

Lebendiger Boden

in Wald, Wiese und Acker





***Regenwürmer:
Schlüsselorganismen
im Boden***

Lebendiger Boden in Wald, Wiese und Acker

Inhalt

Lebensraum Boden (Rudolf Hofer).....	S. 3 – 5
Das Leben im „Untergrund“ (Rudolf Hofer)	S. 6 – 46
Unterirdische Allianz (Michael Traugott)	S. 47 – 63
Den Ackerboden beleben (Hans Gnauer)	S. 64 – 82
Ökosystemleistung der Regenwürmer (Pia Euteneuer)	S. 83 – 87

Autoren

Pia Euteneuer: Ökologin, Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf der Universität für Bodenkultur
email: pia.euteneuer@boku.ac.at

Hans Gnauer: Landwirt in Gröben (Niederösterreich) und Obmannstellvertreter von *Boden.Leben*
email: hans.gnauer@boden-leben.at

Rudolf Hofer: Zoologe, www.focusnatura.at
email: hofer.focusnatura@outlook.com

Michael Traugott: Agrarökologe, Institut für Zoologie, Universität Innsbruck
email: michael.traugott@uibk.ac.at

Layout: Rudolf Hofer

© 2025 – herausgegeben vom
Boden.Leben
Verein für klimaangepasste und
aufbauende Landwirtschaft
kontakt@boden-leben.at



Vorwort

Liebe Freunde des Bodens!

Was ist Boden eigentlich? Eine sehr nüchterne Definition dazu lautet: Boden ist die oberste Verwitterungsschicht der Lithosphäre und entsteht durch Vorgänge der Verwitterung und Humusbildung, bei denen Einflüsse vieler Geofaktoren zusammenwirken. Das klingt sehr technisch und sagt einem jetzt mal nicht sehr viel. Doch unser Boden ist sehr viel mehr, als diese Definition aussagt.

Unser Boden ist lebenswichtig für uns! Boden speichert und filtert unser Grundwasser. Er liefert die Nahrung, die wir für unser tägliches Leben brauchen. Es ist daher sehr wichtig, unseren Boden gesund zu erhalten, um uns weiter mit Nahrungsmitteln und sauberem Wasser versorgen zu können. In unserer modernen Welt sind unsere Böden aber von vielen Faktoren bedroht, auf die der Mensch direkt oder indirekt Einfluss ausübt. Durch zu starke Verbauung und Versiegelung zerstören wir aktiv intakte Böden, die ihre Funktionen dadurch nicht mehr erfüllen können. Das begünstigt wiederum Hochwasserereignisse und Dürren.

Durch den vom Menschen mitverursachten Klimawandel werden unsere Böden und ihre Funktionen stark beeinträchtigt. Durch steigende Temperaturen wird der Abbau von organischer Substanz (Humus) beschleunigt, wodurch noch mehr CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Degradierete Böden können auch weniger Wasser und Nährstoffe speichern und liefern weniger Nahrung. Um weiterhin genügend Nahrung zu haben, müssen neue Flächen für den Ackerbau erschlossen werden, wofür meist Regenwald gerodet wird. Das verursacht wiederum massive CO₂-Emissionen und facht den Klimawandel weiter an. Wir müssen daher unsere Böden schützen und verbessern.

Der Boden ist eine zentrale Stellschraube im Klimawandel. Er kann als Puffersystem im Klimawandel fungieren. Und das kann er nur, wenn er sich sowohl chemisch als auch physikalisch und ganz besonders biologisch in einem guten Zustand befindet. Er muss bei Starkregen viel Wasser speichern können, er muss durch grüne Pflanzen und ihre Verdunstung Energie aus der Atmosphäre nehmen und eine Kühlwirkung entfalten. Und schließlich muss er verlässlich gesunde Nahrung in hoher Qualität und Menge liefern.

Und ganz wichtig dazu ist eben das Bodenleben. Es sind viele kleine Lebensgemeinschaften und Nahrungsketten im Boden, die unser tägliches Essen liefern. Ohne diese unendlich vielen Helfer im Boden wäre eine ertragreiche Landwirtschaft nicht möglich. Als Landwirtinnen und Landwirte müssen wir das Bodenleben daher bestmöglich hegen und pflegen.

Diese Broschüre holt einige dieser mehr oder weniger kleinen Helfer im Boden natürlicher und vom Menschen bewirtschafteter Lebensräume vor den Vorhang. Es soll zeigen, wie besonders und komplex die Zusammenhänge im Ökosystem unserer Böden sind. Eine nachhaltige Bewirtschaftung fördert die Artenvielfalt im Boden und dadurch die Mobilisierung natürlicher Ressourcen. Denn gerade die Artenvielfalt spielt eine entscheidende Rolle für die Funktionalität der Böden im Klimawandel. Es ist die große biologische Vielfalt, die dafür sorgt, dass Böden eine höhere Resilienz gegenüber jedweden Stressfaktoren aufweisen. Der Schutz und die Förderung des Bodenlebens sichern damit eine stabile Produktion von Nahrungsmitteln in Zeiten des Klimawandels und das noch dazu auf eine schonende und nachhaltige Art und Weise.

In dieser Broschüre finden sich auch viele praktische Anwendungen für die Landwirtschaft, wie man seinen Boden verbessern und nachhaltig bewirtschaften kann. Wir im Verein **Boden.Leben** beschäftigen uns genau damit und leben das in unserer alltäglichen Arbeit auf unseren Betrieben und Feldern. Die bestmögliche Förderung des Bodenlebens liegt sozusagen in unserer DNA. Von daher freuen wir uns sehr, dieses Wissen in dieser Broschüre weitergeben zu können. Wir wünschen Ihnen, liebe Leserin und lieber Leser, viel Spaß bei der Lektüre dieser Broschüre und viele neue Einblicke in die wunderbare Welt und Vielfalt des Bodenlebens!

Hans Gnauer - Boden.Leben

hans.gnauer@boden-leben.at

Lebensraum Boden

Der Boden, eine der Grundvoraussetzungen für die Vielfalt terrestrischen Lebens, entsteht in langsamen physikalischen und chemischen Prozessen. Die physikalische Verwitterung des Gesteins (Temperaturunterschiede, Frostsprengung, Hydratation) erzeugt Spalten und Bruchstücke unterschiedlicher Größe. Die Oberflächenvergrößerung beschleunigt die chemische Verwitterung: Durch Hydratation von Silikatgesteinen, Oxidationsprozesse und Säureeinwirkung (CO_2) werden Teile gelöst und Kristallstrukturen verändert – instabile Verbindungen entstehen.

Der weitere Zerfall des Gesteins führt zur Entstehung von Tonmineralen und zur Freisetzung von Kationen (Pflanzennährstoffen). Verwitterungsprozesse sind abhängig von Niederschlagsmenge und Temperatur. Auch Flechten und Algen, die auf blankem Fels wachsen, tragen durch Abscheiden von Säuren zur Verwitterung bei (biologische Verwitterung). Je nach Korngröße der Verwitterungspartikel entstehen Sand, Schluff und Ton. Lehm ist die Mischung aller drei Bodenarten zu gleichen Teilen.



Das Material aus Verwitterungsprozessen sammelt sich aufgrund von Schwerkraft und Erosion in Spalten und Senken und bietet nicht nur Moosen und Pionieren unter den höheren Pflanzen Substrat zum Wachsen, sondern ist auch Lebensraum für Mikroorganismen und mikroskopisch kleine Bodentiere, gefolgt von Milben, Collembolen, Nematoden und Enchyträen, die das anfallende organische Material zu Humus abbauen und mineralisieren. Es entsteht ein **Rohboden**, der direkt auf der Gesteinsoberfläche liegt und für Gebirgsböden typisch ist (*siehe Bild*).

In gemäßigten Klimazonen bilden sich über Jahrtausende tiefgründige Böden, eine Grundlage üppiger Vegetation und tierischen Lebens.

Von Bodentieren skelettiertes Blatt



Der Abbau von organischem Material

Für den biologischen Abbau organischen Materials sind vor allem Mikroorganismen (Bakterien und Pilze) verantwortlich. Beeindruckend ist die bakterielle Hitzeentwicklung in aufgehäuften Pflanzenmaterial bereits nach wenigen Stunden. Trotzdem darf die Rolle der tierischen Bodenorganismen beim Abbau von organischem Material nicht unterschätzt werden: Die unmittelbare Verwertung von Pflanzenabfall (**Saprophagie**) durch Bodentiere und die leicht verfügbare Stickstoffquelle nach deren Tod sind nur ein Teil ihrer Funktion.

