



Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung



Bundesinformationszentrum  
Landwirtschaft

# Lebendige Böden – fruchtbare Böden



# Liebe Leserinnen und Leser,

## kennen Sie diese Organismen?

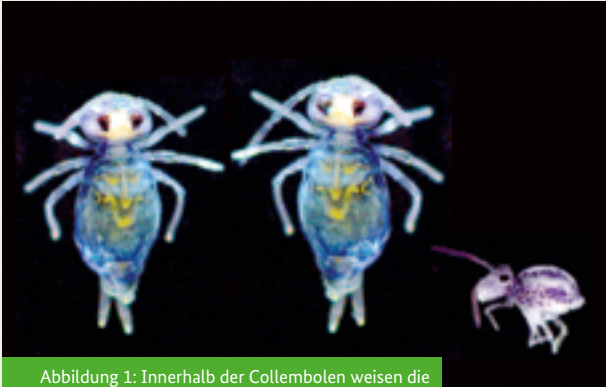


Abbildung 1: Innerhalb der Collembolen weisen die Kugelspringer eine erstaunliche Farbvielfalt auf.

Nein? Ganz normale Nachbarn von Ihnen. Zugegeben, nicht nebenan, sondern unter Ihren Füßen leben sie. Es sind sogenannte Collembolen, zu Deutsch Springschwänze, und sie reihen sich ein in eine riesige Schar von Bodenorganismen. In einer Handvoll Boden leben mehr Organismen als Menschen auf der Erde.

Bodenorganismen sind dreifach viel: viele Individuen, viele Arten und viele Funktionen, die sie erfüllen. Damit bilden sie einen leistungsstarken Pool, den es zu schützen und zu fördern gilt. Ganz nebenbei arbeiten sie für die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum und sind Nahrungsgrundlage für andere Organismen.

Wird das Netzwerk zu stark gestört, bemerken Landwirtinnen und Landwirte dies an aufkommenden Pflanzenkrankheiten, mangelnder Nährstoffversorgung der Pflanzen, ungünstigem Bodengefüge und letztlich am Erntegut, das qualitativ und/oder quantitativ schlechter ausfallen kann. Bodenschonendes Management gemäß „guter fachlicher Praxis in der

Landwirtschaft“ kann die Vielfalt der Bodenorganismen und ihre Leistungen lenken und fördern, um auf nachhaltige Weise ein positives Ernteergebnis zu erzielen.

Diese komplexen Zusammenhänge benötigen noch einiges an Forschungsaufwand, denn ein gutes Verständnis ist essenziell, um nützliche Bodenorganismen gezielt zu fördern und somit dem Ziel einer nachhaltigen Landwirtschaft näherzukommen. Leistet die Landwirtschaft etwas für die Bodenbiodiversität, dann leistet die Bodenbiodiversität auch etwas für die Landwirtschaft, denn lebendige Böden sind fruchtbare Böden.

Ziel dieser Broschüre ist es, Sie mit den wichtigsten Bodenlebewesen und ihren Leistungen, besonders in landwirtschaftlichen Böden unserer Klimazone, bekannt zu machen. Sie werden erfahren, wie sie leben und welche Rolle sie für die Funktionstüchtigkeit von Böden spielen. Gerade in der Landwirtschaft greift der Mensch mit vielen Aktivitäten in den Boden ein. Damit können Störungen einhergehen, die Bodenlebewesen behindern und ihre Leistungen einschränken. In dieser Broschüre erfahren Sie, welche Maßnahmen Bodenlebewesen gezielt fördern, damit uns ihre Leistungen zugutekommen.

Ihr  
Bundesinformationszentrum  
Landwirtschaft



**Bundesinformationszentrum  
Landwirtschaft**

# Inhalt

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Die Vielfalt der Bodenorganismen und ihrer Lebensbedingungen</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Arbeitswelt unter Tage: von Spezialisten, Multitaskern und echtem Networking</b> .....	<b>12</b>
3.1 Definition und funktionelle Gruppen.....	12
3.2 Symbiosen mit Pflanzen.....	13
3.3 Netzwerke.....	14
<b>4 Beteiligung an ökologischen Prozessen und Ökosystemleistungen</b> .....	<b>15</b>
4.1 Nadelöhr für Stoffkreisläufe: Abbau, Umbau und Speicherung der organischen Substanz.....	15
4.2 Kanalisation im Boden: Aufbau einer Bodenstruktur.....	19
4.3 Ansteckungsgefahr für Pflanzen: Krankheiten und Schädlinge aus dem Boden.....	21
4.4 Gesundheitssystem für Pflanzen: Antagonisten und Bioregulation.....	25
4.5 Bodenorganismen erbringen nützliche Leistungen.....	26
<b>5 Maßnahmen in der Landwirtschaft zur Förderung des Bodenlebens</b> .....	<b>28</b>
5.1 Steigerung des Eintrags an organischem Material in den Boden – mundgerecht aufgearbeitet.....	28
5.2 Ganzjährige Bodenbedeckung etablieren – Einsatz von Multitalenten.....	30
5.3 Diversifizierung für mehr Bodenleben.....	30
<b>6 Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>34</b>
<b>7 Literatur</b> .....	<b>35</b>
<b>8 Autorinnen und Autoren</b> .....	<b>41</b>
<b>KTBL-Medien</b> .....	<b>42</b>
<b>BZL-Medien</b> .....	<b>43</b>
<b>Was bietet das BZL?</b> .....	<b>46</b>
<b>Impressum</b> .....	<b>47</b>

# 1 Einleitung

Schätzungen zufolge stehen wir – auf die Fläche bezogen – mit beiden Füßen auf Billionen von Bakterienzellen, Milliarden von Pilzzellen, mikroskopischen Algen und Einzellern,  $5 \times 10^5$  Nematoden,  $5 \times 10^3$  Collembolen und Milben,  $2 \times 10^3$  Enchytraeiden, 10 Tausendfüßern und Asseln sowie 5 Regenwürmern (HOHBERG und XYLANDER, 2004). Die ersten vier genannten Gruppen werden als Bodenmikroorganismen und die folgenden als Bodentiere zusammengefasst.

Die Anzahl der Arten, die unterirdisch im Boden leben, wird auf mindestens so hoch wie die oberirdisch im tropischen Regenwald lebenden Arten geschätzt. Sie bilden ein richtiges

Netzwerk aus Nehmen und Geben: Bodenorganismen nehmen abgestorbene organische Substanz als Nahrung auf (Primärzersetzer) und scheiden unverdauliche Reste aus, die wiederum anderen Bodenorganismen als Nahrung dienen (Sekundärzersetzer). Es entsteht ein System, in dem natürlicherweise Reststoffe recycelt werden. Einige Bodenorganismen verbauen mineralische und organische Bestandteile im Boden, schaffen damit eine Krümelstruktur oder legen stabile Porensysteme an. Die folgenden Kapitel stellen dar, wie Bodenorganismen den biologischen Grundstein für eine nachhaltige landwirtschaftliche Nutzung von Böden legen.



Abbildung 2: Regenwürmer in der Streu- und Humusschicht an der Bodenoberfläche.

## 2 Die Vielfalt der Bodenorganismen und ihrer Lebensbedingungen

Den größten Anteil am Edaphon, der Gesamtheit der Bodenlebewesen, machen nicht die mit bloßem Auge sichtbaren Organismen aus, sondern unscheinbare, mikroskopisch kleine Pilze, Bakterien und Archaeen. Eine Vielzahl verschiedener Arten kommt in unseren Böden vor und wir beschreiben hier „nur“ eine vergleichsweise kleine Auswahl beginnend mit den Bodentieren.

**Regenwürmer** – ja, die kennen alle. Doch viele überrascht schon der Hinweis, dass es viele verschiedene Regenwurmarten gibt, die sich durchaus in wichtigen Eigenschaften unterscheiden. Für Deutschland wird von 46 bekannten Arten ausgegangen (LEHMITZ et al., 2014, LEHMITZ et al., 2016). Die Anzahl und damit die Vielfalt der Regenwürmer nimmt in Europa, wie auch in Amerika, von Süden nach Norden ab. Dies erklärt sich aus der Vereisung der nördlichen Gebiete während der Eiszeit: Nur vergleichsweise wenige Arten waren in der Lage, nach der Erwärmung nach Norden zurückzukehren und dort dauerhaft zu siedeln (KRÜCK, 2018). Diese siedlungsstarken Arten haben sich auch in anderen Teilen der Welt gegen die dort einheimischen durchgesetzt, wo sie durch menschliche Aktivitäten eingeschleppt wurden. Regenwürmer fressen täglich ca. das Zehn- bis 30-fache ihres eigenen Körpergewichtes an totem organischem Material. Zusammen mit dem organischen Material nehmen sie auch mineralische Partikel, wie Sand- oder Tonpartikel, auf und sorgen so dafür, dass pro Jahr bis zu fünf Millimeter frisches Bodenmaterial an die Oberfläche gelangt und bis zu fünf Tonnen Pflanzenreste pro Hektar in den Mineralboden eingearbeitet werden. Diese Umschichtung von Materialien wird Bioturbation genannt. Wir unterscheiden im Wesentlichen drei verschiedene ökologische Gruppen von Regenwurmarten: die Bewohner der Streu- und Laubschicht (epigäische Arten), die Bewohner des Mineralbodens (endogäische Arten) und schließlich die tief grabenden Regenwürmer (anektische Arten). Sehr große Regenwürmer, wie etwa der Große Tauwurm (*Lumbricus terrestris*) mit seinen mitunter 30 cm Länge, gehören in der Regel zu den tief grabenden Arten (Abbildung 3), die beständige senkrechte Röhren im Boden anlegen. Regenwürmer haben keine Zähne und können nur aufgeweichtes Material einsaugen. Hier unterstützen Mikroorganismen, indem sie die Pflanzenreste zersetzen und aufweichen. In ihrer Farbe sind tief grabende Regenwürmer divers, meist rot, dunkelgrau oder braun und am Vorderende dunkel und am Hinterende nicht pigmentiert. Die Färbung schützt sie vor UV-Licht. Dies gilt in gleicher Weise für die epigäischen Regenwürmer in der Streu- und Humusschicht an der Bodenoberfläche. Diese sind zumeist deutlich kleiner, bewegen sich hauptsächlich horizontal und legen relativ kleine Gänge an. Die endogäischen Regenwürmer unterscheiden sich in Färbung und Ernährung deutlich von den Streubewohnern und den tief grabenden Regenwürmern. Diese Mineralbodenbewohner sind sehr blass bzw. farblos und kommen fast nie

an die Bodenoberfläche. Sie ernähren sich von humifizierten organischen Substanzen im Boden und leben in horizontalen Gängen und Gang-Galerien, die nicht beständig sind und zeitweilig immer wieder erneuert werden. Viele der Eigenschaften und Aktivitäten von Regenwürmern sind wertvoll für die Böden, die Ökosysteme und für den Menschen (s. Kapitel 4). Wie lange ein Regenwurm lebt, ist schwer einzuschätzen. Viele sterben sicher jung durch Fressfeinde oder ungünstige Bedingungen wie Trockenheit, aber beispielsweise für erwachsene Tauwürmer geht man von möglichen Lebenszeiten von mehr als zehn Jahren aus. Inwieweit sich klimatische Veränderungen auf Leben und Arbeit der Regenwürmer auswirken werden, ist schwer einzuschätzen. Wir wissen, dass die Aktivität von Regenwürmern von Jahreszeit zu Jahreszeit sehr unterschiedlich sein kann. Klimaveränderungen sind in der Lage, diesen Jahresgang stark zu verändern (SINGH et al., 2019). Die wärmeren frostfreien Winter ermöglichen ggf. eine Ausdehnung der Aktivität in solche Zeiten, die die Regenwürmer sonst in einer inaktiven Ruhephase verbracht haben.



Abbildung 3: Ein bestimmt schon mehrere Jahre altes adultes und ein paar Monate altes juveniles Tier des Großen Tauwurms (*Lumbricus terrestris*) in Winterweizen auf dem Versuchsfeld des Julius Kühn-Instituts in Dahnendorf.



Abbildung 4: Größenvergleich einer eher kleinen Regenwürmart und einer sehr großen Enchyträe, hier in einem Waldboden.

**Enchytraeiden**, auch Kleinringelwürmer genannt, sind die kleinen Verwandten der Regenwürmer und gehören wie diese zur Gruppe der Ringelwürmer. Mit einer Körperlänge von 2-20 mm sind Enchytraeiden für den aufmerksamen Beobachter mit bloßem Auge durchaus noch zu erkennen (Abbildung 4). Sie sind meist farblos und lassen sich von weißlichen, wurmförmigen Insektenlarven durch das völlige Fehlen von dunkel gefärbten Augen, Mundwerkzeugen oder anderen Körperstrukturen unterscheiden. Enchytraeiden kommen als feuchthäutige Tiere in allen nicht zu trockenen Böden sowie in Süß- und Salzwasserlebensräumen vor. Für Mitteleuropa sind etwa 300 Arten beschrieben, doch sind noch bei Weitem nicht alle Arten bekannt. In Grünlandböden kann die Siedlungsdichte der Kleinringelwürmer 30.000 bis 70.000 Tiere je Quadratmeter betragen; in Ackerböden sind es oft deutlich weniger Tiere (BEYLICH und GRAEFE, 2010). Auch das Artenspektrum ist in Ackerböden mit 5-15 Arten meist deutlich schmaler als in Grünlandböden (15-30 Arten). Enchytraeiden fressen abgestorbene organische Substanz und nehmen auch mineralische Teilchen auf. Sie verdauen überwiegend die auf diesen Bestandteilen lebenden Bodenbakterien, Bodenalgeln und Pilze, während die Mineralteilchen und der größere Teil toter organischer Substanz unverdaut wieder ausgeschieden werden (DIDDEN et al., 1997). Die so entstehenden Kotaggregate tragen durch die Schaffung von Mikroporen und Aggregaten zur Feinstrukturierung des Bodens bei. Auch durch die Verbreitung von Sporen und Zysten nehmen sie Einfluss auf den Bodenlebensraum. Enchytraeidenarten zeigen unterschiedliche Ernährungs- und Überlebensstrategien. Einige können sich bei Zufuhr organischer Substanz sehr schnell vermehren (sogenannte Opportunisten) und sind daher auf organisch gedüngten Ackerflächen oft sehr zahlreich. Andere bewohnen die Streuschicht von Grünland- und Waldstandorten und fehlen auf dem Acker ganz. Einige Arten kommen vergleichsweise gut mit Vernässung zurecht und treten oft in staunassen Böden auf, wo ihr Vorkommen auf eine Unterbodenverdichtung hinweisen kann. Doch nicht nur hinsichtlich der Bodenfeuchte, auch hinsichtlich des Säuregehalts des Bodens haben die Arten unterschiedliche Vorlieben: Ein fast neutraler Lehm Boden bietet anderen Arten Lebensraum als ein saurer Sandboden. Enchytraeiden werden daher auch als Bioindikatoren für den biologischen Bodenzustand eingesetzt, z. B. in der Boden-Dauerbeobachtung. Außerdem lassen sich einige Arten im Labor züchten und können, wie Collembolen und Regenwürmer, in ökotoxikologischen Testverfahren zur Bewertung von belasteten Böden herangezogen werden (DIN 16387).

**Nematoden**, auch Fadenwürmer genannt, zählen zu den kleinsten noch sichtbaren Tieren im Boden. Nur die größten unter ihnen, wie z. B. Arten der Gattung *Paralongidorus*, können bei bis zu zehn mm Länge mit dem bloßen Auge wahrgenommen werden. Ebenso einige angeschwollene Stadien von Zysten nematoden, die 0,2-0,8 mm groß werden können. Die allermeisten Nematoden sind aber deutlich unter einem Millimeter lang. Die geringe Größe erklärt auch, weshalb Nematoden vielen Menschen weitgehend unbekannt sind. Wer erwartet schon, dass sich in einer Handvoll fruchtbarem Boden (ca. 100 ml) über 5.000 Nematoden befinden können? So klein sie auch sein mögen, so zahlreich sind sie. Schätzungsweise  $4 \times 10^{20}$  Nematoden (= 400 Trillionen) leben allein in den Oberböden (0-15 cm) unserer Erde, was etwa 80 % aller mehrzelligen Tiere auf der Erde entspricht (VAN DEN HOOGEN et al., 2019). Bezogen auf die Biomasse entspricht dies 0,3 Gt (= 300.000.000 t) oder 80 % der menschlichen Biomasse auf dieser Erde. Nematoden sind in unseren Böden allgegenwärtig. Man findet sie auf dem Meeresgrund ebenso wie in den höchsten Bergregionen, in der Antarktis wie in den Wüsten. Voraussetzung ist, sie haben ausreichend Feuchtigkeit (geringste Mengen genügen) und Nahrung und die Temperaturen liegen unterhalb von 50° C. Nematoden sind sehr ursprüngliche Tiere. Erste Nematoden existierten bereits vor der Besiedlung der Kontinente durch Landpflanzen. In über 500 Millionen Jahren Evolution haben sie eine enorme Vielfalt entwickelt, die aber erst ansatzweise erforscht ist. Bis heute wurden noch nicht einmal 30.000 Arten beschrieben, ihre tatsächliche Anzahl liegt vermutlich um ein Vielfaches höher. Nematoden ernähren sich von Bakterien, Pilzen, Pflanzen oder sind Parasiten von größeren Tieren. Damit sind sie ein ganz zentraler Bestandteil des Nahrungsnetzes im Boden. Zudem setzen sie mit ihren Ausscheidungen Nährstoffe frei. So nehmen beispielsweise bakterien- und pilzfressende Nematoden mit ihrer Nahrung deutlich mehr Stickstoff auf, als sie für ihren eigenen Lebensunterhalt benötigen. Der überschüssige Stickstoff wird ausgeschieden und steht den Pflanzen als Nährstoff zur Verfügung (ANDERSON et al., 1981). Auch für den Kohlenstoffkreislauf sind Nematoden wichtig, insbesondere vor dem Hintergrund von Boden als bedeutenden Kohlenstoffspeicher. So tragen Nematoden mit ihrer Atmung zu etwa 2 % an den Kohlenstoffemissionen des Bodens bei, speichern andererseits in Form ihrer Biomasse aber auch erhebliche Mengen an Kohlenstoff im Boden, zumindest so lange, bis sie von anderen Bodenorganismen als Nahrung genutzt werden. Praktische Bedeutung haben Nematoden vor allem als Bioindikatoren für Bodengesundheit, als bedeutende Pflanzenschädlinge sowie in der biologischen Bekämpfung von Schadinsekten.

**Ameisen** sind in der Kulturlandschaft Europas eher der Regelfall als die Ausnahme. Dies gilt nicht nur für sogenannte Kulturfolger unter den Ameisen, sondern für viele der derzeit 116 in Deutschland nachgewiesenen Arten. Ameisen sind eusoziale Insekten. Sie bilden mehrjährige, zumeist an einen einmal gewählten Standort gebundene Kolonien. Ihre Nester legen sie zumeist im Boden, aber auch in unterschiedlichen oberirdischen Kleinstrukturen an. Ameisen sind eher Wärme und Trockenheit liebende Tiere und daher ist das Vorkommen vieler Arten an Landnutzungsformen gebunden, die offene



Abbildung 5: Mit Thymian bewachsener Nesthügel der Gelben Wiesenameise (*Lasius flavus*).



Abbildung 6: Buckelweide in der Rhön mit zahlreichen Nesthügeln.

bis halboffene Lebensräume mit trockenwarmem Mikroklima erzeugen und Strukturen und Kleinstrukturen wie z. B. Trockenmauern oder Altholzbestände hervorbringen. Für über 50 % der mitteleuropäischen, frei lebenden Ameisenarten ist Grünland einer der Hauptlebensräume, wobei viele Arten auf strukturreiche Mager- oder Trockenrasen angewiesen sind. Ameisen sind im Vergleich zu anderen Bodenorganismen eher artenarm, aber in vielen terrestrischen Lebensräumen erreichen sie sehr hohe Biomassen und tragen dadurch entscheidend zum Ablauf ökosystemarer Prozesse (FOLGARAIT, 1998) und Ökosystemleistungen (DEL TORO et al., 2012) bei. Ameisen beeinflussen Schadinsekten im für den Menschen negativen Sinne durch ihre symbiotische Beziehung mit Pflanzenläusen, die sogenannte Trophobiose, bei der die Ameisen den Honigtau der Läuse als Nahrung aufnehmen. Doch Ameisen gehören ebenso zu den bedeutendsten Räubern von Arthropoden (Gliederfüßern). Als Samenausbreiter und Samenräuber tragen sie sowohl zur Regeneration als auch zur Kontrolle von Pflanzenpopulationen bei (PENN und CRIST, 2018). Ameisen sind Ecosystem Engineers (s. u.), insbesondere im Boden (JOUQUET et al., 2006), wo sie Stoff- und Energieflüsse direkt oder indirekt beeinflussen. Sie verändern schnell und intensiv die chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften in der unmittelbaren Nestumgebung (FROUZ und JILKOVA, 2008). Diese Veränderungen der Bodeneigenschaften, hervorgerufen durch den Bau von Erdhügelnestern, sind vergleichbar mit bodenbildenden Prozessen von der Dauer von mehreren Hundert bis Tausend Jahren (LEVAN und STONE, 1983). Die Aktivität der Ameisen im Boden reguliert auch die Aktivität und Zusammensetzung der Mikroorganismen, inklusive der Mykorrhiza, in deren Nestbereich (DAUBER und WOLTERS, 2000; DAUBER et al., 2008), schafft Habitate für

andere Bodentiere (BOULTON und AMBERMAN, 2006) und steuert die Zusammensetzung von Pflanzengemeinschaften (DOSTAL, 2007). Bei extensiver Weidenutzung und entsprechend geringen Trittschäden können manche Ameisenarten, insbesondere die Gelbe Wiesenameise *Lasius flavus*, durch die Anlage mehrjähriger fester Erdbauten ein „zoogenes Kleinrelief“, auch Buckelweide genannt (Abbildung 5 + 6), erzeugen. Die Nesthügel sind unregelmäßig über die Fläche verteilt und können durchaus eine landschaftsprägende Anzahl erreichen. Die „Buckel“ in den Weiden und entlang den Zäunen erhöhen die standörtliche Heterogenität der Flächen und wirken sich meist positiv auf die Diversität der Vegetation aus (SIMMERING et al., 2003). Trotz ihrer relativ geringen Artenzahl in mitteleuropäischen Kulturlandschaftshabitaten sind die Ameisen aufgrund ihrer Fähigkeit, Ökosystemfunktionen zu regulieren, und ihrer stark ausgeprägten wechselseitigen Beziehungen zu Pflanzen und Insekten, wie z. B. zu myrmecophilen Schmetterlingen (Lepidoptera, Lycaenidae), deren Reproduktion von Ameisen abhängt, wichtige Schlüsselarten für die Existenz anderer Arten und damit für die Biodiversität in Kulturlandschaften insgesamt.

Die **Milben** (Acari) bilden mit über 48.000 beschriebenen, wahrscheinlich aber weit mehr als 100.000 tatsächlich vorkommenden Arten das artenreichste Taxon innerhalb der Spinnentiere (Arachnida) (ALBERTI et al., 2007). Alleine in Deutschland kommen von den achtbeinigen Organismen 3.000 verschiedene Arten vor (BELLMANN, 2010). Auch wenn wir mit der Artengruppe meist eher negative Assoziationen haben – sei es der Zeckenbiss nach dem Waldspaziergang, die Spinnmilben an der Zimmerpflanze oder die Varroa-Milbe im Bienenstock, ist diese Artengruppe doch für das Bodenleben von großer

Bedeutung. Eine große Gruppe innerhalb der Milben bilden die Horn- oder Moosmilben (Oribatida). Der Name rührt daher, dass viele Vertreter der Gruppe einen harten Panzer tragen, in den sie sich bei Gefahr oder bei Trockenheit zurückziehen können (DUNGER, 2008). Die meisten Arten ernähren sich von sich zersetzenden Pflanzenteilen und Pilzen und tragen so zur Mineralisierung von organischem Material bei (ALBERTI et al., 2007). Auf Ackerflächen weisen sie beachtliche Abundanz auf: L'UPTÁČIK et al. (2012) konnten 13.000 bis 20.000 Individuen pro Quadratmeter nachweisen. Landschaftsreliefs oder Heckenstrukturen können schon auf kleiner räumlicher Skalenebene einen Einfluss auf Abundanz und Artenzusammensetzung haben (L'UPTÁČIK et al., 2012). Es gibt auch Milbenarten, die an noch lebenden Pflanzen fressen und somit ökonomisch bedeutsam sein können. Beispielhaft seien hier Wurzelmilben (*Rhizoglyphus*) genannt, die u. a. Karotten, Kartoffeln oder Getreide befallen, aber nicht nur an der Wurzel, sondern auch im Spross, auf den Blättern oder in den Samenanlagen zu finden sind (DÍAZ et al., 2000). Viele andere Milbenarten ernähren sich räuberisch, z. B. die Raubmilben (Gamasina). Einige Vertreter jagen auf der Bodenoberfläche, andere im Boden. Die Ernährungsformen sind vielgestaltig und oft hoch spezialisiert. Manche Arten haben sich auf den Fang von Collembolen spezialisiert, andere fressen Insektenlarven oder deren Eier, andere wiederum Nematoden oder sogar andere Milben (DUNGER, 2008). Nicht zuletzt aufgrund ihrer geringen Größe und zumeist unauffälligen Erscheinung ist über viele Milbenarten hinsichtlich der Ökologie und der taxonomischen Konstellation nur wenig bekannt. Dennoch lassen sich kleinskalige Unterschiede in der Abundanz einzelner Arten oder der Artenzusammensetzung im Allgemeinen durchaus zurate ziehen, um Aussagen über Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit zu treffen. Aufgrund der Sensitivität mancher Milbenarten gegenüber der Qualität des Bodens, z. B. der Schadstoffbelastung, kann diese Gruppe auch als Bioindikator dienen (MANU et al., 2019).



Abbildung 7: Durch den Fraß an Pilzhyphen leisten Springschwänze (Collembolen) einen wichtigen Beitrag zu einem intaktem Ökosystem.

**Collembolen**, auch Springschwänze genannt, sind kleine Bodenarthropoden von 0,1 bis 9 mm Körperlänge, die trotz ihrer sechs Beine nicht in die Gruppe der Insekten gestellt werden. Dennoch sind sie nah mit ihnen verwandt und werden als eine Form von Urinsekten angesehen. Das älteste Fossil eines Arthropoden ist ca. 400 Mio. Jahre alt und aller Wahrscheinlichkeit nach ein Collembola aus der Familie der Isotomidae (HOPKINS, 1997). Die genaue Artenzahl ist nicht bekannt. Von den möglicherweise 50.000 Arten auf unserer Erde wurden bislang ca. 7.000 beschrieben. Für Deutschland wurden bislang 450 Arten nachgewiesen (SCHULZ, 2011). In den meisten ungestörten Ökosystemen kommen Collembolen in Dichten von 10.000 bis 100.000 Individuen pro m<sup>2</sup> vor, wobei die Artengemeinschaften in der Regel von wenigen häufigen Arten dominiert werden. Alle Collembolen sind flügellos, zur schnellen Fortbewegung verfügen sie jedoch über die Furca, eine Sprunggabel unter ihrem Abdomen. Bei Störung kann ein Collembola von 3 bis 6 mm Körperlänge akrobatische Sprünge von 75 bis 100 mm Höhe vollführen (TRIPLEHORN und JOHNSON, 2005). Ein weiteres Merkmal, das sich Beobachtern jedoch nur durch ein Mikroskop zeigt, sind die innen liegenden Mundwerkzeuge. Die allermeisten bodenbewohnenden Arten ernähren sich von Pilzen, zersetztem Pflanzenmaterial und Bakterien. Andere fressen Ausscheidungen anderer Arthropoden, Pollen oder Algen. Durch den Fraß an Pilzhyphen können sie das Wachstum von Mykorrhiza stimulieren oder regulierend auf Pilzkrankungen an Kulturpflanzen einwirken (HOPKINS, 1997). Die überwiegende Mehrheit erbringt daher nützliche Dienste in genutzten Ökosystemen. Nur äußerst wenige Arten wie der Luzernefloh *Sminthurus viridis* fressen direkt an Pflanzen und können eine schädigende Wirkung entfalten. Collembolen werden in drei Lebensformtypen unterschieden: 1.) Epedaphische oder atmobionte Arten, die oberflächenaktiv sind: Sie sind relativ groß, farbig pigmentiert, deutlich behaart und besitzen lange Gliedmaßen. Diese Arten besiedeln die Bodenoberfläche und kommen aufgrund der Pigmentierung mit der UV-Strahlung zurecht. 2.) Hemiedaphische Arten: Sie leben im großporigen Bodengefüge der oberen 5 cm sowie in groben Strukturen der Bodenoberfläche wie Streuauflage oder Moospolster. Sie sind mittelgroß, meist farbig pigmentiert und kompakt gebaut mit kürzeren Gliedmaßen. 3.) Euedaphische Arten, die ausschließlich im Boden leben: Sie sind sehr klein, stets blind und fast immer weiß ohne farbige Pigmente. Ihr Lebensraum ist vor allem der kleinporige Bereich. Aufgrund ihrer geringeren Ausbreitungsmöglichkeiten sind gerade die euedaphischen Arten als Bioindikatoren für die Qualität von Lebensräumen gut geeignet (SCHULZ, 2011).



