder deren Rückstände in landwirtschaftlichen Böden existiert [114].

Mineralische Düngung

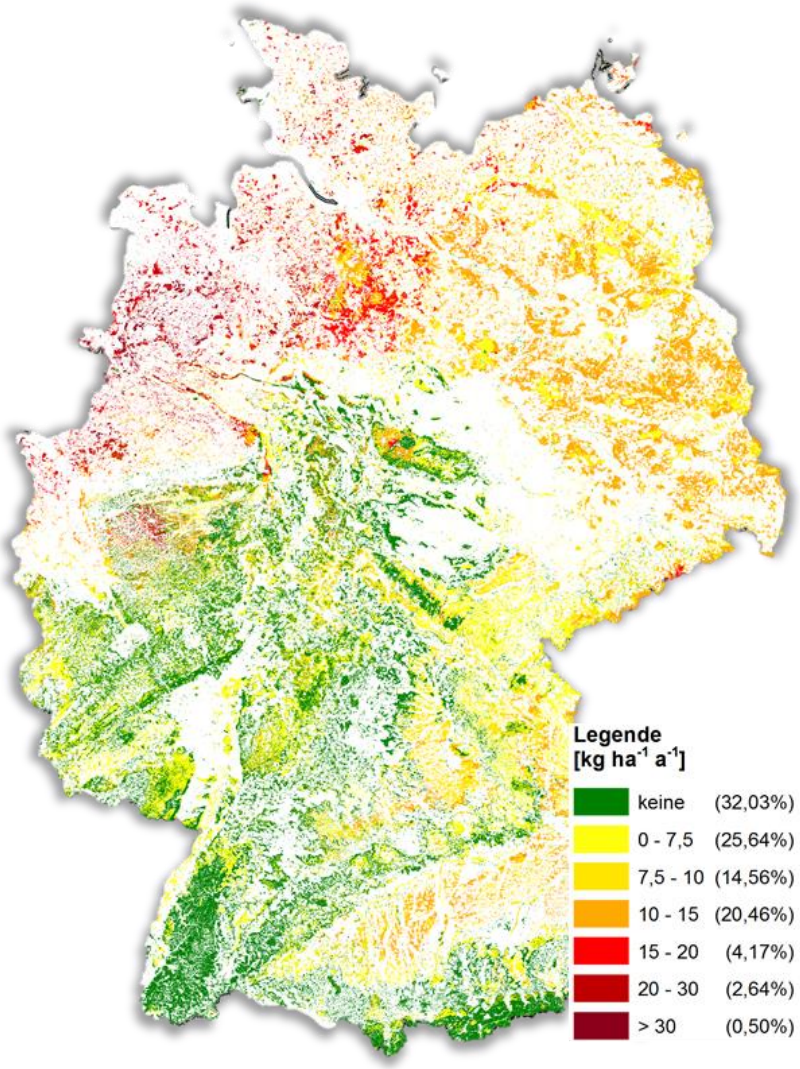
Heute werden 74 Prozent des weltweit zur Düngung eingesetzten Stickstoffs synthetisch erzeugt, wodurch die natürlichen Nährstoffkreisläufe langfristig und kontinuierlich angereichert und so aus dem natürlichen Gleichgewicht gebracht werden.

Zusätzliche Nährstoffeinträge, auch in naturnahen Ökosystemen, steigern zwar zunächst die Pflanzenbiomasse, jedoch profitieren davon nur wenige Arten, die in der Folge alle anderen Arten verdrängen. So nimmt die Diversität ab. Dieser Trend setzt sich durch die Zersetzung der Streu folglich auch beim Bodenleben fort. Pflanzenbiomasse aus eutrophen Gebieten hat ein engeres Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis und ist leichter abbaubar. Profitieren können so nur auf solche Biomasse spezialisierte Bodenorganismen. Organismen, die sich auf den Abbau von Hemizellulosen oder Lignin sowie anderen stabilen Molekülen aus Pflanzenzellwänden spezialisiert haben, gehen in ihren Beständen zurück [73]. Zudem kann durch die gesteigerte Abundanz einiger

spezialisierter Bodenorganismen der Humus im Boden schneller abgebaut werden, wodurch langfristig allen Bodenorganismen eine wichtige Nahrungsquelle versiegt [49].

Pflanzen, die bereits gut mit Nährstoffen versorgt sind, sind nicht mehr auf Symbiosen mit Mykorrhizapilzen oder stickstofffixierenden Bakterien angewiesen, um ihren Bedarf zu decken. Daher reduzieren sie die Energieversorgung der Symbionten und sondern weniger Wurzelexsudate ab. Besonders betroffen sind davon Pilze [43] und Rhizobiumbakterien [11].

Zudem sorgt der durch die zusätzlichen Nährstoffe verstärkte und dichtere Pflanzenbewuchs auf der Bodenoberfläche dafür, dass Insekten für die Eiablage kaum noch Zugang zum Boden finden. Auch wird das bodennahe Klima durch den Bewuchs kühler und feuchter. Dies erhöht das Risiko, dass Larven nicht rechtzeitig aus Gelege schlüpfen oder von Pilzen infiziert werden. Mangelnde Sonneneinstrahlung auf der Bodenoberfläche entzieht auch niedrigeren phototrophen Organismen wie Algen oder Cyanobakterien die Lebensgrundlage und reduziert deren Diversität [73].



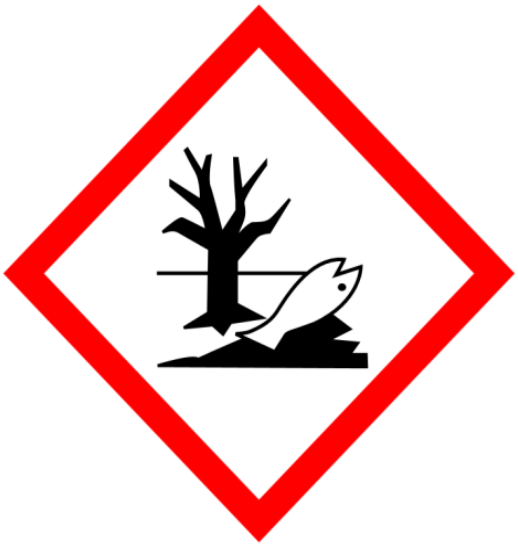
Überschreitung der ökologischen Belastungsgrenzen (Critical Load) für Eutrophierung durch Stickstoffeinträge im Jahr 2015, veränderte Darstellung nach Schaap *et al.* In UBA 2018.

Versauerung

Während im letzten Jahrhundert noch vor allem Schwefelemissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe für Säureeinträge verantwortlich waren, sind heute meist Stickstoffemissionen und Düngung für die Versauerung von Böden besonders der Agrarlandschaft verantwortlich. Auf Grund von Veränderungen des Säurehaushaltes kommt es zur Verschiebung des Pilz-Bakterien-Verhältnisses. Die Symbiose von Pflanzenwurzeln mit Mykorrhizapilzen funktioniert mitunter nicht mehr, was eine geringere Phosphorversorgung von Kulturpflanzen bedingen kann. Auch können durch die Säuren bestimmte Salze gelöst werden, die wichtige Kulturpflanzennährstoffe wie Phosphor fixieren, die damit den Pflanzen fehlen, oder im Falle von im gleichen Kontext gelösten Schwermetallen auch belasten [73].

Sonstige Schadstoffe

Mineralische Düngemittel wie etwa Phosphor- oder Kalidünger enthalten neben den gewünschten Pflanzennährstoffen auch Anteile an Schwermetallen wie Cadmium oder Uran [103]. Bei wiederholter Anwendung reichern diese Schwermetalle sich in den oberen Bodenschichten an, da sie im Boden kaum verlagert werden.



Umweltgefährlicher Stoff! So gekennzeichnete Substanzen sollten keinesfalls in Böden eingetragen werden.

Wirtschaftsdünger wie Gülle aus der Tiermast können Rückstände von Tierarzneimitteln, die in der Tierproduktion breite Anwendung finden, enthalten [103]. Medikamentenrückstände wie auch deren erste Abbauprodukte wirken bereits in sehr geringen Konzentrationen negativ auf viele Bodenorganismen [113]. Antibiotika etwa können resistenten Organismen in der Umwelt sehr schnell einen Selektionsvorteil verschaffen [45]. Langfristig können resistente Mikroorganismen auch für den Menschen ein Gesundheitsrisiko darstellen [113]. Antiparasitika werden im Magendarmtrakt von Nutztieren nicht abgebaut und gelangen so durch den Dung direkt auf Weideflächen. Dort stellt Dung für viele Organismen- und Artengruppen wie Regenwürmer, Zikaden und Fliegen eine wichtige Nahrungsquelle und Ort zur Eiablage dar. Mit Medikamentenrückständen kontaminierter Dung schädigt diese Organismen und verbleibt daher oft lange Zeit auf den Weideflächen, ohne biologisch abgebaut werden zu können [91].

Es gibt noch eine Vielzahl weiterer organischer Schadstoffe, die teils sehr persistent sind und sich daher auch langfristig im Boden anreichern können. Eine neuere Art dieser Schadstoffe stellen Mikro- (Teilchengröße < 5 mm) und Nanoplastik (Teilchengröße < 0,1 µm) dar. Diese werden in jüngerer Zeit immer häufiger in Oberböden nachgewiesen und stören dort physisch und chemisch das Nahrungsnetz [97].

Bodenbearbeitung, Bodenverdichtung und Erosion

Pflügen verlagert die sehr belebte und mit organischem Material angereicherte Bodenschicht in eine Tiefe, in der viele Organismen nicht mehr effektiv arbeiten können. Zusätzlich werden Gänge und Poren zerstört [20]. Damit hat das Pflügen von allen mechanischen Bodenbearbeitungsformen den gravierendsten Einfluss auf die Bodenbiodiversität. Besonders Regenwürmer werden oft direkt betroffen [73]. Die Würmer werden vom Pflug verletzt und an die Bodenoberfläche befördert, wo sie eine leichte Beute für Vögel und andere Räuber sind [42]. Generell sind von mechanischen Eingriffen in das Bodengefüge die Makro- und die Mesofauna besonders betroffen. Dies führt dazu, dass das Bodenleben auf Ackerböden weniger divers ist und vor allem aus Mikroorganismen besteht [102]. Doch auch Pilze, die oft weit verzweigte Netze aus Pilzhyphen im Boden ausbilden, werden durch den mechanischen Eingriff beeinträchtigt. So wird auch die Symbiose von Kulturpflanzen mit Mykorrhizapilzen nachhaltig gestört [13].

Intensive Bodenbearbeitung zerstört zudem das natürliche Bodengefüge und erhöht die Anfälligkeit gegenüber Bodenverdichtung. In der EU zeigen 35 Prozent der landwirtschaftlichen Böden deutliche Verdichtungsschäden [49]. Verdichtete Böden bieten größeren Bodenlebewesen wie Arthropoden oder Würmern nur noch eingeschränkten Lebensraum, da der Ener-

Vögel finden an den durch den Pflug an die Bodenoberfläche beförderten Bodenlebewesen ein leichtes Fressen.

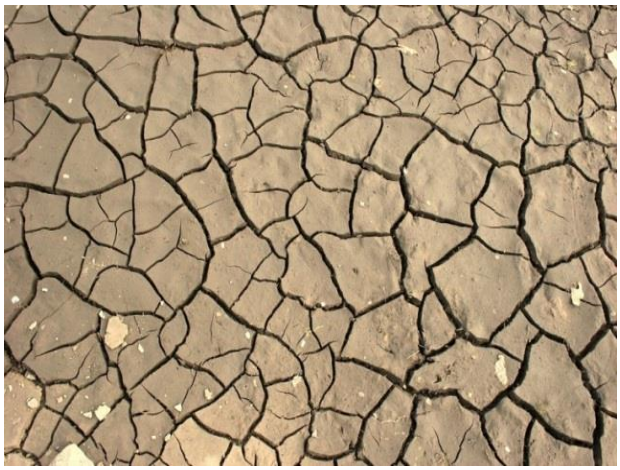
Eine Folge intensiver Bodenbearbeitung und Verdichtung: Überschwemmung durch niedrige Infiltrationsraten von Böden mit gestörter Struktur. Bodenlebewesen, die auf belüftete Böden angewiesen sind, können hier nicht überleben.

gieaufwand zur Fortbewegung im verdichteten Boden zu groß wird [73]. Eine weitere Folge ist die erhöhte Erosionsanfälligkeit und Staunässe, die eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Bodenlebens stört. Das gestörte Bodengefüge in Kombination mit gesteigertem Oberflächenabfluss sorgt dafür, dass der Oberboden von Wind und Regen fortgetragen wird. Gerade der Oberboden, der reich an organischem Material und damit Nahrung für das Bodenleben ist, bietet die höchste Biodiversitätsdichte [73]. In Europa haben 45 Prozent der Böden bereits deutlich an organischer Substanz im Oberboden verloren [49].