Viel wertvoller ist die Rolle der Bodentiere als effektive Katalysatoren der mikrobiellen Aktivität: Ihre energetisch noch hochwertigen Ausscheidungsprodukte erhöhen die Angriffsflächen für Mikroorganismen. Durch das Fressen mikrobiell modifizierter Faeces (**Koprophagie**) passiert das organische Material mehrfach den Verdauungstrakt von Tieren, sodass sich die Oberfläche bis zu tausendfach erhöht und den Abbau beschleunigt.



*Zylinderförmige Faeces von Diplopoden (links) und
brettförmig eckige Faeces von Asseln (rechts)*

Bodentiere beeinflussen auch die Mikroflora selbst, einerseits als Konsumenten von Pilzen und Bakterienbelägen, andererseits durch Veränderung der Zusammensetzung der Mikroorganismen nach der Darmpassage.

Positiv wirkt sich die Mobilität der Bodentiere und die damit verbundene Verteilung der zerkleinerten organischen Substanz im Boden aus (**Bioturbation**). Das Zusammenspiel von Mikroorganismen und Bodentieren führt zu einer lockeren Krümelstruktur, die den Wasserhaushalt und vor allem die Sauerstoffversorgung des Bodens begünstigt.

Im gesunden, biologisch aktiven Oberboden macht der feste Anteil nur etwa die Hälfte des Gesamtvolumens aus, der Rest besteht aus Luft (Voraussetzung für den oxidativen Stoffwechsel der Lebewesen) und Wasser (Lebensraum vieler Mikroorganismen und Lösungsmittel für Pflanzennährstoffe).

Im Boden leben nicht nur Primär- und Folgezersetzer, sondern auch viele **räuberische Arten**. Letztere tragen zwar nicht unmittelbar zum Abbau der organischen Substanz bei, regulieren aber das Gleichgewicht innerhalb der Artengemeinschaft.

Beim biologischen Abbau werden Pflanzennährstoffe frei und es entstehen durch Umbau- und Neubildungsprozesse Huminstoffe, die dem Boden die braune Farbe geben. Huminstoffe haben große Oberflächen, gutes Wasserbindevermögen und eine hohe Kationen-Austauschkapazität. Sie fungieren also als Puffersystem bzw. als mobilisierbarer Speicher von Pflanzennährstoffen – ein vorzeitiges Auswaschen in tiefere Schichten wird so verhindert.

Diesbezüglich übertreffen Huminstoffe die Eigenschaften der (durch Verwitterung von Gestein und Mineralneubildung entstandenen) Tonminerale deutlich. Eine optimale Bodenfruchtbarkeit ergibt sich, wenn sich Huminstoffe mit den vorwiegend tiefer liegenden Tonmineralen zu stabilen **Ton-Humus-Komplexen** verbinden. Dabei spielen Bodentiere, in erster Linie Regenwürmer (*Seite 83*), sowie Mikroorganismen und Wurzeln eine entscheidende Rolle.

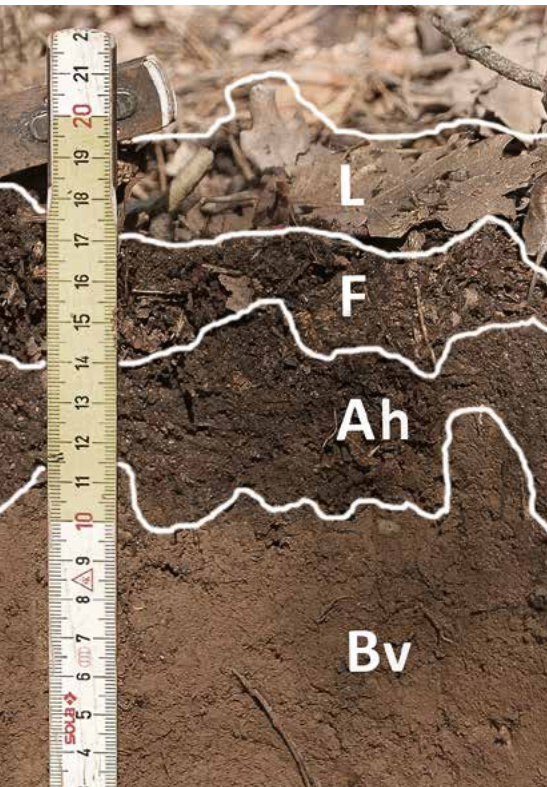


An der Erdoberfläche angehäufter Regenwurm Kot

Wie lange organisches Material braucht, bis es zu Humus ab-, um- und wiederaufgebaut ist, hängt nicht nur von den Umweltbedingungen ab, sondern auch vom Ausgangsmaterial selbst. So sind Blätter von Esche und Erle unter natürlichen Bedingungen bereits nach einem Jahr abgebaut, während die von Buche und Fichte etwa drei Jahre und Lärchennadeln über fünf Jahre brauchen. Am langwierigsten ist die Zersetzung von Holz (12–15 Jahre).

Das Bodenprofil ist geogen und biogen geprägt.

Abgestorbenes Pflanzenmaterial wird in der Regel an der Erdoberfläche abgelagert und nach unten hin sukzessive abgebaut (die Abbaugeschwindigkeit ist abhängig von Umweltbedingungen). Aus der Abfolge organischer und mineralischer Schichten ergibt sich ein mehr oder minder charakteristisches Bodenprofil, das man je nach Ausgangsgestein, Oberflächenbeschaffenheit, Klima und Bewuchs zahlreichen Bodentypen mit unterschiedlichen Eigenschaften zuordnen kann. Zusätzlich verändern anthropogene Einflüsse wie Rodung, Bodenverdichtung, intensive Bodenbearbeitung, Monokulturen oder massiver Einsatz von Dünger und Pestiziden nicht nur die Bodenstruktur, sondern wirken sich negativ auf die Aktivität von Mikroorganismen und die Zusammensetzung der Bodenfauna aus.



Unter optimalen Verhältnissen in **Mullböden** ist die **organische Auflage**, bestehend aus **Streuschicht (L)**: weitgehend unzersetztes Pflanzenmaterial), **Moderschicht (F)**: stark zerkleinertes, aber noch identifizierbares Material) und **Humusschicht (H)**: Ursprung nicht mehr identifizierbar), dünn. Letztere kann ganz fehlen (wie beim nebenstehenden Bild), weil die Abbauprozesse rasch vorstattengehen. Die von Tieren und Mikroorganismen zersetzte organische Substanz wird von Substratfressern (z.B. Regenwürmern) mit Tonmineralen vermischt und rasch in den **humosen Oberboden (Ah)** eingearbeitet. Daran grenzt der mehr oder weniger dicht gepackte **Verwitterungsboden (Bv)** mit geringem organischen und tierischen Anteil, gefolgt von lockerem oder festem **Gestein (C)**. Ein Bodentyp nach diesem Beispiel ist die Braunerde (siehe Abbildung). Die tiefgründigen und fruchtbaren Mullböden findet man im Grünland, in lichten, krautreichen Laubwäldern und in Steppengebieten. Durch den hohen Anteil an Regenwürmern, aber auch an Asseln und Diplopoden ist hier das Gesamtgewicht der Bodentiere sehr hoch.

Im Gegensatz dazu sind **Rohhumus-Böden** nährstoffarm und durch eine dicke, nur langsam abbaubare, von Pilzen verfilzte Streu- und Moderschicht gekennzeichnet. Der nährstoffreiche A-Horizont ist dünn. Rohhumus-Böden sind für Nadelholzforste und Zwergstrauchvegetationen mit ihren zersetzungsresistenten Nadeln bzw. Blättern typisch und werden durch feucht-kühles Klima begünstigt. Das Bodenleben ist zwar arten- und individuenreich (wegen der vielen Lückensysteme), das Gesamtgewicht jedoch niedrig, nicht zuletzt wegen der geringen Zahl an Regenwürmern, die saure Böden meiden. Typisch sind Hornmilben als wichtige Folgezersetzer, Collembolen und Schnecken (hier vor allem als Pilzfresser) und Enchyträen.