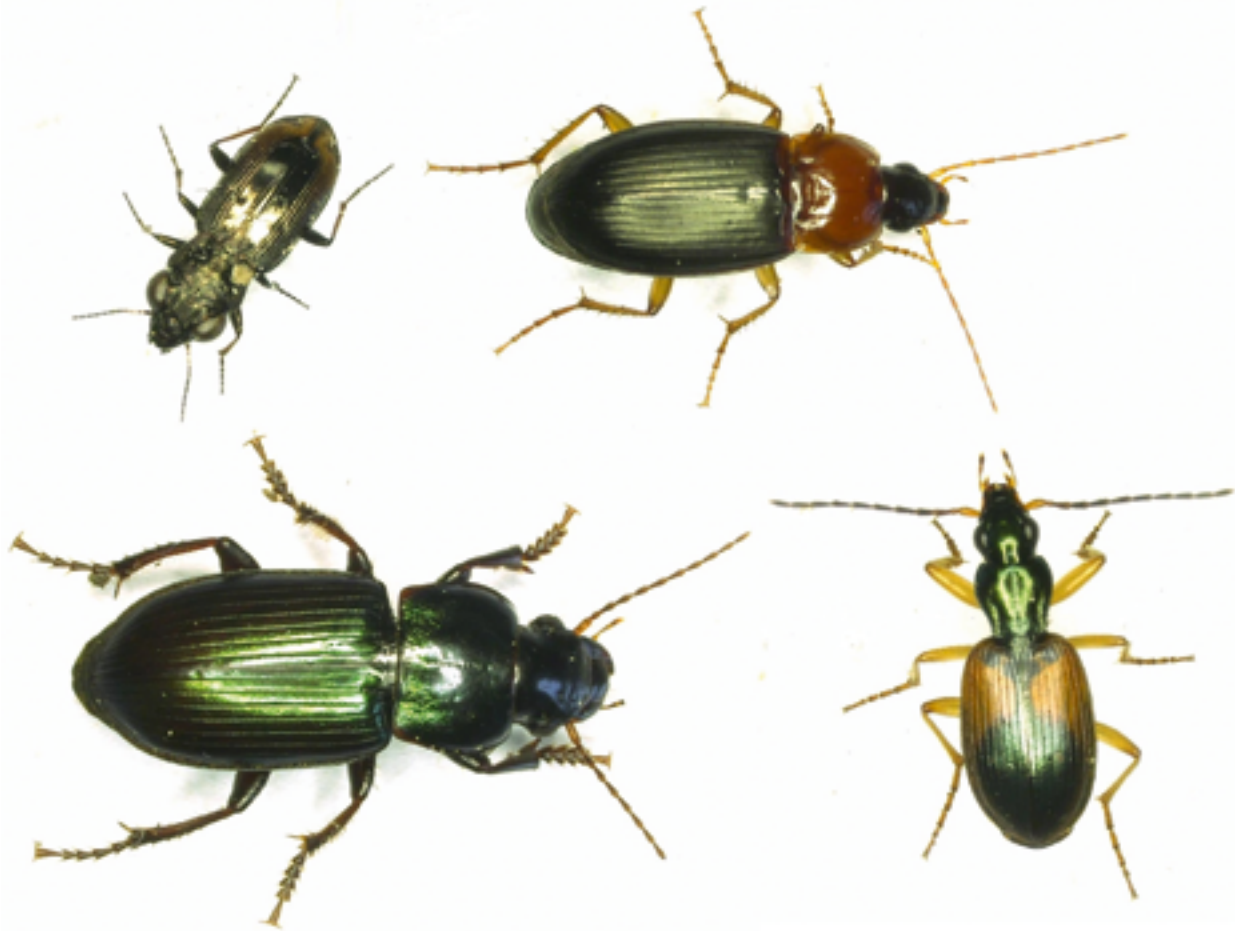


Abbildung 8: Laufkäfer spielen als Antagonisten eine wichtige Rolle in der Bioregulation.

Wer **Laufkäfer** in der Natur entdecken möchte, sollte beim nächsten Spaziergang seinen Blick auf den Boden richten. Denn die Vertreter dieser Käferfamilie leben epigäisch (griech. epigaios = auf, über dem Erdboden). Wie ihr Name vermuten lässt, bewegen sie sich überwiegend laufend fort. Es gibt Arten, die nur reduzierte, fluguntaugliche Flügel ausbilden. Andere wiederum haben voll ausgebildete Flügel, setzen diese aber nur selten ein, z. B. wenn sie aufgrund von Störungen in ein neues Habitat abwandern. Laufkäfer besiedeln eine Vielzahl terrestrischer Lebensräume, von Küstenregionen und Wäldern über Moore und Heiden bis zu Grünland und Äckern. Die etwa 1,5 bis 42 mm großen, schlanken Käfer laufen flink über die Bodenoberfläche und finden hier Nahrung, z. B. andere Insekten, Schnecken, Samen und Aas; nur wenige Arten klettern an Pflanzen empor und finden ihre Nahrung dort. Die meisten Arten sind räuberisch. Sie sind überwiegend Generalisten, haben also ein breites Nahrungsspektrum. Laufkäfer benötigen länger als eine Vegetationsperiode, um ihren Entwicklungszyklus abzuschließen, und überdauern daher den Winter entweder als adultes Tier oder als Larve im Boden. Haben sie das Erwachsenenstadium erreicht, so leben sie noch ein oder mehrere Jahre. In Deutschland sind über 520 Arten bekannt (WACHMANN et al., 1995). Laufkäfer werden als Indikatoren für die Intensität menschlicher Einflüsse

auf Ökosysteme herangezogen, weil sie sehr sensibel gegenüber Störungen sind (KROMP, 1999). Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen kommen daher nur Laufkäferarten vor, die gegenüber Störungen toleranter als andere Arten sind. Sie bilden ackertypische Artengemeinschaften, die sich von England bis nach Russland in ihren häufigsten Arten sehr ähnlich sind (WACHMANN et al., 1995). Der Artenreichtum von Laufkäfern auf einem Acker wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Einerseits sind im Laufe der letzten Jahrzehnte die Häufigkeit und der Artenreichtum von Laufkäfern auf Äckern aufgrund der zunehmenden Intensivierung der Landwirtschaft insgesamt zurückgegangen (BASEDOW, 1987; EMMERSON et al., 2016). Andererseits beeinflusst auch die den Acker umgebende Landschaft den Artenreichtum von Laufkäfern. So fanden zum Beispiel PURTAUF et al. (2005) artenreichere Gemeinschaften auf Äckern, in deren Umgebung ein hoher Grünlandanteil war. Als Räuber und Samenfresser tragen Laufkäfer zur natürlichen Schädlingskontrolle bei. Schon seit Jahrzehnten weiß man, dass räuberische Arten in Winterweizen Blattlauspopulationen während deren früher Kolonisierungsphase eindämmen können und dass samenfressende Laufkäfer unter bestimmten Bedingungen effektiv Beikräuter kontrollieren können (KROMP, 1999). Wie Laufkäfer in Landschaften besser gefördert werden können, wird weiterhin untersucht.

In landwirtschaftlich genutzten Böden finden sich zahlreiche **Mikroorganismen**. In einem Gramm Boden sind 10 bis 100 Millionen Bakterienzellen nicht außergewöhnlich. Ihr Leben spielt sich im Verborgenen ab, da sie sehr klein sind (1/1.000stel bis 1/100stel mm) und ihr Lebensraum für eine Beobachtung nur unter dem Mikroskop zugänglich ist. Die Mikroorganismen werden zwei sehr unterschiedlichen Gruppen zugeordnet, den Prokaryonten und den Eukaryonten. Zur Gruppe der Prokaryonten gehören die Bakterien und Archaeen, meist einzellig vorkommende Lebewesen, bei denen die Erbsubstanz nicht in einem echten Zellkern, sondern frei im Zellraum vorkommt. Im Vergleich zu den Bakterien (s. u.) kommen Archaeen etwa 10- bis 100-mal weniger häufig im Boden vor. Sie besitzen wichtige Fähigkeiten, die für die Funktion von Böden von großer Bedeutung sind. Zum Beispiel können viele Archaeen Ammonium-Stickstoff oxidieren, und sie sind die einzigen Lebewesen, die Methan bilden und freisetzen können. Zu den Eukaryonten zählen die Pilze und die Protisten. Ihre Erbsubstanz liegt in einem Zellkern. Pilze bilden häufig lange Zellfäden (Myzelien), mit denen sie organische Substanzen durchwachsen und abbauen können. Protisten sind stark wasserabhängige, bewegliche Einzeller, die durch ihre Ernährungsaktivität einen wichtigen Beitrag bei Stoffumsetzungen in Böden leisten. Alle diese Gruppen leben nicht isoliert nebeneinander, sondern in Gemeinschaften, verbunden durch vielfältige, bis heute wenig verstandene Wechselwirkungen, wobei die pflanzen- und bodentypabhängige mikrobielle Diversität durch eine Vielzahl biotischer und abiotischer Faktoren beeinflusst wird.

Aus mikrobieller Sicht ist der Boden eine an organischen Nährstoffen arme Umgebung. Jedoch gibt es Oasen, wie zum Beispiel den Wurzelraum: Pflanzen geben einen Teil ihrer Fotosyntheseprodukte über die Wurzeln in den umliegenden Boden ab, um Mikroorganismen gezielt anzulocken und um von deren vielfältigen Funktionen (z. B. Nährstofffreisetzung, Antibiotikaproduktion, Stimulation der Pflanzenabwehr) zu profitieren. Mikroorganismen und Pflanze gehen dadurch komplexe Wechselwirkungen miteinander ein, die gleichzeitig durch Faktoren im Boden und durch menschliche Aktivität (z. B. Landwirtschaft) beeinflusst werden. Problematisch ist der Eintrag von Mikroorganismen mit übertragbaren Antibiotikaresistenzen und/oder Antibiotika, Schwermetallen und Desinfektionsmitteln in Böden über organische Dünger aus der Tierhaltung (Gülle, Gärreste) oder über Klärschlammsubstrate aus der Abwasseraufbereitung. Forschungsergebnisse zeigten, dass auch landwirtschaftliche Maßnahmen, wie Bodenbearbeitung, Pflanzenschutzmittelanwendung und Fruchtfolge, die Zusammensetzung und Diversität der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden beeinflussen können.



Abbildung 9: Die Beweidung von Zwischenfrüchten mit Schafen fördert die Diversität der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden.

**Bakterien** sind die am häufigsten vorkommenden Bodenmikroorganismen und in allen Bodentypen anzutreffen. Von ihnen gibt es Billionen pro Quadratmeter Boden, wobei sie insbesondere im Wurzelbereich und im humosen Oberboden konzentriert sind. Durch Verwendung genetischer Marker (s. u.) wissen wir von ihrer Existenz und von manchen Funktionen. Bakterien zeichnen sich durch eine sehr hohe metabolische Vielfalt aus, wobei sie organische und chemische Substanzen (z. B. Wirtschaftsdünger, Pflanzenschutzmittel, Mykotoxine) durch Enzyme zersetzen und abbauen. Die freigesetzten Nährstoffe werden gespeichert und stehen später den höheren Pflanzen zur Verfügung. Sie spielen insbesondere im Stickstoffkreislauf im Boden eine herausragende Rolle. Viele Bakterien im Boden, insbesondere im wurzelnahen Bereich, gehören dem Phylum (Stamm) Proteobacteria an (Alpha-, Beta- und Gamma-Proteobacteria), zu denen z. B. Rhizobien (Stickstofffixierung bei Leguminosen) und Nitrifizierer zählen. Daneben sind Bakterien aus den Phyla Firmicutes, Actinobacteria, Acidobacteria, Bacteroidetes oder Verrucomicrobia verbreitet. Zu den Actinobacteria zählt z. B. die Gattung *Streptomyces*, die auf schwer abbaubare organische Verbindungen und auf die Produktion von Geosmin, dem Erdgeruch, spezialisiert ist.

**Pilze** sind Eukaryonten und bestehen aus Einzelzellen (Hefen) oder zusammenhängenden Zellfäden, den Hyphen (Durchmesser 1-10 µm). Die Gesamtheit der Hyphen wird Myzel genannt. Manche Pilze gehen mit höheren Pflanzen eine Wurzelsymbiose ein (Mykorrhiza) und liefern der Pflanze dann Wasser und Nährstoffe (z. B. Phosphor). Eine Einteilung der Pilze in fünf Phyla wird derzeit überarbeitet: Chytridiomycota, Zygomycota, Glomeromycota, Ascomycota und Basidiomycota. Zu den Schlauchpilzen (Ascomyceten) zählen insbesondere viele Hefe- und Schimmelpilze, Speisepilze (z. B. Trüffel) oder auch Penicillium. Zu den Ständerpilzen (Basidiomyceten) zählen die bekannten Weißfäule- und Braunfäulepilze. Weißfäulepilze zersetzen bevorzugt abgestorbene holzige Substanz (Lignin) und hinterlassen Zellulose als weißliches Pulver. Zellulose und Hemizellulose werden von den Braunfäulepilzen zersetzt, wobei ein braunes Produkt entsteht. Den großen und heterogenen Gruppen der Ascomyceten und Basidiomyceten ist gemein, dass sie maßgeblich am Abbau der organischen Bodensubstanz beteiligt sind und durch die Produktion von Antibiotika gemeinsam mit Actinobacteria (*Streptomyces*) zum sogenannten antiphytopathogenen Potenzial des Bodens beitragen.

## Mikrobiome und Metagenome

In jedem Gramm Boden leben Tausende unterschiedlicher Bakterien und Archaeen sowie Hunderte unterschiedlicher Pilze und Protisten. Gemeinsam bilden sie eine Lebensgemeinschaft, die man als Mikrobiom bezeichnet. Jeder Boden hat sein eigenes Mikrobiom, das aus seiner Entstehungsgeschichte (Pedogenese), seiner spezifischen Struktur, seiner physikalisch-chemischen Zusammensetzung und seiner Nutzung unter den gegebenen klimatischen Bedingungen resultiert. Auch Pflanzenwurzeln können, vor allem über Exsudate (z. B. Zucker, Aminosäuren), Bodenmikrobiome direkt beeinflussen.

Mikrobiome sind stabile und gleichzeitig dynamische Lebensgemeinschaften. Schon bei Regen oder Trockenheit können sie sich stark verändern, kehren aber dann wieder in ihren Ausgangszustand zurück – sie sind resilient. Aber es kann auch zu Veränderungen kommen, die nicht oder nur sehr schwer rückgängig gemacht werden können, z. B. wenn Schwermetalle oder Antibiotika in den Boden gelangen und dort irreversibel akkumuliert werden oder wenn die Bodenstruktur durch starke mechanische Eingriffe zerstört wird. Landwirtschaftliche Maßnahmen können die strukturelle und funktionelle Zusammensetzung des Bodenmikrobioms beeinflussen – mit Folgen für die Gesundheit der Pflanze und die Bodenfruchtbarkeit.

Um die Reaktionen des Bodenmikrobioms auf solche Veränderungen besser zu verstehen, nutzen Mikrobiologen neuartige molekulare Verfahren. Mit diesen lässt sich das sogenannte Metagenom, d. h. das Erbgut bzw. die DNA der Mikrobiome, charakterisieren. Dazu wird die DNA sequenziert. Die Geschwindigkeit, mit der das erfolgen kann, hat sich in den letzten 20 Jahren etwa um das Einhunderttausendfache (!) erhöht. Das Ergebnis der DNA-Sequenzierung besteht aus einer Abfolge von vier Buchstaben: A, T, C und G. Die Bioinformatik ist die Wissenschaft, die dann dabei hilft, diese Sprache des Metagenoms zu verstehen. Dann erschließen sich die Vielfalt und auch viele funktionelle Potenziale der Mikrobiome. Selbst in einem Gramm Boden ist die Vielfalt des Mikrobioms jedoch zu groß, um alle Gene zu sequenzieren. Daher werden gezielt bestimmte Gene aus den Metagenomen ausgewählt, z. B. solche, die Auskunft über die Identität der Mikroorganismen geben oder über bestimmte Leistungspotenziale. Solche Leistungspotenziale können die Umsetzung oder Transformation von Stickstoffverbindungen oder die Förderung des Pflanzenwachstums durch die Bildung von Hormonen sein. Die Methode, mit der sich solche Gene aus dem Metagenom fischen lassen, ist die Polymerase-Kettenreaktion (PCR). Um die richtigen Köder zu finden, die bei der PCR „Primer“ heißen, ist wiederum die Bioinformatik das entscheidende Arbeitswerkzeug.

## 3 Arbeitswelt unter Tage: von Spezialisten, Multitaskern und echtem Networking

Bodenorganismen weisen eine große strukturelle Diversität auf. Diese umfasst eine riesige Anzahl an Arten, die eine noch viel größere Anzahl an Individuen erreicht. So entsteht eine Lebensgemeinschaft, in der sich jede Art in unterschiedlicher Weise an Prozessen im Boden beteiligt. So werden unterschiedlichste Funktionen erfüllt. Die Gemeinschaft der Bodenorganismen charakterisiert also auch eine große funktionelle Diversität.

### 3.1 Definition und funktionelle Gruppen

Bodenorganismen bilden das Nadelöhr für Stoffkreisläufe, bereiten die Nährstoffquelle für Pflanzen, formen eine Filter- und Pufferanlage für Schadstoffe im Boden, bieten den Speicherplatz für Humus und Kohlenstoff, bauen die Kanalisation im Boden, bannen die Ansteckungsgefahr für Pflanzen und schaffen das Gesundheitssystem für Pflanzen (s. Kapitel 4). Sie erbringen unterschiedliche Leistungen und übernehmen den biologischen Part der Selbstregulation im Boden. Viele Bodenorganismen üben sich im Multitasking und beteiligen sich an mehreren Prozessen, andere sind hoch spezialisiert. Unter den Bodentieren sind Regenwürmer ein Beispiel für Multitasker. Nematoden sind aufgrund ausgeprägter Nahrungspräferenzen ein Beispiel für echte Spezialisten. Landwirtschaftliche Maßnahmen üben einen großen Einfluss auf die strukturelle und funktionelle Vielfalt der Bodenorganismen aus.

Entsprechend ihrer Rolle im Prozessgeschehen des Bodens lassen sich Bodenorganismen in unterschiedliche funktionelle Gruppen einteilen. Ein heute allgemein verbreitetes System (nach TURBÉ et al., 2010) unterscheidet die vorwiegend chemisch wirkende Gruppe der Chemical Engineers, die biologisch regulierende Gruppe der Biological Regulators und die physikalisch agierende Gruppe der Ecosystem Engineers (Tabelle 1).

Unter diesem Dach sammeln sich unterschiedlich spezialisierte Gruppen: z. B. Mineralisierer von Nährstoffen als Chemical Engineers unter den Mikroorganismen; z. B. Pilzfresser, wie einige Nematoden und Collembolen, als Biological Regulators unter den Bodentieren. Biogene Bodenaggregate sind z. B. das Werk von Ecosystem Engineers: Bakterien, die kleinste mineralische Partikel mit Schleim verkleben; Pilze, die mit ihren Hyphen diese kleinen Bodenaggregate zu größeren verkitten; Regenwürmer, die diese größeren Aggregate sowie pflanzliche Reststoffe fressen und Unverdauliches als stabile Ton-Humus-Komplexe ausscheiden (SCHRADER et al., 2020a). Allen drei hier beispielhaft genannten Ecosystem Engineers verdanken wir die Krümelstruktur unserer Böden. Einige Gruppen der Bodenorganismen sind sehr vielseitig und gehören mehr als nur einer funktionellen Gruppe an wie z. B. Regenwürmer, die gleichzeitig die Funktionen als Chemical Engineers, Biological Regulators und Ecosystem Engineers erfüllen (SCHRADER et al., 2020a).

**Tabelle 1: Einordnung der Bodenorganismen in funktionelle Gruppen nach ökologischen Prozessen und Ökosystemleistungen (nach TURBÉ et al., 2010).**

Funktionelle Gruppen	Ökologische Prozesse	Ökosystemleistungen
<b>Chemical Engineers</b>	Abbau und Umbau organischer Substanz	Nährstoffquelle für Pflanzen Speicher für Humus und Kohlenstoff
	Abbau von Schadstoffen	Pufferanlage und Entgiftung
<b>Biological Regulators</b>	Fraß mikrobieller Schaderreger	Gesundheitssystem für Pflanzen
	Transport von Pflanzensamen	Verbreitung von Pflanzen
<b>Ecosystem Engineers</b>	Bioturbation und Bodenstrukturbildung	Wurzelraum für Pflanzen Speicher für Humus und Kohlenstoff Filteranlage
	Infiltration und Wasserspeicherung	Steigerung des Wasserangebots
	Ventilation und Gasaustausch	Regulation des Klimas

Bodenorganismen steuern eine Vielzahl ökologischer Prozesse, denen sich direkt Ökosystemleistungen in genutzten Böden zuordnen lassen (Tabelle 1). Das Ausmaß ihrer Leistungen beruht neben Intensität und Art der Bodennutzung auf komplexen Wechselwirkungen untereinander, mit den Kulturpflanzen (Wurzelraum, Bestandsabfall) und mit den standörtlichen Bodenbedingungen (insbesondere Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, organischer Gehalt, pH-Wert, Feuchtebedingungen). Die funktionelle Vielfalt der Bodenorganismen erbringt Ökosystemleistungen, die Bodenfruchtbarkeit verbessern, Bodenbildung fördern und Transportprozesse steuern. Dieses große Leistungsspektrum hilft, Fruchtbarkeit und Produktivität landwirtschaftlich genutzter Böden zu gewährleisten

### 3.2 Symbiosen mit Pflanzen

Pflanzen leben häufig in enger Beziehung mit Bodenorganismen, wobei die Pflanzen als Lebensraum für Nützlinge, genauso wie für Schädlinge, dienen können. Mögliche Interaktionspartner für Symbiosen mit Pflanzen sind im Boden vorkommende bakterielle oder pilzliche Spezies. Auch die Pflanze selbst lockt durch ihre Wurzelexsudate bestimmte Arten an (Chemotaxis) und steuert somit die Zusammensetzung des mit den Wurzeln assoziierten Mikrobioms. Die Zusammensetzung

und Menge der Wurzelexsudation wiederum ist von verschiedenen Faktoren wie z. B. der Pflanzenart, dem Substrat, der landwirtschaftlichen Bearbeitung, dem Auftreten von Krankheitserregern sowie dem Wachstumsstadium und dem Gesundheitszustand der Pflanze abhängig. An der Pflanzenwurzel findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Mikroorganismen, darunter Pflanzenschädlinge sowie nützliche Arten zur Unterstützung der pflanzeigenen Abwehr oder des Pflanzenwachstums durch die Produktion von Hormonen oder die Versorgung mit Nährstoffen (MENDES et al., 2013; TRIVEDI et al., 2020).

In den sogenannten Symbiosen gehen Pflanzenwurzeln mit Pilzen und Bakterien eine Interaktion ein, in der beide Partner profitieren. Die wohl bekanntesten symbiotischen Partner der pflanzlichen Wurzel sind Mykorrhizapilze und Rhizobien.

**Mykorrhiza** wurde schon zwischen 1840 und 1880 als eine Assoziation zwischen Pflanzen und Pilzen entdeckt (BERCH et al., 2005; RAYNER, 1927). Mykorrhizapilze liefern den Pflanzen mineralische Nährstoffe (Phosphor) und Wasser. Als Gegenleistung gibt die Pflanze einen Teil der fotosynthetischen Assimilate ab. Sehr wahrscheinlich hat sich die Mykorrhiza schon vor 400 Millionen Jahren im Erdzeitalter Devon entwickelt. Es wird vermutet, dass die arbuskuläre Mykorrhiza, eine spezielle Form der Mykorrhiza, überhaupt erst die Landbesiedelung durch die ersten terrestrischen Pflanzen ermöglicht hat. Generell

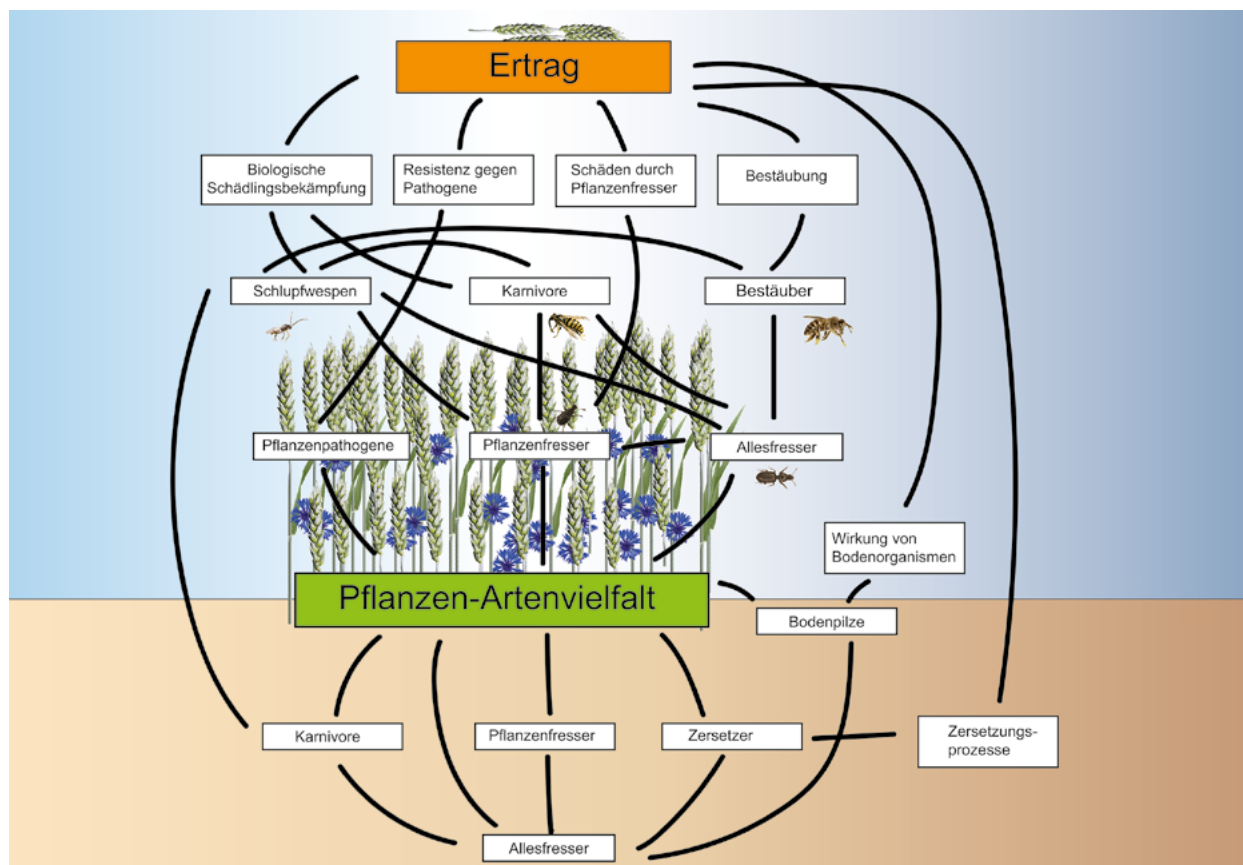


Abbildung 10: Der Zusammenhang zwischen Pflanzen-Artvielfalt und Ertrag wird durch ein komplexes Netzwerk an Interaktionen zwischen Organismen bestimmt. Artenreiche Systeme sind komplexer strukturiert, sowohl im Boden als auch oberirdisch. Durch landwirtschaftliche Maßnahmen ändert sich dieses Gefüge, bleibt aber in seiner Grundstruktur bestehen (SCHERBER).

wird Mykorrhiza in drei Formen unterteilt: die Ekto-, die Endo- und die arbuskuläre Mykorrhiza. Ektomykorrhiza stellt die am häufigsten vorkommende Wurzelsymbiose im Wald dar. In dieser Verbindung bildet das pilzliche Myzel ein dichtes Netzwerk um die Wurzel. Die Pilzhypen wachsen auch in die Wurzel hinein, dringen aber nicht in die Wurzelzellen ein.