Klimawandel

Die globale Veränderung des Klimas wird auch zu gesteigerten Temperaturen in den oberen Bodenschichten führen. Eine gesteigerte Bodentemperatur wirkte sich in Laborstudien direkt auf das Verhältnis von Pilz- und Bakterienpopulationen aus [15]. In Freilandversuchen konnte gezeigt werden, dass bereits ein Temperaturanstieg von 0,6 °C in Kombination mit veränderter Niederschlagsverteilung die Biomasse des Bodenlebens um 17 Prozent verringerte [116]. Effekte auf das weitere Nahrungsnetz sind daher anzunehmen. Bodenorganismen sind, mit Ausnahmen der Säugetiere wie beispielsweise Mäuse, Hamster oder Maulwurf, wechselwarm. Ihre Stoffwechselaktivität wird daher maßgeblich von der Temperatur beeinflusst. Steigende Temperaturen bewirken so einen gesteigerten Energiebedarf. Stoffumsatzprozesse und somit der Abbau von organischem Material im Boden werden sich beschleunigen [72]. Teilweise wird dieser Effekt durch eine längere Wachstumsperiode und gesteigerte Photosyntheseraten der Pflanzen kompensiert werden können, jedoch werden häufigere Extremwetterereignisse wie Dürren und Starkregen diesen Effekt stark begrenzen oder gar umkehren [55, 72]. Für Deutschland wird derzeit von einem mittleren Verlust von 190 kg Bodenkohlenstoff pro Hektar und Jahr ausgegangen [58].

Ausgetrocknete Böden sowie Starkregenereignisse bergen ein großes Erosionsrisiko und gefährden damit den am dichtesten und diversesten besiedelten Oberboden. Neben der Temperatur und der Verfügbarkeit von organischem Material ist die Bodenfeuchte ein wichtiger Faktor für das Bodenleben und dessen Aktivität [99]. Lange Trockenheitsphasen werden sich daher auch auf die Biodiversität in landwirtschaftlich genutzten Böden auswirken. Weiterhin birgt der gesteigerte Abbau organischer Substanz im Boden das Risiko, dass Kohlendioxid in die Atmosphäre entweicht und den Klimawandel zusätzlich



Ein derart ausgetrockneter Boden stellt auch für das Bodenleben einen nur eingeschränkten Lebensraum dar.

befördert [2]. Besonders kommt dies bei Moor- und anderen wassergesättigten Böden zum Tragen. Obwohl Moorböden nur sechs Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland ausmachen, ist in ihnen rund ein Viertel des gesamten Bodenkohlenstoffs landwirtschaftlich genutzter Flächen festgelegt [58]. Letztlich werden sich durch den Klimawandel verursachte Änderungen der oberirdischen Biodiversität, besonders in der Pflanzenwelt, auch auf die Bodenbiodiversität übertragen.

Auch können sich durch ausbleibenden Bodenfrost im Winter invasive Arten wie beispielsweise Plattwürmer ausbreiten, die heimische Bodenfauna bedrohen und so Bodenfunktionen langfristig stören [9].

Bodenverlust und Flächendruck

Dass die landwirtschaftlich genutzte Fläche einem wachsenden Druck durch verschiedene Ansprüche ausgesetzt ist, ist einer der Faktoren, die die voranschreitende Intensivierung der Landbewirtschaftung befördern. Während der Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten stetig steigt, sinkt gleichzeitig die dafür zur Verfügung stehende landwirtschaftliche Nutzfläche, da in Deutschland täglich ca. 56 Hektar für Siedlungs- und Verkehrsfläche beansprucht werden [64].

56 Hektar Boden werden in Deutschland täglich für Siedlungs- und Verkehrsflächen beansprucht.

Der gesteigerte Bedarf landwirtschaftlicher Produkte ergibt sich zunächst aus dem Bevölkerungswachstum, kombiniert mit einem deutlichen Wandel des Konsumverhaltens. Weltweit wird heute rund ein Drittel der Ackerfläche genutzt, um Futter für die gesteigerte Nachfrage an tierischen Produkten anzubauen. In der EU landen 60 Prozent der Getreideernte im Trog und nicht mehr direkt auf dem Teller [49].

Die wachsende Bioökonomie sorgt zusätzlich dafür, dass landwirtschaftliche Flächen heute auch genutzt werden, um industrielle Rohstoffe oder Bioenergie zu produzieren. Dies erhöht den Flächendruck weiter und ist meist mit einer weiteren Intensivierung der landwirtschaftlichen Praxis verbunden [49]. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass bei der Umwandlung von extensivem Grünland in Ackerland 47 Prozent der Individuen im Boden verloren gehen und die Biomasse des Bodenlebens um 37 Prozent sinkt [116].

Verbunden mit den zum größten Teil immer noch an den Flächenbesitz gebundenen Fördergeldern aus der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) hat dieser Flächendruck auch große Auswirkungen auf den Bodenmarkt. Im Zeitraum von 2009 bis 2019 haben sich die Preise für Acker- und Grünland um den Faktor 2,3 erhöht [22]. In der Folge drängen vor allem renditeorientierte und häufig landwirtschaftsfremde Investoren auf den Markt. Eine langfristige und an Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit orientierte Betriebsplanung bleibt dabei anschließend oft außen vor.

Förderung des Bodenlebens

Im Rahmen einer nachhaltigen Neuausrichtung der Landwirtschaft wird auch die Notwendigkeit einer Förderung der Biodiversität in der Agrarlandschaft im politischen Raum bereits breit thematisiert [14, 27, 28]. Viele der dabei diskutierten Maßnahmen bieten Synergien zum Schutz der Biodiversität in landwirtschaftlich genutzten Böden. Es bedarf jedoch noch speziellerer Aufmerksamkeit und Maßnahmen, die auf die Bedürfnisse von Bodenorganismen zugeschnitten sind. Weil Deutschland sich als Mitglied der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) verpflichtet hat sich für ein nachhaltiges Bodenmanagement zum Schutz des Bodens und seiner nachhaltigen Nutzung einzusetzen, sollten die von der FAO bereits entworfenen Ansätze zum integrierten Pflanzenbau besondere Bedeutung erhalten [19, 24]. Sie greifen ein auf dem Grundsatz der Multifunktionalität fußendes landwirtschaftliches Fördersystem auf, in dem die biologische Vielfalt der Agrarlandschaft der Landbewirtschaftung selbst einen direkten Nutzen bringt und zum integrierten Produktionsziel erklärt wird [34, 37, 89]. Die Transformation dieser Maßnahmen in die Praxis und damit eine Umgestaltung der landwirtschaftlichen Wirtschaftsweise kann nur dann langfristig gelingen, wenn die Landwirtinnen und Landwirten, die den größten Teil der Maßnahmen umsetzen müssen, auch die innere Motivation für diese Umgestaltung mitbringen und entsprechend von der Gesellschaft und Politik unterstützt werden. Dies kann wiederum nur dadurch erreicht werden, dass die konkrete Ausgestaltung gemeinsam mit ihnen erarbeitet wird und die Notwendigkeit und der allgemeine Nutzen der Maßnahmen sowie die dadurch geförderten Ökosystemleistungen verständlich gemacht werden [71]. Investitionen in das Bodenleben und die Bodenfruchtbarkeit sind langfristige Investitionen, bei denen es kurzfristig zu Mindererträgen und Mehraufwendungen kommen kann. Um Landwirtinnen und Landwirten trotzdem den Einstieg in eine nachhaltigere Bodenbewirtschaftung zu ermöglichen, müssen auch finanzielle Anreize geschaffen werden, um die entstehenden Einbußen in der Übergangszeit zu kompensieren [92]. Außerdem müssen diese ökologischen Aspekte des Bodenschutzes und des Bodenlebens stärker in die landwirtschaftliche Ausbildung und Beratung eingebracht und Alternativen zur gängigen Wirtschaftsweise aufgezeigt werden.

Die Guidelines und Richtlinien der FAO können als ein übergeordnetes, international anwendbares Ziel- und Maßnahmensystem für das nachhaltige Management landwirtschaftlich genutzter Böden verstanden werden, weshalb sie als Gerüst für die nachfolgenden Ausführungen herangezogen werden.

Boden pflegen

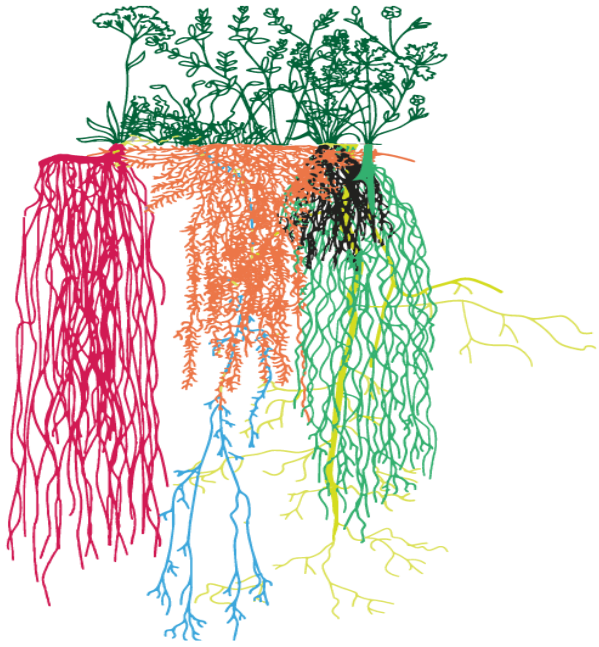
Der Boden mitsamt der darin lebenden Diversität an Organismen muss als essentielle Grundlage einer nachhaltigen Landbewirtschaftung verstanden werden. Die FAO setzt den Boden mit dem darin enthaltenden Leben als endliche und nicht

Eine Mulchschicht schützt den Boden, fördert das Bodenleben (wie hier Pilze) und schützt die Kulturpflanzen vor zu schnell aufwachsenden Ackerbegleitkräutern.

erneuerbare Ressource ins Zentrum des Konzepts der konservierenden Landwirtschaft [19]. Das Konzept besteht aus den drei Kernelementen konservierende Boden-bearbeitung, permanente Bodenbedeckung und Anbaudiversifizierung [62]:

1. konservierende Bodenbearbeitung

Bei konservierender Bodenbearbeitung wird darauf geachtet, die verschiedenen Bodenhorizonte möglichst nicht zu vermengen und die organisch angereicherte Oberbodenschicht auf der Bodenoberfläche zu belassen [34, 73]. So wird gleichzeitig verhindert, dass Bodenlebewesen in tiefere oder höhere, für sie als Lebensraum mehr oder weniger ungeeignete Bodenschichten verlagert werden. Zudem bleibt das natürliche Bodengefüge mit Poren und Gängen als Lebensraum für Bodenlebewesen bestehen [63]. Folglich bleiben eine Vielzahl an Mikrohabitaten erhalten und bieten zahlreiche ökologische Nischen [94].



Bei der Kombination verschiedener Pflanzenarten werden Licht, Wasser und Nährstoffressourcen effektiv genutzt. Zudem bietet jede Pflanzenart eine einzigartige Rhizosphäre und damit Lebensraum für ein angepasstes Artenspektrum. Darstellung nach EU EC/JRC 2016.

Eine besondere Form der konservierenden Bodenbearbeitung ist die Direktsaat, bei der die neue Saat ohne vorherige Saatbettbereitung in den zuvor abgeernteten Bestand eingesät wird. Da hier eine beikrautregulierende Bodenbearbeitung ausbleibt, kommen jedoch vor der Aussaat meist breit wirkende Herbizide zum Einsatz [17]. Diese Herbizide beseitigen auf den behandelten Flächen die Ackerbegleitflora vollständig. Diese Praxis hat weitreichende negative Folgen für die betroffenen Arten und aufgrund von Nahrungsketteneffekten auf die Biodiversität in der Agrarlandschaft insgesamt [12]. Auch negative Auswirkungen auf die Bodenbiodiversität wie beispielsweise auf Regenwürmer und Pilze sind dokumentiert [117].