In kalkarmen Regionen kann aus einem Rohhumus-Boden ein **Podsol** entstehen, bei dem Huminstoffe und Tonminerale durch Säuren teilweise zerfallen und anschließend in tiefere Schichten ausgewaschen werden. Eine Zwischenstellung nehmen **Moderböden** ein, bei denen die Streu langsam abgebaut wird und der Auflagehorizont eine entsprechende Mächtigkeit erhält. Im Gegensatz zu Rohhumusböden ist aber ein ausgeprägter H-Horizont vorhanden. Böden in dichten, unterwuchsarmen Laubwäldern sind ein typisches Beispiel.

Spezielle Verhältnisse herrschen in stark durchnässten Böden: **Auböden** zeichnen sich nicht nur durch feuchtigkeitsliebende Arten aus (z.B. Sumpfsasseln), je nach Wasserstand besiedeln zeitweise auch aquatische und rein terrestrische Tiere diesen Bereich. Extreme Bedingungen herrschen in **Moorböden**, die sehr sauer und knapp unter der Oberfläche anaerob sind und daher zur Vertorfung des organischen Materials führen. Tierisches Leben ist nur an der Oberfläche möglich.

DAS LEBEN IM „UNTERGRUND“

Unter **Edaphon** versteht man die Gesamtheit aller Bodenorganismen – die **Bodenflora** mit Bakterien, Pilzen, Algen und Flechten (unter Ausschluss der Pflanzenwurzeln) und die **Bodenfauna**. Bodenorganismen besiedeln vor allem luft- und wassergefüllte Hohlräume der obersten Bodenschichten und die Bodenoberfläche. Die Bodenflora macht durchschnittlich 75 % der Masse der Bodenorganismen aus und bildet neben vielfältigen Funktionen ein lebendiges Nährstofflager im Boden.

PILZE (Fungi)

Saprophytische (substratabbauende) **Pilze** spielen vor allem in Wäldern eine dominante Rolle. Ihre wenigen Mikrometer dicken Hyphen (aneinandergereihte röhrenförmige Zellen mit Chitin als Zellwände) bilden dichte Geflechte (Mycel), die den Boden durchdringen und organische Substanzen abbauen, indem sie Enzyme absondern und die daraus entstehenden Spaltprodukte aufnehmen. Sie sind vor allem in der Lage, das resistente Holz zu zersetzen. Weiters tragen sie zur Stabilisierung des Bodens bei. —————>

Eine wichtige Rolle für das Pflanzenwachstum spielen **Mykorrhizapilze**, die Symbiosen mit über 80 % der Landpflanzen eingehen. Pilzhypen dringen in die Wurzelenden der Pflanzen ein und beziehen von der Wirtspflanze Zucker. Als „Gegenleistung“ wird die Pflanze mit Wasser und anorganischen Nährstoffen (z.B. Phosphat, Stickstoff und Spurenelementen) versorgt. Da die Pilze über ein wesentlich weiteres Einzugsgebiet als die Pflanzenwurzeln verfügen, wird vor allem bei Trockenheit und auf nährstoffarmen Böden die Versorgung der Pflanzen und ganz allgemein die Resistenz gegenüber Stressfaktoren verbessert und das Risiko eines Befalls mit Pathogenen reduziert.

Von der **Endomykorrhiza**, die in Wurzelzellen eindringt und dort meist bäumchenartige Verdickungen bildet, sind nur wenige hundert Arten bekannt, spielt vor allem bei krautigen Pflanzen, so auch bei vielen Kulturpflanzen, eine wichtige Rolle. Die Hyphen der **Ektomykorrhiza** dringen hingegen nur in den Raum zwischen den Wurzelzellen ein. Um die Wurzelspitzen bilden sie außerdem ein dichtes Geflecht (*siehe Bild*) und ersetzen so die Wurzelhaare. Außerdem vernetzen die Hyphen einzelne Bäume untereinander. Dieser Typus dominiert in den Wäldern gemäßigter Zonen und ist mit sehr vielen Arten vertreten. Die Fruchtkörper dieser Pilze sind jedem Pilzsammler bekannt.



Die Fruchtkörper der Mykorrhizapilze sind jedem Waldbesucher bekannt, wie z.B. der Fliegenpilz (*Amanita muscaria*).



BODENBAKTERIEN

Bakterien sind einzellige Organismen, im Durchschnitt 1–5 Mikrometer groß, von kugel-, stäbchen- oder schraubenförmiger Gestalt und ohne echten Zellkern (Prokaryonten). Eine Vielzahl von Arten mit unterschiedlicher Funktion lebt vor allem im Bereich der Pflanzenwurzeln (Rhizosphäre). Sie besiedeln Oberflächen und den Wasserfilm zwischen den Bodenteilchen und bewegen sich mithilfe rotierender Flagellen (Plasmafäden) fort, andere durch Kriechbewegungen.

So wie Pilze leisten die meisten Bakterien einen wichtigen Beitrag zum Abbau toter organischer Substanzen, vor allem im Agrarland und auf offenen Flächen. Je arten- und individuenreicher die Bakterienpopulation, desto besser das Pflanzenwachstum. Dieses Erkenntnis macht sich die Biolandwirtschaft zunutze.

Unter den vielen Vertretern dieser saprophytischen Bakterien sind die „**Strahlenpilze**“ (Actinomyceten) hervorzuheben. Die meist stäbchenförmigen Zellen vereinigen sich vielfach mithilfe von Schleimabsonderungen zu langen Fäden (Pseudomycel; daher der irreführende Name). Einige Arten scheiden Substanzen ab, die die Aktivität anderer Bakterien hemmen.

Der beim Abbau von Eiweiß anfallende Ammoniak (bzw. Ammonium) wird unter aeroben Bedingungen von **nitrifizierenden Bakterien** zu Nitrit und weiter zu Nitrat oxidiert, das für Pflanzen verfügbar ist. Unter sauerstoffarmen Bodenbedingungen finden hingegen nicht nur Fäulnisprozesse statt, sondern auch eine Denitrifizierung, bei der Bakterien ihren Stoffwechsel umstellen und Nitrat zu elementarem Stickstoff reduzieren, der zum Großteil in die Atmosphäre entweicht.

Neben nitrifizierenden Bakterien können im Boden weitere **chemoautotrophe Bakterien** vorkommen, die ihre Energie aus der Oxidierung von Schwefel-, Eisen- oder Manganverbindungen gewinnen.

Knöllchenbakterien (Rhizobien), die sich in den Wurzeln von Schmetterlingsblütlern ansiedeln (siehe Bild), binden elementaren Stickstoff, den sie zu biologisch verfügbarem Ammonium reduzieren. Vergleichbare Symbiosen können auch bei anderen Arten auftreten (z.B. bei Erlen).

Cyanobakterien (früher als Blaualgen bezeichnet) sind deutlich größer als andere Bakterien und zur Photosynthese befähigt, sie sind daher auf die Bodenoberfläche beschränkt.

Myxobakterien bilden koordinierte Schwärme, die sich auf schleimigen Bahnen fortbewegen und gemeinsam „Jagd“ auf Mikroorganismen machen, die durch Ausscheidung von Enzymen lysiert werden. Bei Nährstoffmangel bilden sie überdauernde Fruchtkörper.

Daneben leben im Boden auch **pathogene Bakterien**.

Knötchenartige Wurzelverdickungen, in denen sich die Knöllchenbakterien angesiedelt haben. —>



Vielfalt der Bodentiere

Einzellige Tiere (Protozoa)

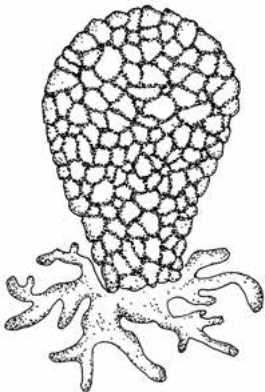
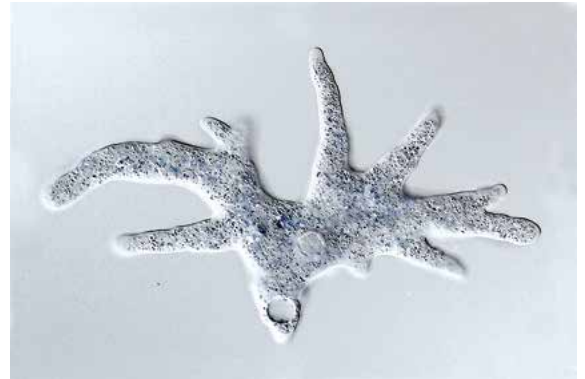
Der Lebensraum von Protozoen beschränkt sich (mit Ausnahme von Schleimpilzen) auf das Adhäsionswasser, das die Bodenpartikel umgibt. Trotz ihrer geringen Größe (meist 10–80 µm) machen sie im Schnitt etwa ein Drittel der tierischen Biomasse aus und spielen eine bedeutende Rolle im Ökosystem Boden. Ihre Erfolgsstrategie ist eine Kombination aus Flexibilität bzw. Toleranz gegenüber Milieuveränderungen und hohen Reproduktionsraten: Bei ungünstigen Bedingungen (z.B. Trockenheit) kapseln sie sich zu resistenten und energiesparenden Dauerstadien ab. So können sie einerseits lange Zeit überdauern, andererseits bei Regen sofort wieder „zum Leben erwachen“ und sich explosionsartig vermehren. Unter optimalen Bedingungen teilen sie sich einmal pro Tag (die Vermehrung erfolgt meist ungeschlechtlich). Räuber und Konkurrenz mit anderen Organismen (z.B. durch Pilz-Hemmstoffe) sorgen dafür, dass die Populationen nicht „in den Himmel wachsen“.