In Europa können über 1.000 Pilzarten, darunter Trüffel und Pfifferlinge, diese Assoziation bilden. Endomykorrhiza bildet eine Symbiose zwischen überwiegend krautigen Pflanzen und Pilzen, deren Hypen in die Zellen des pflanzlichen Partners eindringen. Es wird kein Hyphennetz, sondern es werden sogenannte Haustorien, die innerhalb der pflanzlichen Zelle Nährstoffe und Wasser abgeben und Kohlenhydrate aufnehmen, gebildet. Arbuskuläre Mykorrhiza ist die häufigste Art von Mykorrhiza und eine besondere Form der Endomykorrhiza. Charakteristisch ist die Bildung von Arbuskeln, einer verzweigten Hyphenstruktur innerhalb der Zellen. Viele Nutzpflanzen profitieren von dieser Symbiose, denn die gesteigerte Phosphatversorgung wirkt sich positiv auf den Ertrag aus. Die Pilze in dieser Assoziation werden der neu geschaffenen Abteilung (Phylum) Glomeromycota zugeordnet.

**Rhizobien** haben die Fähigkeit, in Symbiose Stickstoff ( $N_2$ ) aus der Luft, in der dieses Gas reichlich vorkommt, als Stickstoffquelle zum Wachstum zu nutzen. Diese sogenannte biologische Stickstofffixierung basiert auf der Reduktion von  $N_2$  zu Ammoniak ( $NH_3$ ). Die bekanntesten Rhizobien sind wohl die Bakterien der Gattung *Rhizobium*. Diese Knöllchenbakterien leben meist in Symbiose mit Pflanzen, die zu den Hülsenfrüchtlern (Leguminosen) gehören. Bei der Etablierung der Symbiose dringen die Rhizobien als Bodenbakterien in die Wurzeln ein und als Reaktion bilden die Pflanzen dort Knöllchen aus. Die Pflanze stellt den Bakterien Kohlenstoffverbindungen zur Verfügung (Succinat, Malat und Fumarat). Die Bakterien liefern im Gegenzug die stickstoffhaltigen Verbindungen (Glutamat und Glutaminsäure). Die symbiotische  $N_2$ -Fixierung ist eine der wichtigsten Prozesse, die den Pflanzennährstoff Stickstoff, der im geologischen Ausgangssubstrat nicht oder nur in Spuren vorhanden ist, in die Böden bringt, wenn nicht gedüngt wird.

Eine andere und bis vor Kurzem oft übersehene Symbiose bilden endophytische Bakterien, die keine morphologischen Veränderungen (wie Knöllchen) an den Pflanzenwurzeln auslösen. Solche Bakterien, oft aus den Gattungen *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Serratia*, *Pantoea* oder *Pseudomonas*, können die Physiologie der Pflanzen, z. B. durch die Bildung von Hormonen, beeinflussen. Häufig verursachen diese Bakterien eine systemische Resistenz, die eine bedeutende Rolle bei der Abwehr der Pflanze gegenüber Krankheitserregern hat. Nicht selten werden diese hormonellen Reaktionen gezielt eingesetzt, um Kulturpflanzen zu schützen.

### 3.3 Netzwerke

Dass Tiere im Boden einander fressen, ist zunächst einmal nichts Neues. Früher beschrieb man solche Fraßbeziehungen als einfache „Nahrungskette“ – die ältesten Beschreibungen stammen aus dem arabischen Raum und reichen sogar bis in das achte Jahrhundert zurück. Der Begriff des „Nahrungsnetzes“ hingegen entstand erst in den 1930er-Jahren. Ein Nahrungsnetz stellt (Fraß-)Beziehungen zwischen Organismen dar; man kann es sich als System miteinander verbundener Nahrungsketten vorstellen. Die einfachste Darstellungsform ist rein topologischer Natur – die Beziehungen zwischen Bodenlebewesen werden durch Knoten und Verbindungslinien dargestellt. Ein Nahrungsnetz kann auch als Beschreibung des Energieflusses oder als Netz der verschiedensten Formen der Interaktion zwischen Bodenorganismen dargestellt werden.

Interessant ist die Tatsache, dass viele Bodenlebewesen nicht nur ein „Schattendasein“ im Boden führen, sondern entweder selbst als oberirdische Stadien existieren oder zumindest mit oberirdischen Organismen in Interaktion treten. Hierdurch ergibt sich ein oberirdisch-unterirdisches Interaktionsnetzwerk (Abbildung 10). Erst in den letzten Jahren hat man begonnen, solche komplexen Netzwerke genauer zu untersuchen, denn die hierfür verwendeten Methoden sind technisch recht aufwendig. Die Auseinandersetzung mit Nahrungsnetzen bringt dabei auch einen Perspektivwechsel mit sich: Da die Welt im Boden in Netzwerken organisiert ist, wirken sich auch scheinbar kleine Änderungen in der Abundanz von Organismen oft auf das ganze Netzwerk aus. Untersuchungen im Rahmen eines großen Grünland-Feldversuches haben gezeigt, dass Nahrungsnetze in artenreichem Grünland komplexer strukturiert sein können als in artenarmem Grünland (SCHERBER et al., 2010). Ähnliches gilt für den Ackerbau: In komplexeren und artenreicheren Systemen (z. B. im Mischfruchtanbau) finden sich feiner verästelte Netzwerke als in reinen Monokulturen. Die Struktur solcher Netzwerke wirkt sich letzten Endes auch auf den landwirtschaftlichen Ertrag aus – im positiven wie im negativen Sinne. Dazu mehr in den nachfolgenden Kapiteln dieser Broschüre.

## 4 Beteiligung an ökologischen Prozessen und Ökosystemleistungen

Bodenorganismen erfüllen wichtige Schlüsselfunktionen in vielfältigen ökologischen Prozessen. Im Resultat führt dies z. B. dazu, dass Nährstoffe überhaupt von der Pflanzenwurzel aufgenommen werden können. Bodenorganismen spielen somit eine wichtige Rolle für die landwirtschaftliche Produktivität und für die Landschaft insgesamt und sind somit wichtige Leistungsträger in unseren Ökosystemen. Um diese Ökosystemleistungen zu schützen, zu fördern und gezielt für die Landwirtschaft zu nutzen, ist es wichtig, dass wir die Funktionen von Bodenorganismen in ökologischen Prozessen und die damit verbundenen Ökosystemleistungen kennen und genau verstehen. Vieles ist der Wissenschaft bekannt – etwa, dass die Aktivität von Mikroorganismen abhängig ist von der Verfügbarkeit von Wasser und gelösten organischen Stoffen und dass das Anbaumanagement so gestaltet werden kann, dass die Bodenorganismen ausreichend Futter erhalten. Einiges liegt noch im Verborgenen und bedarf weiterer Forschung: Zum Beispiel ist immer noch zu wenig darüber bekannt, wie die Larvenstadien bodenlebender Insekten mit ihren oberirdischen Adultstadien in Verbindung stehen (above-belowground interactions; VAN DER PUTTEN et al., 2009) und es gibt nach wie vor Wissenslücken hinsichtlich des Beitrags von Bodentieren zur Bodengesundheit durch die Kontrolle bodenbürtiger Pflanzenpathogene. Auch können derzeit nur zwei bis drei Prozent der Bodenbakterien zu Analysezwecken im Labor kultiviert werden. Allerdings hat die Nutzung kultivierungsunabhängiger nukleinsäure basierter Methoden in den letzten zwei Jahrzehnten unsere Kenntnisse über die Diversität insbesondere der Bakterien, Archaeen, Pilze und Protisten revolutioniert. Durch die Nutzung besonders leistungsstarker DNA-Sequenzierungstechniken wurden viele neue, bedeutende Phyla (Stämme) im Boden entdeckt. Wichtig war die Erkenntnis, dass mikrobielle Gemeinschaften in Böden nicht nur sehr vielfältig sind, sondern auch sehr dynamisch auf sich verändernde Umweltfaktoren reagieren können. Ihre Funktionen im Ökosystem Boden zu verstehen, ist wichtiger Gegenstand der aktuellen Forschung.

### 4.1 Nadelöhr für Stoffkreisläufe: Abbau, Umbau und Speicherung der organischen Substanz

Bodenorganismen sind das „Nadelöhr, das alles organische Material, das in den Boden gelangt, passieren muss“ (übersetzt nach JENKINSON; POWLSON et al., 2017). Bodenorganismen spielen damit eine Schlüsselrolle in den Nährstoffkreisläufen: Alles organische Material, das in den Boden gelangt, wird von den Organismen als Nahrung genutzt, verdaut, veratmet und/oder ausgeschieden. Das organische Material stammt aus abgestorbenen unterirdischen Pflanzenresten wie Wurzeln und oberirdischen Pflanzenresten wie Ernteresten auf Ackerböden und Laub von Bäumen sowie organischen Düngern. Auch tote tierische Zellen und Ausscheidungsprodukte gehören zum sogenannten Humus (lateinisch humus für Erdboden), der Gesamtheit der toten organischen Substanz im Boden. Der Humus steht auf dem Speiseplan der meisten Bodenorganismen, aber nur ein Teil davon dient zum Aufbau der eigenen Biomasse und Population. Die Ausscheidungsprodukte sind ein wertvolles nährstoffkonzentriertes mineralisch-organisches Gemisch, das den Pflanzen wichtige Ernährungsgrundlagen schafft und gleichzeitig durch Humusstabilisierung den Böden langfristig hohe Fruchtbarkeit verleiht. Die Stoffe sind dabei entweder bereits vollständig verdaut (mineralisiert) oder in andere organische Verbindungen umgebaut, zum Beispiel, weil sie „schwer verdaulich“ sind. Organische Verbindungen, die von den Organismen ausgeschieden werden, sind meist relativ stabil („humifiziert“) und somit vorerst im Boden gespeichert. Die mineralischen Endprodukte entweichen gasförmig in die Atmosphäre (s. Kasten) oder gehen im Bodenwasser in Lösung und können von den Pflanzen als Nährstoff aufgenommen werden (Nitrat, Ammonium, Phosphat).

#### Warum ist die Speicherung von Humus im Boden wichtig für die Bodenfruchtbarkeit?

Der Gehalt und die Zusammensetzung von Humus sind wesentliche Parameter für die Bodenfruchtbarkeit. Er wirkt vielfältig und entscheidend auf biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften sowie auf die wichtigsten Prozesse in Böden – und dies bereits bei geringen Gehalten. Humus fördert die Bodenfruchtbarkeit, er ist die Basis für die biologische Aktivität und ein effizienter Wasser- und Stoffspeicher.

Durch ihn und die Aktivität der Bodenorganismen wird/werden:

- » Wasser gespeichert und durch verlangsamtes Versickern gefiltert,
- » Nährstoffe für Pflanzen geliefert und
- » eine stabile Bodenstruktur mit hohem Porenvolumen gebildet.

Dadurch wird/werden:

- » das Wurzelwachstum und damit die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzen erleichtert,
- » die mikrobielle Aktivität im Boden erhöht,
- » die Wasserinfiltration in den Boden verbessert sowie
- » die Erosionsanfälligkeit und
- » die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens reduziert.

### Nährstoffquelle für Pflanzen

Humus ist eine Nährstoffquelle für die Pflanzen, denn nach seiner Mineralisierung durch die Verdauung der Bodenorganismen liegen wichtige Elemente wie Phosphor und Stickstoff in der Bodenlösung als mineralisches Phosphat, Nitrat und Ammonium vor. Nach BEISECKER et al. (2015) können drei Stickstofffraktionen unterschieden werden. Dies sind der langsam wirksame Stickstoff (Nslow) aus dem Humusvorrat, der schnell wirksame Stickstoff aus der mikrobiellen Biomasse (Nfast) sowie der direkt pflanzenverfügbare mineralische

Stickstoff (Nmin) vor allem aus der Düngung. Die Menge an organisch im Boden gebundenem Stickstoff beträgt ein Vielfaches des mineralischen Stickstoffes (Abbildung 11). Kulturpflanzen nehmen nahezu ausschließlich die mineralische Stickstofffraktion auf. Ihr Bedarf ist in Abhängigkeit vom Wachstumsstadium recht genau quantifizierbar. Sind die Nährstoffe für den avisierten Ertrag nicht ausreichend vorhanden, müssen zusätzliche Nährstoffe gedüngt werden, um diesen zu erreichen.

### Warum ist eine ausgewogene Dynamik von Speicherung und Mineralisierung von Humus wichtig?

Wie alle biologischen Prozesse ist die Mineralisierung von Humus durch die Bodenorganismen, und damit die Bereitstellung von Pflanzennährstoffen im Boden, abhängig von der Temperatur sowie von der Verfügbarkeit von Wasser und Luft. Die lokalen Boden- und Witterungsverhältnisse sind also die Treiber der Humusmineralisierung und lassen sich nur wenig in Richtung Pflanzenbedarf steuern. Gelingt es, durch mineralische Ergänzungsdüngung die Stickstofflieferung aus dem Humus auf Höhe des jeweiligen Bedarfs des Kulturpflanzenbestandes zum jeweiligen Wachstumsstadium zu ergänzen, ergibt sich eine hohe Stickstoffeffizienz. Entsteht dabei nur ein geringer oder kein Stickstoffüberschuss, kann wenig Stickstoff über das Sickerwasser in das Grundwasser gelangen. Düngestrategien, die diesen Zusammenhang aufgreifen, basieren z. B. auf der Ermittlung der Stickstoffversorgung der Kulturpflanzen im Wachstumsverlauf (durch Pflanzenanalyse oder optische Verfahren), der Bedarfsprognose und Bemessung der Ergänzungsdüngung. Besonders kritisch sind niederschlagsreiche und vegetationsarme/-freie Perioden, in denen keine Stickstoffaufnahme durch Pflanzen stattfindet, die Bodenmikroorganismen jedoch weiter aktiv sind. In solchen Fällen können im Winter regelmäßig hohe Nmin-Mengen ins Grundwasser ausgewaschen werden. Durch den Klimawandel hat sich diese kritische Zeitspanne in den letzten Jahren verlängert. Insbesondere winterharte Zwischenfrüchte sind sehr gut geeignet, diesen

überschüssigen Nmin über das Winterhalbjahr zu binden. Bereits anhand der Bestandsentwicklung im Herbst lässt sich einschätzen, wie viel Stickstoff durch die Zwischenfrucht gebunden wird. Die Spanne reicht von knapp 30 kg ha<sup>-1</sup> bis über 200 kg ha<sup>-1</sup>. Davon können erfahrungsgemäß 50-70 % auf den Stickstoffbedarf der Folgekultur angerechnet werden (KLAGES et al., 2018).

Für jeden Standort ergibt sich ein charakteristischer Humusgehalt mit sich daraus ableitendem Stickstoffgehalt. Mit ansteigendem Humusgehalt im Boden steigt auch die mineralisierbare und damit potenziell pflanzenverfügbare Stickstoffmenge. Dabei haben neuere Untersuchungen gezeigt, dass auf vielen Flächen bei gleichbleibendem Humusgehalt das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C:N-Verhältnis) aufgrund der Zunahme einstreuloser Tierhaltung und der damit verbundenen Gülledüngung enger wird (GEBAUER und SCHAAF, 2017). Diese Flächen besitzen trotz des relativ niedrigen Humusgehalts ein ausgesprochen hohes Stickstoff-Nachlieferungspotenzial (GEBAUER und SCHAAF, 2017). Auch stickstoffreiche Moorböden sind im entwässerten Zustand weit entfernt von einem Humus- und Stickstoffgleichgewicht und setzen darum hohe Mengen an gelösten und gasförmigen Stickstoffverbindungen frei, die zu Umweltbelastungen führen können.



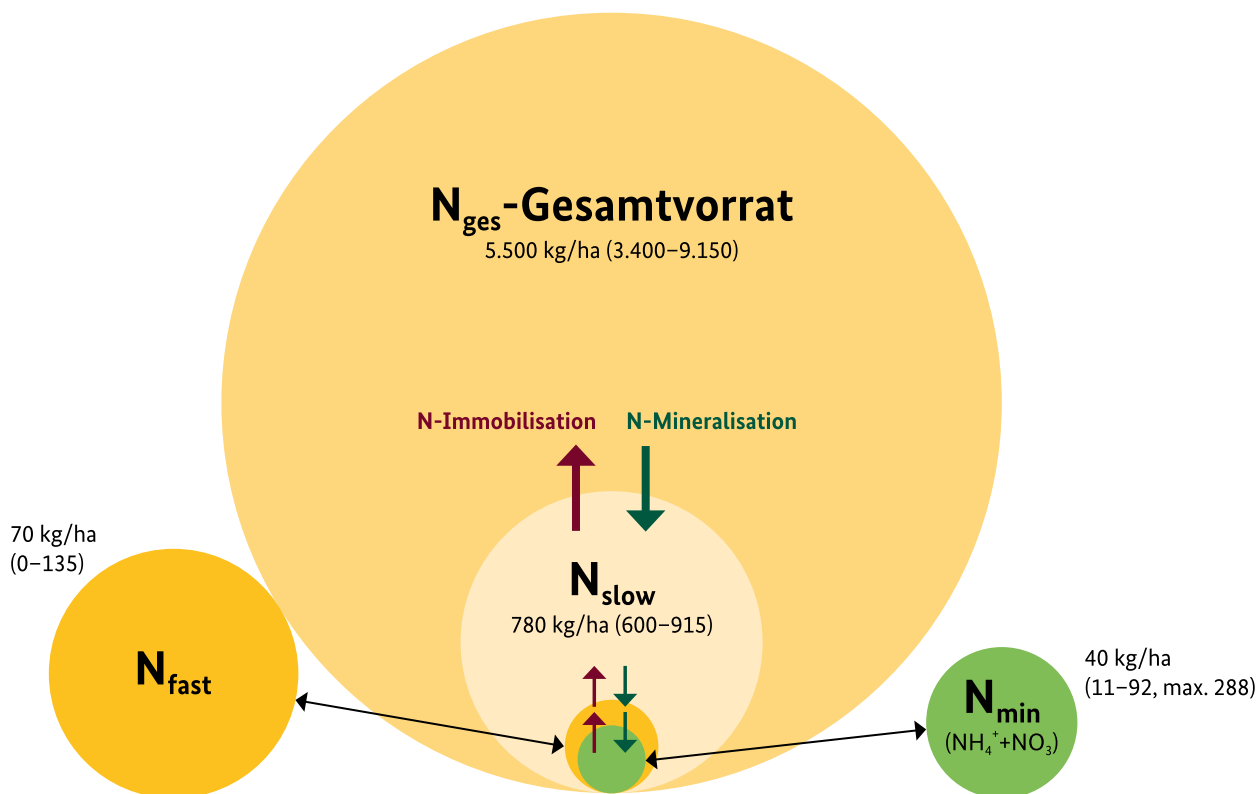


Abbildung 11: Größenordnung der verschiedenen Stickstofffraktionen im Oberboden jeweils als Mittelwert, Minimum und Maximum (BEISECKER et al., 2015).

Bodenorganismen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung und Umsetzung der Treibhausgase Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ) und Lachgas ( $N_2O$ ) (OERTEL et al., 2016). Klimabelastende  $CO_2$ -Emissionen treten auf, wenn die  $CO_2$ -Freisetzung durch die Atmung der Bodenorganismen höher ist als der Kohlenstoffeintrag über Vegetation (z. B. Erntereste) und organische Düngung. Besonders hoch sind die  $CO_2$ -Emissionen beispielsweise aus entwässerten Moorböden, in denen viele Jahrhunderte alter Torf, der unter Wassersättigung gebildet wurde, in relativ kurzer Zeit mineralisiert wird. Auch die steigenden Temperaturen beschleunigen an den meisten Standorten die mikrobiellen Abbauprozesse der organischen Substanz.

Das Treibhausgas  $CH_4$  wird durch Mikroorganismen, die zu den Archaeen gehören, in wassergesättigten Böden gebildet. Methan ist ein Produkt des Energiestoffwechsels dieser Organismen, die unter anaeroben Bedingungen, wenn gleichzeitig genügend leicht abbaubare organische Substanz vorhanden ist, aktiv sind. Böden von Feuchtgebieten sind weltweit die wichtigste natürliche Quelle für  $CH_4$ . So gehören Emissionen aus wasserüberstauten Böden des Reisanbaus zu den wichtigsten  $CH_4$ -Quellen, die der Mensch verursacht. Böden beherbergen aber auch Mikroorganismen, die  $CH_4$  als Energie- oder Kohlenstoffquelle nutzen. Besonders häufig sind diese Bakterien in sauerstoffhaltigen Bodenhorizonten oberhalb der  $CH_4$ -Bildungszone. Sie sind dafür verantwortlich, dass ein

großer Teil des gebildeten  $CH_4$  noch in den Böden wieder verbraucht wird und nicht in die Atmosphäre gelangt. Gut belüftete Böden sind aufgrund dieser  $CH_4$ -verbrauchenden Bakterien in den oberen Bodenzentimetern sogar leichte Senken für atmosphärisches  $CH_4$ .

Lachgas wird in Böden überwiegend im Zuge mikrobieller Stickstoffumsetzungsprozesse gebildet. Beteiligt hieran sind unterschiedliche Bakterien und Pilze. Zu den wichtigsten  $N_2O$ -bildenden Prozessen zählen die Nitrifikation, durch die Ammonium zu Nitrit und weiter zu Nitrat umgesetzt wird, sowie die Denitrifikation, durch die Nitrat bei Sauerstoffmangel schrittweise zu Nitrit und weiter zu verschiedenen gasförmigen Stickstoffverbindungen ( $NO$ ,  $N_2O$ ,  $N_2$ ) umgewandelt wird. Im Zuge der Denitrifikation kann  $N_2O$  sowohl gebildet als auch verbraucht werden. Lachgasemissionen aus Böden sind sowohl die bedeutendste natürliche Quelle dieses Treibhausgases als auch die wichtigste Ursache für den menschengemachten Anstieg der  $N_2O$ -Konzentration in der Atmosphäre. Hohe Emissionen treten besonders aus Böden auf, die sowohl eine hohe Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff als auch von leicht zersetzbarer organischer Substanz aufweisen. Die  $N_2O$ -Freisetzung steigt daher an den meisten Standorten mit der Höhe der Stickstoffdüngung an. Eine eingeschränkte Belüftung, die zu kleinräumig wechselnden oxidischen und anoxischen Zonen im Boden führt, begünstigt Denitrifikation und  $N_2O$ -Emission.

### Puffer- und Filteranlage

Das als Filter agierende Porensystem des Bodens wird sehr wesentlich von der biologischen Aktivität im Boden und dem Humusgehalt geprägt (s. u.). Die von vielen Bodentieren (z. B. Regenwürmern, einigen Enchytraeiden, Collembolen) ausgeschiedenen Losungsaggregate sind organo-mineralische Komplexe, die neben organischen Reststoffen Polysaccharide, Tonteilchen und Huminstoffe enthalten. Sie begünstigen die Sorption und Filterung verschiedenster Stoffe an den Wandungen und damit die Fähigkeit des Bodens, diese Stoffe abzubauen.

Diese mechanische Filterung ist zusammen mit der biochemischen Pufferung durch die Bodenmikroorganismen wesentlich, um Akkumulation und Verlagerung von Substanzen in unseren Böden zu minimieren. Diese Filter- und Pufferanlage unserer Böden spielt daher eine wichtige Rolle bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zum Schutz unserer Kulturpflanzen oder bei der Ausbringung von Gülle oder Biokompost als Düngemittel.

Beim Abbau des Humus haben verschiedene Bodenorganismen unterschiedliche Präferenzen und übernehmen damit vielfältige Ökosystemleistungen. Sie beseitigen z. B. überschüssigen Stickstoff, indem sie ihn in klimaunschädliches gasförmiges  $N_2$  umwandeln und somit die negativen Folgen der Stickstoffauswaschung für die Gewässergüte reduzieren. Je nach vorherrschenden Bedingungen können dabei jedoch auch klimaschädliche Treibhausgase entstehen (siehe Abbildung 11). Im Stoffkreislauf werden in der Regel auch Rückstände von Pflanzenschutzmitteln abgebaut, sofern sie nicht mineralischen Ursprungs sind wie z. B. kupferhaltige

Pflanzenschutzmittel. Diese können nicht abgebaut werden und reichern sich daher im Boden an, wobei sie allerdings bis zu einer gewissen Menge an Bodenpartikel gebunden werden können und damit biologisch unbedenklich sind. Auch die Wirkstoffe organischer Pflanzenschutzmittel oder deren Abbauprodukte (Metabolite) können an Bodenpartikel gebunden sein, wodurch wiederum der weitere Abbau verlangsamt wird (HERWIG et al., 2015).

### Speicher für Kohlenstoff

Humus besteht zu 58 % aus Kohlenstoff. Über ober- und unterirdische Pflanzenreste sowie organische Dünger gelangen in Deutschland im Schnitt jährlich 3,7 Tonnen organischer Kohlenstoff pro Hektar in Acker- und Grünlandböden (JACOBS et al., 2018). Durch die Arbeit der Mikroorganismen werden Verdauungsprodukte mit mineralischen Bodenpartikeln (Sand, Ton, Schluff) vermischt und zusammengeklebt. Dies ist ein wichtiger Speichermechanismus, bei dem Humus schließlich als Ton-Humus-Komplex oder in Aggregate eingeschlossen vor weiterem Abbau durch Organismen mehr oder weniger lange geschützt wird. Ton-Humus-Komplexe im Boden gelten als relativ stabile Verbindungen, die sich nicht zeitnah wieder lösen und einer längerfristigen Speicherung organischer Substanz dienen. Aggregate kommen in verschiedensten Größen im Boden vor, wobei sich mehrere kleine Mikroaggregate zu großen zusammenschließen können (OADES, 1984). Die Aggregate unterliegen einem ständigen Prozess von Neubildung und Zerfall, wobei letzterer durch mechanische Einflüsse wie Starkregen oder Bodenbearbeitung begünstigt wird (PAUSTIAN et al., 2000). Aggregate bilden also einen kurz- bis mittelfristigen Speicherplatz für Kohlenstoff im Boden.



Abbildung 12: Bodenprofil eines humosen Oberbodens im Winter.



Abbildung 13: Durch die Entnahme von Bodenproben, hier im Rahmen der Bodenzustandserhebung, kann der Humusgehalt bestimmt werden.

### Warum ist die Speicherung von Kohlenstoff im Boden wichtig?

Die organische Substanz in Böden ist weltweit der größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff. Böden speichern rund viermal so viel Kohlenstoff wie die oberirdische Vegetation und mehr als doppelt so viel wie die Atmosphäre (CIAIS et al., 2013). Im oberen Meter der landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland sind rund 2,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert (FLESSA et al., 2018). Bereits geringe Veränderungen des Vorrates von organischem Bodenkohlenstoff, sei es durch Klimaänderungen, Landnutzungsänderungen oder Bewirtschaftungsmaßnahmen, können die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre daher erheblich verändern. Ein Verlust von organischem Bodenkohlenstoff ist verbunden mit der Freisetzung des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre. Der Vorratsaufbau führt zu einer Festlegung von  $\text{CO}_2$ -Kohlenstoff in Böden, also einer C-Bindung. Auf der Grundlage internationaler Klimaschutzabkommen berichtet die Bundesrepublik Deutschland jährlich im Rahmen der nationalen Emissionsberichterstattung für Treibhausgase über Veränderungen der Vorräte an organischem Kohlenstoff in land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden. Wichtig für den Klimaschutz sind deshalb besonders langfristig stabile und hohe Vorräte an organischer Substanz.