Mulchsaatsysteme können hier eine Alternative darstellen, die auch ohne den Einsatz von Herbiziden die Etablierung eines widerstandsfähigen Kulturpflanzenbestandes ermöglichen. Dabei erfolgt die Saat entweder nach einer konservierenden Bodenbearbeitung oder im Direktsaatverfahren in die Mulchschicht, etwa eines gewalzten Zwischenfruchtbestandes. Diese Mulchschicht bedeckt in der Folge den Boden, hält diesen feucht und unterdrückt die Ackerbegleitflora solange, bis die Kulturpflanzen ein widerstandsfähiges Entwicklungsstadium erreicht haben. Die Mulchschicht hat dabei den weiteren Vorteil, dass sie das Bodenleben mit organischem Material versorgt. Stammt die Mulchschicht aus einem artenreichen Zwischenfruchtbestand, kann davon eine Vielzahl von Arten profitieren [25].

Sollten agronomische Umstände wie beispielsweise ein massiver Unkrautdruck oder hohe Schäden durch Wühlmäuse eine wendende Bodenbearbeitung zwingend erforderlich machen, so ist diese Maßnahme etwa durch die Ausbringung

von Stallmist zu kompensieren, um eine rasche Wiederbesiedelung zu fördern [47].

2. permanente Bodenbedeckung

Liegt Ackerboden nach der Ernte blank, ist er Sonneneinstrahlung, Regenschauern und Windböen gegenüber ungeschützt. Dies begünstigt oberflächliches Austrocknen und erhöht die Erosionsgefahr. Auch das Bodenleben findet auf einer blanken Ackerbodenfläche nicht ausreichend organisches Material, um seinen Energiebedarf zu bedienen. Wichtig ist es daher, genügend Ernterückstände auf der Bodenoberfläche zu belassen, die eine schützende Mulchschicht bilden können und das Bodenleben mit ausreichend organischem Material versorgen, um die entstehende Nahrungslücke zwischen dem Anbau zweier Kulturpflanzenbestände zu schließen [5, 79].

Alternativ können Zwischenfruchtmischungen, teils sogar bereits in den noch abreifenden Kulturpflanzenbestand eingesät werden und so auch das Aufwachsen von verlustbringenden Beikräutern verringern [87]. Die Zwischenfrüchte stabilisieren mit ihren Wurzeln das Bodengefüge und nutzen das Sonnenlicht zur Photosynthese um Biomasse zu bilden, die dem Boden in der Folge wieder als organisches Material zukommt. So wird die Nutzungseffizienz des Ackers deutlich erhöht, da das Sonnenlicht nach der Ernte genutzt werden kann, um den Boden mit organischem Material anzureichern, das Bodenleben zu fördern und so langfristig die Boden-fruchtbarkeit zu steigern [20]. Gerade auf Standorten mit niederer Bodenqualität kann die Steigerung der Bodenfruchtbarkeit auch die Ertragspotentiale anheben und den Landwirtinnen und Landwirten einen wirtschaftlichen Anreiz zum Zwischenfruchtanbau bieten [38]. Diverse und regional angepasste Zwischenfruchtmischungen haben dabei für die Bodenbiodiversität größeren Nutzen, da sie einer Vielzahl von spezialisierten Destruenten eine Nahrungsgrundlage bieten [25].

Eine diverse Landschaft mit vielen dauerhaften Strukturen wie Hecken bietet Rückzugsräume für viele typische Arten der Agrarlandschaft.

Gleichzeitig haben sie positive Effekte auf weitere Organismengruppen wie bestäubende Insekten [67].

3. Anbaudiversifizierung

Jede Kulturpflanze begünstigt ein spezifisches Spektrum an Bodenorganismen. Dazu gehören Destruenten, die auf den Abbau der kulturspezifischen Streu spezialisiert sind, oder auch die auf die spezifischen Gegebenheiten der Wurzelarchitektur und der Rhizosphäre der Kulturpflanzen angepassten Mikroorganismen. Nur eine hohe Diversität an Kulturpflanzen in weiten Fruchtfolgen kann also die Grundlage für eine hohe Bodenbiodiversität in landwirtschaftlich genutzten Böden legen [100].

Ausgeweitete Fruchtfolgen steigern die Diversität an Kulturpflanzen in der Agrarlandschaft insgesamt und wirken sich positiv auf die biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft und somit auch die Bodenbiodiversität aus [100]. Jedoch steht auch bei weiten Fruchtfolgen meist nur eine Kulturart pro Wachstumsperiode auf einem Acker, gerade wenn Beikräuter intensiv bekämpft werden. Um die Diversität auf dem einzelnen Acker zu steigern, müssen Pflanzenschutzschadschwellen für Beikräuter überarbeitet und eingehalten werden.

Weiterhin können Anbauverfahren gefördert werden, bei denen mehrere Kulturarten zur selben Zeit auf der Fläche stehen. Beispiele dafür wären etwa Untersaaten, die gleichzeitig auch unerwünschten Beikrautbewuchs begrenzen können [1]. Kombinierte Anbausysteme aus Ackerbau und Baumreihen, sogenannte Agroforstsysteme bieten darüber hinaus den Vorteil, dass sie mehrjährige Baumkulturen mit einjährigen Kulturpflanzen kombinieren und so auf dem Acker Zonen mit dauerhafter Bodenruhe entstehen. Diese können auch größeren und mobilen Bodenorganismen ein Refugium bieten, wenn auf der Ackerfläche Bodenbearbeitung stattfindet [85]. Zudem steigert die Mehrfachnutzung die effektive Nutzung von Wurzelraum, Wasser, Sonnenlicht und Nährstoffen und ermöglicht so einen gesteigerten Energieeintrag in das Bodensystem mit

Diverse, standortangepasste Zwischenfrucht- und Blühmischungen sowie Begleitkräuter haben sowohl für die ober- als auch die unterirdische Biodiversität hohen Nutzen.

Vorteilen für Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit [73].

Die positiven Effekte einer Mischkultur mit den Vorteilen mehrjähriger Bodenruhe können durch die Einsaat mehrjährigen Kleegrases verbunden werden [107]. Auch mehrjährige Energiepflanzen, die als extensive Anbaualternative zu intensiv bewirtschaftetem Energiemais kultiviert werden, können das Bodenleben fördern [70]. Mehrjährige Getreidesorten spielen in der deutschen Landwirtschaft bisher kaum eine Rolle. Dabei könnte ihr Anbau großes Potential zur Förderung des Bodenlebens bieten, da er die Interessen des Bodenschutzes mit ökonomisch orientierter Landwirtschaft kombinieren würde [90]. Die Forschung und Züchtung in diesem Bereich sollte daher deutlich ausgebaut werden.

Neben dem Ackerbau spielt auch das Grünland zur Futtergewinnung oder als Weideland eine flächenmäßig wichtige Rolle beim Erhalt und der Förderung der Bodenbiodiversität. Extensive Bewirtschaftung von Wiesen und Weiden mit gestaffelter Mahd, angepasstem Viehbesatz sowie maßvoller Düngung fördern sowohl die oberirdische als auch die unterirdische Biodiversität [66]. Wenn Weidetiere aber, teils auch prophylaktisch mit Medikamenten behandelt werden, die über den Dung und Harn teilweise ausgeschieden werden, sollten diese während der Behandlung eingepfercht oder im Stall gehalten werden. Medikamentenrückstände können sich negativ auf die Diversität der vom Dung abhängigen Organismen auswirken [53]. Belastete tierische Exkremente dürfen daher nicht unbehandelt wieder dem Nährstoffkreislauf zugeführt werden. Gerade bei extensiver Beweidung kann der Dung jedoch lokale Hotspots der Bodenbiodiversität im Grasland bieten, da er vielen Bodenorganismen als Nahrungsquelle oder auch Möglichkeit zur Eiablage dient. Dies sollte bei der zukünftigen Gestaltung von Förderprogrammen etwa zur Beweidung berücksichtigt werden.

Landschaftsdiversifizierung

Landschaftselemente wie Bäume, Hecken, Wegränder und Säume bieten einen Bodenlebensraum, der dauerhaft ungestört bleibt und somit auch die Wiederbesiedelung von Ackerflächen nach störenden Ereignissen wie tiefem Pflügen oder auch einer langanhaltenden Trockenheit ermöglicht. Bäume und Hecken haben Wurzelsysteme, die in tiefere Bodenschichten als die von einjährigen Kulturpflanzen reichen. Zum Teil wird diese Feuchtigkeit auch an die Umgebung abgegeben. So kann das Bodenleben unter Hecken und Bäumen auch in langen Trockenphasen noch mit Feuchtigkeit versorgt und dadurch aktiv bleiben. Auch vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels wird dieser Effekt besonders im Osten Deutschlands nach Einschätzung der UNCCD wachsende Bedeutung erhalten [73].

Da Bodenorganismen oft weniger mobil sind als oberirdisch lebende, ist eine gute Vernetzung von dauerhaften Landschaftselementen und Biotopen äußerst wichtig. Auch sollten Ackerschläge in ihrer Größe begrenzt und große Ackerschläge von dauerhaften Strukturen durchzogen sein. Nur so können Bodenlebewesen die

Der Marienkäfer und seine Larven sind ein häufig genutztes Bild für eine biologische Bekämpfungsmaßnahme gegen Blattläuse im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes.

Ackerböden aus den Rückzugsräumen in dauerhaften Landschaftsstrukturen heraus wieder besiedeln und zur Fruchtbarkeit der landwirtschaftlich genutzten Flächen beitragen [118].

Integrierter Pflanzenschutz

Pflanzenschutzmittel sind selten selektiv und wirken sich vor allem langfristig negativ auf die Biodiversität von Ackerböden aus. Der seit 2009 in der europäischen Gesetzgebung verankerte integrierte Pflanzenschutz bietet eine Reihe von pflanzenbaulichen Maßnahmen, die dem Aufkommen von Schädlingen und kulturschädigenden Beikräutern vorbeugen sollen [33]. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch die Förderung der Biodiversität sowohl über als auch unter der Erde, da diese Grundlage einer natürlichen Schädlingsregulation ist. Synthetische Pflanzenschutzmittel sollten nach den Grundsätzen des integrierten Pflanzenschutzes immer nur dann Einsatz finden, wenn keine der nicht-chemischen Verfahren in der Schädlingsregulation den gewünschten Erfolg gebracht haben. Weiterhin sind vor der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln Schadschwellen zu beachten. Diese richten sich bisher nur nach betriebswirtschaftlichen Kalkulationen. Externe Kosten der Pflanzenschutzmittelanwendungen wie die Schädigung der Biodiversität mit ihren Ökosystemleistungen oder Kontaminationen des Grundwassers wirken sich auf die Ökosysteme aus und werden letztlich der Gesellschaft getragen. Es ist daher angesagt, diese externen Kosten in die Berechnung von Schadschwellen vor einer Pflanzenschutzmittelanwendung einzupreisen [32, 92].

Bei Flächenbehandlung mit biodiversitätsschädigenden Pflanzenschutzmitteln muss der durch die Behandlung entstehende Schaden kompensiert und sichergestellt werden, dass durch die Behandlung beeinträchtigte Nicht-Ziel-Organismen die Flächen erfolgreich wiederbesiedeln können und Nahrungsnetze nicht unterbrochen werden [32]. Dazu muss ein Mindestanteil an Refugialflächen auf und abseits der Ackerflächen bereitgestellt werden, die unter ökologischen Gesichtspunkten auszugestalten sind und so Nicht-Ziel-Organismen einen geeigneten Rückzugsraum bieten [14]. Der Anteil dieser Flächen sollte dabei je nach Ausgestaltung der Rückzugsräume auf der Ackerfläche und angrenzenden Strukturen wie Hecken und Säumen ca. 10 Prozent der behandelten Fläche betragen [50]. Entscheidend ist es, diese Rückzugsräume durch Nutzung von Abdrift mindernder Technik und Einhaltung angemessener Abstände vor unbeabsichtigtem Eintrag von Pflanzenschutzmitteln zu schützen.

Des Weiteren sollte die für die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln zuständige EU Behörde EFSA das Bodenleben in ihren Leitfäden zur Bewertung von Pflanzenschutzmitteln im Zulassungsverfahren stärker berücksichtigen. Da Pflanzenschutzmittel sich im Boden anreichern können und dort teils auch lange nachweisbar bleiben, müssen für Bodenorganismen auch Langzeiteffekte sowie indirekte Effekte über die Nahrungskette mit in die Bewertung einfließen [20]. Beachtung sollten dabei nicht nur chemisch-synthetische Einzelsubstanzen erhalten, sondern auch in der Praxis verwendete Wirkstoffgemische sowie das selbst im

Dung bildet auf dem Boden ein eigenes Mikrohabitat, das innerhalb kürzester Zeit besiedelt wird.