Wechseltierchen (Amoebozoa)

Die **Amöbozoen** sind eine Gruppe einzelliger Lebewesen (mit Zellkern), die sich durch Zellausstülpungen (Pseudopodien) kriechend fortbewegen, Nahrungspartikel umschließen und diese in Nahrungsvakuolen verdauen.

Schalenlose Amöben der Gattung *Acanthamoeba* zählen zu den häufigsten Einzellern im Boden, die sich von Bakterien ernähren. Dadurch scheinen Bakterienpopulationen zu verstärktem Wachstum und Stoffumsatz angeregt zu werden, was wiederum das Wurzel- und in der Folge Pflanzenwachstum zur Folge hat. An Stellen mit hoher Amöbendichte wurde ein erhöhter Nitratgehalt gemessen.

Amoeba proteus ist mit etwa 0,5 mm einer der größten Vertreter der Schalenlosen Amöben. Sie lebt vor allem im Süßwasser, aber auch in feuchten Böden. Typisch sind die fingerförmigen Ausstülpungen, mit denen Nahrungspartikel umflossen und inkorporiert werden. →



Schalenamöben (Thecamoebida) bestehen aus einer gallertartigen Hülle, in die Fremdkörper oder selbst gebildete Kieselsäureplättchen eingebaut werden. Durch eine Öffnung in der Schale strecken sie die Pseudopodien zur Fortbewegung und Nahrungsaufnahme hervor.

Die 30–100 µm großen Vertreter der Gattung *Euglypha* leben u.a. in der Streu- und Humusschicht des Bodens. →



Schleimpilze (Myxogastria) haben nichts mit Pilzen gemeinsam, sondern sind außergewöhnliche Vertreter der Amöbozoen, die vor allem in Wäldern gemäßigter Zonen vorkommen. Sie bilden unterirdisch aderförmige, schleimige Plasmamassen (Plasmodien), und obwohl sie mehr als einen Quadratmeter (!) groß werden können, bestehen sie aus nur einer einzigen Zelle, oft mit vielen Millionen von Zellkernen. Sie bewegen sich pulsierend mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1 cm/h zielgerichtet zu Nahrungsquellen (organisches Material, Mikroorganismen, Pilze) hin. Zur Vermehrung kommen sie an die Oberfläche und bilden kugelige, netzartige oder fingerförmige Fruchtkörper, die oft auffällig gefärbt sind und Sporen entlassen (*Bild*). Daraus entwickeln sich je nach Feuchtigkeitszustand der Umgebung begeißelte oder amöbenförmige Jugendstadien (Mixoflagellaten bzw. Mixamöben), wobei jeweils zwei zu einer Zygote verschmelzen, woraus wieder ein neues Plasmodium entsteht.

links: **Gelber Eierschleimpilz** (*Physarum virescens*),

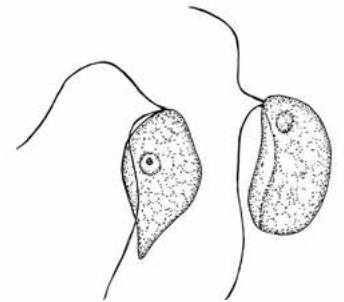


rechts: **Rotköpfiger Schleimpilz** (*Trichia decipiens*)



Geißeltierchen (Euglenozoa)

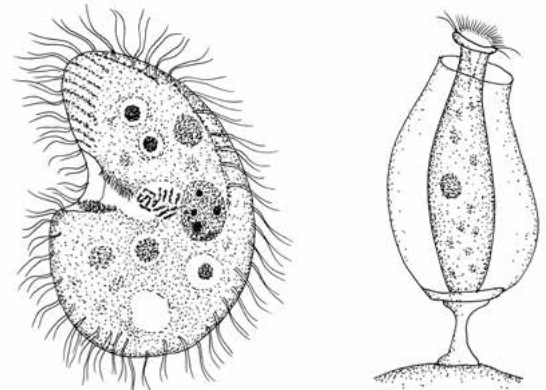
Die wenige µm großen Geißeltierchen bewegen sich mit Hilfe von meist zwei Geißeln fort (Zug- oder Schleppgeißeln). Ihre Ernährungsweise ist recht unterschiedlich. Die meisten bodenbewohnenden Arten ernähren sich in erster Linie von Bakterien (heterotrophe Ernährung), während die an der Bodenoberfläche lebenden Arten Zellwände aus Zellulose haben und (sowie Algen) mit Hilfe von Chloroplasten Photosynthese betreiben (autotrophe Ernährung). Daneben gibt es Arten, die zu beiden Ernährungsweisen fähig sind (mixotrophe Ernährung).



Wimpertierchen (Ciliophora)

Wimpertierchen sind die am höchsten entwickelten Einzeller. Ihr Körper ist mit einem arttypischen Muster von Wimpern bedeckt, die zur Nahrungsaufnahme (Bakterien und andere Kleinlebewesen) bzw. zur Fortbewegung dienen. Sie benötigen größere Wassersammlungen als andere Einzeller.

Holotriche Wimpertierchen (*links*) schwimmen frei im Wasser; bei **hypotrichen Wimpertierchen** sind die ventralen Cilien zu Cirren verklebt, mit denen sie am Untergrund laufen. Die **peritrichen Wimpertierchen** (*rechts*) sitzen mit einem Stiel am Untergrund fest, die Cilien dienen ausschließlich zum Einstudeln von Nahrung.



Vielzellige Tiere (Metazoa)



LANDPLANARIEN (Geoplanidae)

Landplanarien überwältigen Bodenorganismen mit Hilfe ihres klebrigen, z.T. giftigen Schleims. Über den ausstülpbaren, rüsselartigen Schlund (Pharynx) freigesetzte Verdauungsenzyme lösen das Gewebe der Beute auf, und der Brei wird in den blind endenden Darm aufgenommen. Die wenigen heimischen Arten, wie *Rhynchodemus* sp. (im Bild) sind klein und unauffällig. Problematisch sind einige bis 20 cm große, durch Zimmerpflanzen aus subtropischen und tropischen Ländern der Südhalbkugel importierte und dann ins Freiland entwichene invasive Arten, die in Großbritannien und Frankreich lokal zu starker Dezimierung von Regenwurm- bzw. Schneckenpopulationen geführt haben.



Habrotrocha bidens (25µm)

RÄDERTIERCHEN (Rotatoria)

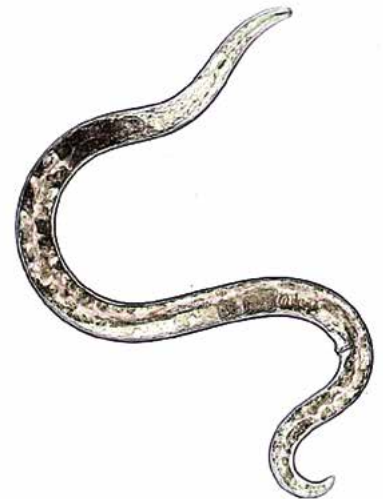
Obwohl Rotatorien als mehrzellige Organismen spezifische Organe ausbilden, werden sie nur unwesentlich größer als Einzeller (40–500 µm). Ihr Körper gliedert sich in Kopf (mit einem bewimperten Räderorgan), Körper und Fuß (mit Klebedrüsen zum Anheften am Untergrund). Auch Rotatorien bewegen sich im Wasserfilm der oberen Bodenschichten, entweder egelartig kriechend oder schwimmend mit Hilfe des Räderorgans, mit dem gleichzeitig Nahrungspartikel (Detritus, Bakterien, Einzeller) eingestrudelt werden. Einige Arten schützen ihren Körper mit einem Gehäuse. Bei Austrocknung bilden sie resistente Dauerstadien.