### 4.2 Kanalisation im Boden: Aufbau einer Bodenstruktur

Regenwürmer und andere Organismen fressen die Pflanzenreste und vermischen die Verdauungsprodukte im Darm mit mineralischen Bodenpartikeln (Sand, Ton, Schluff). So entstehen Ton-Humus-Komplexe und Aggregate, die dazu beitragen, dass Humus im Boden gespeichert wird (s. o.). Bei der Bildung von Aggregaten kommt auch den Mikroorganismen eine besondere Bedeutung zu: Myzelien (lange Fäden aus Pilzzellen oder Streptomyceten) vernetzen und verbinden Bodenpartikel und Mikroaggregate mit organischen Partikeln und kleben sie regelrecht zusammen. Auch Bakterien scheiden organische Klebstoffe aus; protein- und zuckerhaltige Verbindungen dienen als Aggregatkleister. So werden grobe und feine organische Partikel und lösliche Stoffe in Aggregate eingeschlossen und im Boden vor weiterem Abbau durch die Organismen geschützt. So entsteht, neben einer stabilen Bodenstruktur, ein physikalischer Speicher für Humus. Regenwurmreiche Böden haben stabilere Aggregate, die zu groß und zu schwer sind, als dass der Wind sie forttragen könnte. So wird das Risiko von Bodenverlust durch Winderosion stark vermindert. Eine stabile Bodenstruktur kann nur dann aufgebaut werden, wenn die Bodenorganismen ausreichend Futter „von oben“ bekommen.

Wird seitens der Landwirtschaft nicht für eine ausreichende Zufuhr an organischen Materialien und für günstige Lebensbedingungen für diese Bodenarchitekten gesorgt, sackt die Kanalisation in sich zusammen. Dabei verdichtet sich der Boden und die Aggregate geben Kohlenstoff wieder frei – beides Prozesse, die die Fruchtbarkeit des Bodens herabsetzen.

Besonders die tief grabenden (anektischen) Regenwürmer ziehen Pflanzenreste von der Bodenoberfläche in tiefere Bodenschichten hinein und verdauen im und auf dem Boden vorhandene Pflanzenreste. Sie fressen an einer Stelle im Bodenprofil und scheiden an anderer Stelle wieder aus. So verläuft eine natürliche Art der Bodenbearbeitung – Bioturbation genannt –, bei der feste Bodenschichten aufgelockert werden. *Lumbricus terrestris*, der Große Tauwurm, kann als Tiefgräber dabei bis ca. ein bar Druck entwickeln (KEUDEL und SCHRAEDER, 1999) und bohrt bis zu mehrere Meter tiefe vertikale Gänge, sogenannte Wohnröhren, die mit der Bodenoberfläche verbunden sind. Die Verdrängung des Bodens führt zu einer leichten Verdichtung der Gangwände – zusätzlich ausgekleidet mit „Kot-Tapete“ erhöht sich die Stabilität (GRAFF, 1983). In diesen Gängen verbringt er sein ganzes Leben, sofern er nicht durch Störungen vertrieben wird. Tief grabende Regenwürmer ernähren sich hauptsächlich von Streuresten an der Bodenoberfläche, die sie zur Nahrungsaufnahme in die Gänge ziehen. Auf diesem Wege werden bis zu fünf Tonnen organische Reststoffe pro Hektar und Jahr von Regenwürmern in den Boden eingearbeitet. Durch die oftmals ein bis zwei Meter tiefen vertikalen Grabgänge (auch Röhren) entstehen außerdem Porenräume, die wichtig für Wasser- und Luftleitfähigkeit im Boden sind und die Pflanzenwurzeln auf der Suche nach Nährstoffen und Wasser gut erschließen können. So sind Böden vor Erosion durch heftige Niederschläge geschützt, da das Wasser schnell in den Boden gelangen (infiltrieren) kann. Bereits durch 50 intakte Regenwurmgänge pro Quadratmeter Bodenoberfläche lässt sich eine Abflussminderung von 35 % erreichen (Abbildung 14).

Das in die vertikale Bodenkanalisation eindringende Niederschlagswasser kann im Makroporenfluss Nährstoffe und Agrochemikalien mit in die Tiefe transportieren und sie dadurch der Pflanzenernährung oder dem Abbau durch die Bodenmikroorganismen entziehen. Damit steigt das Risiko, dass diese Stoffe ins Grundwasser gelangen. Darüber, ob Agrochemikalien durch die Makroporen „hindurchrauschen“ oder ob sie gelöst und gleichmäßig in die Bodenmatrix aufgenommen werden, gibt es widersprüchliche Aussagen (LOGAN et al., 1987; ALLETTO et al., 2010). Eindeutig ist jedoch, dass so die Austragsmenge an Agrochemikalien in andere Umweltmedien, z. B. in angrenzende Oberflächengewässer, geringer ist, als wenn diese direkt mit dem Abfluss von der Bodenoberfläche verlagert werden. So kommt dem porenreichen Boden eine wichtige Bedeutung als Filteranlage für den Schutz angrenzender terrestrischer und aquatischer Habitats zu (DÜRING und HUMMEL, 1999).

Infiltrationsmessungen mit eingefärbten Substanzen belegen, dass Böden unter nicht wendender Bodenbearbeitung gegenüber solchen unter Pflugeinsatz weitaus mehr und tiefer reichende Makroporen aufweisen (HANGEN et al., 2002). Bei gleicher oder höherer Lagerungsdichte zeigte ein Boden unter Mulchsaat ein ausgeprägtes Makroporensystem mit deutlich höherer Kontinuität, Konnektivität und Tortuosität (Grad an Gewundenheit). Selbst wenn diese Gänge nur mit zwei bis vier Prozent am Gesamtporenvolumen beteiligt sind (EHLERS, 1975), fördern sie durch ihre hohe Kontinuität den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens entscheidend. Die Röhren sind durch das organische Material auf der Bodenoberfläche vor Verschlämmung geschützt (s. a. rechts im Bild). Die gesteigerte Infiltrationsleistung führt in gefährdeten Gebieten zu einer Entspannung der Hochwassersituation (HANGEN et al., 2002) und verbessert nach Niederschlagsereignissen die Befahrbarkeit des Bodens.

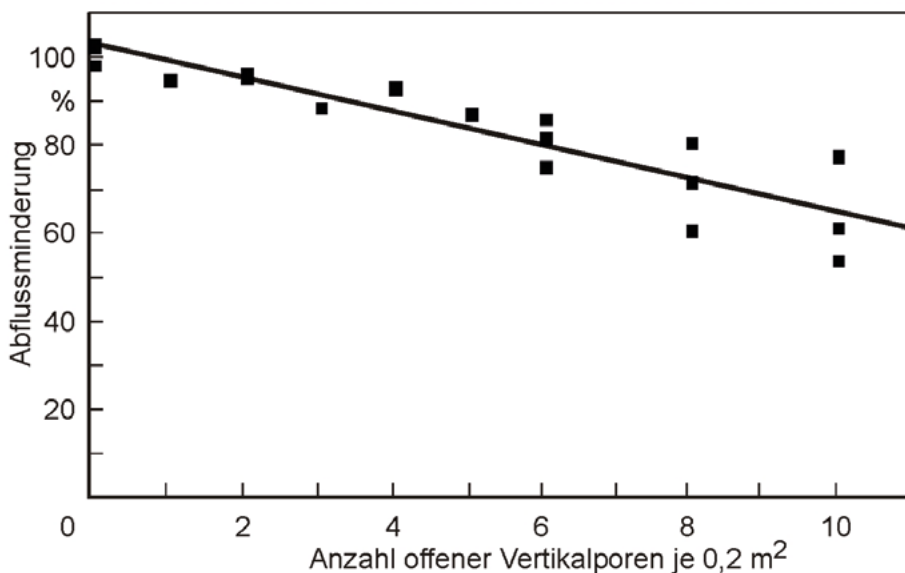


Abbildung 14: Reduktion des Oberflächenabflusses von Wasser durch die Anzahl an biogenen Vertikalporen (Regenwurmgingen) in einem Ackerboden (ROTH und JOSCHKO, 1991).

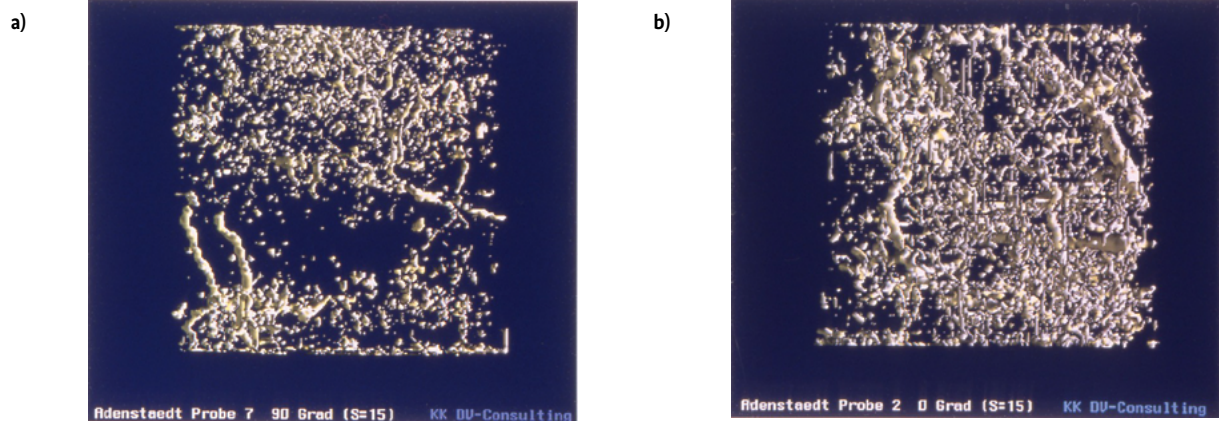


Abbildung 15: Dreidimensionale Visualisierung des Makroporenraumes (Makroporen > 1 mm) durch Röntgencomputertomografie von ungestörten Bodensäulen (Durchmesser = 10 cm) bei a) wendender Bodenbearbeitung mit Pflug und b) nicht wendender Bodenbearbeitung mit Grubber; Adenstedt (ROGASIK et al., 1994).

Der senkrechte Verlauf der Regenwurmgänge erhöht die Gefügestabilität und reduziert damit die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden, weil Strukturen gegenüber Druckbelastung umso stabiler sind, je ausgeprägter sie in Richtung der einwirkenden Belastungsimpulse ausgerichtet sind (HARTGE und SOMMER, 1980; KIRBY und BLACKWELL, 1989). Sie reichen oft durch dichtere Kompartimente im Boden, wie z. B. Krumenbasisverdichtungen, hindurch und stellen die Verbindung zum Unterboden her (SOMMER, 1998; VETTER und LICHTENSTEIN, 1968). In der dreidimensionalen Visualisierung des Makroporenraumes durch Röntgencomputertomografie ist bei wendender Bodenbearbeitung mit Pflug oft ein Abschneiden vertikaler Regenwurmgänge an der Krumenbasis zu beobachten (links im Bild). Auch werden die kontinuierlichen Poren im Boden unter Mulchsaat (Abbildung 15 b; beide ROGASIK et al., 1994) gegenüber den ungeordneten Hohlraumformen der Bearbeitung mit Pflug deutlich.

Inwieweit sich die ungeordneten Poren einer Pflugfurche bei mechanischer Belastung verändern, zeigten Computertomografie-Untersuchungen an ungestörten Bodensäulen bis in 35 cm Tiefe (Abbildung 16; JEGOU et al., 2001). Bei kurzzeitiger Belastung mit 250 kPa, was einer Belastung eines Reifens eines sechsstufigen beladenen Rübenrodgers entspricht, wurde das Porensystem bis zur Krumenbasis stark zusammengepresst, der nahe Unterboden blieb relativ unbeeinflusst. Das deutet auf die erhöhte Tragfähigkeit der Krumenbasis aufgrund erhöhter Lagerungsdichte hin. Dies ist unkritisch für die Bodenfunktionen, wenn die Zone durch Regenwürmer ausreichend „durchport“ ist, sodass Luft-, Wasserhaushalt und Wurzelwachstum gewährleistet sind (SCHRADER et al., 2020a).

### 4.3 Ansteckungsgefahr für Pflanzen: Krankheiten und Schädlinge aus dem Boden

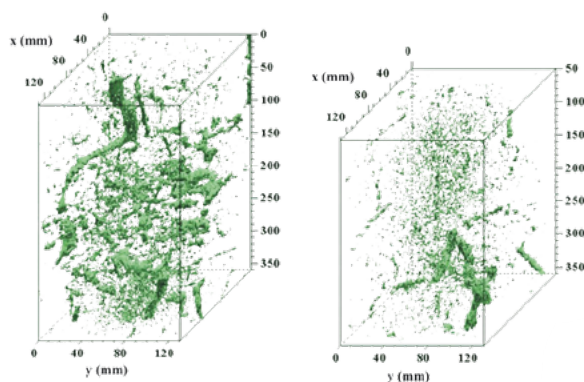


Abbildung 16: Dreidimensionale Visualisierung eines Makroporensystems nach Pflugfurche ohne Druckbelastung (links) und nach einer Druckbelastung mit 250 kPa (rechts) (JEGOU et al., 2001).

Die Bodenbiodiversität hat zwei Gesichter und ist aus Sicht der Landwirtschaft nicht uneingeschränkt positiv zu werten. So schließt die biologische Vielfalt in landwirtschaftlich genutzten Böden auch potenzielle Schaderreger mit ein. Dabei gilt der Grundsatz: Je diverser die Zusammensetzung der Bodenorganismenarten ist, desto widerstandsfähiger ist diese Gemeinschaft gegenüber Schaderregern. Erstaunlich viele Insekten verbringen einen Teil ihres Lebens im Boden und es gibt in allen bekannten Insektenordnungen Arten, die zur Bodenfauna gezählt werden können (MCCOLLOCH und HAYES, 1922). Viele weitere suchen im Boden zeitweise Schutz vor Umwelteinflüssen und überdauern Trocken- und Kälteperioden. Als Bodenschädlinge unter den Insekten werden in der Regel nur solche Arten bezeichnet, bei denen ein oder mehrere Entwicklungsstadien Ertragseinbußen oder ästhetische Schäden durch Fraß an unterirdischen Teilen (Wurzeln, Knollen, Sprossen) von Kulturpflanzen hervorrufen. Neben Nematoden spielen auch Bakterien, Viren und insbesondere bodenbürtige Pilze als Verursacher zahlreicher Pflanzenkrankheiten eine entscheidende wirtschaftliche Rolle.

Bedeutende pflanzenpathogene **Bodenpilze** (und Oomyceten) stellen Vertreter der Gattungen *Rhizoctonia*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Sclerotinia*, *Pythium*, *Phytophthora* (Orgiazzi et al. 2016) und die Art *Synchytrium endobacterium* dar. Ein Befall mit diesen Pflanzenpathogenen kann zu erheblichen Ertragsverlusten der angebauten Kultur führen. Exakte Verluste sind oft schwierig zu ermitteln, Schätzungen zufolge liegen die Ertragsverluste durch Pilzbefall in den Hauptkulturen (Weizen, Reis, Kartoffeln, Mais und Soja) weltweit zwischen sieben und 15 % (OERKE, 2006). Unter extremen Bedingungen können sie regional weit höher sein. Die Anfälligkeit der Kulturpflanze und das Infektionsgeschehen werden stark durch externe Faktoren beeinflusst, denn natürlicherweise haben Böden durch komplexe Selbstregulierungsmechanismen eine Art Immunsystem, das eine übermäßige Entwicklung von Schadorganismen unterdrückt (siehe unten). Bei Bewirtschaftungsweisen wie z. B. Daueranbau der Wirtspflanzen bzw. einseitigen Fruchtfolgen mit häufigem Anbau von gleichen Wirtspflanzen oder intensiver Bodenbearbeitung kann die Funktion dieser Mechanismen gestört sein. Zusätzlich spielen für das Infektionsgeschehen abiotische Faktoren wie Witterungsverhältnisse (Temperatur und Niederschlag), Licht (Tageslänge) und Nährstoffangebot eine entscheidende Rolle. Auch das Entwicklungsstadium der Pflanzen ist entscheidend für eine Infektion, da ältere Pflanzen im Allgemeinen widerstandsfähiger sind als Pflanzen im Jungstadium (BÖRNER, 2009). Im Hinblick auf eine mögliche Infektion stellt vor allem die Gattung *Fusarium* die Landwirtschaft vor besondere Herausforderungen. Diese **bodenbürtigen Schadpilze** finden in den Pflanzenresten, die nach der Ernte auf der Bodenoberfläche verbleiben, ein ideales Nährsubstrat. Bevorzugt werden Mais- und Getreidereste besiedelt. Da die Überlebensdauer verschiedener *Fusarium*-Arten im Boden oft mehrere Jahre betragen kann (LEPLAT et al., 2013), gefährdet eine Infektion nicht nur den aktuellen Bestand, sondern auch die Gesundheit der in der Fruchtfolge nachfolgenden Kulturen. Darüber hinaus produzieren diese pflanzenpathogenen Pilze giftige Stoffwechselprodukte, sogenannte Mykotoxine, die ein Gesundheitsrisiko für Mensch und Tier darstellen (BIANCHINI et al., 2015). Zu den häufigsten Mykotoxinen der Fusarien zählen Deoxynivalenol (DON), Zearalenon (ZEN) und Fumonisin. Ein *Fusarium*-Befall mit einhergehender Mykotoxin-Kontamination beeinträchtigt die Verwertbarkeit des Ernteguts im Rahmen der Nahrungs- und Futtermittelproduktion und geht mit wirtschaftlichen Schäden einher (FERRIGO et al., 2016). Erschwerend kommt hinzu, dass viele bodenbürtige Schadpilze von den aktuell verfügbaren Fungiziden nur in begrenztem Maße erfasst werden können (WEGULO et al., 2015; PAUL et al., 2018; MASIELLO et al., 2019), gleichzeitig aber, aufgrund der prognostizierten Klimaveränderung, zukünftig noch mit einer Zunahme der Befallsraten zu rechnen ist (VAUGHAN et al., 2016).

Eine Reihe von **Bodenbakterien**, die zu verschiedenen Gattungen gehören, kann Pflanzenkrankheiten auslösen – *Agrobacterium/Rhizobium*, *Dickeya* oder *Pectobacterium* (früher *Erwinia*), *Ralstonia*, *Streptomyces*, *Clavibacter*. Durch die Nutzung DNA-basierter Methoden (Genomsequenzierung) hat sich in den letzten Jahrzehnten das Wissen über die Taxonomie, die Ökologie und die Pathogenität dieser bakteriellen Phytopathogene grundlegend verändert. So haben Genomsequenzierungen nicht nur zur Reklassifizierung vieler bakterieller Phytopathogene geführt, sondern auch gezeigt, wie hoch die genetische Vielfalt innerhalb einer Art sein kann, und dass die Eigenschaft, Krankheiten hervorzurufen, oft stammspezifisch ist. Heute liegen Genomsequenzen für viele bakterielle Pathogene vor und ermöglichen, die Verwandtschaft von Phytopathogenen isoliert von verschiedenen Wirtspflanzen oder aus verschiedenen Regionen zu vergleichen. Viele bakterielle Phytopathogene sind für die Pflanze nur gefährlich, wenn ihr Vorkommen eine kritische Zellzahl pro Gramm Boden übersteigt. Hier spricht man vom sogenannten Quorum sensing – also einer kritischen Zellzahl, die erreicht sein muss, bevor Gene, die für die Pathogenität wichtig sind, exprimiert werden. Im Boden können auch Bakterien vorkommen, die **potenziell humanpathogen** (gesundheitsschädigend für Menschen) sind oder übertragbare Antibiotikaresistenzen besitzen. Sie kommen meist in geringen Zellzahlen vor und können über nicht oder wenig hitzebehandeltes Obst oder Gemüse (Salat, Kräuter) in die Nahrungskette gelangen. Man geht davon aus, dass organische Dünger und Beregnungswasser sowie die Verfrachtung von Bodenpartikeln oder Wildtiere zum Eintrag dieser Bakterien in den Boden beitragen. Das Vorkommen in geringen Zellzahlen macht den Nachweis schwierig und die Kombination molekularer Methoden mit Anreicherungsverfahren notwendig. Untersuchungen zum Überleben von phyto- und humanpathogenen Bakterien im Boden haben gezeigt, dass eine hohe mikrobielle Diversität und Aktivität der Bodenmikroorganismen die beste Kontrolle dieser Erreger darstellen. Ein verbessertes Verständnis der multifaktoriellen Interaktionen zwischen Pflanze, bakteriellen Phytopathogenen, Antagonisten (auch Inokulantien) und der autochthonen mikrobiellen Gemeinschaft wird durch die konsequente Nutzung moderner, ganzheitlicher Hochdurchsatz-Methoden (sogenannter „omics“-Techniken) erwartet.

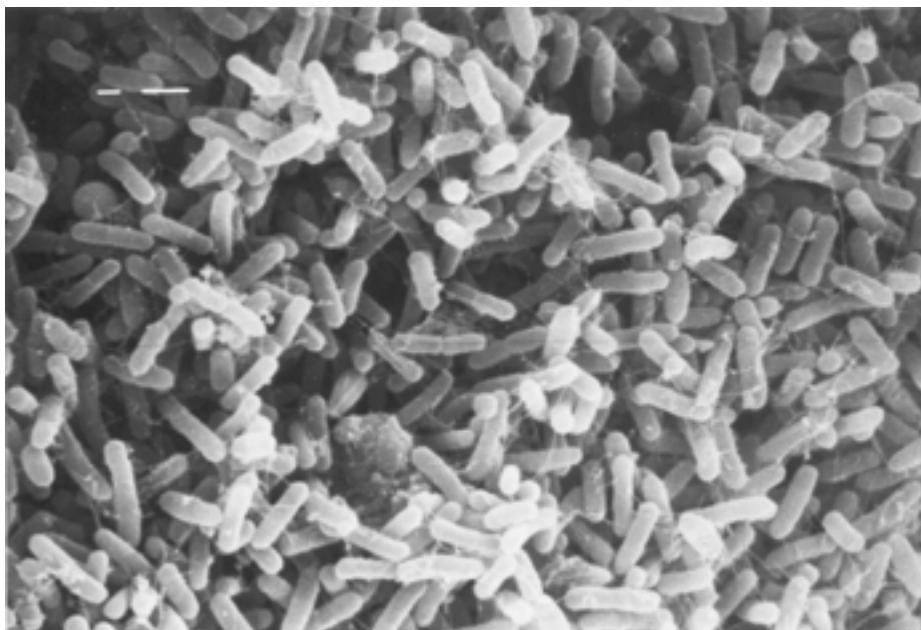


Abbildung 17: Die Aufnahme mit Raster-Elektronenmikroskop zeigt Darmmikroorganismen eines Collembolen (*Folsomia candida*).

**Pflanzenviren** gehören per Definition nicht zu den Lebewesen, da sie keinen eigenen Energie produzierenden Stoffwechsel besitzen und zur Vermehrung auf die Zelle ihres Wirtes angewiesen sind. Trotzdem gehören sie zu den sehr erfolgreichen Pathogenen sämtlicher Lebensformen auf diesem Planeten und haben eine Vielzahl unterschiedlicher Übertragungsmechanismen entwickelt. Der größte bekannte Teil der pflanzenpathogenen Viren wird über Insektenvektoren auf spezifische Wirtspflanzen übertragen. Mehr als 50 Spezies aus mindestens fünf verschiedenen Familien werden als bodenbürtig bezeichnet und über den Boden übertragen. Sie kommen weltweit vor und nicht wenige von ihnen verursachen Krankheiten – verbunden mit erheblichen wirtschaftlichen Verlusten – bei wichtigen Kulturpflanzen. Vektoren für die Verbreitung dieser Viren sind, neben Insekten, pilzähnliche Organismen (Protisten), Pilze oder pflanzenparasitäre Nematoden. Einige Viren können auch von den Wirtspflanzen aus infizierten Wurzeln ausgeschieden werden und abiotisch, also ohne die Hilfe eines Vektors, übertragen werden. Eine wichtige Quelle für die Verbreitung ist die Verfrachtung von Boden durch Wind oder menschliche Aktivitäten, wie z. B. Erntemaschinen oder Pflanzgut. Die hohe Überdauerungsfähigkeit/Persistenz von teilweise mehreren Jahrzehnten und ein Mangel an effizienten Kontrollstrategien bedeuten, dass die verursachten Pflanzenkrankheiten nur sehr schwer zu kontrollieren sind: Einmal mit einem Virus infiziert, ist eine Eradikation des Inokulums aus dem Boden nahezu unmöglich. Auch eine vollständige Kontrolle des Inokulums über die Gestaltung der Fruchtfolge konnte bisher nicht gezeigt werden. Bei Infektion eines Bodens mit einem spezifischen Virus ist daher, neben dem völligen Ausschluss der Wirtskulturart aus der betroffenen Anbauregion, die pflanzliche Resistenz, wenn verfügbar, die einzige Kontrollmöglichkeit zur Sicherung von Ertrag und Anbauwürdigkeit dieser Kulturart. Darüber hinaus sind bodenbürtige Viren sehr schwer zu studieren und insbesondere die Biologie

der Übertragung ist noch kaum verstanden (CAMPBELL, 1996). Einige der bodenbürtigen Viren besitzen auch die Fähigkeit, über Samen oder vegetative Vermehrungseinheiten (z. B. Knollen) an die Nachkommenschaft übertragen zu werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Mehrzahl der Virusspezies mit diesen speziellen Eigenschaften noch unentdeckt ist. Beispiele für ökonomisch bedeutende bodenbürtige Viren sind aus nahezu jeder Gruppe der landwirtschaftlich bedeutenden Kulturpflanzen zu nennen. Zum Beispiel werden Weizen, Gerste, Roggen, Triticale und Hafer über *Polymyxa graminis* (einen pilzähnlichen Protisten) z. B. mit Barley yellow mosaic virus (BaYMV) oder Soil-borne cereal mosaic virus (SBCMV) und diversen verwandten Spezies infiziert und stark geschädigt (bis zu 50 % Ertragsverlust) (KÜHNE, 2009). Der Zuckerrübenanbau ist durch das ebenfalls von Protisten übertragbare Beet necrotic yellow vein virus (BNYVV) bedroht und wirtschaftlich nur durch pflanzliche Resistenzeigenschaften möglich (SCHOLTON und LANGE, 2000). Kartoffeln werden durch das von Protisten übertragbare Potato mop-top virus (PMTV) und das durch Nematoden übertragbare Tobacco rattle virus (TRV) befallen, was zu erheblichen Qualitätseinschränkungen führt. TRV besitzt darüber hinaus einen sehr großen Wirtspflanzenkreis mit mehreren Hundert Pflanzenspezies. Im Weinanbau ist weltweit die Reusigkrankheit der Weinrebe die bedeutendste Krankheit, verursacht u. a. durch das Grapevine fanleaf virus (GFLV) und übertragen durch frei lebende Nematoden. Sie kann bis zu 80 % Ertragsverluste hervorrufen. Da die Vektoren auch ohne Wirtspflanzen vier bis fünf Jahre überleben können, kann die Krankheit aktuell nur durch Rodung der Rebstöcke und mit einer langen Anbaupause bekämpft werden (ANDRET-LINK et al., 2004).