Das Ausbringen von Kalk ist ein geeignetes Mittel um den versauernden Effekt von Düngemitteln auszugleichen.

Ökolandbau zugelassene Kupfer, das auch Pilze und Regenwürmer im Boden beeinträchtigt [36].

Integriertes Nährstoffmanagement

Düngung muss das Ziel haben, einen belebten und damit fruchtbaren Boden zu fördern und damit auf natürliche Weise das Wachstum von vitalen und widerstandsfähigen Kulturpflanzen zu ermöglichen [18]. Daher sollten nicht nur die Hauptnährstoffe im Fokus stehen, sondern vor allem darauf geachtet werden, dass alle Nährstoffe in einem angemessenen Verhältnis vorliegen und Schadstoffe wie Schwermetalle sich im Boden nicht anreichern. Düngung muss das Ziel haben, das Bodenleben mit ausreichend organischem Material zu versorgen, Stoffkreisläufe und Bodenstruktur dauerhaft aufrecht zu erhalten und so zur langfristigen und nachhaltigen Steigerung von Erträgen beizutragen. Organische Dünger sollten die Grundlage jeder Düngeplanung bilden, da diese die Böden mit einer großen Breite an Nährstoffen sowie organischem Material versorgen können. Wichtig ist dabei, dass Düngung bedarfsgerecht erfolgt und Überschüsse vermieden werden. Dafür ist eine regional gleichmäßige Verfügbarkeit von Wirtschaftsdüngern Voraussetzung. Die momentane Konzentration von Wirtschaftsdüngern in den Veredelungsregionen sorgt dort für eine Über- und in den übrigen Regionen für eine Unterversorgung mit organischen Düngemitteln. Eine flächengebundene Tierhaltung kann dazu beitragen, dieses Ungleichgewicht zu beseitigen [74]. Gülle und Dung sollten nur dann unverarbeitet als Wirtschaftsdünger ausgebracht werden, wenn sie

Festmist versorgt den Boden durch Dung und Streu gleich doppelt mit organischem Material.

frei von Schadstoffen wie Medikamentenrückständen sind, da sich diese erheblich auf das Bodenleben auswirken können. Belastete Wirtschaftsdünger sollten zunächst aufbereitet werden, um Schadstoffe zu entfernen, die wichtigen Nährstoffe jedoch im Kreislauf zu halten.

Landwirtschaftliche Betriebe in reinen Ackerbauregionen, ohne Zugang zu Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung, sollten den Anbau von Phosphor mobilisierenden sowie Stickstoff fixierenden Zwischenfrüchten oder Untersaaten fest in ihre Dünge- und Fruchtfolgenplanung aufnehmen [112].

Mineralische Düngemittel sollten lediglich dazu dienen, auftretende Lücken im Düngebedarf zu schließen und so eine ausgewogene Nährstoffverfügbarkeit zu gewährleisten und eine hohe Produktqualität der Kulturpflanzen zu garantieren. Dazu müssen Menge, Zusammensetzung und Zeitpunkt der Ausbringung genauestens geplant werden. Die auf dem Markt angebotenen mineralischen Düngemittel müssen Landwirtinnen und Landwirten diese Planung ermöglichen und sollten frei von schädlichen Begleitstoffen wie Schwermetallen sein, um Böden nicht langfristig damit anzureichern und das Bodenleben zu gefährden. Da der Einsatz bestimmter stickstoffhaltiger Mineraldünger sowie ein regelmäßiger Abtrag des Ernteguts ohne entsprechende Gegenmaßnahmen langfristig zu einer Versauerung der Ackerböden führen kann, ist es wichtig, den Säurehaushalt regelmäßig zu kontrollieren. Bei Bedarf kann zum Ausgleich eine ökologisch angepasste Erhaltungskalkung in die Fruchtfolgeplanung integriert werden.

Zielgenaue Applikationstechnik

Bei der Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln müssen Emissionen so gering wie möglich gehalten werden, um unbeabsichtigte Einträge in angrenzende Flächen zu verhindern und die Auswirkungen auf Nicht-Ziel-Organismen zu reduzieren. Für die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln sollten daher Geräte mit der höchsten Abdriftreduktionsklasse bevorzugt werden und die entsprechenden Einstellungen an den Geräten aktiviert sein. Die Ausbringung darf nur bei angemessener Witterung und Tageszeit erfolgen, um eventuelle Abwaschung von Blättern auf den Boden und Auswirkungen auf Bodenorganismen so gering wie mög-

Bei der Injektion kann Gülle zielgenau ausgebracht werden. Der oberirdische Zugang bleibt so aber zahlreichen Arten verwehrt.

lich zu halten. Behandlungen dürfen nur auf betroffenen Teilflächen, aber nie auf dem gesamten Schlag erfolgen. Zusätzlich sollten ausreichend breite Pufferstreifen rund um die Felder eingerichtet werden, in denen auf eine Pflanzenschutzmittelanwendung und Düngeapplikation verzichtet wird [14]. Bei Ausbringung mineralischer Düngemittel mit Düngerstreuern, sollte auf eine exakte Einstellung der Geräte geachtet werden, bevorzugt werden sollten jedoch immer Systeme, die den Dünger gezielt, gegebenenfalls direkt in der Rhizosphäre ablegen. Auch für das Ausbringen organischer Düngemittel wie Gülle sind entsprechende Techniken bereits weit verbreitet. Mit Blick auf bestimmte Bodenorganismen muss jedoch beachtet werden, dass diese bei direkter unterirdischer Platzierung keinen Zugang mehr zum organischen Material haben. Um diesen Organismen weiterhin Möglichkeit zur Eiablage zu geben, kann es hilfreich sein, einen Anteil der Düngung auf der Bodenoberfläche zu belassen [73]. Durch die zielgenaue Applikation werden die Aufwandmengen von Pflanzenschutzmitteln und Düngern reduziert, der wirtschaftliche Erfolg der Maßnahmen gesteigert und unerwünschte Auswirkungen auf Nicht-Ziel-Organismen reduziert [20, 108].

Bodenmarkt regulieren

Da Ackerland eine weltweit endliche und knappe Ressource darstellt, ist auch dessen Bedeutung auf den Kapitalmärkten in den letzten Jahren deutlich gewachsen. Für viele Investoren haben die Förderung der Bodenbiodiversität und Fruchtbarkeit keine Priorität, da diese langfristigen Investitionen keine kurzfristigen Renditen versprechen. Nach Eurostat sind heute 44 Prozent der Ackerfläche in der EU Pachtland. Kurze Pachtverträge und der damit gesetzte Fokus auf Maximalerträge fördern eine hochintensive Landbewirtschaftung [20, 106]. Agronomische Optimalerträge werden sich stattdessen an langfristigen Zielen orientieren und so Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit fördern und aufbauen. Pachtverträge mit Laufzeiten in Generationenlängen und klaren Vorschriften zum Bewahrungszustand des Ackerbodens wie beispielsweise Humusgehalt, Bodendichte oder dessen biologische Aktivität können Landwirtinnen und Landwirten darin unterstützen und bestärken, langfristig nachhaltige Wirtschafts-

Die meisten Bodenorganismen und ihre Funktionen im Ökosystem sind weit unbekannter als der Mistkäfer. Diese Wissenslücken müssen geschlossen werden.

weisen kurzfristig zu erzielenden Maximalerträgen vorzuziehen [56]. Zusätzlich müssen die bundesweiten Bemühungen verstärkt werden, den Verlust von ökologisch wertvollen Flächen und Ackerland durch Überbauung zu minimieren. Dazu müssen die bereits im Bundesbaugesetz und Bundesnaturschutzgesetz verankerten Grundsätze, mit der endlichen Ressource Boden sparsam umzugehen, in Zukunft konsequent angewandt werden. Vor einer Umwandlung in Bauland sollte immer eine Prüfung unter ökologischen Gesichtspunkten erfolgen, welche bereits erschlossenen Industrie- oder Gewerbeflächen in der Umgebung sich für eine neue Nutzung eignen, auch wenn die Kosten durch vorherigen Rückbau höher ausfallen.

Lebensraum Boden erforschen, monitoren und schützen

Bodenorganismen gehören zu den am wenigsten beachteten Organismengruppen, weshalb über eine Vielzahl der Arten keine Informationen zu Lebensweise und Bestandsentwicklung vorliegen [6–8, 88]. Mit dieser Kenntnislücke geht das Risiko einher, dass Arten in ihrem Bestand stark abnehmen oder gar aussterben, bevor diese und ihre Bedeutung für das jeweilige Ökosystem ausreichend beschrieben und untersucht wurden. Die Folgen für die Ökosysteme sind damit unüberschaubar. Folglich ist es erforderlich, bestehende Wissenslücken zu schließen und das Bodenleben wissenschaftlich zu untersuchen und zu erfassen [40]. Dazu sind geeignete Methoden weiterzuentwickeln, die sowohl die Biodiversität als auch die damit verbundenen Ökosystemleistungen erfassen [44]. Neben molekularbiologischen Methoden sollten dabei auch Leitfäden für Indikatorarten wie etwa den Regenwürmern [73] entwickelt werden, damit auch Landwirtinnen und Landwirten selbst anhand der Bodenfauna einen Eindruck von der Bodengesundheit auf ihren Ackerflächen gewinnen können. Die Basis hierfür liegt in der Ausbildung ausreichend vieler Expertinnen und Experten mit den entsprechenden taxonomischen Fähigkeiten.

Weiterhin sollten das Bodenleben und dessen große Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit bereits in der landwirtschaftlichen Ausbildung, in Berufs- und Fachschulen sowie Universitäten und Fachhochschulen einen eigenen Schwerpunkt bilden. Nur so können Landwirtinnen und Landwirten frühzeitig alle Maßnahmen zur Förderung der Bodenbiodiversität erlernen und später in die langfristige Betriebsplanung integrieren. Ebenso wichtig ist es, dass die Beratungsleistungen, die landwirtschaftliche Betriebe in Anspruch nehmen können, den Aspekt der Bodenbiodiversität und Bodenfruchtbarkeit mehr in den Fokus nehmen. Dies erfordert eine gezielte Aus- bzw. Fortbildung entsprechender Beraterinnen und Berater in diesem Themenkomplex. Auch in der breiten Öffentlichkeit ist das Leben in den Böden bisher kaum bekannt. Citizen-Science-Projekte könnten die Öffentlichkeit einbinden, für ein größeres Bewusstsein sorgen und gleichzeitig einen Beitrag dafür leisten, um das Wissen zu den Arten in den Böden zu mehren [76].

Rechtliche Grundlagen

Nach dem verfassungsrechtlichen Auftrag des Artikel 20a Grundgesetz sind die natürlichen Lebensgrundlagen für künftige Generationen zu erhalten. Dies schließt den Boden und seine Biodiversität mit ein. Dieses Staatsziel wird in verschiedenen Fachgesetzen des Bundes und der Länder umgesetzt, unter dem Aspekt der Bodenbiodiversität jedoch sehr zurückhaltend und mit eher allgemein gehaltenen Bestimmungen.

Bodenschutzrecht

Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) zielt darauf ab, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen (§ 1). Hierzu ist unter anderem Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sollen so weit wie möglich vermieden werden. Dies gilt nicht nur im Hinblick auf die Bedeutung des Bodens für den Naturhaushalt, sondern insbesondere auch als Lebensgrundlage für Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen (§ 2 Abs. 2 Nr. 1 Buchst. a BBodSchG).

In der Praxis liegt der Hauptanwendungsbereich des Bundes-Bodenschutzgesetzes jedoch eher in der Sanierung von eingetretenen schädlichen Bodenveränderungen, insbesondere hinsichtlich Altlasten und hierdurch verursachten Gewässerverunreinigungen. Beim Schutz des Bodenlebens hat das Gesetz bisher nachgeordnete Bedeutung. Dies liegt unter anderem daran, dass im Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung die ordnungsrechtliche Steuerungswirkung eher gering ausgeprägt ist und sich die staatliche Vorsorgetätigkeit auf Beratungsleistungen beschränkt.

Zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis des Bodenschutzes gehört insbesondere, dass nicht nur naturbetonte Strukturelemente der Feldflur wie Feldraine und Ackerterrassen erhalten werden, sondern auch die biologische Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolgegestaltung erhalten oder gefördert wird (§ 17 Abs. 2 S. 2 Nr. 6 BBodSchG). Eine untergesetzliche Maßstabsbildung durch Rechtsverordnung ist bislang nicht erfolgt. Die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) regelt primär den Komplex Gefahrenabwehr und Altlasten, Vorsorgemaßstäbe gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen sind auf Schadstoffe beschränkt und nicht auf die Biodiversität ausgerichtet. Die gesetzliche Vorsorgepflicht wird insbesondere durch die Einhaltung der oben genannten Anforderungen zu Strukturelementen und zur Fruchtfolge erfüllt, deren Durchsetzung bleibt mangels behördlicher Anordnungsbefugnisse aber versagt (vgl. § 17 Abs. 1 BBodSchG).

Naturschutzrecht

Angesichts der geringen Regelungstiefe des Bodenschutzrechts stellt sich die Frage, ob der Schutz des Bodenlebens zumindest vorläufig über das Naturschutzrecht erfolgen kann. Natur und Landschaft sind nach § 1 Abs. 1 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) so zu schützen, zu pflegen und zu entwickeln, dass unter anderem die biologische Vielfalt und die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts auf Dauer gesichert sind. Hierzu sind auch Böden so zu erhalten, dass sie ihre Funktion im Naturhaushalt erfüllen können (§ 1 Abs. 3 Nr. 2 BNatSchG). Die Vielfalt der Tier- und Pflanzenarten ist auch im Boden zu schützen und soweit erforderlich wiederherzustellen. Diese Zielbestimmung wird jedoch auch hier nur unzureichend instrumentell flankiert.

Bei der landwirtschaftlichen Nutzung sind neben den Anforderungen des Dünge-

Die Politik bestimmt den rechtlichen Rahmen für den Schutz des Bodens und gibt somit vor, in welche Richtung sich der Zustand der Bodenbiodiversität in Zukunft entwickeln wird.

und Pflanzenschutzrechts zwar die Grundsätze der guten fachlichen Praxis zur nachhaltigen und standortangepassten Bewirtschaftung zu beachten (§ 5 Abs. 2 BNatSchG). Diese sind aber weder naturschutzfachlich konkretisiert noch durchsetzbar. Erhebliche Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft sind vom Verursacher zwar vorrangig zu vermeiden und im Übrigen zu kompensieren. Von dieser Eingriffsregelung ist die Landwirtschaft aber in der Regel bereits ausgenommen, wenn sie den vorgenannten allgemeinen Grundsätzen entspricht (§ 14 Abs. 2 BNatSchG).

Das Naturschutzrecht schützt nicht alle Lebewesen, sondern allein Tiere und Pflanzen (sowie Flechten und Pilze, vgl. § 7 Abs. 2 Nr. 2 BNatSchG). Ein großer Teil der gesamten Biomasse der Erde, der auf sonstige unterirdisch lebende Mikroorganismen entfällt, ist somit allenfalls mittelbar erfasst. Dementsprechend kommt dem Bodenleben und den Lebensraumfunktionen des Bodens insbesondere im Arten- und Gebietsschutz keine oder eine nur untergeordnete Rolle zu. Diese Rechtsinstrumente sind offenkundig anders ausgerichtet und nicht sinnvoll auf Einzeller, Bakterien oder andere Mikroorganismen auszuweiten.

Regelungsbedarf

Eine konkretere und mehr an einer nachhaltigeren Art und Weise der Landbewirtschaftung ausgerichtete Definition der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft könnte einen deutlichen Beitrag zum Schutz der Biodiversität auch in den Böden der Agrarlandschaft leisten [59]. Auf nationaler Ebene sind hierzu allerdings bislang keine Regelungsinitiativen erkennbar und ohne europäische Impulse wohl auch nicht zu erwarten. Im Unionsrecht ist der Boden das einzige Umweltmedium, das nicht durch eine eigene Richtlinie geschützt ist. Nach einem in Jahr 2006 von den Mitgliedsstaaten abgelehnten Vorschlag für eine europäische Boden-Rahmenrichtlinie legte die EU-Kommission nun im November 2020 zur Umsetzung der EU-Biodiversitätsstrategie eine Roadmap für eine neue Strategie zum Schutz des Bodens zur öffentlichen Konsultation vor [29]. Dieser Prozess sollte genutzt werden, um den Boden als Lebensraum besser als bislang zu schützen

Gleich sechs der von den Vereinten Nationen (UN) verabschiedeten Sustainable Development Goals (SDGs) hängen direkt von einem aktiven und diversen Bodenleben ab.

Politische Verpflichtungen

Die UN-Konvention über die biologische Vielfalt (CBD) beinhaltet die zwanzig sogenannten Aichi-Ziele zum weltweiten Schutz von Arten und Ökosystemen. Keines dieser Ziele wurde bis zum Fristende im Jahr 2020 von den Vertragsstaaten erreicht [104]. Damit dies in Zukunft gelingt, identifiziert die CBD die Notwendigkeit einer nachhaltigeren Landwirtschaft unter Berücksichtigung der biologischen Vielfalt als einen der Schlüsselfaktoren. Die Rolle der Bodenbiodiversität wird da-

bei explizit benannt [104]. Der Zustand des Bodens und der Bodenbiodiversität beeinflusst ebenso die 17 UN-Nachhaltigkeitsziele, die in der Agenda 2030 der Vereinten Nationen verabschiedet wurde.

Politische Verpflichtungen und Strategien zum Schutz der Biodiversität gibt es auch auf europäischer und nationaler Ebene. Die Ende 2019 veröffentlichte Wachstumsstrategie der Europäischen Kommission, der „European Green Deal“, verfolgt unter anderem das Ziel, den Verlust der biologischen Vielfalt zu stoppen und umzukehren. Hieraus gehen zwei weitere Strategien hervor, die maßgeblich die Landwirtschaft und die von ihr betroffene biologische Vielfalt, also auch die Bodenbiodiversität, adressieren: die EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 [27] und die „Farm to Fork“-Strategie [28]. Ein gemeinsames Ziel dieser beiden EU-Strategien ist die Reduzierung von Nährstoffverlusten bei gleichbleibender Bodenfruchtbarkeit. Die EU-Biodiversitätsstrategie erkennt zudem den Boden als eines der komplexesten Ökosysteme an, das mit seiner enormen Vielfalt an Organismen sowohl für die Gesundheit des Menschen als auch für die Erzeugung von Lebensmitteln von entscheidender Bedeutung ist.

Für den Schutz der Bodenbiodiversität ist in Deutschland neben der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, auch das Aktionsprogramm Insektenschutz (API) von Bedeutung [14]. Das API fordert unter anderem explizit den Erhalt und die Förderung der Bodenbiodiversität und schlägt dafür zum Beispiel reduzierte Bodenbearbeitung, Mistwirtschaft und Weidehaltung, humusmehrende Bewirtschaftung und eine durchgehende Bodenbedeckung vor [14]. Die Umsetzung der meisten notwendigen Maßnahmen liegt bei den Landwirtinnen und Landwirten. Auch wenn die Betriebe langfristig von einer verbesserten Bodenfruchtbarkeit direkt profitieren, können einige Maßnahmen kurzfristig zu Ertragsminderungen und somit zu finanziellen Verlusten führen. Wenn landwirtschaftliche Betriebe in das Allgemeingut Bodenbiodiversität investieren, sollte dies aufgrund definierter Maßnahmen auch durch öffentliche Gelder fördertechnisch unterstützt werden [65].

Förderung und Finanzierung

Die EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 sieht vor, den Schutz des Bodens auch im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) zu gewährleisten [27]. Dies soll unter anderem über die Einführung und Förderung nachhaltiger Bodenbewirtschaftungsverfahren ermöglicht werden. Die GAP ist das einflussreichste Instrument in Bezug auf den Schutz des Bodens in der Landwirtschaft. Zurzeit ist sie außerdem das finanziell am besten ausgestattete Förderinstrument sowie das wichtigste Finanzierungsinstrument für die biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft. Daher kommt ihr beim Erreichen der EU-weiten Verpflichtungen zum Schutz und Erhalt der (Boden-)Biodiversität eine besondere Rolle zu. Der Anteil der Finanzmittel, Maßnahmen und Regelungen zum Schutz und zur Förderung der Bodenbiodiversität in der GAP ist jedoch bislang marginal [92]. Der dringend notwendige Paradigmenwechsel in der Agrarpolitik, der die konsequente Berücksichtigung der Belange des Umwelt- und des Naturschutzes als öffentliche Leistungen anerkennt und fördert, muss explizit auch das Medium mit einbeziehen bzw. über den Schutz vor stofflichen Einträgen und die Vermeidung von Bodenerosion hinausgehen [75].

Der Schutz und die Förderung der Bodenbiodiversität in landwirtschaftlich genutzten Böden muss zu einer Priorität im Rahmen der GAP werden, um viele auch für die

Produktion wichtige Ökosystemleistungen zu bewahren. Dies betrifft die erste und die zweite Säule des derzeitigen agrarpolitischen Modells der GAP gleichermaßen.

Die Verhandlungen zur Ausgestaltung der GAP ab 2023 sind auf EU-Ebene bereits weit fortgeschritten. Da ein besonderer Schutz des Bodens darin fehlt müssen die Spielräume zur Gestaltung des nationalen GAP-Strategieplans genutzt werden. Dort wird festgelegt, wie Deutschland in der kommenden Förderperiode die neun spezifischen Ziele der GAP erreichen will. Eines von ihnen zielt explizit auf den „Schutz der Biodiversität, die Verbesserung von Ökosystemleistungen und den Erhalt von Lebensräumen und Landschaften“ ab. Zudem sollen die Strategiepläne aller Mitgliedstaaten, also auch der deutsche, die Ziele des europäischen Grünen Deals, der EU Biodiversitätsstrategie für 2030 und der Strategie vom Hof auf den Tisch vollständig wiederspiegeln. Eine Erfüllung der genannten politischen Verpflichtungen und ein Erreichen der Ziele der einschlägigen EU Strategien sind ohne die Berücksichtigung der Bodenbiodiversität im nationalen GAP Strategieplan nicht möglich.

Im Rahmen der Konditionalität der ersten Säule bedeutet dies, dass die Einhaltung nachhaltiger Maßnahmen und Bewirtschaftungsstandards mit besonderer Berücksichtigung des Bodenlebens Voraussetzungen für alle Betriebe sein muss, die Direktzahlungen beziehen.

Es ist daher zum jetzigen Zeitpunkt notwendig, insbesondere die Umsetzung der vorgesehenen Standards zum „Guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand“ (GLÖZ) mit einem ausreichenden Ambitionsniveau festzulegen. Unter Berücksichtigung der direkten Auswirkungen auf das Bodenleben sollten die zukünftigen GLÖZ Standards die folgenden Punkte abdecken:

Förderung und Schutz des Bodenlebens sind Investitionen, die sich langfristig auszahlen.

- Dauergrünlandschutz ist Bodenschutz: Der Erhalt von Dauergrünland muss auf einem hohen Niveau gesichert werden. Das Umbruchs- und Umwandlungsverbot für Dauergrünland muss über Natura-2000-Gebiete hinaus auch weitere Grünlandstandorte mit hohem Naturschutzwert einbeziehen. Zudem sollte eine feste Stichtagsregelung eingeführt werden, um Umbrüche von potenziellem Dauergrünland auf Grund der 5-Jahres-Regel für Dauergrünland zu verhindern und so einen höheren Anteil an Grünland in der Landschaft zu sichern.
- Nachhaltiger Schutz organischer Böden: Um das Bodengefüge auf diesen besonderen Standorten zu bewahren müssen Neuanlagen von Entwässerungen und Vertiefungen in Zukunft ausgeschlossen werden.
- Effektiver Erosionsschutz: In erosionsgefährdeten Gebieten sollte ein Gebot zu konservierender Bodenbearbeitung etabliert und wendende Bodenbearbeitung ausgeschlossen werden.
- Keine vegetationslosen Böden: Ein Gebot des Zwischenfruchtanbaus oder Kulturen mit einer Untersaat die

überjährig verbleibt, muss angestrebt werden. Einsaat-Brache bzw. selbstbegrünte Brache, Schwarz- und Stoppelbrache sollte dort, wo es für den Artenschutz fachlich sinnvoll ist, wegen der positiven ökologischen Effekte für die unterirdische und oberirdische Biodiversität weiterhin erlaubt bleiben.