FADENWÜRMER (Nematoda)

Die 0,5–2 mm langen Nematoden bewegen sich schlängelnd im dünnen Wasserfilm, der die Bodenpartikel umgibt. Sie bevorzugen die obersten Zentimeter dauerfeuchter, bakterienreicher Mineralböden. Ungünstige Lebensbedingungen überstehen sie in Form von Dauerstadien (Anabiose).

Die Ernährung der im Boden lebenden Nematoden ist vielseitig. Viele Arten fressen Mikroorganismen oder leben räuberisch. Landwirtschaftlich von Bedeutung sind pathogene Nematoden (Wurzelälchen, Stängelälchen, Zystenälchen), die sich in Wurzeln, Stängeln oder Blättern bohren, das Pflanzengewebe lokal auflösen und damit großen Schaden im Garten- und Ackerbau verursachen können.

Daneben gibt es tierpathogene Arten, die z.T. zur biologischen Bekämpfung von schädlichen Käferlarven (z.B. Dickmaulrüssler, Gartenlaubkäfer, Maiswurzelbohrer, Schnellkäfer) eingesetzt werden: Die Nematoden dringen in die Larven ein und setzen Bakterien frei, die den Tod des Wirtes verursachen. Die Nematoden ernähren sich vom zersetzten Larvengewebe, die Nachkommen schwärmen im Boden aus und befallen neue Opfer.



SCHNECKEN (Gastropoda)

Die meisten Schnecken sind herbivor und fressen lebendes und totes Pflanzenmaterial sowie Pilze. Ein effektives Verdauungssystem bewirkt eine hohe Nahrungsverwertung: Mit der Radula (Raspelzunge) werden die Pflanzen zerkleinert. Die eigene Enzymausstattung und die Mitwirkung von Symbionten gewährleisten sogar eine teilweise Verwertung schwer verdaulicher Substrate wie Zellulose.

Während „Gehäuseschnecken“ auch in trockenen Habitaten leben können, sind „Nacktschnecken“ auf eine feuchte Umgebung angewiesen. Die Fortbewegung erfolgt üblicherweise auf einem (im vorderen Fußbereich abgeschiedenen) Schleimtepich. Die Lungenschnecken (Pulmonata) nehmen Sauerstoff über einen stark durchbluteten Teil der Mantelhöhle (Lunge) auf und verteilen ihn – gebunden an Haemocyanin (kupferhaltiger Sauerstoffträger) – im Körper.

Der Wirkungsbereich von Schnecken konzentriert sich auf die Bodenoberfläche, wobei sie vor allem bei feuchtem Wetter aktiv sind. Bei anhaltender Trockenheit verschließen sie die Schalenmündung mit einem aushärtenden Schleimfilm. Gehäuse-schnecken brauchen genügend Kalk zum Aufbau ihrer Gehäuse.

Die wärmeliebende **Schöne Landdeckelschnecke** (*Pomatias elegans*) weist eine nahe Verwandtschaft zu marinen Schnecken auf (*Neotaenio-glossa*). Sie kann ihre Schalenmündung mit einem Deckel (*Pfeil*) verschließen und übersteht so Trockenphasen. Während Lungenschnecken Zwitter sind, ist sie getrenntgeschlechtlich und zeigt eine eigenartige Fortbewegung, indem sie die linke und rechte Fußhälfte abwechselnd schrittartig versetzt (*im Bild hebt sie gerade die rechte Fußhälfte*). Lungenschnecken hingegen versetzen ihre ganze Fußfläche in wellen-artige Bewegungen.



Moore, Feuchtwiesen und Auwälder werden von winzigen, meist amphi-bisch lebenden Gehäuseschnecken bewohnt, wie z.B. der 2 mm großen **Bauchigen Zwerghornschncke** (*Carychium minimum*), eine Vertreterin der Wasserlungenschnecken (Basommatophora). Sie trägt im Gegensatz zu den Landlungenschnucken (Stylommatophora) die Augen an der Fühlerbasis und nicht an der Fühlerspitze.



Die **Weinbergsschnecke** (*Helix pomatia*) ist die größte heimische Lungenschnecke, wird mehrere Jahre alt und steht unter Naturschutz (wird auch in Schneckenfarmen gezüchtet). Bei der Paarung (*Bild*) rammen sich die Partner zur gegenseitigen Stimulation einen kalkigen, hormonhaltigen „Liebespfel“ in den Fuß. Im Winter vergräbt sich die Weinbergsschnecke und verschließt die Schalenmündung mit einem Kalkdeckel.



Fraßspuren auf einer von Algen bewachsenen weißen Oberfläche durch die Raspelzunge (Radula) einer Schnecke.





↑ Die kalkliebende, vorwiegend mediterran-südalpine **Märzen-** oder **Zebbraschnecke** (*Zebrina detrita*) besiedelt z.T. in großer Dichte sonnenexponierte Magerrasen. Die nachtaktive Schnecke verkriecht sich tagsüber im Boden.



↑ Die **Blindschnecke** (*Cecilioides acicula*) lebt unterirdisch in warmen, trockenen Habitaten, wo sie sich in Lückenräumen und Regenwurmgängen vor allem von Pilzgeflechten ernährt. Ihre 5 mm große Schale ist transparent und zerbrechlich.

Die braun bis rot gefärbte **Spanische Wegschnecke** (*Arion vulgaris*) dürfte ursprünglich aus SW-Frankreich stammen und hat sich seit den 1960er Jahren über große Teile Europas ausgebreitet und sich heute zur dominantesten Nacktschnecke entwickelt. In Landwirtschaft und Gärten verursacht sie erhebliche Fraßschäden. Durch das Wegzuchten natürlicher Fraßhemmer in Kulturpflanzen wurden diese nicht nur für Menschen, sondern auch für Schnecken attraktiver. Im Bild: Paarung

→ Die seltene **Rötliche Daubebardie** (*Daubebardia rufa*) lebt in der Laubstreu feuchter Bergwälder, bevorzugt in Gewässernähe. Ihre rudimentäre Schale, in die sie sich nicht mehr zurückziehen kann, trägt sie am Hinterende des Fußes. Die Daubebardie erbeutet Regenwürmer und andere Bodentiere.



Häufiger findet man Glasschnecken (Vitrinidae), die einen Teil des dünnchaligen Gehäuserestes mit einem Mantellappen verdecken.

Die **Weitmündige Glasschnecke** (*Semilimax semilimax*) ernährt sich von verwesenden Pflanzenteilen in feuchten Wäldern.



Auch der **Tigerschneigel** (*Limax maximus*) ist eine invasive Art. Ursprünglich ein Waldbewohner in Süd- und Westeuropa, ist er heute nahezu weltweit verschleppt und bei uns zum Kulturfolger geworden. Er ernährt sich von verrotteten Pflanzen, Pilzen und Aas. Ob er zur Reduktion der Spanischen Wegschnecke beiträgt, ist umstritten. Faszinierend ist sein Paarungsspiel, an einem langen Schleimfaden hängend. →



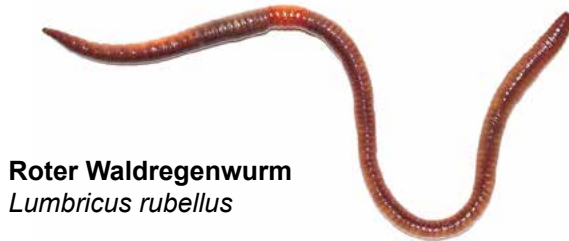
RINGELWÜRMER (Annelida)

Regenwürmer (Lumbricidae) nehmen in vielen Böden eine Schlüsselstellung beim Abbau organischen Materials ein und schaffen günstige Voraussetzungen für die Existenz anderer Organismen. Durch wellenförmige Verkürzung und Streckung ihres segmental aufgebauten Körpers, durch den inneren Druck ihrer Coelomflüssigkeit und mit Unterstützung der vier Paare kurzen, beweglichen Borsten graben sie sich durch den Boden. Da sie ausschließlich durch ihre Haut atmen und daher auf einen Verdunstungsschutz verzichten müssen, sind sie an feuchte Umgebung gebunden. Wegen des geringen Sauerstoffgehaltes im Boden enthält ihr Blut Hämoglobin als Sauerstoffspeicher. Kurzfristig können sie auch ohne Sauerstoff überleben. Regenwürmer verfügen über ein geschlossenes Blutgefäßsystem.