Die Fraßaktivität von **Insekten** als Bodenschädlinge kann zu Wuchsdepressionen, direkten Schäden am Erntegut oder sogar zum Absterben der Pflanzen und damit auch zu hohen wirtschaftlichen Schäden führen (BROWN und GANGE, 1990). Auch Vegetationsgesellschaften können sich mit zunehmender Herbivorie am Wurzelsystem in der Artenzusammensetzung verändern (BROWN und GANGE, 1989), was in Grünland- oder Kleegrasmischungen durchaus relevant ist. Die allgemein als Engerlinge bekannten Larven von Mai-, Juni- oder Gartenlaubkäfern leben je nach Art ein bis mehrere Jahre im Boden und schädigen durch Fraß die unterirdischen Teile verschiedenster Pflanzen von Gräsern und Kräutern über ackerbauliche Kulturen bis hin zu Obstbäumen (ZIMMERMANN, 2010). Der verwandte, in Nordamerika hochproblematische Japankäfer (*Popilia japonica*) wurde inzwischen auch nach Europa (Norditalien) eingeschleppt (EFSA PLH Panel 2018) und in der EU als Quarantäneschadorganismus eingestuft. Auch in Deutschland gibt es Hinweise auf Erstfunde in Nordrhein-Westfalen im Jahr 2014 und in Bayern im Jahr 2018. Einschleppungen oder aktive Einwanderungen neuer Arten gab es auch bei Dickmaulrüsslern (*Otiorynchus*-Arten an vielen Zierpflanzen) und Blattrandrüsslern (*Sitona*-Arten an Leguminosen). Bei diesen beiden Gruppen stellen auch die Larven einiger einheimischer Arten wichtige Schädlinge dar. Die Blattrandrüsslerlarven fressen dabei fast ausschließlich an den rhizobienhaltigen Wurzelknöllchen der Leguminosen, während die Larven der Dickmaulrüsslerarten an unterirdischen Teilen vieler Pflanzenarten fressen (RHEINHEIMER und HASLER, 2010). Drahtwürmer, die unterirdisch lebenden Larven verschiedener Schnellkäfer-Arten (Elateridae) mit ebenfalls mehrjähriger Entwicklung, führen gleichfalls zu quantitativen und qualitativen Ertragsverlusten in vielen Kulturen. Informationen zu Biologie und Identifikation vieler Drahtwürmer sind immer noch unvollständig (BARSICS et al., 2013) – ein Problem für deren Bekämpfung, das auch auf andere Bodenschädlinge zutrifft. Drahtwürmer sind aktuell im Kartoffelanbau ein großes Problem, da es hier derzeit keine hinreichend wirksamen chemischen Möglichkeiten der Bekämpfung gibt. Im Mais stellt sich mit dem Larvenfraß des Westlichen Maiswurzelbohrers (*Diabrotica virgifera*) ein weiterer im Boden sehr aktiver Schädling ein, dessen hohes Schadpotenzial für den Maisanbau unbestritten ist (SCHWABE et al., 2010). Diese aus Nordamerika eingeschleppte Art hat ihr volles Schadpotenzial in Mitteleuropa bis 2020 noch nicht erreicht und befindet sich weiter in Ausbreitung. Die heimische Kleine Kohlflyge (*Delia radicum*) entwickelt mit ihren drei Generationen pro Jahr in Mitteleuropa ebenfalls ein hohes Schadpotenzial, gehört zu den bedeutendsten Schädlingen im Kohlanbau und spielt auch im Raps eine Rolle. Auch weitere Wurzelfliegen (*Delia platura*, *Delia florilega* etc.) können an verschiedenen Pflanzenarten wirtschaftliche Schäden anrichten (FINCH, 1989). Daneben sind Schnakenlarven (Tipulidae), die vor allem im Grünland schwere Ertragsverluste bis zum Kahlfraß verursachen können (FRENCH et al., 1990), und verschiedene Erdräupen (aus der Familie der Eulenfalter, Noctuidae), die vor allem in Gemüse- und Ackerkulturen zu hohen Verlusten führen können, von Bedeutung. Keine Bodenschädlinge im eigentlichen Sinn sind die Schadinsekten, die nur das Puppenstadium im Boden verbringen und die Entwicklung zum Vollinsekt im Boden

verleben, aber während der Entwicklungsschritte im Boden unschädlich sind. Dies sind erstaunlich viele Arten, unter anderem ein Großteil der Rapsschädlinge, der Kartoffelkäfer, Getreidehähnchen, viele Eulenfalter, verschiedene Gallmückenarten und verschiedene Thripse. Die Bekämpfung vieler Insekten-Bodenschädlinge ist meist schwierig, da die schädigenden Entwicklungsstadien während der Vegetationsperiode kaum direkt erreicht werden können. Ein weiteres Problem ist die oft komplexe Biologie der Bodenschädlinge unter den Insekten, die in vielen Fällen nur bestimmte Lebensstadien im Boden verbringen und in anderen Stadien flugfähig und oberirdisch mobil sind, sodass diese Stadien aktiv neue Flächen besiedeln können. Eine mögliche Lösung aus Sicht des Pflanzenschutzes ist die Saatgutbehandlung mit Insektiziden oder die Anwendung von insektizidhaltigen Granulaten, die die besonders empfindlichen Jungpflanzen schützen. Das Einbringen von Antagonisten, z. B. insektenpathogenen Nematoden oder Pilzen, in den Wurzelraum kann eine vielversprechende Alternative sein, z. B. bei der Bekämpfung der Larven einiger Dickmaulrüssler (HIRSCH, 2012; HOMMES et al., 2015). Andere, wie z. B. Drahtwürmer, sind gegenüber solchen Gegenspielern teilweise unempfindlicher. Außerdem gibt es artspezifische Faktoren. Insektenpathogene Pilzstämme oder Nematoden mit guter Wirkung bei einer Drahtwurm- oder Dickmaulrüsslerart können beispielsweise bei einer anderen Art keine Wirkung haben – dies gilt selbst für nah verwandte Arten (POGGI et al., 2021). Die Wirksamkeit der Antagonisten von Insekten-Bodenschädlingen hängt zusätzlich stark von lokalen Bodeneigenschaften wie Porengefüge, pH-Wert und Wasserhaushalt ab. Biologische Pflanzenschutzmittel auf Basis von Antagonisten im Einsatz gegen Insekten-Bodenschädlinge sind demnach bisher oft weniger wirkungssicher als die zum Teil nicht mehr verfügbaren chemischen Produkte. Ansätze, dieses Problem zu mindern, sind „attract & kill“-Formulierungen oder die Kombination verschiedener Gegenspieler. Auch die Förderung natürlicher Gegenspieler, wie zum Beispiel verschiedener Kurzflügelkäfer (Staphylinidae) oder räuberisch lebender Bodenmilben, kann dabei helfen, manche Insekten-Bodenschädlinge zu regulieren. Da außerdem viele oberirdisch schädigende Insekten Teile ihres Lebenszyklus im Boden verbringen, gibt es auch Versuche, solche Arten ebenfalls im Boden mit insektenpathogenen Antagonisten zu kontrollieren. Wo Insekten-Bodenschädlinge in landwirtschaftlichen Böden überdauern, können ihre Populationen auch durch geeignete, oft tiefgründige Bodenbearbeitungsmaßnahmen teilweise reduziert werden. Solche Maßnahmen stehen jedoch der Idee des Bodenschutzes durch reduzierte Bodenbearbeitung gegenüber.

Innerhalb der Bodenfauna stellen **pflanzenparasitäre Nematoden** typische Fruchtfolgeschaderreger dar. Durch den wiederholten Anbau von Wirtspflanzen können sie hohe Besatzdichten erreichen und einen wirtschaftlichen Anbau von Kulturpflanzen unmöglich machen. In diesem Fall spricht man auch von Bodenmüdigkeit (z. B. Rübenmüdigkeit bei Auftreten des Rübenzystennematoden an Zuckerrüben). Ein weiteres Beispiel sind Kartoffelzystennematoden als ernst zu nehmende Quarantäneschadorganismen. In Deutschland werden zwei Arten unterschieden: der gelbe Kartoffelzystennematode



(*Globodera rostochiensis*) und der weiße Kartoffelzystenne-matode (*Globodera pallida*). Pflanzenparasitäre Nematoden saugen an den Wurzeln und entziehen so den Pflanzen Wasser und Nährstoffe. Die Pflanze wird geschwächt und ist anfälliger für Krankheiten. Besonders groß ist der Schaden, wenn die Erträge gering sind oder die Ernteprodukte geschädigt und nicht mehr vermarktet werden können (z. B. beinige Möhren). Grundsätzlich werden alle Pflanzen von Nematoden befallen, doch nur, wenn bestimmte Schadschwellen überschritten werden, kommt es zu einer wirtschaftlichen Auswirkung. Die Höhe des Schadens wiederum hängt vom Spektrum der auftretenden Nematodenarten, der Anfälligkeit der Kulturpflanze und den herrschenden Umweltbedingungen ab. Es gibt Arten mit einem engen Wirtspflanzenkreis (z. B. Zystennematoden) und Arten mit einem sehr breiten Wirtspflanzenkreis (z. B. Wurzelgallennematoden, Wurzelläsionsnematoden). Einige Nematoden saugen nur von außen an der Wurzel, andere dringen komplett in die Wurzel ein, wandern in der Wurzel entlang oder induzieren ein Nährgewebe, von dem sie sich für den Rest ihres Lebens ernähren. Mögliche Gegenmaßnahmen sind eine Auflockerung der Fruchtfolge, die Förderung des Bodenlebens oder der Anbau resistenter Sorten oder resistenter Zwischenfrüchte.

#### 4.4 Gesundheitssystem für Pflanzen: Antagonisten und Bioregulation

Böden verfügen natürlicherweise über komplexe Selbstregulierungsmechanismen – deren Akteure: die Bodenorganismen. Sie sind Gegenspieler, sogenannte Antagonisten, von Krankheitserregern und Schadorganismen und übernehmen die Bioregulation. Die mikrobielle Diversität und insbesondere das Vorkommen und die Aktivität von Bakterien oder Pilzen, die Antagonisten sind oder durch Sensibilisierung oder sogenannte induzierte systemische Resistenz die Immunantwort der Pflanze stärken, sind von großer Bedeutung für die Kontrolle von Pflanzenkrankheiten. Neben den Mikroorganismen weist auch die Bodenfauna zahlreiche Schlüsselarten mit hohem antagonistischem und bioregulatorischem Potenzial auf. Werden Antagonisten im Rahmen des landwirtschaftlichen Managements berücksichtigt und wird ihre Aktivität gefördert (z. B. durch eine vielfältige Fruchtfolge oder reduzierte Bodenbearbeitung), so kann man sich diese Bioregulation gezielt zunutze machen. Diese Ökosystemleistung trägt damit maßgeblich zu einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktion auf gesunden, ertragsfähigen und widerstandsfähigen Böden bei (Abbildung 18). Darüber hinaus gelten Antagonisten als Indikatorarten für den guten ökologischen Zustand unserer Böden.

Regenwürmer fressen in Apfelplantagen das mit Schorfsporen (*Venturia inaequalis*) befallene Falllaub und tragen damit zur Reduzierung des Infektionsdruckes im Folgejahr bei. Zur Verbesserung der Wirkung wird die mehrmalige Ausbringung von Vinasse oder Bierhefeextrakt auf dem Falllaub empfohlen, weil sich daraufhin Mikroorganismen, die wiederum die Attraktivität der Blätter für Regenwürmer steigern, ansiedeln

(BLE, 2020a). Diese Bedeutung der Antagonisten kann unter Umständen konterkariert werden, wenn für die Bekämpfung des Apfelschorfes regenwurmschädigende, kupferhaltige Pflanzenschutzmittel angewandt werden (BVL, 2020). Räuberische Milben (Gamasina) im Boden jagen Nematoden, unter denen viele unsere Kulturpflanzen schädigen können. Laufkäfer (Carabidae) jagen als Larven und erwachsene Tiere im und auf dem Boden fast alles, was dort krecht und fleucht. Sie fressen Schnecken und von den Pflanzen heruntergefallene Blattläuse, im Boden vorhandene Eier, Puppen und Larven anderer Insekten, aber auch nützliche Spinnen und Regenwürmer. Phytophage Laufkäferarten verzehren zusammen mit anderen Samenfressern einen großen Teil der ausfallenden Samen der Ackerbegleitflora (Unkräuter, Ungräser, nicht mit der Kulturpflanze konkurrierende Pflanzen). Spinnen (vor allem Zwerg- und Baldachinspinnen) stellen ebenfalls vielen Insekten nach, darunter einer Vielzahl von Schädlingen, z. B. Blattläusen. Mit dem Schutz und der Förderung von in und auf dem Boden lebenden Antagonisten von Schadorganismen wird ein wichtiger Beitrag zur natürlichen Selbstregulation in Agrarökosystemen und damit zur Reduktion der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln geleistet.

Pilzfressende Bodentiere unterdrücken Schadpilze und beschleunigen den Abbau ihrer Mykotoxine (GONCHAROV et al., 2020; SCHRADER et al., 2020b). Verschiedene Studien zeigen, dass schadpilzinfizierte und mykotoxinkontaminierte Pflanzenreste von unterschiedlichen Bodentieren als Nahrungsquelle sogar bevorzugt werden (BONKOWSKI et al., 2000), da die erhöhten Stickstoffgehalte im pilzinfizierten Material eine bessere Nährstoffversorgung gewährleisten (LARSEN et al., 2008). Neben den kleineren Vertretern der Bodenfauna (z. B. Enchytraeiden, Collembolen, Nematoden), die die Pilze gezielt abweiden, spielen insbesondere die Primärerzersetzer innerhalb der Regenwurmgemeinschaft eine wichtige Rolle (SCHRADER et al., 2020b). Sie arbeiten die Pflanzenreste über ihre Gangsysteme aktiv in den Boden ein und nutzen sie unmittelbar als Nahrungsquelle. Auf diese Weise entziehen sie den Schadpilzen nicht nur das Siedelsubstrat, sondern unterbinden gleichzeitig die lichtabhängige Bildung von Pilzsporen (INCH und GILBERT, 2003) und somit die weitere Verbreitung der Pilze. Neben dem direkten antagonistischen Effekt durch die Bodentiere selbst tragen auch die mit ihnen assoziierten Mikroorganismen (z. B. Bakterien auf der Haut oder im Darm) zur Unterdrückung der Schadpilze sowie zum Abbau ihrer Mykotoxine bei. Die synergistische Zusammenarbeit zwischen landwirtschaftlichem Management und Bodenfauna (Bioregulation als Ökosystemleistung) kann daher in landwirtschaftlichen Systemen eine Erfolg versprechende Bekämpfungsstrategie gegen pflanzenpathogene Pilze (z. B. Fusarien) (Abbildung 18) und ggf. gegen Bakterien oder Oomyceten darstellen.

## Welche Bedeutung haben Antagonisten für den integrierten Pflanzenschutz?

Wenn der Schutz der Kulturpflanzen vor Schadorganismen ausbleibt oder nicht ausreichend wirksam ist, drohen vor allem in den frühen Stadien von der Aussaat über die Keimung bis zur Jungpflanze Lücken im Bestand und später erhebliche Ertragseinbußen. Die Anwendung chemischer Mittel sollte am Ende aller Maßnahmen stehen, wenn praktikable vorbeugende und nicht chemische Verfahren nur ungenügend den notwendigen Schutz erwarten lassen – z. B. wenn in Apfelpflanzungen die Reduktion von Schorfsporen durch Regenwürmer nicht ausreicht und chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel dennoch, dann aber in deutlich geringerem Umfang, angewandt werden müssen. Es ist integrierter Pflanzenschutz, wenn die chemischen Mittel somit auf das notwendige Maß begrenzt werden. Es gibt durchaus Situationen, in denen die Anwendung chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel für den Boden und die in und auf ihm lebenden Organismen vorteilhafter gegenüber alternativen Verfahren ist, zum Beispiel, wenn in erosionsgefährdeten Lagen bodenkonservierende Bearbeitungsverfahren bevorzugt und mit der Anwendung von Herbiziden kombiniert werden. Es muss angemerkt werden, dass der integrierte Pflanzenschutz auch eine ökonomische Komponente hat: Alle Pflanzenschutzverfahren müssen für die Betriebe wirtschaftlich tragbar sein.

Viele vorbeugende oder nicht chemische Maßnahmen kommen für den Schutz der Kulturpflanzen vor bodenbürtigen Schadorganismen infrage. An dieser Stelle sollen die Bedeutung und Förderung der natürlichen Gegenspieler von Schädlingen, den sogenannten Antagonisten oder Nützlingen, erklärt werden. Fast jeder Bodenorganismus hat ein oder mehrere Gegenspieler: „Fressen und gefressen werden“ findet in unseren Böden tagtäglich statt. Im und auf dem Boden leben zum Beispiel antagonistische Bakterien, Pilze, Milben und Spinnen, Insekten, Nematoden und Ringelwürmer (Enchytraeiden, Regenwürmer). Die Schadorganismen haben jedoch einen großen Vorteil: Ihre Nahrung, die vom Menschen angebaute Kulturpflanze, ist in großer Menge pro Flächeneinheit vorhanden. Wenn die

Umweltbedingungen passen und die Kulturpflanze keinen Widerstand entgegensetzen kann (z. B. durch Resistenz), dann bauen die Schadorganismen oft ungebremsst hohe Populationen auf. Die Antagonisten sind dann überfordert, diesem Wachstum wirkungsvoll zu begegnen. Diese Zusammenhänge für den integrierten Schutz unserer Kulturpflanzen zu nutzen, z. B. durch gezieltes Einbringen von Antagonisten in den Boden oder auf das Saatgut, ist die große Kunst für die nachhaltige Bodennutzung. Dafür müssen die Antagonisten erst einmal vorhanden sein und geschützt werden. Vor diesem Hintergrund stellt der Umgang mit Ernteresten die Landwirtschaft regelmäßig vor ein Dilemma, für das es gilt, Lösungen zu finden. Denn aus Sicht der Pflanzengesundheit und als Bestandteil des integrierten Pflanzenschutzes ist die Landwirtin oder der Landwirt angehalten, potenzielle Infektionsquellen (z. B. Erntereste) zu beseitigen oder in den Boden einzuarbeiten. Aus Sicht des Bodenschutzes leistet der Verbleib der Erntereste auf der Ackeroberfläche wichtige Funktionen, wie Erosionsschutz und die Förderung des Bodenlebens und damit potenzieller Antagonisten.

Wie fördern und schützen wir die Antagonisten und erhalten damit ihre Ökosystemleistungen? Hierzu gehören eine wenig intensive Bodenbearbeitung, eine vielfältige Fruchtfolge, der Anbau von Zwischenkulturen und Untersaaten. Wichtig ist, dass der Boden so lange wie möglich, bestenfalls das ganze Jahr über, bedeckt bleibt. Die notwendigerweise ausgebrachten chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmittel sollten so zielartenspezifisch wie möglich eingesetzt werden und dabei die Bodenorganismen so wenig wie möglich beeinträchtigen bzw. mindestens deren schnelle Erholung ermöglichen. Letzteres ist an entsprechender Kennzeichnung der Pflanzenschutzmittel erkennbar. Insbesondere gilt das für jene Mittel, die in (insbesondere über die Beizung von Saat- und Pflanzgut) oder direkt (als Voraufbauherbizide) auf den Boden appliziert werden.

## 4.5 Bodenorganismen erbringen nützliche Leistungen

Bis hierher wurden Funktionen und Prozesse dargestellt, die von Bodenorganismen ausgeführt werden und die der Bodenstruktur, der Nährstoffversorgung der Pflanzen, dem Erosionsschutz, der Bodengesundheit und damit der Bodenfruchtbarkeit dienen. Durch die Aktivitäten von Bodenorganismen wird etwas erhalten, geliefert oder verbessert. Wir reden hier über Leistungen, Ökosystemleistungen genannt, die einen Wert haben und die für Entscheidungsprozesse in Wert gesetzt werden müssen. Dies kann auf der Ebene eines landwirtschaftlichen Betriebes für die Planungen der Anbausysteme oder auf der Ebene von Umwelt- und Agrarpolitik bei der Zielsetzung von Strategien geschehen.

Landwirtschaftlich genutzte Böden sind immer und zur gleichen Zeit beides: Ökosystem und Produktionssystem. Ökosystemleistungen bilden die Verbindung zwischen der Funktion des Bodens als Produktionsfaktor und der Funktion als Lebensraum. Der höchste Nutzen der Ökosystemleistungen kann somit nur dann erreicht werden, wenn der Boden auch als Lebensraum und die Bodenlebewesen als genetische Ressource verstanden werden. Dazu ist es wichtig zu wissen, wie stark und auf welche Weise Maßnahmen im Produktionssystem die Bodenorganismen und damit die Erbringung von Ökosystemleistungen beeinträchtigen bzw. auch fördern können. Zum anderen ist es genauso wichtig, die Leistungen

zu bewerten und sie in ihrem Umfang oder ihrer Bedeutung messbar zu machen. So können sie dann viel besser in die Überlegungen und Entscheidungen zur Landnutzung einbezogen werden.

**Bodenorganismen erfüllen Schlüsselfunktionen in ökologischen Prozessen. Dadurch entstehen nützliche Leistungen:**

- » Nährstoffquelle für Pflanzen
- » Filter- und Pufferanlage
- » Speicher für Humus und Kohlenstoff
- » Bodenstruktur zur Kanalisation und als Erosionsschutz
- » Gesundheitssystem für Pflanzen
- » Verbreitung von Pflanzen
- » Regulation des Klimas

Auch wenn es Ausnahmen von der Regel oder auch regionale Besonderheiten geben mag, können auf Basis der bodenökologischen Forschung recht eindeutige Zusammenhänge

zwischen bestimmten Produktionsmaßnahmen und bestimmten Bodenorganismen aufgezeigt werden, z. B. dass das Pflügen der Böden einerseits Regenwürmer beeinträchtigt (BRIONES und SCHMIDT, 2017; VAN CAPELLE et al., 2012) und andererseits phytosanitäre Wirkungen haben kann. Beispielhaft ist es auch schon gelungen, die von den Organismen erbrachten Leistungen in Wertungen außerhalb der Ökologie zu übersetzen, etwa das Vermögen von Regenwürmern, den Umfang von Schadpilzen und Toxinen im Boden zu verringern und so zum einen Kosten bei der Bekämpfung der Schadpilze zu verringern und zum anderen die Qualität und damit den Preis des Ernteguts für die Landwirtinnen und Landwirte zu erhöhen (PLAAS et al., 2019). So kommen wir mehr und mehr zu einem integrierten Verständnis der Bodennutzung, wo die Berücksichtigung der Bedürfnisse von Bodenorganismen im Umkehrschluss auch Vorteile und Mehrwert für Landwirtinnen und Landwirte bedeutet und Bodenorganismen als „Produktionspartner“ gesehen werden (SCHRADER et al., 2020a). Wir sollten sie daher schützen und fördern. Leistet die Landwirtschaft etwas für die Bodenbiodiversität, dann leistet die Bodenbiodiversität auch etwas für die Landwirtschaft, denn lebendige Böden, sind fruchtbare Böden.

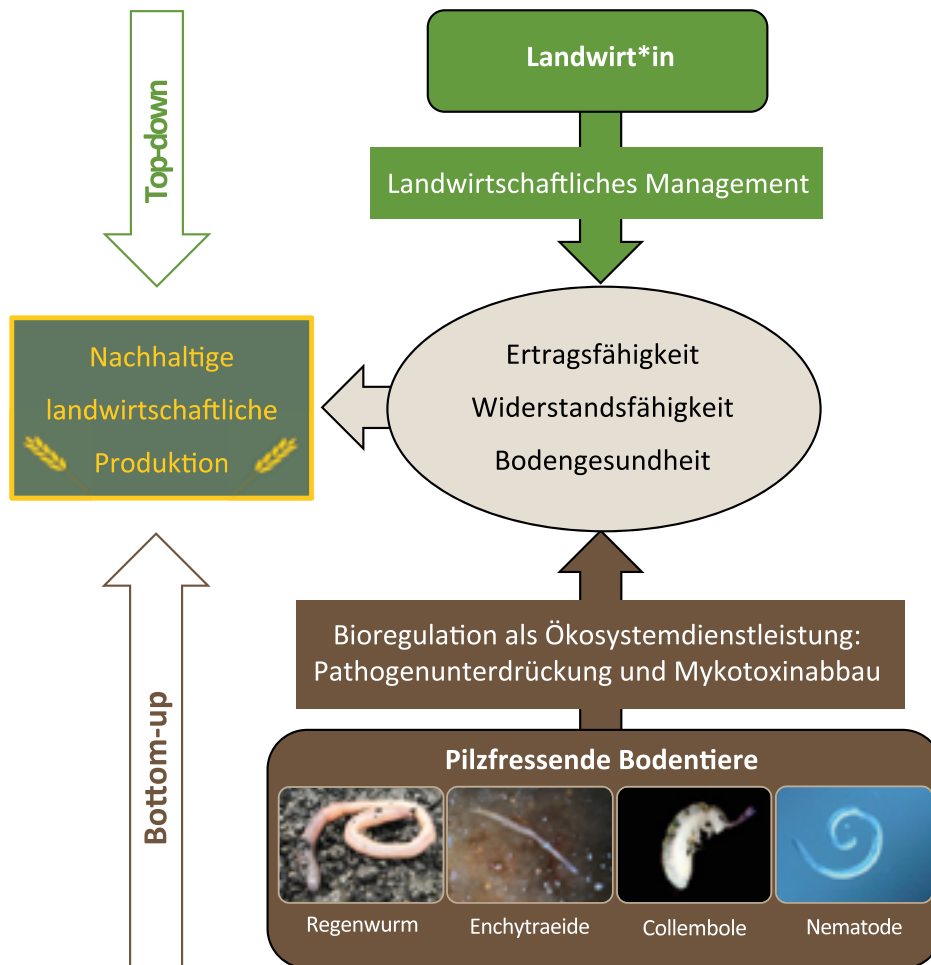


Abbildung 18: Sicherung der nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktion durch das Zusammenspiel von landwirtschaftlichem Management (top down) und Bioregulation (bottom up, hier: Pathogenunterdrückung und Mykotoxinabbau) als Ökosystemleistung der Bodenfauna (Regenwürmer, Enchytraeiden, Nematoden und Collembolen) (VAN CAPELLE).

## 5 Maßnahmen in der Landwirtschaft zur Förderung des Bodenlebens

Die Bedeutung von Bodenorganismen für ökologische Prozesse sowie die dadurch erbrachten Ökosystemleistungen wurden im vorigen Kapitel beleuchtet. Mit welchen praktischen Maßnahmen können Landwirtinnen und Landwirte also Aktivität und Funktionalität der Bodenlebewesen und Biodiversität gezielt fördern bzw. Beeinträchtigungen vermeiden?

Die praktische Landwirtschaft greift mit verschiedenen Maßnahmen, z. B. der Auswahl von Fruchtfolge, Bodenbearbeitungssystem und Pflanzenschutzstrategie sowie Düngung, unterschiedlich stark in die Lebensbedingungen von Bodenorganismen ein. Durch die vielfältigen Funktionen, die durch Bodenorganismen gesteuert werden, bergen unsachgemäße landwirtschaftliche Maßnahmen das Risiko, Bodengesundheit und Pflanzenproduktivität zu beeinträchtigen. Die Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft sind im Wesentlichen in Gesetzgebungen zum Bodenschutz, zur Düngung und zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln gegeben.

Die Vorsorgepflicht zur Vermeidung schädlicher Bodenveränderungen wird in § 7 BBodSchG (ANONYMOUS, 1998) festgehalten. Darin ist die Pflicht zur nachhaltigen Sicherung der Fruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit der Böden als natürliche Ressource festgeschrieben. Die Umsetzung erfolgt mit den „Grundsätzen der guten fachlichen Praxis“ (§ 17 BBodSchG). Von dort abgeleitete Handlungsempfehlungen berücksichtigen die Förderung der biologischen Aktivität im Boden ausdrücklich. Zusätzlich werden in § 17 BBodSchG die Vermeidung von Bodenverdichtung und -erosion und der Erhalt der Bodenstruktur als Lebensraum von Bodenorganismen sowie der Erhalt des standorttypischen Humusgehalts als Nährstoffquelle angesprochen. Als Schlüsselindikator zur Vorsorge gegen Bodenverdichtungen und -erosion und als Nahrungsangebot für Bodenlebewesen kann der Bodenbedeckungsgrad durch organisches Material angesehen werden (BRUNOTTE et al., 2015).