- Fruchtfolgen sind mit mindestens fünf Gliedern zu gestalten: Mindestens ein Fruchtfolgeglied sollte dabei eine Leguminose, tiefwurzelnde-, oder überjährig wachsende Pflanze sein.
- Nichtproduktive Areale in der Fläche sichern Überwinterungs- und Ausweichhabitate für Bodenorganismen: Mindestens 10 Prozent aller landwirtschaftlich genutzten Flächen müssen auf Betriebsebene für nichtproduktive Landschaftselemente oder Bereiche bereitgestellt werden, um die Leistungsfähigkeit der Agrarökosysteme aufrechtzuerhalten.

Die aufgelisteten Anforderungen bilden die Grundlage einer nachhaltigen, zukunftssichernden Wirtschaftsweise und sollten daher auch nicht separat gefördert werden, wie es derzeit teilweise über die Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK) bzw. über die im ELER-geförderten Maßnahmen der Bundesländer der Fall ist. Die somit freiwerdenden Finanzmittel stehen dann für gezieltere biodiversitätsfördernde Maßnahmen zur Verfügung und leisten dadurch einen höheren Beitrag zu Erhalt und Förderung der biologischen Vielfalt.

Bezüglich der sogenannten Eco-Schemes (Öko-Regelungen) der ersten Säule der GAP müssen den Landwirtinnen und Landwirten ökologisch sinnvolle und finanziell attraktiv untersetzte Maßnahmen angeboten werden, von denen auch die biologische Vielfalt in Böden des Acker- und Grünlands profitiert. Über die Eco-Schemes sollte die Förderung der Ökologischen Landwirtschaft, eine über die Anforderungen der GLÖZ hinausgehende Ausweitung des Anteils nichtproduktiver Flächen, inklusive Hecken und Feldgehölze, sowie die Anlage von vorzugsweise mehrjährigen Flächen oder Streifenelementen (Blüh-, Schutz-, Schon und Randstreifen) auf Acker und Grünland ermöglicht werden. Für Letztere eignen sich insbesondere Blühflächen auf Grundlage von Regiosaatgut. Diese Flächen sollten ohne oder mit reduzierter Düngung sowie dem Verzicht auf chemische Pflanzenschutz-

Die Bewahrung des Dauergrünlands vor Umbruch hat für den Schutz des Bodenlebens große Bedeutung.

mittel auskommen. Mehrjährige Blühflächen können auf Grund der Bodenruhe einen besonders hohen ökologischen Wert haben und sollten bevorzugt werden. Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUKM) aus der 2. Säule, die speziell auf eine Förderung des Bodenlebens abzielen, müssen entwickelt und in die Förderprogramme integriert werden. Diese sind nach Möglichkeit so zu gestalten, dass sie auch über die nationale Förderrichtlinie der GAK kofinanzierbar sind, um nicht nur den finanzstärkeren, sondern allen Bundesländern eine Implementierung zu ermöglichen. Solche Maßnahmen wären gleich in zweierlei Hinsicht wirksam, da die meisten Aktivitäten zur Förderung der Bodenbiodiversität in landwirtschaftlich genutzten Böden sich auch positiv auf deren Bindungsvermögen des klimaschädlichen Kohlendioxids auswirken.

Eine umfassende landwirtschaftliche Betriebsberatung, die auch den Schutz des Bodens als Lebensraum für eine Vielzahl an Organismen berücksichtigt, muss ebenfalls über die 2. Säule der GAP gefördert werden. Zudem sollten Investitionsprogramme Landwirtinnen und Landwirten bei der Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitungstechnik und deren Anschaffung unterstützen. Dies soll auch eine Reduzierung des Herbizidmittelaufwands ermöglichen. Beide Maßnahmen kommen dem Querschnittsziel der neuen GAP nach einer „Förderung von Wissen, Innovation und Digitalisierung in der Landwirtschaft“ nach.

Neben der direkten Förderung von Landwirtinnen und Landwirten muss die angewandte Forschung und Entwicklung im Bereich der Bodenbiodiversität ausgeweitet werden, um die bestehenden Wissenslücken zu im Boden lebenden Arten und deren Funktionen im Ökosystem zu schließen [65]. Dabei sollte eine Kombination verschiedener Forschungsansätze umgesetzt werden, die von gezielten kleinräumigen Kooperationen, über Leuchtturmprojekte und größeren Modellregionen besonders den Ansatz der sogenannten „Living Labs“ als Kooperation zwischen Wissenschaft und Zivilgesellschaft umfasst. Die Entwicklung Bodenlebenfördernder Ackerbausysteme und Landtechnik muss mit entsprechenden Forschungsbudgets ausgestattet werden, um es den landwirtschaftlichen Betrieben in Zukunft zu ermöglichen, die Bodenbiodiversität bei der Bewirtschaftung ihrer Flächen stärker in den Fokus zu setzen. Forschungsergebnisse müssen entsprechend schnell und anwenderorientiert zur Verfügung gestellt werden.

Maßnahmenübersicht zur Förderung des Bodenlebens

Die Förderung des Bodenlebens muss stärker als Aufgabe des Naturschutzes verankert und als zentrales Element der Bodenfruchtbarkeit wieder zum integrierten Produktionsziel der Landwirtschaft erklärt werden. Ganz im Sinne eines integrierten Pflanzenbaues sollen folgende Maßnahmen als Bausteine eines die Bodenbiodiversität fördernden standortspezifischen Ackerbausystems verstanden werden, in dem die verschiedenen Komponenten ineinandergreifen und sich gegenseitig positiv verstärken.

Bodenbearbeitung:

- Einsatz konservierender Bodenbearbeitungsverfahren
- Entkopplung von Direkt- und Mulchsaatsystemen von der Verwendung breit wirkender Herbizide
- Verwendung energieeffizienter, leichter und bodenschonender Landtechnik

Kulturführung:

- vielfältige Fruchtfolgen mit standortangepassten Sorten
- ganzjährige Bodenbedeckung durch Anbau von diversen Zwischenfruchtmischungen
- Einsatz von blühenden Untersaaten
- Ausbau der Verwendung mehrjähriger Kulturen
- Erhalt des Bodenlebens und der Bodenfruchtbarkeit als Bestandteil von Pachtverträgen
- Schutz vor Versiegelung landwirtschaftlich genutzter und ökologisch hochwertiger Böden

Integriertes Nährstoffmanagement:

- Sicherstellung der Versorgung des Bodenlebens mit ausreichend organischer Substanz
- Präferierung organischer vor mineralischer Düngung
- Ausgleich von Nährstoffbilanzen
- Orientierung der Ausbringzeitpunkte an der jeweiligen Kulturpflanze
- Einsatz verlustarmer Ausbringtechnik mit teilweise offenem Zugang zur Besiedelung von organischen Düngemitteln
- Stärkung regionaler Nährstoffkreisläufe durch flächengebundene Tierhaltung
- Anlage von möglichst mehrjährigen Ackerrandstreifen, ohne Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln
- Ausschluss einer Kontamination durch Düngemittel (Schwermetalle, Antiparasitika, Antibiotika, Krankheitserreger), Einpferchen behandelter Weidetiere, Aufarbeitung belasteter Gülle

Integrierter Pflanzenschutz:

- konsequente Einhaltung der Leitlinien des integrierten Pflanzenschutzes und dementsprechend Einsatz synthetischer Pflanzenschutzmittel nur als letztes Mittel der Wahl
- Förderung natürlicher Nützlinge, auch unter den Bodenorganismen als Bestandteil des Pflanzenschutzes
- Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nur unter Einhaltung ökologischer Schadschwellen
- Kompensation biodiversitätsschädigender Effekte durch Einrichtung von für den Naturschutz wertvollen Refugialflächen
- Ausbringung von Pestiziden nur nach Bestandsschluss und entsprechender Witterung, um unnötige Einträge in den Boden zu verringern
- Einrichten von Ackerrandstreifen, ohne Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln

Integration und Vernetzung von Landschaftselementen

- Landschaftsangepasste Begrenzung von Schlaggrößen
- Integration dauerhafter Struktur- und Landschaftselemente in landschaftliche Zusammenhänge
- Vernetzung von Landschaftselementen und Biotopen

Forschung, Monitoring und Bildung

- Schließen von Wissenslücken zu in Böden lebenden Arten und deren Ökosystemleistungen
- Identifikation geeigneter Indikatorarten für den Zustand des Bodenlebens sowie deren Integration in nationale Monitoringprogramme in der Agrarlandschaft
- Ausbau der Budgets für angewandte Forschung und Entwicklung im Bereich Bodenbiodiversität und Landwirtschaft
- bessere Integration der Bedeutung und Förderung von Bodenorganismen in die landwirtschaftliche Ausbildung

Politische Förderung, Finanzierung und Implementierung

- Beachtung der Bodenbiodiversität bei der Formulierung grundsätzlicher Vorgaben im Rahmen der Konditionalität für die Inanspruchnahme agrarpolitischer Fördermittel
- Ausbau und Entwicklung bodenbiodiversitätsfördernder Maßnahmen unter Berücksichtigung von Synergien bestehender Förderprogramme zum Boden-, Klima- und Artenschutz
- Sicherstellung von verfügbaren Finanzmitteln in ausreichender Höhe für Förderprogramme und Maßnahmen, inkl. Beratungsangeboten, mit starkem Bezug zur Bodenbiodiversität für alle Bundesländer und Regionen
- stärkere Förderung von Investitionen in bodenlebenfördernde Landtechnik, z.B. über investiven Naturschutz in der GAK

Literaturverzeichnis

[1] Amossé, C., Jeuffroy, M.-H., Celette, F., and David, C. 2013. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production. *European Journal of Agronomy* 49, 158–167.

[2] Bardgett, R. D., Freeman, C., and Ostle, N. J. 2008. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME journal* 2, 8, 805–814.

[3] Bardgett, R. D. and van der Putten, W. H. 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515, 7528, 505–511.

[4] Barrios, E. 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64, 2, 269–285.

[5] Bender, S. F., Wagg, C., and van der Heijden, M. G. A. 2016. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends in ecology & evolution* 31, 6, 440–452.

[6] BfN. 2011. *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands - Wirbellose Tiere (Teil 1)*. Naturschutz und biologische Vielfalt 70,3. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

[7] BfN. 2016. *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands - Wirbellose Tiere (Teil 2)*. Naturschutz und biologische Vielfalt 70,4. Bundesamt für Naturschutz; BfN-Schriftenvertrieb Leserservice im Landwirtschaftsverlag GmbH, Bonn-Bad Godesberg, Münster.

[8] BfN. 2018. *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands - Pflanzen*. Naturschutz und biologische Vielfalt Band 70,7. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

[9] Boag, B. and Yeates, G. W. 2001. The potential Impact of the New Zealand Flatworm, A Predator fo Erathworms, in Western Europe. *Ecological Applications* 11, 5, 1276–1286.

[10] Bolan, N. S. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant Soil* 134, 2, 189–207.

[11] Bonilla, I. and Bolaños, L. 2009. Mineral Nutrition for Legume-Rhizobia Symbiosis: B, Ca, N, P, S, K, Fe, Mo, Co, and Ni: A Review. In *Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants*. *Organic farming, pest control and remediation of soil pollutants*, E. Lichtfouse, Ed. Sustainable Agriculture Reviews 1. Springer Netherlands, Dordrecht, 253–274. DOI=10.1007/978-1-4020-9654-9_13.

[12] Boutin, C., Aya, K. L., Carpenter, D., Thomas, P. J., and Rowland, O. 2012. Phytotoxicity testing for herbicide regulation: shortcomings in relation to biodiversity and ecosystem services in agrarian systems. *The Science of the total environment* 415, 79–92.

[13] Briones, M. J. I. and Schmidt, O. 2017. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global change biology* 23, 10, 4396–4419.

[14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. 2019. *Aktionsprogramm Insektenschutz*. *Gemeinsam wirksam gegen das Insektensterben*, Berlin.

[15] Castro, H. F., Classen, A. T., Austin, E. E., Norby, R. J., and Schadt, C. W. 2010. Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers. *Applied and environmental microbiology* 76, 4, 999–1007.

[16] Chaplin-Kramer, R., Sharp, R. P., Weil, C., Bennett, E. M., Pascual, U., Arkema, K. K., Brauman, K. A., Bryant, B. P., Guerry, A. D., Haddad, N. M., Hamann, M., Hamel, P., Johnson, J. A., Mandle, L., Pereira, H. M., Polasky, S., Ruckelshaus, M., Shaw, M. R.,

Silver, J. M., Vogl, A. L., and Daily, G. C. 2019. Global modeling of nature's contributions to people. *Science (New York, N.Y.)* 366, 6462, 255–258.

[17] Chauhan, B. S., Gill, G. S., and Preston, C. 2006. Tillage system effects on weed ecology, herbicide activity and persistence: a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 46, 12, 1557.