Regenwürmer tragen nicht nur zur Bodenfruchtbarkeit bei, sie sind auch Nahrungsgrundlage für viele andere Tiere (z.B. Maulwurf, Vögel, Insekten und andere Wirbellose). Schutz bieten ihre versteckte Lebensweise, der empfindliche Erschütterungssinn, der eine rechtzeitige Flucht ermöglicht, und die Fähigkeit, bei Gefahr hintere Körpersegmente abzustößen (Selbstverstümmelung, Autotomie) und wieder zu regenerieren. Regenwürmer sind erstaunlich langlebig (bis 8 Jahre). Die höchsten Besiedelungsdichten findet man im Kompost, die niedrigsten in sauren Nadelwäldern und in flachgründigen Böden. Intensive Bodenbearbeitung durch die Landwirtschaft schädigt die Regenwurmpopulation massiv (*siehe Seite 83*).

Je nach Lebensraum teilt man Regenwürmer in drei Typen (mit Übergängen) ein:

1. Streuformen (epigäische Arten) leben im Auflagehorizont des Bodens, in modernem Holz oder im Kompost. Sie ernähren sich von organischer Substanz. Ihre kräftig rotbraune Pigmentierung schützt sie zumindest ein wenig vor UV-Strahlung.



Roter Waldregenwurm
Lumbricus rubellus

Wenn man im Komposthaufen wühlt, fallen neben einer Vielzahl anderer Organismen ganze Knäuel des lebhaft gefärbten, geringelten **Kompostwurms** (*Eisenia fetida*) auf. Im Gegensatz zu anderen Arten verträgt er hohe Temperaturen und durch die konstant optimalen Bedingungen ist nicht nur das Wachstum, sondern auch die Reproduktionsrate ungewöhnlich hoch (bis zu zwei Kokons pro Woche). Die kleinen weißen Würmer im Bild sind Enchyträen (*Seite 15*).



2. Tiefgräber (anözische Arten) graben ihre Gänge von der Oberfläche bis tief in den Boden. In der Nacht ziehen sie Pflanzenteile in ihre Gänge. Nachdem Feuchtigkeit und vom Wurm abgegebene Verdauungsenzyme die Verrottung beschleunigt haben, wird der eingebrachte Vorrat gefressen. Ihren Kot lagern sie teilweise an der Bodenoberfläche ab. Zumindest die Oberseite ihres Vorderkörpers ist deutlich pigmentiert.



Tauwurm
Lumbricus terrestris



Der **Schwarzkopf-Regenwurm** (*Aporrectodea nocturna*), ebenfalls ein **Tiefgräber**, lagert bis zu 8 cm hohe Kothäufchen an der Bodenoberfläche ab. Diese in Österreich ursprünglich nicht heimische Art wurde durch Zierpflanzen eingeschleppt und kann erhebliche Probleme verursachen. Durch die massive, flächendeckende Akkumulierung von Kothäufchen, die bei feuchtem Wetter zu einer Verschlämmung des Geländes führt, wird im Extremfall die landwirtschaftliche Nutzung von Wiesen unmöglich gemacht (siehe Bild links).



3. Flachgräber (endogäische Arten) legen ihre vorwiegend horizontalen Gänge in der obersten Wurzelzone (30–50 cm Tiefe) an. Sie fressen sich durch das Substrat und nutzen organische Stoffe und Mikroorganismen. Da sie in der Regel nicht an die Oberfläche kommen, verzichten sie auf eine Pigmentierung. Der dunkle Darminhalt, Organe und Blutgefäße schimmern durch ihre Haut.

Kleiner Ackerwurm
Allolobophora chlorotica



Alle Regenwürmer sind Zwitter. In feuchten Nächten treffen sich **Tauwürmer** (*Lumbricus terrestris*) an der Bodenoberfläche zur Fortpflanzung und verbinden sich mit Schleim am Gürtel: **Clitellum** (siehe Pfeile), 32.–37. Körperring. Bei der Paarung werden Spermien ausgetauscht und in den Samentaschen (9. und 10. Ring) gespeichert.

Die Befruchtung der Eizellen erfolgt erst Tage später. Dabei bildet der Gürtel einen Schleimring, der nach vorne abgestreift wird und an der weiblichen Geschlechtsöffnung (14. Ring) ein Ei aufnimmt, das auf dem weiteren Weg nach vorne an der Samentasche besamt wird. Der Ring wird abgestreift und erhärtet zu einem **Kokon** (Bild links: *Kokons vom Kompostwurm*). Nach mehreren Wochen schlüpft ein junger Wurm aus dem Kokon.



Aus Österreich sind über 60 Regenwurmarten bekannt. Viele sind nur durch Lage und Bau der äußeren Geschlechtsmerkmale sicher zu bestimmen. Allerdings gibt es auch auffällige Arten, wie die kontrastreich geringelte ***Eisenia lucens***, die man bevorzugt unter der Rinde von totem Buchenholz findet. Bei Bedrängnis scheidet sie eine blaugrün fluoreszierende Flüssigkeit ab.



Ein echtes Highlight unter den Regenwürmern ist der **Smaragdgrüne Regenwurm** (*Aporrectodea smaragdina*), der erst im dritten Lebensjahr seine charakteristische Farbe annimmt. Er ernährt sich von verrottetem Buchenholz.



Enchyträen (Enchytraeidae)

Die 5–30 mm langen Enchyträen sind unpigmentierte Ringelwürmer, die sich vor allem in den obersten 10 cm feuchter Böden aufhalten. Als Substratfresser, die gerne Kotballen anderer Streuzersetzer verwerten, leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Humusbildung. Durch das Graben dünner Gänge wirken sie sich positiv auf den Wasser- und Luftgehalt im Boden und seine Mikrostruktur aus. Dort, wo Regenwürmer seltener sind, z. B. in Rohhumusböden, nimmt die Bedeutung von Enchyträen entsprechend zu. Auch mit der Meereshöhe nimmt das Vorkommen von Regenwürmern ab und endet an der Grasheide. Enchyträen hingegen steigen bis in die nivale Zone und übernehmen dort in den Rohböden eine wichtige Aufgabe.

BÄRTIERCHEN (Tardigrada)

Die weniger als 1 mm großen Tardigraden sind die mit Abstand widerstandsfähigsten mehrzelligen Lebewesen. Sie bewohnen nicht nur den wässrigen Film, der sich um Bodenstrukturen, Moose und Flechten bildet, sondern haben sich in allen Lebensräumen von der Tiefsee bis zu den Gletschern etabliert. Bärtierchen sind auf die periodische Austrocknung ihrer Umwelt hervorragend angepasst. Inaktive Dauerstadien, bei denen der Stoffwechsel auf Null sinkt, überstehen Trockenheit und extremste Temperaturen. Sie überleben unter diesen Bedingungen jahrelang. Selbst flüssiger Stickstoff, konzentrierter Alkohol oder hohe radioaktive Belastungen können ihnen nichts anhaben. Andererseits reagieren sie im aktiven Stadium empfindlich auf Umweltgifte. Tardigraden ernähren sich von Algen, Bakterien und abgestorbenem Material (Detritus) oder anderen winzigen Bodenbewohnern.



GLIEDERFÜSSER (Arthropoda)

Die Arthropoden sind der mit Abstand artenreichste Tierstamm mit **Crustaceen** (Krebstieren), **Cheliceraten** (Kieferklauenträgern), **Myriapoden** (Tausendfüßern) und **Hexapoden** (Sechsfüßern). Ihr Körper ist in Segmente gegliedert, die teilweise zu funktionellen Einheiten verschmolzen sind. Die Segmente tragen primär ebenfalls gegliederte Extremitäten, die auch spezielle Funktionen (z.B. Mundwerkzeuge) übernehmen oder rückgebildet wurden. Ihr Körper ist von einem Außenskelett aus Chitin (Cuticula) umhüllt, das durch Einlagerung von Calciumcarbonat verstärkt sein kann.

ASSELN (Isopoda)

Landasseln (Oniscidea) sind **Krebstiere**, die von marinen Asseln abstammen und sich stufenweise an das Landleben angepasst haben. Wesentlich ist die Anpassung des Atmungssystems – von der ursprünglichen Kiemenatmung bis zur Lungenatmung. Die nur 3–5 mm großen **Zwergasseln** und die doppelt so große **Sumpfassel** (*Ligidium hypnorum*, Bild unten) leben in feuchten Biotopen und decken ihren Sauerstoffbedarf über dachziegelartig aneinandergereihte Innenäste (Endopodite) der Hinterleibsfüße (Pleopoden), die als Kiemen dienen.