Mit der seit 2009 gültigen EU-Pflanzenschutzrahmenrichtlinie 2009/128 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2009) wurden die Mitgliedsstaaten unter anderem aufgefordert, die Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes verbindlich einzuführen. Deutschland hat diese Vorgabe mit dem 2012 novellierten Pflanzenschutzgesetz umgesetzt (ANONYMOUS, 2012). Ziel der insgesamt acht Grundsätze ist, alle praktikablen vorbeugenden und nicht chemischen Verfahren für den Pflanzenschutz vorrangig anzuwenden. Wenn dennoch chemische Mittel ausgebracht werden müssen, dann nur auf der Grundlage von Befallserhebungen, die die Notwendigkeit der Behandlung begründen, und nach Auswahl jener Mittel mit den geringsten Wirkungen auf die Umwelt (BARZMAN et al., 2015; HOMMEL et al., 2013).

### Forschung für den integrierten Pflanzenschutz

Für die Kontrolle der Einhaltung des notwendigen Maßes bei der Anwendung von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln gibt es in Deutschland ein Netz von Vergleichsbetrieben, auf dessen Grundlage das Julius Kühn-Institut und die Pflanzenschutzdienste der Länder die Notwendigkeit von Behandlungsmaßnahmen erheben und jährlich veröffentlichen (DACHBRODT SAAYDEH et al., 2018). Um insbesondere vorbeugende und nicht chemische Verfahren für die Praxis fit und attraktiv zu machen, gibt es in Deutschland seit 2011 ein von der Bundesregierung finanziertes Modellvorhaben „Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz“ (<https://www.nap-pflanzenschutz.de/integrierter-pflanzenschutz/modellvorhaben-demonstrationsbetriebe/>).

### 5.1 Steigerung des Eintrags an organischem Material in den Boden – mundgerecht aufgearbeitet

Bodenorganismen benötigen organisches Material als Nahrungsquelle. In der Landwirtschaft entscheidet das Anbaumanagement darüber, wie viele oberirdische Pflanzenreste und organische Dünger auf den Boden gelangen und dort verbleiben. Wird Getreidestroh nach der Ernte geborgen und für andere Zwecke verwendet, ohne dass es z. B. als Mist auf die Fläche zurückgeführt wird, fehlt dies nicht nur den Bodenorganismen als Nahrungsquelle, sondern auch für den Humusaufbau. In einer Studie, in der Landwirtinnen und Landwirte in ganz Deutschland befragt wurden, zeigten JACOBS et al. (2020), dass 42 % des anfallenden Getreidestrohs von den Ackerflächen abgefahren werden. Pro Jahr und Hektar berechnet landen im Durchschnitt 3,7 Tonnen Kohlenstoff auf deutschen Ackerflächen. Davon sind 1,1 Tonnen aus Ernteresten (Stroh), 0,3 Tonnen aus Zwischenfrüchten und 0,5 Tonnen aus organischen Düngern (JACOBS et al., 2020). Besonders bei den Zwischenfrüchten und beim Strohverbleib besteht also noch einiges Potenzial, den Eintrag an organischem Material in den Boden zu steigern.

Ist das Nahrungsangebot an der Oberfläche „mundgerecht“, initiiert dies die Grabetätigkeit der Regenwürmer. Zerkleinerungs- und Spleißgrad entscheiden also über ihre Aktivität. Diese kann durch die Anzahl von Regenwurm-Strohhäufchen an der Oberfläche bestimmt werden. Eine Untersuchung von BRUNOTTE (2007) zeigte bei lang (> 10 cm) geschnittenem Stroh und Senf weniger Strohhäufchen als bei kurz (< 5 cm) geschnittenem (Abbildung 19).

*Phacelia*-Stängel enthalten weniger Lignin als Stroh und Senf und sind insgesamt brüchiger: So erreichten lange und kurze

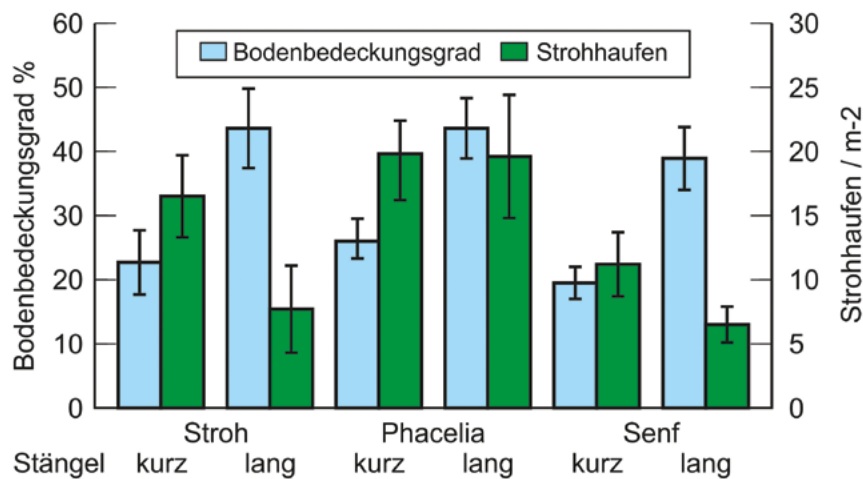


Abbildung 19: Regenwurmaktivität gemessen in Strohhaufen an der Bodenoberfläche in Abhängigkeit von verschiedenen organischen Reststoffen und deren Zerkleinerungsgrad (kurz: < 5 cm, lang: ≥ 10 cm); Mittelwert (n = 50) und Standardabweichung (BRUNOTTE et al., 2002)

Stängel die gleiche Anzahl an Strohhaufen (BRUNOTTE, 2007). Aus dieser Untersuchung kann folgende Empfehlung für die Praxis abgeleitet werden: Der kostengünstige Einsatz einer Cambridge-Walze ist zu vermeiden, da zum Beispiel die langen Senfstängel lediglich an den Boden gedrückt und von den Regenwürmern wenig verarbeitet werden (Abbildung 20).

Lange, sperrige Stängel verbessern zwar, genauso wie zerkleinerte, den Bremseffekt für Wasser und Boden (Erosionsschutz), fördern die Regenwurmaktivität aber nicht. Werden dagegen Schlegelmulcher eingesetzt, wird das organische Material zerkleinert und zerfasert und so für die Regenwürmer und weitere Organismen „mundgerecht“ vorbereitet (Abbildung 21).



Abbildung 20: Abgestorbener Senfbestand nach Überrollung mit einer Cambridgewalze (BRUNOTTE et al., 2016).



Abbildung 21: Zerkleinerung mit Schlegelmulcher, Standort Upstedt, März 2016 (BRUNOTTE et al., 2016).

## 5.2 Ganzjährige Bodenbedeckung etablieren – Einsatz von Multitalenten

Zwischenfrüchte sind richtige Multitalente mit vielen positiven Wirkungen für die Bodenorganismen: Als Mulchdecke auf dem Boden sind Zwischenfrüchte im Frühjahr nicht nur eine wichtige Nahrungsquelle, sondern sorgen auch für Beschattung. Im Spätsommer und Herbst verlängert ein Zwischenfruchtanbau die Zeit mit Bewuchs und sorgt damit für eine kontinuierliche Bereitstellung von leicht abbaubarem organischem Material, was wichtig ist für ein funktionierendes Nahrungsnetz (s. Kapitel 3.3). Über die Wurzeln gelangt organisches Material auch in tiefere Bodenschichten und die abgestorbenen Wurzelgänge werden zu wichtigen Ausbreitungswegen für kleinere Bodentiere und Pilzhyphen. Die positive Wirkung zeigt sich insbesondere beim Einsatz von Zwischenfruchtmischungen, da sie zum Beispiel ganz unterschiedliche Bodentiefen durchwurzeln. Auch die mit vielen Kulturpflanzen in Symbiose lebenden Mykorrhiza-Pilze werden durch Zwischenfrüchte gefördert. Mit einer geeigneten Arten- und Sortenwahl beim Zwischenfruchtanbau kann das Gesundheitssystem für die Ackerkulturen aktiviert werden, z. B. wenn eine Zwischenfruchtsorte resistent gegen eine bestimmte Nematodenart ist, reduziert deren Anbau die Reproduktion dieses Nematoden im Boden.

Durch den Bewuchs im Herbst und insbesondere beim Stehenlassen über Winter schützen Zwischenfrüchte den Boden vor Erosion, da sie den Bodenbedeckungsgrad erhöhen. Zusätzlich stärkt die durch die Zufuhr an organischer Nahrungsquelle angeregte Aktivität der Organismen die Bodenstruktur und den Humusaufbau – auch in tieferen Bodenschichten. Zwischenfrüchte brauchen zwar Wasser aus dem Bodenvorrat auf, jedoch sorgt ihre Durchwurzelungsaktivität für eine günstige

Bodenstruktur, die im darauffolgenden Anbaujahr mehr Wasser halten kann. Die Zwischenfrüchte halten Wasser und Nährstoffe in der oberen Bodenschicht und verhindern einen Übergang ins Grundwasser und/oder angrenzende Gewässer. Ein weiteres Plus für den Stoffkreislauf: Beimengungen von Leguminosen, wie Ackerbohne oder Wicke, haben die Fähigkeit, Luftstickstoff im Boden zu binden.

## 5.3 Diversifizierung für mehr Bodenleben

Der Daueranbau einer Kulturart führt zu einem Ermüden des Bodenlebens und zu „einseitigen“ Organismengemeinschaften. Dabei besteht die Gefahr, dass sich, wenn in zwei aufeinanderfolgenden Jahren dieselben oder nah verwandte Kulturarten angebaut werden, Schädlinge (u. a. bestimmte Nematoden oder Käferarten oder Pilze) anreichern, was zu entsprechenden Ertragsausfällen führen kann. Die Selbstverträglichkeit der einzelnen Nutzpflanzen unterscheidet sich sehr stark: Während Mais oder Roggen eher in Selbstfolge (Daueranbau) angebaut werden können, ist dies bei Kreuzblütengewächsen (z. B. Raps) deutlich riskanter (AIGNER, 2014; LOCHNER und BREKER, 2012). Eine Kulturartendiversität ist grundsätzlich der bessere Weg – beispielsweise durch einen Wechsel der Kulturart von Jahr zu Jahr (Fruchtfolge) oder durch den gleichzeitigen Anbau verschiedener Nutzpflanzen (Mischfruchtanbau). Durch diese zeitliche und räumliche Diversifizierung steigt die Vielfalt der Bodenlebewesen, was zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und Reduktion von Schadorganismen und letztlich höherer Ertragsstabilität führt (BRUNOTTE et al., 2016). Wichtig ist jedoch zu erwähnen, dass für die Vielfalt der Bodenorganismen der Anbau von möglichst vielen verschiedenen Kulturarten über einen bestimmten Zeitraum allein nicht entscheidend ist – es kommt auch darauf an, welche

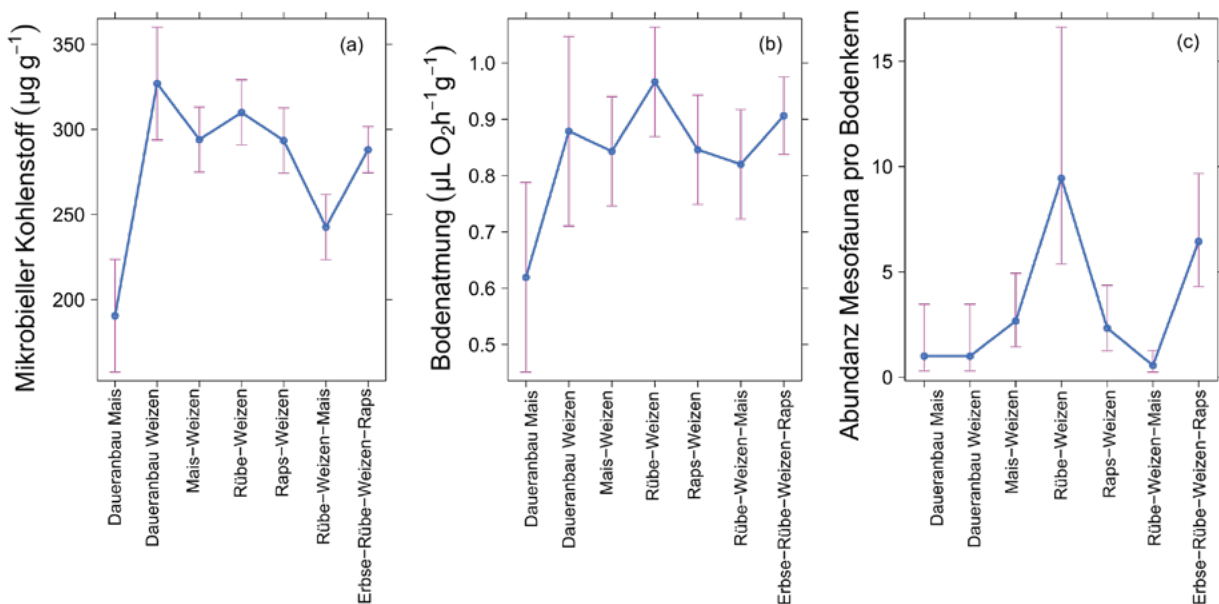


Abbildung 22: Auswirkungen unterschiedlicher Fruchtfolgen auf das Bodenleben: (a) mikrobieller Kohlenstoff, (b) Bodenatmung und (c) Mesofauna-Abundanz (Tiere pro kg Boden basierend auf einem Probevolumen von ca. 36 cm<sup>2</sup>) in einem Langzeit-Fruchtfolgeversuch (15 Jahre) bei Göttingen im Jahr 2016; Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall (n = 3) (M. MEYER).



Abbildung 23: Mischfruchtanbau am Beispiel des EU-Projektes DIVERSify ([www.plant-teams.eu](http://www.plant-teams.eu)), in welchem unterschiedliche Mischungen von Nutzpflanzen hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen untersucht werden.

Kulturarten angebaut werden. Untersuchungen hierzu wurden in einem Langzeit-Fruchtfolgeversuch bei Göttingen angestellt (MEYER et al., 2019). So zeigte sich bei Flächen, auf denen seit 10 Jahren Mais im Daueranbau angebaut wurde, eine sehr niedrige mikrobielle Aktivität und auch sehr wenig mikrobieller Kohlenstoff (Abbildung 22).

Ebenso hatte der Daueranbau von Winterweizen in diesem Experiment einen negativen Effekt auf die Bodenmesofauna, die Effekte auf das Mikrobiom waren allerdings weniger gravierend. Sowohl bei der Bodenatmung als auch bei der Mesofauna (Springschwänze oder Milben) zeigte sich jedoch, trotz der Trockenheit im Untersuchungsjahr, ein positiver Effekt, wenn Raps Teil der Fruchtfolge war. Eine wirkliche Quantifizierung des Effektes einzelner Kulturarten nebst deren Auswirkungen auf Nährstoffverfügbarkeit oder auf das Auftreten assoziierter Schadorganismen oder der Abfolgesequenzen ist nur schwer möglich, weil sich diese Effekte überlagern. Auch Bodenbearbeitung oder Pflanzenschutzmaßnahmen sind im Zweifel schwer von den Effekten des Kulturartenwechsels zu trennen.

#### Kulturartendiversität vs. Monokultur

Auch der Anbau mehrjähriger Energiepflanzen – wie Miscanthus und Durchwachsene Silphie – mit ihrer deutlich intensiveren und tieferen Durchwurzelung als bei einjährigen Kulturen fördert das Bodenleben. Zudem können tiefer wurzelnde Pflanzen verdichtete Bereiche im Bodenprofil aufbrechen. Eine Bodenruhe mit Bodenbedeckung kann durch eine zeitlich befristete Nutzung eines Ackers als Wechselgrünland oder durch mehrjährigen Luzerne- oder Klee-grasanbau erreicht werden. Damit wird eine deutliche Zunahme der biologischen Aktivität im Boden bewirkt. Insbesondere auf erosionsgefährdeten Kuppen oder auch auf Vorgewenden bietet sich neben Graseinsaat auch die Anlage mehrjähriger Blühflächen an. Eine erst kürzlich im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wieder ins Bewusstsein gerückte Strategie zur Verbesserung des Bodenlebens ist der Mischfruchtanbau (Abbildung 23)

– also der Anbau mehrerer Kulturarten zur selben Zeit am selben Ort (BROOKER et al., 2015). Während diese Kulturmethode im Ökolandbau beispielsweise beim Anbau von Getreide-Leguminosen-Mischungen weitverbreitet ist, befinden sich die Forschung und Anwendung im konventionellen Anbau noch in den Kinderschuhen. Mischfruchtanbau und eine diversifizierte Fruchtfolge stellen Möglichkeiten dar, um bodenbürtige Schadorganismen von Kulturpflanzen zu vermindern und damit möglichst ohne Ertragseinbußen die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren.

#### Bodenbearbeitung – auf das Bodenleben abstimmen

Tiefe und intensive Bodenlockerung wirkt sich ungünstig auf das Bodenleben aus. Regenwürmer werden vor allem durch den Pflug beschädigt und zerteilt, kleinere Bodenorganismen werden an die Bodenoberfläche geholt, trocknen dort aus oder werden von Vögeln gefressen. Dagegen fördern Pflugverzicht, eine flachere Bodenbearbeitung, Strip-Till oder Direktsaat das Bodenleben. Grundsätzlich wird bei den Bodenbearbeitungssystemen unterschieden zwischen wendender Bodenbearbeitung mit Pflug, nicht wendender Bodenbearbeitung mit Lockerung zum Beispiel mittels Grubber bzw. ohne Lockerung mittels Scheibenegge und Direktsaat. Die Auswahl der Gerätetechnik gestaltet dabei die Eingriffsintensität nach Tiefe und Häufigkeit. Außerdem bestimmt das Bodenbearbeitungssystem den Bedeckungsgrad des Bodens mit organischem Material und die Art der Einarbeitung (Tiefe, Vermischung im Boden), was neben der Nahrungszufuhr für die Bodenlebewesen auch die Bodenstruktur, deren Lebensraum, beeinflusst (HEISLER et al., 1998; MOOS et al., 2017) und den Boden vor Erosion schützen kann (BRUNOTTE et al., 2016). So ist der Bedeckungsgrad nach Pflugeinsatz mit 0-5 % sehr gering, bei nicht wendender Bodenbearbeitung mit Lockerung liegt er bei 10-25 % und steigt ohne Lockerung auf 20-50 %. Ein Direktsaatsystem ohne Bodenbearbeitung kann einen Bodenbedeckungsgrad von 70 % bis annähernd 100 % erreichen (BRUNOTTE, 2007). Die organischen Reststoffe, die bei nicht wendender Bodenbearbeitung an der Oberfläche verbleiben, steigern die Regenwurmaktivität

auf das Drei- bis Vierfache (JOSCHKO et al., 1997) gegenüber der wendenden Bearbeitung mit Pflug. Allerdings ist die Bodenbearbeitung per Pflug eine der wichtigsten mechanischen Maßnahmen gegenüber Beikräutern und bodenbürtigen Schadorganismen. Sollten die nicht selektiven Herbizide zukünftig wegfallen und die Unkrautbekämpfung ausschließlich mechanisch erfolgen, würde die Anzahl der Arbeitsgänge der nicht wendenden Bodenbearbeitung um mindestens 30 % ansteigen, was zu einer starken Minderung des Bedeckungsgrades mit entsprechenden negativen Folgen für die Regenwurmaktivität und den Humusvorrat führen würde.

#### **Reduktion von chemisch-synthetischem Pflanzenschutz – das notwendige Maß**

Wenn chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel auf den Boden gelangen, haben sie auch Auswirkungen auf Bodenorganismen. Insbesondere Beizmittel, mit denen Samen vor der Aussaat ummantelt werden, und Unkrautbekämpfungsmittel (Herbizide), die vor oder unmittelbar nach der Aussaat ausgebracht werden, kommen mit dem Boden in Kontakt. Die behördliche Bewertung der wichtigen Eigenschaft der Pflanzenschutzmittel, nämlich „keine unvermeidbaren Auswirkungen auf den Naturhaushalt“ (ANONYMOUS, 2012), ist Teil ihrer Zulassung. Der „Naturhaushalt“ bezieht dabei natürlich die Bodenorganismen mit ein. Auf der Grundlage der durch die Antragstellung eingereichten Labor-, Halbfreiland- und Freilandstudien mit Indikatororganismen bewerten Umweltbundesamt und Julius Kühn-Institut die akuten und chronischen Auswirkungen auf Bodenorganismen. „Keine unvermeidbaren Auswirkungen auf den Naturhaushalt“ bedeutet auch, dass über Risikominderungsmaßnahmen die Bodenorganismen geschont werden. Solche Maßnahmen umfassen zum Beispiel die Begrenzung der Wirkstoffmenge pro Hektar und Jahr, die Häufigkeit der Anwendung oder die Festlegung des Anwendungszeitraumes, um die Exposition des Bodens und damit der Organismen gering zu halten. Auch Systeme zur teilflächenspezifischen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, z. B. für die Unkrautbekämpfung, reduzieren die ausgebrachten Mengen pro Hektar und damit die Risiken deutlich. Die Kombination von Hacke und Bandspritze ist als teilflächenspezifische Maßnahme vielversprechend, da bei Reihenkulturen sogar bis zu 60 % der Herbizide eingespart werden können. Die Reihenhacke zur mechanischen Unkrautbekämpfung kann nur in der Ebene erfolgreich eingesetzt werden – in Hanglagen ab zwei Prozent Neigung verbietet sich ihr Einsatz, weil der lockere Boden die Gefahr von Bodenerosion enorm steigern würde. Gerade die Anwendung technischer Innovationen, z. B. Drohnen für die Erkennung der Unkrautarten und ihres Deckungsgrades, verspricht neue Optionen für teilflächenspezifische Verfahren (POHL et al., 2020). Das Ziel dieser Maßnahmen ist es, zur Förderung der oberirdischen Diversität so viel Ackerbegleitflora, wie für den Ernteerfolg tolerierbar, auf der Fläche zu lassen. Dies ist ein wichtiger Beitrag zur Förderung der Biodiversität in und auf dem Boden.

Eine Möglichkeit zur Reduktion des chemischen Pflanzenschutzes ist zweifellos die Anwendung praktikabler vorbeugender und alternativer Verfahren. So kann die Wahl einer gegenüber Schädlingen resistenten Sorte den Verzicht auf

chemischen Schutz bedeuten – es sei denn, die Kulturpflanze muss sich mit mehreren verschiedenen Schadorganismen auseinandersetzen und die Resistenz ist nur gegen einzelne Schadorganismen wirksam. Auch bei der Unkrautbekämpfung stehen nicht-chemische Verfahren als Alternative zur Verfügung (PAAP et al., 2020). Im Ackerbau ist der Einsatz des Pfluges eine sehr effektive Maßnahme, da aufgelaufene Unkräuter/Ungräser und deren Samen von der Oberfläche in den Boden eingewendet werden. Auf der anderen Seite nimmt nach dem Einsatz des Pfluges das Risiko für Bodenerosion und -verdichtung zu. Eine praktikable Unkrautbekämpfung nach dem Auflaufen von Getreide ist das dreimalige Striegeln. Auch die Verwendung von Untersaaten in Winterkulturen kann neben dem Erosionsschutz zur Unkrautunterdrückung beitragen. Nichtsdestotrotz sind aus der besonderen Sicht der Regenwürmer fast alle chemischen Unkrautbekämpfungsmittel akzeptabler als das Pflügen (s. o.). Denn dies führt – in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Substanz im Boden – speziell beim Regenwurm zu geringeren Individuen- und Artenzahlen pro m<sup>2</sup> im Vergleich zur Bodenbearbeitung ohne Pflug (CRITTENDEN et al., 2014, HERWIG et al., 2020). Im Gegensatz dazu geht von den aktuell in Deutschland zugelassenen 380 Herbiziden nur von einem Mittel eine (schwach) schädigende Wirkung auf Regenwürmer aus (persönliche Mitteilung BVL, 2020). So stellt die chemische Unkrautbekämpfung eine für Regenwürmer günstigere ackerbauliche Maßnahme dar. Keine oder geringe Nebenwirkungen von Herbiziden auf Regenwürmer heißt jedoch nicht gleichzeitig, dass diese auch für andere Bodenorganismen unbedenklich sind. Grundsätzlich gilt: Es sollte stets abgewogen werden, welche notwendigen Maßnahmen den geringsten negativen Eingriff auf Bodenorganismen zur Folge haben. Dabei ist unstrittig, dass solche Abwägungsprozesse oft verschiedenste Parameter zu berücksichtigen haben.

#### **Anlage von Landschaftselementen**

Die positive Wirkung der Landschaftselemente zur Förderung von Pflanzen- und Tiervielfalt, ob als Hecke, Baumgruppe oder auch in Form von Einzelbäumen, ist seit Langem bekannt. Gleichzeitig sind die Vielfalt und Anzahl an Bodenorganismen hier ebenfalls deutlich höher (BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, 2021; ORGIAZZI et al., 2016). Landschaftselemente reduzieren zwar die aktiv genutzte landwirtschaftliche Fläche selbst, doch können sie die Produktivität in der Agrarlandschaft insgesamt deutlich steigern (DENDONCKER et al., 2018). Die Streu ist eine wichtige Nahrungsquelle, so holen Regenwürmer bevorzugt Blätter im Herbst in den Boden, aber auch andere Zersetzer nutzen das abgestorbene Pflanzenmaterial. Außerdem bietet die intensive und die im Vergleich zu den jährlich wechselnden Kulturen deutlich tiefere Durchwurzelung zusätzlichen Nahrungs- und Lebensraum. Die Landschaftselemente enthalten somit einen wichtigen Genpool, denn von dort aus ist eine Besiedlung der landwirtschaftlichen Fläche bei entsprechender Bewirtschaftung möglich. Wie wichtig Hecken als Windschutz sind, sieht man besonders gut im trockenen Frühjahr. Die Bildung von Staubstürmen wird verhindert und damit wird auch die Verlagerung nährstoffreicher Bodenteilchen einschließlich kleinster Bodenorganismen unterbunden oder auf kurze Strecken beschränkt (BAUDE et al., 2019).



### Mikrobielle Inokulantien (Biostimulanzien, biologische Kontrollstämme, im Englischen auch als Biologicals oder Beneficials bezeichnet): Was können sie leisten, wie ist der Stand der Wissenschaft?

Der gezielte Einsatz von Mikroorganismen durch Inokulation oder Saatgutbehandlung ist einer der aktuell am stärksten wachsenden Bereiche der Landwirtschaft. Derzeit werden mikrobielle Inokulantien in pflanzenwachstumsfördernde Mikroorganismen und in biologische Kontrollstämme eingeteilt, wobei deren Zulassung sehr unterschiedlich reguliert wird (Düngemittelverordnung; Pflanzenschutzmittelverordnung): (i) Biostimulanzien sind Mikroorganismen, traditionell aus der Gruppe der Rhizobien, *Azospirillum*, *Azotobacter*, die das pflanzliche Wachstum fördern und die Pflanze vor allem gegen abiotischen Stressfaktoren schützen. Oft sind es bakterielle oder pilzliche Stämme, die die pflanzliche Physiologie beeinflussen, z. B. durch die Produktion von bestimmten Wachstumshormonen oder durch die Induktion von Abwehrmechanismen. Sie können als sogenannte Biofertilizer bei der Nährstoffaufnahme der Pflanzen behilflich sein, weil sie Substanzen produzieren, die die Aufnahme bestimmter Nährstoffelemente erleichtern (Phosphor-, Eisen-, Manganverbindungen). (ii) Mikrobielle Inokulantien, die Pflanzen bei biotischem Stressfaktoren (z. B. Phytopathogene) helfen, werden als biologische Pflanzenschutzmittel eingeordnet und reguliert. Man geht davon aus, dass sie

direkt gegen Krankheitserreger wirken und somit die Kulturpflanzen vor einer Infektion schützen. Häufig schützen biologische Kontrollstämme die Pflanze durch Priming oder induzierte Resistenz. Dabei ist Priming eine Sensibilisierung der Pflanzen, die es diesen ermöglicht, stärker und schneller auf einen Stressfaktor zu antworten. Die modernen molekularen Methoden (s. o.) haben allerdings gezeigt, dass viele mikrobielle Inokulantien beides können – das Pflanzenwachstum stärken und vor möglichen Pathogenen schützen. Daten vieler wissenschaftlicher Studien legen nahe, dass mikrobielle Inokulantien wesentlich zu einer nachhaltigen Landwirtschaft beitragen können, sodass die Suche nach neuen nützlichen Mikroorganismen in vollem Gange ist. Jährlich werden Dutzende bakterielle und pilzliche Stämme identifiziert, jedoch sind nicht viele der gewünschten Effekte ausreichend zur erfolgreichen Vermarktung. Der Trend zur Umstellung auf Pflanzenschutzprodukte mit geringem Risiko (sogenannte low-risk products) jedoch erhöht das Interesse der Landwirtschaft an solchen Produkten und somit die Motivation, weitere, noch effizientere Produkte zu entwickeln.