[18] Collette, L. 2011. *Save and grow*. *A policymaker's guide to the sustainable intensification of smallholder crop production*. FAO, Rome.

[19] Corsi, S. 2019. *Conservation Agriculture*. *Training guide for extension agents and farmers in Eastern Europe and Central Asia*, Rom.

[20] Courvoisier, T. J. 2018. *Opportunities for soil sustainability in Europe*. Science advice for the benefit of Europe 36. EASAC Secretariat Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale).

[21] Darwin, C. 1983. *Die Bildung der Ackererde durch die Tätigkeit der Würmer mit Beobachtung über deren Lebensweise*. März-Verlag, Berlin.

[22] Destatis. 2019. *Teures Acker- und Weideland: Kaufwerte für Agrarland erhöhen sich seit 2009 auf das 2,3-Fache*. *Pressemitteilung*.

[23] Díaz, S., Settele, J., and Brondízio, E. 2019. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. ADVANCE UNEDITED VERSION. IPBES.

[24] Die Bundesregierung. 2016. *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. *Kabinettbeschluss vom 11. Januar 2017*.

[25] Dybzinski, R., Fargione, J. E., Zak, D. R., Fornara, D., and Tilman, D. 2008. Soil fertility increases with plant species diversity in a long-term biodiversity experiment. *Oecologia* 158, 1, 85–93.

[26] Europäische Kommission. 2006. *Thematische Strategie für den Bodenschutz*. *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*, Brüssel.

[27] Europäische Kommission. 2020. *EU Biodiversity Strategy for 2030*. *Bringing nature back into our lives*.

[28] Europäische Kommission. 2020. *Farm to Fork Strategy*. *For a fair, healthy and Environmentally-friendly food system*, Brüssel.

[29] Europäische Kommission. 2020. *Gesunde Böden – eine neue Bodenstrategie der EU*. *Roadmap - Have Your Say*.

[30] European Academies Science Advisory Council and Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina. 2015. *Ecosystem services, agriculture and neonicotinoids*. Building science into EU policy 26. EASAC Secretariat Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale).

[31] F. Emde, B. Jessel, R. Schedlbauer, and D. Wolf. 2015. *Artenschutz-Report 2015*. *Tiere und Pflanzen in Deutschland*. BfN, Bonn.

[32] Fachbeirat für Nachhaltigen Pflanzenbau beim BVL. 2019. *Mehr Verunkrautung wagen*. *Plädoyer für einen Perspektivwechsel in der Unkrautbekämpfung im Ackerbau*. BVL, Braunschweig.

[33] FAO. 2014. *The international code of conduct on pesticide management*. *IOMC, The Inter-Organization Programme For The Sound Management of Chemicals*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

[34] FAO. 2017. *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management Food and Agriculture Organization of the United Nations*. FAO, Rome.

[35] FAO. 2019. *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Assessments / FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. FAO Commission on genetic resources for food and agriculture assessments, Rome.

[36] FAO and ITPS. 2017. *Global assessment of the impact of plant protection products on soil functions and soil ecosystem*. FAO, Rome.

[37] Gabor, V., Timus, A., Mariam, C., Gayane, A., Vardan, T., Zsuzsanna, H., Andrea, V., and Avetik, N. 2017. *Integrated pest management*. *of major pests and diseases in eastern Europe and the Caucasus*.

[38] Gabriel, J. L., Garrido, A., and Quemada, M. 2013. Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: Linking economic and environmental analysis. *Agricultural Systems* 121, 23–32.

[39] Garbeva, P., van Veen, J. A., and van Elsas, J. D. 2004. Microbial diversity in soil: selection microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. *Annual review of phytopathology* 42, 243–270.

[40] Gardi, C., Montanarella, L., Arrouays, D., Bispo, A., Lemanceau, P., Jolivet, C., Mulder, C., Ranjard, L., Römbke, J., Rutgers, M., and Menta, C. 2009. Soil biodiversity monitoring in Europe: ongoing activities and challenges. *European Journal of Soil Science* 60, 5, 807–819.

[41] Geisen, S., Wall, D. H., and van der Putten, W. H. 2019. Challenges and Opportunities for Soil Biodiversity in the Anthropocene. *Current biology : CB* 29, 19, R1036-R1044.

[42] Giller, K. E., Beare, M. H., Lavelle, P., Izac, A.-M., and SWIFT, M. J. 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology* 6, 1, 3–16.

[43] Gryndler, M., Larsen, J., Hršelová, H., Řezáčová, V., Gryndlerová, H., and Kubát, J. 2006. Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. *Mycorrhiza* 16, 3, 159–166.

[44] Guerra, C. A., Heintz-Buschart, A., Sikorski, J., Chatzinotas, A., Guerrero-Ramírez, N., Cesarz, S., Beaumelle, L., Rillig, M. C., Maestre, F. T., Delgado-Baquerizo, M., Buscot, F., Overmann, J., Patoine, G., Phillips, H. R. P., Winter, M., Wubet, T., Küsel, K., Bardgett, R. D., Cameron, E. K., Cowan, D., Grebenc, T., Marín, C., Orgiazzi, A., Singh, B. K., Wall, D. H., and Eisenhauer, N. 2020. Blind spots in global soil biodiversity and ecosystem function research. *Nature communications* 11, 1, 3870.

[45] Gullberg, E., Cao, S., Berg, O. G., Ilbäck, C., Sandegren, L., Hughes, D., and Andersson, D. I. 2011. Selection of resistant bacteria at very low antibiotic concentrations. *PLoS pathogens* 7, 7, e1002158.

[46] Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., and Kroon, H. de. 2017. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS one* 12, 10, e0185809.

[47] Hansen, S. and Engelstad, F. 1999. Earthworm populations in a cool and wet district as affected by tractor traffic and fertilisation. *Applied Soil Ecology* 13, 3, 237–250.

[48] Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., and Ahmed, I. 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann Microbiol* 60, 4, 579–598.

[49] Heinrich Böll Stiftung, IASS Potsdam, BUND, and Le Monde diplomatique. 2015. *Bodenatlas*. *Daten und Fakten über Acker, Land und Erde*.

[50] Hermann, H., Carsten, B., Constanze, B., and Rainer, O. 2018. *Biodiversitätsflächen zur Minderung der Umweltauswirkungen von Pflanzenschutzmitteln*. *Anforderungen an Kompensationsmaßnahmen im Risikomanagement*.

[51] Heywood, V. H. and Watson, R. T. 1995. *Global biodiversity assessment*. Cambridge university press Cambridge.

[52] Hooper, D. 2000. Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks. *BioScience*.

[53] Iglesias, L. E., Saumell, C. A., Fernández, A. S., Fusé, L. A., Lifschitz, A. L., Rodríguez, E. M., Steffan, P. E., and Fiel, C. A. 2006. Environmental impact of ivermectin excreted by cattle treated in autumn on dung fauna and degradation of faeces on pasture. *Parasitology Research* 100, 1, 93.

[54] IPCC. 2019. *IPCC-Sonderbericht über Klimawandel und Landsysteme (SRCCL)*. *Hauptaussagen des IPCC-Sonderberichts über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasflüsse in terrestrischen Ökosystemen*.

[55] IPCC, C. C. 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA* 996, 2007.

[56] Isbell, F., Gonzalez, A., Loreau, M., Cowles, J., Díaz, S., Hector, A., Mace, G. M., Wardle, D. A., O'Connor, M. I., Duffy, J. E., Turnbull, L. A., Thompson, P. L., and Larigauderie, A. 2017. Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. *Nature* 546, 7656, 65–72.

[57] IVA Magazin. 2005. *Der Boden lebt*, online.

[58] Jacobs, A., Flessa, H., Don, A., Heidkamp, A., Prietz, R., Dechow, R., Gensior, A., Poeplau, C., Riggers, C., Schneider, F., Tiemeyer, B., Vos, C., Wittnebel, M., Müller, T., Säurich, A., Fahrion-Nitschke, A., Gebbert, S., Hopfstock, R., Jaconi, A., Kolata, H., Lorbeer, M., Schröder, J., Laggner, A., Weiser, C., and Freibauer, A. 2018. *Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland*. *Ergebnisse der Bodenzustandserhebung*. Thünen Report 64. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Germany.

[59] Jessel, B. 2019. *Umweltwirkungen der Landwirtschaft – Förderung versus Ordnungsrecht, Naturschutz auch auf landwirtschaftlich genutzten Flächen*. *Dokumentation zur 43. wissenschaftlichen Fachtagung der Gesellschaft für Umweltrecht e.V*, Leipzig.

[60] Jones, D. L. and Hinsinger, P. 2008. The rhizosphere: complex by design. *Plant Soil* 312, 1-2, 1–6.

[61] Karigar, C. S. and Rao, S. S. 2011. Role of microbial enzymes in the bioremediation of pollutants: a review. *Enzyme research* 2011, 805187.

[62] Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., and Pretty, J. 2009. The spread of Conservation Agriculture: justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7, 4, 292–320.

[63] Kladivko, E. J. 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research* 61, 1-2, 61–76.

[64] Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt. 2013. *12 notwendige Schritte auf dem Weg zum Schutz fruchtbarer Böden und zur Reduzierung des Flächenverbrauchs*. *Ergebnisse der KBU-Veranstaltung "Wie viel Boden brauchen wir?"*, Dessau.

[65] Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt. 2020. *Boden und Biodiversität*. *Forderungen an die Politik*, Dessau-Roßlau.

[66] Lillak, R., Ed. 2005. *Integrating efficient grassland farming and biodiversity*. *Proceedings of the 13th International Occasional Symposium of the European Grassland Federation, Tartu, Estonia ; 29 - 31 August 2005*. Grassland science in Europe 10. British Grassland Society, Reading.

[67] Mallinger, R. E., Franco, J. G., Prischmann-Voldseth, D. A., and Prasifka, J. R. 2019. Annual cover crops for managed and wild bees: Optimal plant mixtures depend on pollinator enhancement goals. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 273, 107–116.

[68] Meyer, S., Bergmeier, E., Becker, T., Wesche, K., Krause, B., and Leuschner, C. 2015. Detecting long-term losses at the plant community level - arable fields in Germany revisited. *Appl Veg Sci* 18, 3, 432–442.

[69] Miransari, M. 2011. Soil microbes and plant fertilization. *Applied microbiology and biotechnology* 92, 5, 875–885.

[70] Nabel, M., Schrey, S. D., Poorter, H., Koller, R., and Jablonowski, N. D. 2017. Effects of digestate fertilization on Sida hermaphrodita : Boosting biomass yields on marginal soils by increasing soil fertility. *Biomass and Bioenergy* 107, 207–213.

[71] Nabel, M., Selig, C., Grunewald, R., and Stolpe, G. 2018. *11 Punkte für einen gemeinsamen Weg zu mehr Biodiversität im Ackerbau*. *Ergebnisse der interdisziplinären Tagung „Naturschutz und Landwirtschaft im Dialog – Biodiversität im Ackerbau“*, Vilm.

[72] Nielsen, U. N., Ayres, E., Wall, D. H., and Bardgett, R. D. 2011. Soil biodiversity and carbon cycling: a review and synthesis of studies examining diversity-function relationships. *European Journal of Soil Science* 62, 1, 105–116.

[73] Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., and Barrios, E., Eds. 2016. *Global soil biodiversity atlas*. *Supporting the EU Biodiversity Strategy and the Global Soil Biodiversity Initiative: preserving soil organism through sustainable land management practices and environmental policies for the protection and enhancement of ecosystem services. Global soil biodiversity initiative*.

[74] Osterburg, B. 2014. Schutz landwirtschaftlicher Böden vor Überdüngung. In *Handbuch der Bodenkunde*, H.-P. Blume, K. Stahr, W. Fischer, G. Guggenberger, R. Horn, H.-G. Frede and P. Felix-Henningsen, Eds. Wiley online library. Wiley-VCH, Weinheim, 1–28. DOI=10.1002/9783527678495.hbbk2015005.

[75] Pe'er, G., Bonn, A., Bruelheide, H., Dieker, P., Eisenhauer, N., Feindt, P. H., Hagedorn, G., Hansjürgens, B., Herzon, I., Lomba, Â., Marquard, E., Moreira, F., Nitsch, H., Oppermann, R., Perino, A., Röder, N., Schleyer, C., Schindler, S., Wolf, C., Zinngrebe, Y., and Lakner, S. 2020. Action needed for the EU Common Agricultural Policy to address sustainability challenges. *People and nature (Hoboken, N.J.)* 2, 2, 305–316.