Sumpfassel



Für die Funktion der **Kiemen** an Land dient ein spezielles Wasserleitungssystem, das vom Kopf entlang des Körpers bis in die Kiemen führt und diese feucht hält. Gespeist wird das System über die Maxillardrüse am Kopf, das Exkretionsorgan der Asseln.

Der Harn enthält Ammoniak (das für Wassertiere typische Exkretionsprodukt des Stickstoffwechsels), das auf dem Weg zu den Kiemen in die Atmosphäre entweicht. Überschüssiges Wasser wird nach dem Passieren der Kiemen über den After im Enddarm wieder resorbiert. Landasseln hingegen müssen Wasser trinken.

Die Mauerassel (*Oniscus asellus*, Seite 17) zeigt schon erste Ansätze einer **Lungenatmung**, bei der die Außenäste (Exopodite) der Hinterleibsfüße eine leicht vergrößerte Oberfläche aufweisen. Perfektioniert ist die Lungenatmung u.a. bei Kellerasseln (*Porcellio scaber*) und Rollasseln (*Armadillidium* sp.), deren Außenäste der ersten und zweiten Hinterleibsfüße sich zu „Lungenbläschen“ mit einer gefalteten und verästelten inneren Oberfläche entwickelt haben. Diese **Tracheenlunge** ist an den weißen Körperchen deutlich erkennbar (siehe Pfeil).

An den dahinter liegenden Hinterleibsfüßen bleibt auch bei diesen Arten die Kiemenfunktion erhalten.



Kellerassel

Die flache **Mauerassel** (*Oniscus asellus*) benötigt hohe Luftfeuchtigkeit. Im Wald lebt sie unter der Rinde von Totholz. →

Die Oberfläche (Cuticula) der Asseln enthält Kalkeinlagerungen und ist für Wasser mehr oder weniger durchlässig. Daher sind selbst Arten mit Lungenatmung an eine zumindest mäßig feuchte Umgebung gebunden und müssen sich untertags oft verbergen.

Asseln zeigen ein ausgeprägtes **Brutverhalten**. Das Weibchen häutet sich nach der Begattung und bildet zwischen den ersten und fünften Laufbeinhüften einen mit Flüssigkeit gefüllten Brutbeutel (Marsupium), in dem sich die Eier entwickeln. Nach über einem Monat schlüpfen je nach Art 10–60 Junge.



Die **Kellerassel** (*Porcellio scaber*) ist eine der häufigsten Asseln und kommt auch in Gärten unter Steinen, Brettern und im Komposthaufen vor.



Die **Rollassel** (*Armadillidium vulgare*) kann sich bei Trockenheit einrollen und so den Wasserverlust an der dünnhäutigen Unterseite vermindern. Das erlaubt ihr auch die Besiedlung trockenerer Biotope. Gleichzeitig bewährt sich dieses Verhalten als Schutz gegen Fressfeinde. Rollasseln sind leicht mit Saftkuglern (Glomeridae) zu verwechseln (Seite 27).



Ökologische Bedeutung der Asseln

In vielen Lebensräumen zählen Asseln zu den wichtigsten Destruenten, die oft am Beginn der Humusbildung stehen. Die kräftigen Mundwerkzeuge erlauben ihnen, selbst frisches Falllaub zu nutzen und es rasch der Humifizierung zuzuführen. Übrig bleiben zunächst die derberen Blattrippen (Seite 3). Die mechanisch und chemisch aufgeschlossenen organischen Reste in den abgegebenen Faeces (Seite 4) beschleunigen in der Folge den weiteren mikrobiellen Aufschluss und sind auch Nahrungsquelle für andere Bodenorganismen, selbst für Asseln (**Koprophagie**).

Die höchste Dichte an Asseln findet man in feuchten Wäldern und überall dort, wo Pflanzenabfall und genügend Versteckmöglichkeiten vorhanden sind. Wärmeliebende Arten (Kellerasseln, Rollasseln) zeigen in unseren Breiten auch eine Bindung an menschliche Lebensräume (Synanthropie), wie z.B. Mauern und Komposthaufen. Gemieden werden hingegen stark saure Böden (Mangel an verfügbarem Calcium für Einlagerungen in ihren Panzer) und landwirtschaftliche Flächen und Wiesen mit zu geringen Versteckmöglichkeiten.

SPINNENTIERE (Arachnida)

Spinnentiere, die einzige heimische Klasse der **Cheliceraten**, umfassen mehrere, recht unterschiedlich aussehende Ordnungen. In Österreich heimisch sind: **Webspinnen** (Araneae), **Weberknechte** (Opiliones), **Milben** (Acari), **Pseudo-skorpione** (Pseudoscorpiones) und **Skorpione** (Scorpiones).

Im Gegensatz zu Insekten haben alle Spinnentiere vier Paar Laufbeine und ihr Körper ist in zwei Abschnitte, den Cephalothorax (verschmolzener Kopf-Brustabschnitt) und das Opisthosoma (Hinterleib), unterteilt, was allerdings nur bei den Webspinnen deutlich in Erscheinung tritt.

Webspinnen (Araneae)

Webspinnen sind bedeutende Räuber an der Bodenoberfläche, vor allem nachts. Hohlräume im Boden dienen oft nur als Versteck für untertags und als Schutz für ihre Brut. Neben Bodentieren erbeuten sie auch Fluginsekten. Die großen **Kieferklauen (Cheliceren)** mit einem einklappbaren Zahn dienen zum Beutefang. Sie injizieren das Gift (neurotoxische und nekrotische Wirkung) in die Beute. Erbrochene Verdauungssäfte lösen das Gewebe auf und die Spinne saugt den flüssigen Anteil des Gewebebreis auf (extraintestinale Verdauung).

Die meisten Spinnen haben zwei verschiedene Atemorgane ausgebildet: Röhrentracheen, die den ganzen Körper durchziehen, und Fächertracheen, auch „Buchlungen“ genannt, weil sie im Inneren übereinander geschichtete, blattartige Strukturen aufweisen. Sie liegen an der vorderen Ventralseite des Hinterleibs (Opisthosoma). Die herausragende Eigenschaft der Webspinnen ist die Produktion von Spinnseide, einem Protein mit hoher Elastizität und Reißfestigkeit, das von den **Spinnwarzen** (aus Gliedmaßen entstanden) an der Hinterleibsspitze abgeschieden wird (*Pfeil*).

Wolfsspinnen (Lycosidae) der artenreichen Gattung *Pardosa* sind vagabundierende, tagaktive Jäger an der Bodenoberfläche. Die Weibchen tragen den Eikokon an den Spinnwarzen mit sich (*Bild links: **Pardosa lugubris***). Nach dem Schlüpfen werden die Jungen bis zur ersten Häutung am Rücken mitgetragen (*Bild rechts: **Pardosa riparia***).



Das bodennah, flach in der Vegetation liegende Netz der **Labyrinthspinne** (*Agelena labyrinthica*) mündet schräg nach unten in eine dicht gesponnene Wohnröhre, an deren Eingang die Spinne lauert. Durch ein Insekt ausgelöste Vibrationen des Netzes alarmieren die Spinne, die ihre Röhre verlässt und versucht, die Beute zu ergreifen. Bei Bedrohung kann die Spinne durch einen Hinterausgang am Ende der Röhre entkommen.

Die Netze sind bei Morgentau leicht zu erkennen, aber nicht zu verwechseln mit den meist kuppelartig gebauten Bodennetzen vieler Baldachinspinnen.

Die nur 2–3 mm große **Zwerg-Baldachinspinne** (*Tenuiphantes cristatus*) bewohnt feuchte Wälder und Wegränder, wo sie über Bodenvertiefungen ihre Fangteppiche spannt. Diese Art ist auch im Winter aktiv – in frostfreien Tagesstunden kann man Männchen auf der Suche nach Weibchen beobachten. Die Weibchen bauen ihre Netze bevorzugt über Wildspuren oder anderen Vertiefungen im Schnee. Dort erbeuten sie winteraktive Arthropoden, vor allem Springschwänze (*Seite 29*). Wie bei allen Webspinnen fallen die auffällig geformten Pedipalpen (Kiefertaster) der Männchen auf, die als Begattungsorgan dienen (*siehe Pfeil*).