Abbildung 24: Die hier gezeigten Landschaftselemente fördern die Pflanzen- und Tiervielfalt einschließlich der Bodenorganismen.

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Innerhalb der Collembolen weisen die Kugelspringer eine erstaunliche Farbvielfalt auf.....	2
Abbildung 2: Regenwürmer in der Streu- und Humusschicht an der Bodenoberfläche. GettyImages-1139950067ands456.....	4
Abbildung 3: Ein bestimmt schon mehrere Jahre altes adultes und ein paar Monate altes juveniles Tier des Großen Tauwurms ( <i>Lumbricus terrestris</i> ) in Winterweizen auf dem Versuchsfeld des Julius Kühn-Instituts in Dahnendorf.....	5
Abbildung 4: Größenvergleich einer eher kleinen Regenwurmart und einer sehr großen Enchyträe, hier in einem Waldboden.....	6
Abbildung 5 (links): Mit Thymian bewachsener Nesthügel der Gelben Wiesenameise ( <i>Lasius flavus</i> ).....	7
Abbildung 6 (rechts): Buckelweide in der Rhön mit zahlreichen Nesthügeln.....	7
Abbildung 7: Durch den Fraß an Pilzhyphen leisten Springschwänze (Collembolen) einen wichtigen Beitrag zu einem intaktem Ökosystem.....	8
Abbildung 8: Laufkäfer spielen als Antagonisten eine wichtige Rolle in der Bioregulation.....	9
Abbildung 9: Die Beweidung von Zwischenfrüchten mit Schafen fördert die Diversität der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden.....	10
Abbildung 10: Der Zusammenhang zwischen Pflanzen-Artenvielfalt und Ertrag wird durch ein komplexes Netzwerk an Interaktionen zwischen Organismen bestimmt. Artenreiche Systeme sind komplexer strukturiert, sowohl im Boden als auch oberirdisch. Durch landwirtschaftliche Maßnahmen ändert sich dieses Gefüge, bleibt aber in seiner Grundstruktur bestehen (SCHERBER).....	13
Abbildung 11: Größenordnung der verschiedenen Stickstofffraktionen im Oberboden jeweils als Mittelwert, Minimum und Maximum (BEISECKER et al., 2015).....	17
Abbildung 12: Bodenprofil eines humosen Oberbodens im Winter.....	18
Abbildung 13: Durch die Entnahme von Bodenproben, hier im Rahmen der Bodenzustandserhebung, kann der Humusgehalt bestimmt werden.....	19
Abbildung 14: Reduktion des Oberflächenabflusses von Wasser durch die Anzahl an biogenen Vertikalporen (Regenwurmgängern) in einem Ackerboden (ROTH und JOSCHKO, 1991).....	20
Abbildung 15: Dreidimensionale Visualisierung des Makroporenraumes (Makroporen > 1 mm) durch Röntgencomputertomografie von ungestörten Bodensäulen (Durchmesser = 10 cm) bei a) wendender Bodenbearbeitung mit Pflug und b) nicht wendender Bodenbearbeitung mit Grubber; Adenstedt (ROGASIK et al., 1994).....	21
Abbildung 16: Dreidimensionale Visualisierung eines Makroporensystems nach Pflugfurche ohne Druckbelastung (links) und nach einer Druckbelastung mit 250 kPa (rechts) (JEGOU et al., 2001).....	21
Abbildung 17: Die Aufnahme mit Raster-Elektronenmikroskop zeigt Darmmikroorganismen eines Collembolen ( <i>Folsomia candida</i> ).....	23
Abbildung 18: Sicherung der nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktion durch das Zusammenspiel von landwirtschaftlichem Management (top down) und Bioregulation (bottom up, hier: Pathogenunterdrückung und Mykotoxinabbau) als Ökosystemleistung der Bodenfauna (Regenwürmer, Enchytraeiden, Nematoden und Collembolen) (VAN CAPELLE).....	27
Abbildung 19: Regenwurmaktivität gemessen in Strohhaufen an der Bodenoberfläche in Abhängigkeit von verschiedenen organischen Reststoffen und deren Zerkleinerungsgrad (kurz: < 5 cm, lang: ≥ 10 cm); Mittelwert (n = 50) und Standardabweichung (BRUNOTTE et al., 2002).....	29
Abbildung 20: Abgestorbener Senfbestand nach Überrollung mit einer Cambridgewalze (BRUNOTTE et al., 2016).....	29
Abbildung 21: Zerkleinerung mit Schlegelmulcher, Standort Upstedt, März 2016 (BRUNOTTE et al., 2016).....	29
Abbildung 22: Auswirkungen unterschiedlicher Fruchtfolgen auf das Bodenleben: (a) mikrobieller Kohlenstoff, (b) Bodenatmung und (c) Mesofauna-Abundanz (Tiere pro kg Boden basierend auf einem Probevolumen von ca. 36 cm <sup>2</sup> ) in einem Langzeit-Fruchtfolgeversuch (15 Jahre) bei Göttingen im Jahr 2016; Mittelwert und 95-%-Konfidenzintervall (n = 3) (M. MEYER).....	30
Abbildung 23: Mischfruchtanbau am Beispiel des EU-Projektes DIVERSify ( <a href="http://www.plant-teams.eu">www.plant-teams.eu</a> ), in welchem unterschiedliche Mischungen von Nutzpflanzen hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen untersucht werden.....	31
Abbildung 24: Die hier gezeigten Landschaftselemente fördern die Pflanzen- und Tiervielfalt einschließlich der Bodenorganismen.....	33
Tabelle 1: Einordnung der Bodenorganismen in funktionelle Gruppen nach ökologischen Prozessen und Ökosystemleistungen.....	12

## 7 Literatur

- Aigner, A. (2014): Fruchtfolgegestaltung. In: Doleschel, P. und Frahn, J. (Herausgeber): Landwirtschaftlicher Pflanzenbau, Band 13, München: BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, 185-194.
- Alberti, G.; Thaler, K. und Weygoldt, P. (2007): Chelicerata – Acari. In: Westheide, W. und Rieger (2007, Herausgeber): Spezielle Zoologie – Teil 1: Einzeller und Wirbellose Tiere, Elsevier GmbH, München, 2. Auflage, 521-529.
- Alletto, L.; Coquet, Y.; Benoit, P.; Heddadja, D. und Barriuso, E. (2010): Tillage Management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 367-400.
- Anderson, R. V.; Coleman, D. C.; Cole, C. V. und Elliott, E. T. (1981): Effects of the nematodes *Acrobeloides* sp. and *Mesodiplogaster lheritieri* on substrate utilization and nitrogen and phosphorus mineralization in soil. *Ecology* 62, 549-555.
- Andret-Link, P.; Laporte, C.; Valat, L.; Ritzenthaler, C.; Demangeat, G.; Vigne, E.; Laval, V.; Pfeiffer, P.; Stussi-Garaud C. und Fuchs, M. (2004): Grapevine fanleaf virus: Still a major threat to the grapevine. *Journal of Plant Pathology* 86, 3, 183-195.
- Anonymous (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG). <http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BBodSchG.pdf>, letzter Zugriff: 28.04.2020.
- Anonymous (2012): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz – PflSchG). Pflanzenschutzgesetz vom 6. Februar 2012 (BGBl. I S. 148, 1281), das zuletzt durch Artikel 4 Absatz 84 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist. [https://www.gesetze-im-internet.de/pflschg\\_2012/](https://www.gesetze-im-internet.de/pflschg_2012/), letzter Zugriff: 22.07.2021.
- Barsics, F.; Haubrugge, E. und Vanderheggen, F. (2013): Wireworms' Management: An Overview of the Existing Methods, with Particular Regards to *Agriotes* spp. (Coleoptera: Elateridae). *Insects*, 4(1):117-152.
- Basedow, Th. (1987): Der Einfluß gesteigerter Bewirtschaftungsintensität im Getreidebau auf die Laufkäfer (Col., Carabidae). Auswertung vierzehnjähriger Untersuchungen (von 1971 bis 1984). *Mitt. Biol. Bundesanst. Land- Forstwirtsch. Berlin-Dahlem*, 253: 123.
- Baude, M.; Meyer, B. C. und Schindewolf, M. (2019): Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem services. *Science of the Total Environment* 659 1526-1536, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.455.
- Beisecker, R.; Piegholdt, C.; Seith, T. und Helbing, F. (2015): Abschätzung der standortspezifischen Stickstoffnachlieferung zur Optimierung der gewässerschonenden Stickstoffdüngung (Abschlussbericht). Band 1: Kurzfassungen. DVGW e. C., Bonn (Herausgeber).
- Bellmann, H. (2010): Der Kosmos Spinnenführer – über 400 Arten Europas, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG.
- Berch, S. M.; Massicotte, H. B. und Tackaberry, L. E. (2005): Republication of a translation of „The vegetative organs of *Monotropa hypopitys* L.“, published by F. Kamienski in 1882, with an update on *Monotropa mycorrhizas*. *Mycorrhiza* 15, 323-332.
- Byelich, A.; Graefe, U. (2010): Regenwürmer und Kleinringelwürmer als Bioindikatoren im Bodenmonitoring. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft*, 70 (4): 119-123.
- Bianchini A.; Horsley, R.; Jack, M. M.; Kobiush, B.; Ryu, D.; Tittlemier, S.; Wilson, W. W.; Abbas, H. K.; Abel, S. und Harrison, G. (2015): DON occurrence in grains: A North American perspective. *Cereal Foods World* 60, 32-56. DOI: 10.1094/CFW-60-1-0032.
- Bonkowski, M.; Griffiths, B. S. und Ritz, K. (2000): Food preferences of earthworms for soil fungi. *Pedobiologia* 44, 666-676. DOI: 10.1078/S0031-4056(04)70080-3.
- Börner, H. (2009): Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Boulton, A. M. und Amberman, K. D. (2006): How ant nests increase soil biota richness and abundance: a field experiment. *Biodivers. Conserv.* 15: 69-82.
- Briones, M. J. I. und 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: 4396-4419.
- Brooker, R. W.; Bennett, A. E.; Cong, W. F.; Daniell, T. J.; George, T. S.; Hallett, P. D.; Hawes, C.; Iannetta, P.P.M.; Jones, H. G.; Karley, A. J.; Li, L.; McKenzie, B.M. Pakeman, R. J.; Paterson, E.; Schöb, Ch.; Shen, J.; Squire, G.; Watson, Ch. A.; Zhang, Ch.; Zhang, F.; Zhang, J.; und White, Ph. J. (2015): Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytology* 206:107-117.
- Brown, V.K. und Gange, A.C. (1989): Differential effects of above- and below-ground insect herbivory during early plant succession. *Oikos*. 54:67-76.
- Brown, V.K. und Gange, A.C. (1990). Insect herbivory below ground. *Advances in Ecological Research*, 20: 1-58.
- Brunotte, J. und Autorenkollektiv (2016): Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit. Herausgeber AID, Bestell-Nr. 1585.
- Brunotte, J. und Autorenkollektiv (2015): Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Herausgeber AID, Bestell-Nr. 3614.

- Brunotte, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Boden-erosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. *Landbau-forschung Völknerode, Sonderheft* 305.
- Brunotte, J.; Voßhenrich, H.-H. und Ortmeier, B. (2002): Stroh-mulchverfahren im Zuckerrübenanbau. *Zuckerrübe* 51 (6), 312-314.
- Bundesamt für Naturschutz (2021): Bodenreport – Vielfältiges Bodenleben – Grundlage für Naturschutz und nachhaltiges Leben. [https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/210108\\_BodenBioDiv-Report.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/210108_BodenBioDiv-Report.pdf), letzter Zugriff: 31.01.2021.
- Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) (2020): PSM-Liste – Suchbegriffe: Apfel; Schorf (*Venturia* spp.). <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/ListeMain.jsp?page=1&ts=1587567826344>, letzter Zugriff: 22.04.2020.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2020a): Schorf an Apfel. <https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/pflanze/grundlagen-pflanzenbau/pflanzenschutz/schadereger/schadorganismen-im-obst-und-weinbau/pilzkrankheiten/schorf/>, letzter Zugriff: 22.04.2020.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2020b): Mon-ViA – Das bundesweite Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften. <https://www.agrarmonitoring-monvia.de/>, letzter Zugriff: 27.08.2020.
- Campbell, R. N. (1996): Fungal transmission of plant viruses. *Annual Review of Phytopathology*, 34:1, 87-108.
- Ciais, P.; Sabine, C.; Bala, G.; Bopp, L.; Brovkin, V.; Canadell, J.; Chhabra, A.; DeFries, R.; Galloway, J. und Heimann, M. (2013): Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 465-570.
- Crittenden, S. J.; Eswaramurthy, T.; de Goede, R. G. M.; Brussaard, L. und Pulleman, M. M. (2014): Effect of tillage on earthworms over short- and medium-term in conventional and organic farming. *Applied Soil Ecology* 83: 140-148. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.03.001.
- Dachbrodt-Saaydeh, S.; Sellmann, J.; Strassemeyer, J.; Schwarz, J.; Klocke, B.; Krengel, S. und Kehlenbeck, H. (2018): Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz. Zwei-Jahresbericht 2015 und 2016. Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2016. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 194.
- Dauber, J. und Wolters, V. (2000): Microbial activity and functional diversity in the mounds of three different ant species. – *Soil Biol. Biochem.* 32: 93-99.
- Dauber, J.; Niechoj, R.; Baltruschat, H. und Wolters, V. (2008): Soil engineering ants increase grass root arbuscular mycorrhizal colonization. *Biol. Fertil. Soils* 44: 791-796.
- Del Toro, I.; Ribbons, R. R. und Pelini, S. L. (2012): The little things that run the world revisited: a review of ant-mediated ecosystem services and disservices (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News* 17, 133-146.
- Dendoncker, N.; Boeraeve, F.; Crouzat, E.; Dufrêne, M.; König, A. und Barnaud C. (2018): How can integrated valuation of ecosystem services help understanding and steering agroecological transitions? *Ecology and Society* 23(1):12. DOI: 10.5751/ES-09843-230112.
- Diaz, A.; Okabe, K.; Eckenrode, C. J.; Villani, M. G. und O'Connor, B. M. (2000): Biology, ecology, and management of the bulb mites of the Genus *Rhizoglyphus* (Acari: Acaridae). *Experimental and Applied Acarology*, 24, 85-113.
- Didden, W. A. M.; Fründ, H.-C. und Graefe, U. (1997): Enchytraeids. In: Benckiser, G. (Herausgeber): *Fauna in Soil Ecosystems*. Marcel Dekker Inc., New York, 135-172.
- DIN EN ISO 16387: Bodenbeschaffenheit – Wirkungen von Verunreinigungen auf Enchytraeidae (*Enchytraeus* sp.) Bestimmung der Wirkungen auf die Reproduktion (ISO 16387:2014). Deutsche Fassung EN ISO 16387:2014.
- Dostal, P. (2007): Population dynamics of annuals in perennial grassland controlled by ants and environmental stochasticity. *J. Veg. Sci.* 18: 91-102.
- Düngemittelverordnung (DüV) vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.
- Düring, R.-A. und Hummel, H. E. (1994): Der Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf das Verhalten ausgewählter Herbizide im Boden. In: *Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkungen auf den Boden*. Herausgeber: Tebruegge, F. und Dreier, M., Wissenschaftlicher Verlag Giessen, 65-82.
- Dunger, W. (2008): *Tiere im Boden*. Neue Brehm Bücherei, Band 327, Westarp Wissenschaften, 4., unveränderte Auflage, Nachdruck der 3. Auflage von 1983.
- Ehlers, W. (1975): Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science* 119 (3), 242-249.
- EFSA Plant Health Panel (EFSA PLH Panel); Bragard, C.; Dehnen-Schmutz, K.; Di Serio, F.; Gonthier, P.; Jacques, M.-A.; Jaques Miret, J. A.; Justesen, A. F.; Magnusson, C. S.; Milonas, P.; Navas-Cortes, J. A.; Parnell, S.; Potting, R.; Reignault, P. L.; Thulke, H.-H.; Van der Werf, W.; Vicent Civera, A.; Yuen, J.; Zappalà, L.; Czwienczek, E. und MacLeod, A. (2018): Scientific Opinion on the pest categorisation of *Popillia japonica*. *EFSA Journal*, 16(11):5438. DOI: 10.2903/j.efsa.2018.5438.

- Emmerson, M.; Morales, M. B.; Oñate, J. J.; Batáry, P.; Berendse, F.; Liira, J.; Aavik, T.; Guerrero, I.; Bommarco, R.; Eggers, S.; Pärt, T.; Tschardt, T.; Weisser, W.; Clement, L. und Bengtsson, J. (2016): Chapter Two – How Agricultural Intensification Affects Biodiversity and Ecosystem Services. Hier: Kordas, R. L.; Dumbrell, A. J. und Woodward, G. (Herausgeber), *Advances in Ecological Research Academic Press*.
- Europäische Kommission (2020b): KOM (2020) 380 final – EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 – Mehr Raum für die Natur in unserem Leben. [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-eu-biodiversity-strategy-2030\\_de.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-eu-biodiversity-strategy-2030_de.pdf), letzter Zugriff: 03.06.2020.
- Europäische Kommission (2020a): COM(2020) 381 final – Vom Hof auf den Tisch – eine Strategie für ein faires, gesundes und umweltfreundliches Lebensmittelsystem. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0381&from=EN>, letzter Zugriff: 03.06.2020.
- Europäische Kommission (2019): COM(2019) 640 final – Der europäische grüne Deal. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF), letzter Zugriff: 03.06.2020.
- Europäische Kommission (2017): COM(2017) 713 final – Ernährung und Landwirtschaft der Zukunft. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/03dc8701-d5aa-11e7-a5b9-01aa75ed71a1/language-de/format-xhtml>, letzter Zugriff: 03.06.2020.
- Europäische Union (2020): Soil Quality – European Union. <https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DashboardIndicators/Soil.html>, letzter Zugriff:
- Parlament und Rat der Europäischen Union (2009): Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0071:0086:de:PDF>, letzter Zugriff: 22.04.2020.
- Ferrigo, D.; Raiola, A. und Causin, R. (2016): Fusarium toxins in cereals: occurrence, legislation, factors promoting the appearance and their management. *Molecules* 21, 627. DOI: 10.3390/molecules21050627.
- Finch, S. (1989): Ecological considerations in the management of *Delia* pest species in vegetable crops. *Annual Review in Entomology*, 34:117-137.
- Flessa, H.; Don, A.; Jacobs, A.; Dechow, R.; Tiemeyer, B. und Pöplau, C. (2018): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands – Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. (Herausgeber), BMEL, <https://www.thuenen.de/de/ak/projekte/bodenzustandserhebung-landwirtschaft-bze-lw/>, letzter Zugriff: 05.02.2020.
- Folgarait, P. J. (1998): Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. – *Biodivers. Conserv.* 7: 1221-1244.
- French, N.; Nichols, D. B. R. und Wright, A. J. (1990): Yield response of improved upland pasture to the control of leatherjackets under increasing rates of nitrogen. *Grass and Forage Science* 45:99-102.
- Frouz, J. und Jilkova, V. (2008): The effects of ants (Hymenoptera: Formicidae) on soil properties and processes. *Myrmecol. News* 11: 191-199.
- Gebauer, W.-G. und Schaaf, H. (2017): Gesamt-Stickstoff im Boden verdient stärkere Beachtung. *LW* 41, 20-23.
- Goncharov, A. A.; Glebova, A. A. und Tiunov, A. V. (2020): Trophic interactions between *Fusarium* species and soil fauna: A meta-analysis of experimental studies. *Applied Soil Ecology* 45. DOI: 10.1016/j.apsoil.2019.06.005.
- Graff, O. (1983): *Unsere Regenwürmer: Lexikon für Freunde der Bodenbiologie*. Schaper Verlag, Hannover.
- Hangen, E.; Buczko, U.; Bens, O.; Brunotte, J. und Hüttle, R. F. (2002): Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil & Tillage Research* 63 (3-4), 181-186.
- Hartge, K. H. und Sommer, C. (1980): The effect of geometric patterns of soil structure on compressibility. *Soil Science* 130 (4), 180-185.
- Heisler, C.; Rogasik, H.; Brunotte, J. und Joschko, M. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung und biologische Aktivität. *Landbauforschung Völkenrode* 4, 199-211.
- Herwig, N.; Felgentreu, D. und Hommel, B. (2020): Auswirkungen von natürlichen Standortbedingungen und ackerbaulichen Maßnahmen auf Bodenorganismen – Erhebungen in den Langzeitversuchen des Julius Kühn-Instituts in Dahnsdorf (Hoher Fläming, Land Brandenburg). *Journal für Kulturpflanzen*, 72 (7): 327-337. DOI: 10.5073/JfK.2020.07.09.
- Herwig, N.; Strassemeyer, J.; Vetter, C.; Horney, P.; Hommel, B.; Felgentreu, D. und Strumpf T. (2015): Entwicklung eines Entscheidungshilfemodells für die Auswahl von Flächen für das Monitoring (RL 2009/37/EG). *Journal für Kulturpflanzen* 67(11), 368-376.
- Hirsch, J. (2012). *Otiiorhynchus* spp. (Coleoptera: Curculionidae) as pests in horticulture – genetics and management options with entomopathogenic fungi. Dissertation, Universität Hohenheim.
- Hohberg, K. und Xylander, W. (2004): *Unter unseren Füßen – Lebensraum Boden*. Staatliches Museum für Naturkunde Görlitz.
- Hommel, B.; Dachbrodt-Saaydeh, S. und Freier, B. (2013): Experiences with Implementation and Adoption of Integrated Plant Protection (IPP) in Germany. In: Peshin, R.; Pimentel,

- D. (Herausgeber), *Integrated Pest Management Experiences with Implementation, Global Overview*, Vol. 4, 429-465, DOI: 10.1007/978-94-007-7802-3.
- Hommes, M.; Schaarschmidt, R.; Mösch, S.; Hirsch, J.; Reineke, A.; Schwarz, J.; Sprick, P.; Ufer, T.; Weihrauch, F. und Wrede, A. (2015): Rüsselkäfer in Baumschulen und Staudengärtnereien – Wichtige Arten, Bestimmung und Bekämpfung mittels entomopathogener Nematoden. JKI Datenblätter Pflanzenkrankheiten und Diagnose. Herausgeber Backhaus, G., JKI.
- Hopkins, S. P. (1997): *Biology of the Springtails (Insecta: Collembola)*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Inch, S. A. und Gilbert, J. (2003). Survival of *Gibberella zeae* in Fusarium-Damaged Wheat Kernels. *Plant Disease* 87, 282-287.
- 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. und Freibauer, A. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Thünen Report 64. [https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Thuenen\\_Report\\_64\\_final.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Thuenen_Report_64_final.pdf), letzter Zugriff: 13.01.2020.
- Jacobs, A., Poeplau, C.; Weiser, C.; Fahrion-Nitschke, A. und Don, A. (2020): Exports and inputs of organic carbon on agricultural soils in Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 118: 249-271.
- Jegou, D.; Brunotte, J.; Rogasik, H.; Capowiez, Y.; Diestel, H.; Schrader, S. und Cluzeau, D. (2001): Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology* 38, 329-336.
- Joschko, M.; Rogasik, H. und Brunotte, J. (1997): Einfluß konservierender Bodenbearbeitung auf Bodentiere und Bodengefüge von Lehmböden. *Landbauforschung Völkenrode SH* 178, 69-82.
- Jouquet, P.; Dauber, J.; Lagerlöf, J.; Lavelle, P. und Lepage, M. (2006): Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Appl. Soil Ecol.* 32: 153-164.
- Keudel, M. und Schrader, S. (1999): Axial and radial pressure exerted by earthworms of different ecological groups. *Biology and Fertility of Soils* 29, 262-269.
- Kirby, J. M. und Blackwell, P. S. (1989): Design of soil slots to resist wheel track compaction. *Soil Technology* 2, 147-161.
- Klages, S.; Apel, B.; Feller, C.; Hofmeier, M.; Homm-Belzer, A.; Hüther, J.; Löloff, A.; Olf, W. und Osterburg, B. (2018): Effizient Düngen – Anwendungsbeispiele zur Düngeverordnung. <https://www.ble-medienservice.de/search?sSearch=effizient+d%C3%BCngen>, letzter Zugriff: 01.07.2020.
- Kromp, B. (1999): Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74 187-228.
- Krück, S. (2018): *Bildatlas zur Regenwurmbestimmung*. Rangsdorf, Natur + Text.
- Kühne, Th. (2009): Soil-borne viruses affecting cereals – Known for long but still a threat. *Virus Research*, 141, 2, 174-183.
- Levan, M. A. und Stone, E. L. (1983): Soil modification by colonies of black meadow ants in a New York old field. *J. Soil Sci. Soc. America* 47: 1192-1195.
- Larsen, J.; Johansen, A.; Larsen, S. E.; Heckmann, L. H.; Jakobsen, I. Krogh, P. H. (2008): Population performance of collembolans feeding on soil fungi from different ecological niches. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 360-369. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.08.016.
- Lehmitz, R.; Römbke, J.; Jänsch, S.; Krück, S.; Beylich, A. und Graefe, U. (2014): Checklist of earthworms (Oligochaeta: Lumbricidae) from Germany. *Zootaxa* 3866 No. 2; DOI: 10.11646/zootaxa.3866.2.3.
- Lehmitz, R.; Römbke, J.; Graefe, U.; Beylich, A. und Krück, S. (2016): Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer (Lumbricidae et Criodrilidae) Deutschlands. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 70 (4) 565-590. Bundesamt für Naturschutz.
- Leplat, J.; Friberg, H.; Abid, M. und Steinberg, C. (2013): Survival of *Fusarium graminearum*, the causal agent of Fusarium head blight. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 97-111. DOI: 10.1007/s13593-012-0098-5.
- Lochner, H. und Breker, J. (2012): *Anbau anderer Mähdruschfrüchte – Raps zur Körnernutzung*. In: Fachstufe Landwirt, München: BLV Buchverlag GmbH & Co. KG, 84-92.
- Logan, T. J.; Chang, A. C.; Page, A. L. und Ganje, T. J. (1987): Accumulation of Selenium in Crops Grown on Sludge-treated Soil. Technical Report. *Journal of Environmental Quality*. DOI: 10.2134/jeq1987.00472425001600040010x.
- L'uptáčík, P.; Miklisová, D. und Kováč, L. (2012): Diversity and Community structure of soil Oribatida (Acari) in an arable field with alluvial soils. *European Journal of Soil Biology* 50, 97-105.
- Manu, M.; Honciuc, V.; Neagoe, A.; Băncilă, R. I.; Iordache, V. und Onete, M. (2019): Soil mite communities (Acari: Mesostigmata, Oribatida) as bioindicators for environmental conditions from polluted soils. *Scientific reports* 9:20250.
- Masiello, M.; Somma, S.; Ghionna, V.; Logrieco, A. F. und Moretti, A. (2019): In Vitro and in Field Response of Different Fungicides against *Aspergillus flavus* and *Fusarium* Species Causing Ear Rot Disease of Maize. *Toxins* 11, 11. DOI: 10.3390/toxins11010011.
- McColloch, J. W. und Hayes, W. P. (1922): The Reciprocal Relation of Soil and Insects. *Ecology* 3(4): 288-301.