[76] Pettibone, L., Vohland, K., and Bonn, A. *Citizen Science für alle*. *Eine Handreichung für Citizen Science-Beteiligte*.

[77] Phillips, H. R. P., Cameron, E. K., Ferlian, O., Türke, M., Winter, M., and Eisenhauer, N. 2017. Red list of a black box. *Nature ecology & evolution* 1, 4, 103.

[78] Phillips, H. R. P., Guerra, C. A., Bartz, M. L. C., Briones, M. J. I., Brown, G., Crowther, T. W., Ferlian, O., Gongalsky, K. B., van den Hoogen, J., Krebs, J., Orgiazzi, A., Routh, D., Schwarz, B., Bach, E. M., Bennett, J., Brose, U., Decaëns, T., König-Ries, B., Loreau, M., Mathieu, J., Mulder, C., van der Putten, W. H., Ramirez, K. S., Rillig, M. C., Russell, D., Rutgers, M., Thakur, M. P., Vries, F. T. de, Wall, D. H., Wardle, D. A., Arai, M., Ayuke, F. O., Baker, G. H., Beauséjour, R., Bedano, J. C., Birkhofer, K., Blanchart, E., Blossey, B., Bolger, T., Bradley, R. L., Callaham, M. A., Capowiez, Y., Caulfield, M. E., Choi, A., Crotty, F. V., Dávalos, A., Cosin, D. J. D., Dominguez, A., Duhour, A. E., van Eekeren, N., Emmerling, C., Falco, L. B., Fernández, R., Fonte, S. J., Fragoso, C.,

Franco, A. L. C., Fugère, M., Fusilero, A. T., Gholami, S., Gundale, M. J., López, M. G., Hackenberger, D. K., Hernández, L. M., Hishi, T., Holdsworth, A. R., Holmstrup, M., Hopfensperger, K. N., Lwanga, E. H., Huhta, V., Hurisso, T. T., Iannone, B. V., Iordache, M., Joschko, M., Kaneko, N., Kanianska, R., Keith, A. M., Kelly, C. A., Kernecker, M. L., Klaminder, J., Koné, A. W., Kooch, Y., Kukkonen, S. T., Lalthanzara, H., Lammel, D. R., Lebedev, I. M., Li, Y., Lidon, J. B. J., Lincoln, N. K., Loss, S. R., Marichal, R., Matula, R., Moos, J. H., Moreno, G., Morón-Ríos, A., Muys, B., Neirynck, J., Norgrove, L., Novo, M., Nuutinen, V., Nuzzo, V., Rahman P, M., Pansu, J., Paudel, S., Pérès, G., Pérez-Camacho, L., Piñeiro, R., Ponge, J.-F., Rashid, M. I., Rebollo, S., Rodeiro-Iglesias, J., Rodríguez, M. Á., Roth, A. M., Rousseau, G. X., Rozen, A., Sayad, E., van Schaik, L., Scharenbroch, B. C., Schirrmann, M., Schmidt, O., Schröder, B., Seeber, J., Shashkov, M. P., Singh, J., Smith, S. M., Steinwandter, M., Talavera, J. A., Trigo, D., Tsukamoto, J., Valença, A. W. de, Vanek, S. J., Virto, I., Wackett, A. A., Warren, M. W., Wehr, N. H., Whalen, J. K., Wironen, M. B., Wolters, V., Zenkova, I. V., Zhang, W., Cameron, E. K., and Eisenhauer, N. 2019. Global distribution of earthworm diversity. *Science (New York, N.Y.)* 366, 6464, 480–485.

[79] Pimentel, D. and Kounang, N. 1998. Ecology of Soil Erosion in Ecosystems. *Ecosystems* 1, 5, 416–426.

[80] Pisa, L., Goulson, D., Yang, E.-C., Gibbons, D., Sánchez-Bayo, F., Mitchell, E., Aebi, A., van der Sluijs, J., MacQuarrie, C. J. K., Giorio, C., Long, E. Y., McField, M., van Bijleveld Lexmond, M., and Bonmatin, J.-M. 2017. An update of the Worldwide Integrated Assessment (WIA) on systemic insecticides. Part 2: impacts on organisms and ecosystems. *Environmental science and pollution research international*.

[81] Poschlod, P. 1991. Diasporenbanken in Böden—Grundlagen und Bedeutung. In *Populationsbiologie der Pflanzen*. Springer, 15–35.

[82] Postma-Blaauw, M. B., Goede, R. G. M. de, Bloem, J., Faber, J. H., and Brussaard, L. 2010. Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification. *Ecology* 91, 2, 460–473.

[83] Puglisi, E. 2012. Response of microbial organisms (aquatic and terrestrial) to pesticides. *EFS3* 9, 11, 62.

[84] Purahong, W., Wubet, T., Lentendu, G., Schloter, M., Pecyna, M. J., Kapturska, D., Hofrichter, M., Krüger, D., and Buscot, F. 2016. Life in leaf litter: novel insights into community dynamics of bacteria and fungi during litter decomposition. *Molecular ecology* 25, 16, 4059–4074.

[85] Rigueiro-Rodríguez, A., Fernández-Núñez, E., González-Hernández, P., McAdam, J. H., and Mosquera-Losada, M. R. 2009. Agroforestry Systems in Europe: Productive, Ecological and Social Perspectives. In *Agroforestry in Europe*. *Current status and future prospects*, A. Rigueiro Rodríguez, J. H. McAdam and M. R. Mosquera-Losada, Eds. Advances in Agroforestry 6. Springer, Dordrecht, 43–65. DOI=10.1007/978-1-4020-8272-6_3.

[86] Rillig, M. C., Lehmann, A., Lehmann, J., Camenzind, T., and Rauh, C. 2018. Soil Biodiversity Effects from Field to Fork. *Trends in plant science* 23, 1, 17–24.

[87] Ringselle, B., Bergkvist, G., Aronsson, H., and Andersson, L. 2015. Under-sown cover crops and post-harvest mowing as measures to control Elymus repens. *Weed Res* 55, 3, 309–319.

[88] 2016. *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands - Großpilze*. Naturschutz und biologische Vielfalt 70.

[89] Roy, R. N. 2006. *Plant nutrition for food security*. *A guide for integrated nutrient management*. FAO fertilizer and plant nutrition bulletin 16. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

[90] Scheinost, P. L., Lammer, D. L., Cai, X., Murray, T. D., and Jones, S. S. 2001. Perennial wheat: The development of a sustainable cropping system for the U.S. Pacific Northwest. *Am J Alt Ag* 16, 4, 147–151.

[91] Schoof, N., Luick, R., Ackermann, A., Baum, S., Böhmer, H., Röder, N., Rudolph, S., Schmidt, T., Hötker, Hermann, and Jeromin, H. 2019. *Auswirkungen der neuen Rahmenbedingungen der Gemeinsamen Agrarpoilitik auf die Grünland-bezogene Biodiversität*. *BfN-Skript 540*.

[92] Schweppe-Kraft, B., Schlegelmilch, K., and Berger, L. 2019. *Subventionsbericht 2019. Abbau naturschädigender Subventionen und Kompensationszahlungen auf stoffliche Belastungen. Ökonomische Instrumente zum Schutz der biologischen Vielfalt*. *BfN-Positionspapier*, Bonn.

[93] Seibold, S., Gossner, M. M., Simons, N. K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarlı, D., Ammer, C., Bauhus, J., Fischer, M., Habel, J. C., Linsenmair, K. E., Nauss, T., Penone, C., Prati, D., Schall, P., Schulze, E.-D., Vogt, J., Wöllauer, S., and Weisser, W. W. 2019. Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574, 7780, 671–674.

[94] Sengupta, A. and Dick, W. A. 2015. Bacterial Community Diversity in Soil Under two Tillage Practices as Determined by Pyrosequencing. *Microbial ecology* 70, 3, 853–859.

[95] Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K. E., Nabel, M., Roß-Nickoll, M., and van Dongen, J. T. 2020. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of The Total Environment*, 141607.

[96] Silva, V., Montanarella, L., Jones, A., Fernández-Ugalde, O., Mol, H. G. J., Ritsema, C. J., and Geissen, V. 2018. Distribution of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in agricultural topsoils of the European Union. *The Science of the total environment* 621, 1352–1359.

[97] Souza Machado, A. A. de, Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., and Rillig, M. C. 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global change biology* 24, 4, 1405–1416.

[98] Sparling, D. W. and Fellers, G. 2007. Comparative toxicity of chlorpyrifos, diazinon, malathion and their oxon derivatives to larval Rana boylii. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 147, 3, 535–539.

[99] SWIFT, M. J., Andrén, O., BRUSSAARD, L., BRIONES, M., Couteazx, M.-M., EKSCHMITT, K., KJOLLER, A., LOISEAU, P., and SMITH, P. 1998. Global change, soil biodiversity, and nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: three case studies. *Global change biology* 4, 7, 729–743.

[100] Tiemann, L. K., Grandy, A. S., Atkinson, E. E., Marin-Spiotta, E., and McDaniel, M. D. 2015. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology letters* 18, 8, 761–771.

[101] Tiemeyer, B., Albiac Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Drösler, M., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Freibauer, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Roßkopf, N., Sommer, M., and Zeitz, J. 2016. High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global change biology* 22, 12, 4134–4149.

[102] Tsiafouli, M. A., Thébault, E., Sgardelis, S. P., Ruiter, P. C. de, van der Putten, W. H., Birkhofer, K., Hemerik, L., Vries, F. T. de, Bardgett, R. D., Brady, M. V., Bjornlund, L., Jørgensen, H. B., Christensen, S., Hertefeldt, T. D., Hotes, S., Gera Hol, W. H., Frouz, J., Liiri, M., Mortimer, S. R., Setälä, H., Tzanopoulos, J., Uteseny, K., Pižl, V., Stary, J., Wolters, V., and Hedlund, K. 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global change biology* 21, 2, 973–985.

[103] Umweltbundesamt. 2015. *Bodenzustand in Deutschland*. *Zum "internationalen Jahr des Bodens"*.

[104] UN CBD. 2020. *Global Biodiversity Outlook 5*. *Summary for Policy Makers*, Montreal.

[105] v.d.Decken, H., Jessel, B., Krug, A., and et.al. 2017. *Agrar-Report 2017*. *biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft*.

[106] van Dijk, T. 2007. Complications for traditional land consolidation in Central Europe. *Geoforum* 38, 3, 505–511.

[107] van Eekeren, N., van Liere, D., Vries, F. de, Rutgers, M., Goede, R. de, and Brussaard, L. 2009. A mixture of grass and clover combines the positive effects of both plant species on selected soil biota. *Applied Soil Ecology* 42, 3, 254–263.

[108] Viscarra Rossel, R. A. and Bouma, J. 2016. Soil sensing: A new paradigm for agriculture. *Agricultural Systems* 148, 71–74.

[109] Vries, F. T. de, Liiri, M. E., Bjørnlund, L., Bowker, M. A., Christensen, S., Setälä, H. M., and Bardgett, R. D. 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nature Clim Change* 2, 4, 276–280.

[110] Wall, D. H., Nielsen, U. N., and Six, J. 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature* 528, 7580, 69–76.

[111] Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., van der Putten, W. H., and Wall, D. H. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science (New York, N.Y.)* 304, 5677, 1629–1633.

[112] Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., and Peigné, J. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 1, 1–20.

[113] Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz. 2002. *Ohne Boden bodenlos*. *Eine Denkschrift zum Boden-Bewusstsein*, Berlin.

[114] Wissenschaftlicher Beirat zum Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutz. 2019. *Pflanzenschutz und Biodiversität in Agrarökosystemen*. BMEL, Bonn.

[115] Wissenschaftlicher Dienst. 2018. *Energieverbrauch bei der Produktion von mineralischem Stickstoffdünger* WD 8 - 3000 - 088/18. Deutscher Bundestag.

[116] Yin, R., Siebert, J., Eisenhauer, N., and Schädler, M. 2020. Climate change and intensive land use reduce soil animal biomass via dissimilar pathways. *eLife* 9.

[117] Zaller, J. G., Heigl, F., Ruess, L., and Grabmaier, A. 2014. Glyphosate herbicide affects belowground interactions between earthworms and symbiotic mycorrhizal fungi in a model ecosystem. *Scientific reports* 4, 5634.

[118] Zangger, A., Lys, J.-A., and Nentwig, W. 1994. Increasing the availability of food and the reproduction of Poecilus cupreus in a cereal field by strip-management. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 71, 2, 111–120.