- Mendes, R.; Garbeva, P. und Raaijmakers, J. M. (2013): The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. In: *FEMS microbiology reviews* 37 (5), 634-663. DOI: 10.1111/1574-6976.12028.
- Meyer, M.; Ott, D.; Götz, P.; Koch, H.-J. und Scherber, C. (2019): Crop identity and memory effects on arthropods in a long-term crop rotation experiment. *Ecology and Evolution*, Vol. 9, Issue 12, 7307-7323, DOI: 10.1002/ece3.5302.
- Moos, J. H.; Schrader, S. und Paulsen, H. M. (2017): Reduced tillage enhances earthworm abundance and biomass in organic farming: A meta-analysis. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res* 67(3-4):123-128, DOI: 10.3220/LBF1512114926000.
- Moritz, M. (1992): Arachnida – Acari. in: Stresemann, E. (Begr.): *Exkursionsfauna von Deutschland*, Volk und Wissen, 8. Auflage, 476-480.
- Oades, J. (1984): Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76, 319-337.
- Oerke, E.-C. (2006): Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144, 31-43. DOI: 10.1017/S0021859605005708.
- Oertel, C.; Matschullat, J.; Zurba, K. und Zimmermann, F. (2016): Greenhouse gas emissions from soils – A review. *Chemie der Erde* 76: 327-352.
- Orgiazzi, A.; Bardgett, R. D.; Barrios, E.; Behan-Pelletier, V.; Briones, M. J. I.; Chotte, J.-L.; De Deyn, G. B.; Eggleton, P.; Fierer, N.; Fraser, T.; Hedlund, K.; Jeffery, S.; Johnson, N. C.; Jones, A.; Kandeler, E.; Kaneko, N.; Lavelle, P.; Lemanceau, P.; Miko, L.; Montanarella, L.; Moreira, F. M. S.; Ramirez, K. S.; Scheu, S.; Singh, B. K.; Six, J.; van der Putten, W. H. und Wall, D. H. (Herausgeber) (2016): *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Paap, M.; Helbig, J.; Gummert, A.; Kehlenbeck, H. (2020): Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz. *Julius-Kühn-Archiv* 464, 246-254, DOI: 10.5073/jka.2020.464.037.
- Paul, P. A.; Bradley, C. A.; Madden, L. V.; Lana, F. D.; Bergstrom, G. C.; Dill-Macky, R.; Wise, K. A.; Esker, P. D.; McMullen, M.; Grybauskas, A.; Kirk, W. W.; Milus, E. und Ruden, K. (2018): Effects of Pre- and Postanthesis Applications of Demethylation Inhibitor Fungicides on Fusarium Head Blight and Deoxynivalenol in Spring and Winter Wheat. *Plant Disease* 102, 2500-2510. DOI: 10.1094/PDIS-03-18-0466-RE.
- Paustian, K.; Six, J.; Elliott, E. T. und Hunt, H. W. (2000): Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48: 147-163.
- Powlson, D.; Xu, J.; Brookes, P. (2017): Through the Eye of the Needle – The Story of the Soil Microbial Biomass. In: K. R. Tate (Herausgeber) *Microbial Biomass*, World Scientific (Europe), 1-40, DOI: 10.1142/9781786341310\_0001.
- PENN, H.J. und Christ, T. O. (2018): From dispersal to predation: A global synthesis of ant-seed interactions. *Ecol. Evol.* 2018; 8:9122-9138. DOI: 10.002/ece3.4377.
- Plaas, E.; Meyer-Wolfarth, F.; Banse, M.; Bengtsson, J.; Bergmann, H.; Faber, J.; Potthoff, M.; Runge, T.; Schrader, S. und Taylor, A. (2019): Towards valuation of biodiversity in agricultural soils: a case for earthworms. *Ecological Economics* 159, 291-300. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.02.003.
- Pflanzenschutzmittelverordnung (PflSchMV) vom 15. Januar (BGBl. I S. 74).
- Pohl, J.-P.; von Hörsten, D.; Wegener, J. K.; Golla, B.; Karpinski, I.; Rajmis, S.; Sinn, Ch.; Nordmeyer, H.; Wellhausen, Ch.; Kleinhenz, B.; Herrmann, M.; Dunekacke, H.; Matthiesen, A.; von Bargen, F.; Jahncke, D.; Feise, D.; Röhrig, M. und Sander, R. (2020): Assistenzsystem für den teilflächenspezifischen Einsatz von Herbiziden. *Julius-Kühn-Archiv* 464, 216-221, DOI: 10.5073/jka.2020.464.033.
- Poggi, Sylvain, Ronan Le Cointe, Jörn Lehmhus, Manuel Planthenest, and Lorenzo Furlan. 2021. „Alternative Strategies for Controlling Wireworms in Field Crops: A Review“ *Agriculture* 11, no. 5: 436. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050436>
- Purtauf, T.; Roschewitz, I.; Dauber, J.; Thies, C.; Tschardtke, T. und Wolters, V. (2005): Landscape context of organic and conventional farms: Influences on carabid beetle diversity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108: 165-74.
- Rayner, M. C. (1927): Mycorrhiza. *New Phytologist* 26, 22-45, DOI: 10.1111/j.1469-8137.1927.tb06704.x.
- Rheinheimer, J. und Hasler, M. (2010): *Die Rüsselkäfer Baden-Württembergs*. Herausgeber LUBW Baden-Württemberg, Verlag Regionalkultur 2010.
- Roberts, A. (2014): Plant Viruses: Soil-borne. DOI: 10.1002/9780470015902.a0000761.pub3.
- Rogasik, H.; Joschko, M. und Brunotte, J. (1994): Nutzung der Röntgen-Computertomographie zum Nachweis von Gefügevänderungen durch Mulchsaat. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 73, 111-114.
- Roth, C. H. und Joschko, M. (1991): A note on the reduction of run off from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (154), 101-105.
- Roth, C. H. (1992): *Die Bedeutung der Oberflächenverschlammung für die Auslösung von Abfluss und Abträgen*. Habilitation, TU Berlin.
- Scherber, C.; Eisenhauer, N.; Weisser, W. W.; Schmid, B.; Voigt, W.; Fischer, M.; Schulze, E. D.; Roscher, C.; Weigelt, A.; Allan, E.; Beler, H.; Bonkowski, M.; Buchmann, N.; Buscot, F.; Clement, L. W.; Ebeling, A.; Engels, C.; Halle, S.; Kertscher, I.; Klein, A. M.; Koller, R.; König, S.; Kowalski, E.; Kummer, V.; Kuu, A.; Lange,

- M.; Lauterbach, D.; Middelhoff, C.; Migunova, V. D.; Milcu, A.; Müller, R.; Partsch, S.; Petermann, J. S.; Renker, C.; Rottstock, T.; Sabais, A.; Scheu, S.; Schumacher, J.; Temperton, V. M. und Tschantke, T. (2010): Bottom-up effects of plant diversity on multitrophic interactions in a biodiversity experiment. *Nature* 468, 553-556.
- Scholten, O. E. und Lange, W. (2000): Breeding for resistance to rhizomania in sugar beet: A review. *Euphytica* 112, 219-231.
- Schrader, S.; van Capelle, C. und Meyer-Wolfarth, F. (2020a): Regenwürmer als Partner bei der Bodennutzung: Die Servicekräfte des Bodens. *Biologie in unserer Zeit* 50, 192-198. DOI: 10.1002/biuz.202010706.
- Schrader, S.; van Capelle, C. und Meyer-Wolfarth, F. (2020b): Pflanzenschutz aus dem Boden. *LUMBRICO* 5, 35-38.
- Schwabe, K.; Kunert, A.; Heimbach, U.; Zellner, M.; Baufeld, P. und Grabenweger, G. (2010): Der Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte) – eine Gefahr für den europäischen Maisanbau. *Journal für Kulturpflanzen*, 62(8): 277–286.
- Schulz, H.-J. (2011): Collembola – Springschwänze. In: Klausnitzer, B. (Herausgeber): *Stresemann – Exkursionsfauna von Deutschland*, Band 2: Wirbellose: Insekten. 11. Aufl. Spektrum, Heidelberg. 45-53.
- Simmering, D.; Dauber, J.; Wolters, V. und Otte, A. (2003): Die Bedeutung von Ameisenbauten für die Vegetation von Besenginsterbrachen. *Nova Acta Leopoldina NF 87 328*: 409-416.
- Singh, J.; Cameron, E.; Reitz, T.; Schädler, M. und Eisenhauer, N. (2021): Grassland management effects on earthworm communities under ambient and future climatic conditions. *European Journal of Soil Science* 72: 343-355.
- Sommer, C. (1998): *Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme*. Habilitation, Braunschweig/Kassel. *Landbauforschung Völkerröde*, 191.
- Stadler, B. und Dixon, T. (2008): *Mutualism. Ants and their insect partners*. Cambridge University Press, New York: 1-219.
- Triplehorn, C. A.; Johnson, N. F. (2005): *Borror & DeLong's introduction to the study of insects* 7th edition. Brooks/Cole, Belmont, CA.
- Trivedi, P.; Leach, J. E.; Tringe, S. G.; Sa, T.; Singh und Brajesh K. (2020): Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. In: *Nature reviews. Microbiology*. DOI: 10.1038/s41579-020-0412-1.
- Turbé, A.; De Toni, A.; Benito, P.; Lavelle, P.; Ruiz, N.; Van der Putten, W. H.; Labouze, E. und Mudgal, S. (2010): *Soil Biodiversity: Functions, Threats and Tools for Policy Makers*. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment). Download verfügbar: [http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/biodiversity\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/biodiversity_report.pdf), letzter Zugriff: 22.07.2021.
- Usher, M. B.; Davis, P.; Harris, J. und Longstaff, B. (1979): A profusion of species? Approaches towards understanding the dynamics of the populations of microarthropods in decomposer communities. In: Anderson, R. M.; Turner, B. D.; Taylor, L. R. (Herausgeber) *Population Dynamics*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 359-384.
- van Capelle, C.; Schrader, S. und Brunotte, J. (2012): Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology* 50, 165-181.
- van den Hoogen, J.; Geisen, S.; Routh, D.; Ferris, H.; Traunspurger, W.; Wardle, D. A.; und Crowther, T. W. (2019): Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature*. DOI: 10.1038/s41586-019-1418-6.
- van der Putten, W. H.; Bardgett, R. D.; De Ruiter, P. C.; Hol, W. H. G.; Meyer, K. M.; Bezemer, T. M.; Bradford, M. A.; Christensen, S.; Eppinga, M. B.; Fukami, T.; Hemerik, L.; Molofsky, J.; Schädler, M.; Scherber, C.; Strauss, S. Y.; Vos, M. und Wardle, D. A. (2009): Empirical and theoretical challenges in aboveground-belowground ecology. *Oecologia* 161, 1-14.
- Vaughan, M.; Backhouse, D. und Del Ponte, E. M. (2016): Climate change impacts on the ecology of *Fusarium graminearum* species complex and susceptibility of wheat to *Fusarium* head blight: a review. *World Mycotoxin Journal* 9, 685-700. DOI: 10.3920/WMJ2016.2053.
- Vetter, H. und Lichtenstein, H. (1968): Die biologische Auflösung von Unterbodendichtungen. *Landwirtschaftliche Forschung* 22, 85-88.
- Vernon, R. S.; Van Herk, W. G.; Clodius, M. und Harding, C. (2009): Wireworm Management I: Stand Protection Versus Wireworm Mortality With Wheat Seed Treatments. *Journal of Economic Entomology*, 102: 2126-2136.
- Wachmann, E.; Platen, R. und Barndt, D. (1995): *Laufkäfer – Beobachtung, Lebensweise*. Naturbuch Verlag, Augsburg.
- Wegulo, S. N.; Baenziger, P. S.; Nopsa J. H.; Bockus, W. W. und Hallen-Adams, H. (2015): Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley. *Crop Protection* 73, 100-107. DOI: 10.1016/j.cropro.2015.02.025.
- Zimmermann, G. (2010): Maikäfer in Deutschland: Geliebt und gehasst. Ein Beitrag zur Kulturgeschichte und Geschichte der Bekämpfung. *Journal für Kulturpflanzen*, 62(5): 157–172.



## 8 Autorinnen und Autoren

### **PD Dr. Anna Jacobs**

Thünen-Institut, Stabsstelle Boden

### **Prof. Dr. Stefan Schrader**

Thünen-Institut für Biodiversität

### **Dr. Doreen Babin**

Julius Kühn-Institut, Institut für Epidemiologie und Pathogendiagnostik

### **Dr. Anneke Beylich**

IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH

### **PD Dr. Joachim Brunotte**

Thünen-Institut für Agrartechnologie

### **Prof. Dr. Jens Dauber**

Thünen-Institut für Biodiversität

### **apl. Prof. Dr. Christoph Emmerling**

Universität Trier, Fachbereich VI – Bodenkunde

### **Ilka Engell**

Universität Göttingen, Zentrum für Biodiversität und nachhaltige Landnutzung (CBL)

### **Prof. Dr. Heinz Flessa**

Thünen-Institut für Agrarklimaschutz

### **apl. Prof. Dr. Johannes Hallmann**

Julius Kühn-Institut, Institut für Epidemiologie und Pathogendiagnostik

### **Dr. Bernd Hommel**

Julius Kühn-Institut, Institut für Ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz

### **Dr. Susanne Klages**

Thünen-Institut, Stabsstelle Klima

### **Dr. Jörn Lehmhus**

Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenschutz im Ackerbau und Grünland

### **Dr. Michael Meyer**

Universität Münster, Institut für Landschaftsökologie

### **Dr. Friederike Meyer-Wolfarth**

Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland

### **PD Dr. Martin Potthoff**

Universität Göttingen, Zentrum für Biodiversität und nachhaltige Landnutzung (CBL)

### **Dr. Tania Runge**

Thünen-Institut für Ländliche Räume

### **Prof. Dr. Christoph Scherber**

Zentrum für Biodiversitätsmonitoring, Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels, Museum Koenig

### **Dr. Adam Schikora**

Julius Kühn-Institut, Institut für Epidemiologie und Pathogendiagnostik

### **Dr. Quentin Schorpp**

Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst

### **Katharina Schulz-Kesting**

Thünen-Institut für Biodiversität

### **Prof. Dr. Kornelia Smalla**

Julius Kühn-Institut, Institut für Epidemiologie und Pathogendiagnostik

### **Prof. Dr. Christoph C. Tebbe**

Thünen-Institut für Biodiversität

### **Dr. Christine van Capelle**

Thünen-Institut für Biodiversität

### **Prof. Dr. Mark Varrelmann**

Institut für Zuckerrübenforschung, Abteilung Phytopathologie

# KTBL-Medien



## Betriebsplanung Landwirtschaft 2020/21

Maschinenkosten kalkulieren oder Arbeitsprozesse und Produktionsverfahren planen: Für die Betriebszweige Pflanzenproduktion und Tierhaltung bietet die 27. Auflage des KTBL-Standardwerkes umfassende Daten und Informationen. Die kostenfreien Web-Anwendungen unter [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de) ergänzen die gedruckte Datensammlung.

2020, 27. Auflage, 768 Seiten, 26 €, Bestell-Nr. 19526, ISBN 978-3-945088-74-6



## Streifenbodenbearbeitung

Eine Bestandsaufnahme aus Forschung und Beratung

Die Schrift richtet sich an Vertreter der landwirtschaftlichen Beratung sowie an praktische Landwirte und Lohnunternehmer. Sie gibt einen Überblick über den Stand der Versuche zum Thema Streifenbodenbearbeitung in Forschung und Beratung.

2021, 116 Seiten, Schrift, 22 €, Bestell-Nr. 11521, ISBN 978-3-945088-79-1



## Faustzahlen für die Landwirtschaft

Als verlässliches Nachschlagewerk für produktionstechnische, betriebswirtschaftliche und unternehmerische Kenndaten gehören die "Faustzahlen für die Landwirtschaft" zu den Standardwerken der Agrarliteratur. Für die 15. Auflage haben rund 80 Expertinnen und Experten aus ihren Fachgebieten interessante und aussagefähige Daten bedeutsamer Quellen zusammengetragen und mit eigenem Wissen ergänzt. Mit den Ergebnissen lassen sich viele Fragen ohne weitere Recherche beantworten.

2018, 15. Auflage, 1386 Seiten, 30 €, Bestell-Nr. 19523, ISBN 978-3-945088-59-3

### Bestellhinweise

Besuchen Sie auch unseren Internet-Shop [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)  
Porto- und Verpackungskosten werden gesondert in Rechnung gestellt.  
Preisänderungen vorbehalten. Wir freuen uns auf Ihre Bestellung.

### Senden Sie diese bitte an:

KTBL, Bartningstraße 49, D-64289 Darmstadt | Tel.: +49 6151 7001-189 |  
E-Mail: [vertrieb@ktbl.de](mailto:vertrieb@ktbl.de) | [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)

# BZL-Medien



## Sicher transportieren in der Land- und Forstwirtschaft

Täglich transportieren land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge unterschiedliche Güter. Damit niemand gefährdet wird, muss die Ladung entsprechend gesichert sein. Das Heft gibt dazu praktische Hinweise. Es fasst die wichtigsten gesetzlichen Vorgaben zusammen und erklärt, wann der Fahrer, Halter oder Verlader im Schadensfall haftet. Es stellt alle gängigen Arten der Ladungssicherung und die fachlichen Grundsätze des Beladens vor. Beispiele werden vorgestellt. Die Palette reicht von Getreide, Stroh, Zuckerrüben bis zu Silage, Gülle oder auch Holz. Ausführliche Anhänge liefern Zahlen zur Schüttdichte und zu den Ladeeigenschaften wichtiger landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Zusätzlich gibt es Tipps zum richtigen Verhalten im Falle eines Unfalls. Ein herausnehmbarer Aufkleber weist auf das sichere Bremsen bei Fahrten mit Anhänger hin.

Heft, DIN A5, 56 Seiten, 6. Auflage 2018, Bestell-Nr. 1574



## Integrierter Pflanzenschutz

Durch die Verfahren des integrierten Pflanzenschutzes können Ertrags- und Qualitätsverluste durch Schädlinge, Krankheiten und Unkräuter weitgehend verhindert werden. Das Heft macht dem Praktiker das Konzept des integrierten Pflanzenschutzes verständlich. Neben den Acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen werden Schutz, Förderung und Einsatz von Nützlingen sowie der sachgerechte chemische Pflanzenschutz nach dem Schadensschwellenprinzip vorgestellt.

Heft, DIN A5, 52 Seiten, 7. Auflage 2018, Bestell-Nr. 1032



## Vorsicht beim Umgang mit Pflanzenschutzmitteln

Pflanzenschutzmittel bewahren Kulturpflanzen vor Krankheitsbefall, ihrer Zerstörung durch Schädlinge oder der Konkurrenz von Unkräutern. Falsch angewandt können sie aber zu einer Gefahr für Mensch und Umwelt werden. Ob Landwirt oder Hobbygärtner, das Heft gibt jedem Pflanzenschutzmittelanwender grundlegende Tipps zur Vermeidung dieser Gefahr. Es informiert über Zulassung und Kennzeichnung von Pflanzenschutzmitteln und Pflanzenschutzgeräten. Maßnahmen zur umweltgerechten Anwendung der Pflanzenschutzmittel werden vom Ansetzen der Spritzflüssigkeiten bis zur Entsorgung von Mittelresten beschrieben. Wie die Mittel sicher gelagert werden und was zur Schutzausrüstung des Anwenders gehört, ist umfassend dargestellt.

Heft, DIN A4, 72 Seiten, 19. Auflage 2018, Bestell-Nr. 1042



### Bodentypen – Nutzung, Gefährdung, Schutz

So vielfältig wie die Landschaften sind auch die Böden Deutschlands. Als Wasser- und Nährstoffspeicher sind sie die Produktionsgrundlage für die Land- und Forstwirtschaft und den Gartenbau. Ihrem Schutz kommt daher große Bedeutung zu. Ausgehend von der Entstehungsgeschichte der Bodentypen informiert das Heft über deren Eigenschaften wie zum Beispiel die Korngrößenverteilung, den pH-Wert und den Humusgehalt. Farbfotos von Bodenprofilen veranschaulichen die wichtigsten Merkmale 25 ausgewählter Bodentypen. Landwirte und Berater erfahren, für welche Art der Bewirtschaftung der jeweilige Typ am besten geeignet ist und wo er seine Stärken und Schwächen hat. Außerdem erhalten sie darauf abgestimmte Tipps zur Bodenbearbeitung und zur Düngung.

Broschüre, DIN A5, 92 Seiten, 6. Auflage, Bestell-Nr. 1572



### Böden in der Landwirtschaft

Das Poster stellt acht Bodentypen vor, die landwirtschaftlich genutzt werden, sowie einen Weinbergboden. Jedes ausgewählte Bodenprofil ist typisch im Hinblick auf seine Verbreitung innerhalb einer bestimmten Agrarlandschaft. Neben der Horizontabfolge wird jeweils die mögliche landwirtschaftliche Nutzung beschrieben.

Poster, DIN A1 auf DIN A4 gefalzt, Erstauflage 2019, Bestell-Nr. 0046



### Rechtsformen landwirtschaftlicher Unternehmen

Hofübergabe, Kooperationen, größere Investitionen - fast immer stellt sich die Frage der passenden Rechtsform. Das Heft berücksichtigt dabei auch neuere, europäische Rechtsformen. Es erläutert alle Kriterien, die bei der Auswahl eine Rolle spielen. Dazu gehören z. B. die Gestaltungsmöglichkeiten von Verträgen, Haftungsfragen und Finanzierungsmöglichkeiten, die Übertragbarkeit von Beteiligungen, die Gewinn- und Verlustverteilung. Auch die erbrechtliche Seite wird angesprochen. Ein weiterer Schwerpunkt sind die Steuern. In Beispielen wird gezeigt, wie die Steuerbelastung in einer GmbH und einer GbR oder die Kapitalertragsteuer ermittelt werden. Abschließend erhalten Leserinnen und Leser Empfehlungen, welche Rechtsform zu welcher Ausgangssituation am besten passt.

Heft, DIN A4, 68 Seiten, 4. Auflage 2020, Bestell-Nr. 1147



### Mit Kalk gegen Schwermetalle

Schwermetalle dürfen in Lebens- und Futtermitteln Höchstwerte nicht überschreiten. Die Einhaltung der Grenzen ist dabei stark von einer ausgeglichenen Kalkversorgung der Acker- und Grünlandböden abhängig. Das Heft informiert Landwirte und Gärtner über die Herkunft von Schwermetallen in Böden und die Funktion von Kalk bei ihrer Aufnahme in die Pflanzen. Die im Bundesbodenschutzrecht verwendeten Begriffe Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwert werden erklärt. Grafiken und Tabellen fassen dabei die wichtigsten Unterschiede zusammen. Welche zusätzlichen Maßnahmen auf besonders mit Schwermetallen belasteten Böden zur Sicherung der Pflanzenqualität (insbesondere auch der Lebensmittelqualität) beitragen können, wird ebenso beschrieben wie weitere Vorteile der Kalkdüngung für den Boden.

Heft, DIN A4, 24 Seiten, 3. Auflage 2020, Bestell-Nr. 0389



### Zwischen- und Zweitfrüchte im Pflanzenbau

Die eigentlich vegetationslose Zeit mit Zwischen- und Zweitfrüchten zu nutzen, hat viele Vorteile: Sie verbessern den Boden durch verbleibende Pflanzenreste auf dem Acker. Außerdem schützen sie Umwelt und Gewässer, weil durch sie Bodenerosion und Nährstoffaustrag vermindert und Biodiversität erhöht wird. In dieser Broschüre lesen Sie, wie Sie Zwischenfrüchte in Ihre Anbausysteme integrieren können: durch Unter- und Stoppelsaaten, Sommer- und Winterzwischenfruchtbau oder durch Zweitfruchtanbau. Dieser wird heute zunehmend durch den Anbau von Futter- oder Energiepflanzen praktiziert.

Broschüre, DIN A4, 140 Seiten, 2. Auflage 2018, Bestell-Nr. 1060



### Gute fachliche Praxis - Bodenfruchtbarkeit

Bodenfruchtbarkeit ist mehr als der Ertrag in Dezitonnen: Dazu gehören auch der Umgang mit Pflanzenschutzmitteln, die Düngung, die Fruchtfolge und ackerbauliche Maßnahmen. Die komplexen Zusammenhänge werden in der Broschüre erläutert und zwar mit Blick auf eine Verbesserung der guten fachlichen Praxis. Sie ist definiert im Bundesbodenschutzgesetz. Im §17 steht, dass die Bodenfunktionen, wie der Luft-, Wasser-, Nährstoffhaushalt, erhalten werden sollen. Mehr als 20 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben den Stand des aktuellen Wissens zum Thema Bodenfruchtbarkeit zusammengetragen. Ihre Erkenntnisse sollen mit der Broschüre in die Praxis getragen werden. Sie dient als Grundlage für Landwirte, Beratungskräfte, Vertretungen der Fachbehörden und der Ausbildung im Agrarbereich

Broschüre, DIN A4, 144 Seiten, 2. Auflage 2022, Bestell-Nr. 1585

# Was bietet das BZL?

## Internet

### [www.landwirtschaft.de](http://www.landwirtschaft.de)

Vom Stall und Acker auf den Esstisch – Informationen für Verbraucherinnen und Verbraucher

### [www.praxis-agrar.de](http://www.praxis-agrar.de)

Von der Forschung in die Praxis – Informationen für Fachleute aus dem Agrarbereich

### [www.bzl-datenzentrum.de](http://www.bzl-datenzentrum.de)

Daten und Fakten zur Marktinformation und Marktanalyse

### [www.bildungsserveragrar.de](http://www.bildungsserveragrar.de)

Gebündelte Informationen zur Aus-, Fort- und Weiterbildung in den Grünen Berufen

### [www.nutztierhaltung.de](http://www.nutztierhaltung.de)

Informationen für eine nachhaltige Nutztierhaltung aus Praxis, Wissenschaft und Agrarpolitik

### [www.oekolandbau.de](http://www.oekolandbau.de)

Das Informationsportal rund um den Öko-Landbau und seine Erzeugnisse.

## Social Media

Folgen Sie uns auf Twitter, Instagram und YouTube



@bzl\_aktuell



@mitten draussen



Bundesinformationszentrum Landwirtschaft

## Medienservice

Alle Medien erhalten Sie unter [www.ble-medienservice.de](http://www.ble-medienservice.de)



## Unsere Newsletter

[www.landwirtschaft.de/newsletter](http://www.landwirtschaft.de/newsletter)  
[www.praxis-agrar.de/newsletter](http://www.praxis-agrar.de/newsletter)  
[www.oekolandbau.de/newsletter](http://www.oekolandbau.de/newsletter)  
[www.bmel-statistik.de/newsletter](http://www.bmel-statistik.de/newsletter)

# Impressum

1020/2022

## Herausgeberin

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)  
 Präsident: Dr. Hanns-Christoph Eiden  
 Deichmanns Aue 29  
 53179 Bonn  
 Telefon: +49 (0)228 6845-0  
 Internet: www.ble.de

## Redaktion

Monika Fischer  
 BZL in der BLE  
 Referat 412, Experten- und Fachkommunikation Landwirtschaft,  
 Bundeszentrum Weidetiere und Wolf

## Text

Siehe Autorenliste auf Seite 41

## Grafik

Liquid Impressions KG

## Bilder:

A. Murray: Titelbild  
 TI/Welling/vanCapelle: Abb. 1  
 GettyImages-1139950067\_and456\_iStock\_GettyImages Plus viaGettyImages: Abb. 2  
 JKI/Hommel: Abb. 3  
 Prof. Heinz-Christian Fründ: Abb. 4  
 TI/Dauber: Abb. 5 + 6  
 TI/van Capelle: Abb. 7  
 JKI/J. Lehnhus: Abb. 8  
 TI/Runge: Abb. 9 + 24  
 ZMFK/Scherber: Abb. 10 + 23  
 TI/Dühnelt: Abb. 12  
 TI/Hochgesand: Abb. 13  
 TI/Tebbe: Abb. 17

## Bilder U4:

brytta/iStock/Getty Images Plus via Getty Images; Hansenn/iStock/Getty Images Plus via Getty Images; Bim/iStock/Getty Images Plus via Getty Images; tepic/iStock/Getty Images

Erstauflage  
 (Stand: März 2022)

© BLE 2022



Das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) ist der neutrale und wissenschaftsbasierte Informationsdienstleister rund um die Themen Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Imkerei, Garten- und Weinbau – von der Erzeugung bis zur Verarbeitung.

Wir erheben und analysieren Daten und Informationen, bereiten sie für unsere Zielgruppen verständlich auf und kommunizieren sie über eine Vielzahl von Medien.

[www.praxis-agrar.de](http://www.praxis-agrar.de)