Die **Finsterspinne** *Amaurobius fenestralis* lebt in Wäldern und hat ihren Schlupfwinkel oft unter loser Baumrinde oder unter Steinen. Von dort aus spinnt sie ein weitmaschiges Trichternetz aus cribellaten Fäden nach außen. In dieser Spinnwolle (ohne Klebetropfen) verheddert sich die Beute. Interessant ist die Spinne durch ihre Brutfürsorge. Sie bewacht das Eigelege (*siehe Bild*) und die frisch geschlüpften Jungen (wie es viele andere Arten auch tun). Außergewöhnlich ist aber, dass nach der ersten Häutung der Jungspinnen die Mutter stirbt und zur ersten Nahrung für ihren Nachwuchs wird, der sie aussaugt.



Bei den tagaktiven **Springspinnen** (Salticidae) sind die Männchen oft auffällig gefärbt.

Der wichtigste Sinn beim Beutefang sind die großen Augen, besonders die beiden Mittelaugen, die räumliches Sehen ermöglichen (Spinnen haben 6–8 Augen, die familienspezifisch angeordnet sind). Insekten werden im Sprung erbeutet. Vor dem Absprung wird ein Sicherungsfaden am Grund befestigt. **Aelurillus v-insignitus** (4–7 mm) bewohnt sonnenexponierte, schütter bewachsene Lebensräume. *Links das balzende Männchen.*

Die bis zu 15 mm große **Tapezierspinne** (*Atypus piceus*) ist eine heimische Verwandte der Vogelspinnen (im Gegensatz zu anderen Spinnen sind die Giftzähne parallel zueinander beweglich).

An sonnigen Standorten gräbt sie eine bis zu 30 cm tiefe Röhre in den Boden, die an der Oberfläche in einen gesponnenen, getarnten, blind endenden Schlauch mündet, in dem sich die Spinne in der Nacht aufhält. Läuft eine Beute über den Schlauch, wird sie mit den Kiefern ergriffen und durch den Schlauch ins Innere gezogen.



Weberknechte (Opiliones)

Die meisten Weberknechte haben extrem lange, dünne, flexible Beine. Damit ist ihr Aktionsradius vorwiegend auf die Bodenoberfläche beschränkt. Im Gegensatz zu den Webspinnen sind Vorder- und Hinterkörper miteinander verschmolzen. Sie verfügen weder über Spinn- noch Giftdrüsen. Zur Feindabwehr dienen mehr oder weniger wirksame Stinkdrüsen.

Der **Hornweberknecht** (*Phalangium opilio*) lebt in offenen Biotopen, auch in Kulturlandschaften. →



Einige Arten, wie der **Fadenkanker** (*Paranemastoma quadripunctatum*), haben ihre Beinlänge reduziert und können in größere Bodenhohlräume eindringen. Tagsüber findet man den nachtaktiven Fadenkanker in feuchten Wäldern unter Steinen und Totholz. Er jagt Milben, Springschwänze und andere kleine Bodentiere.



Der nur 2 mm große **Milben-Weberknecht** (*Cyphophthalmus duricorius*) ist nicht nur wegen seiner Kleinheit leicht mit Milben zu verwechseln. Er lebt in feuchter Streu von Laubmischwäldern und ernährt sich von kleinen tierischen Organismen.

Gut an das Bodenleben angepasst haben sich **Brettkanker** (im Bild *Trogulus tricarinatus*). →

Der plattgedrückte Körper trägt nur kurze Beine, die zur Tarnung häufig mit Erdteilchen inkrustiert sind. Bei Gefahr stellen sie sich tot und sind vom Untergrund kaum zu unterscheiden. Brettkanker sind auf die Erbeutung von Gehäuseschnecken spezialisiert.



Pseudoskorpione (Pseudoscorpiones)

Pseudoskorpione erinnern an schwanzlose Miniskorpione (2–5 mm). Neben den vier Beinpaaren fallen die langen, mit Scheren bewaffneten Pedipalpen (umgewandelte Extremitäten im Kopfbereich) mit einem kleinen Giftzahn auf. Zur Orientierung dienen lange Tasthaare und Trichobothrien (Erschütterungssinn). Die Beute besteht aus kleinen Bodentieren, die mit kleinen zangenförmigen Cheliceren bearbeitet und extraintestinal verdaut werden.

Bei Gefahr flüchten Pseudoskorpione in rasantem Tempo im Rückwärtsgang, die Scheren nach vorne gerichtet.

Die Brutpflege ist hoch entwickelt: Eier und Nymphen werden im Brutbeutel intensiv gepflegt und mit Nährflüssigkeit aus dem Ovar versorgt.

Mooskorpione der Gattung **Neobisium** sind die häufigsten Vertreter im Boden, die in Streu und Moos nach Beute jagen. Da sie sich gelegentlich an den Beinen von Fluginsekten festklammern (*Bild unten*) und transportieren lassen (Phoresie), sind sie weit verbreitet.



Skorpione (Scorpiones)

Die 30–50 mm großen Skorpione der Gattung *Euscorp***ius** sind im südlichen Europa weit verbreitet. Drei Arten leben in Österreich, vor allem *Euscorp***ius germanicus** in Kärnten und Osttirol. Die großen Pedipalpen (Kiefertaster) tragen kräftige Scheren. Das Kammorgan an der Ventralseite nimmt Bodenvibrationen und Luftströmungen wahr. Die nachtaktiven Räuber töten die Beute mit dem Giftstachel am schwanzförmig verlängerten Körperende. Für Menschen ist der Stich dieser Arten schmerzhaft, aber ungefährlich.

Skorpione bringen lebende Junge zur Welt, die sich nach der Geburt bis zur ersten Häutung am Rücken der Mutter aufhalten (siehe Bild).



Milben (Acari)

Die vier Laufbeinpaare der Milben weisen sie als Spinnentiere aus, das erste Entwicklungsstadium hat allerdings nur drei Beinpaare. Etwa die Hälfte der heimischen Arten lebt im Boden, andere leben im Wasser, als Vorratsschädlinge oder als Pflanzen- und Tierparasiten (oft gleichzeitig auch Überträger von Krankheiten). Sie sind alle winzig klein, nur wenige überschreiten deutlich die Millimetergrenze. Der Tastsinn ist ihr wichtigstes Sinnesorgan, Augen fehlen fast immer, ein Helligkeitssinn ist vorhanden.

Hornmilben (Oribatida) sind wegen ihrer hohen Individuenzahl (bis 100.000 Individuen/m²) effektive Folgezer-setzer von zerkleinerter und mikrobiell infizierter Blatt- bzw. Nadelstreu. Auch als Katalysatoren der mikrobiellen Aktivität im Boden und als Verbreiter unverdaulicher Pilzsporen sind sie von großer bodenbiologischer Bedeutung.

Neben plumpen, stark gepanzerten Formen, die sich bei Gefahr abkugeln und nur schwer zu „knacken“ sind (z.B. *Oribotritia*), gibt es langbeinige Arten, die sich mit abgestreiften Nymphenhäuten und Erdpartikeln am Rücken tarnen (z.B. *Damaeus*).

Hornmilben leben hauptsächlich in den obersten 10 cm des Bodens, vor allem im Rohhumus feuchter Nadelwälder. Im tieferen Boden findet man ungepanzerte, weiße Arten. Hornmilben sind meist heterogen im Boden verteilt und akkumulieren an günstigen Stellen.

Die artspezifische Nahrung ist vielfältig: von abgestorbenen Pflanzenteilen und verrottetem Holz, über Pilz-, Bakterien- und Algenbeläge bis zu Aas und Faeces anderer Bodentiere.

Hornmilben können auch Zwischenwirte von Bandwürmern sein, die bei Säugern parasitieren.



Oribotritia sp.



Eupelops sp.



Euzetes globulus



Hermannia gibba

Damaeus sp.





Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Hornmilbe der Familie der Suctobelbidae, von denen es nur Weibchen gibt, die sich aus unbefruchteten Eiern (parthenogenetisch) vermehren.



Auffällig in Farbe und Größe (bis zu 4 mm) sind Vertreter der **Samtmilben** (Trombidiidae). Im Bild oben: *Allothrombium* sp.

Im Gegensatz zu anderen Milben scheuen sie nicht das Sonnenlicht. Sie ernähren sich von Insekteneiern und kleinen Bodentieren. Die Larven parasitieren an Insekten und Weberknechten, wo sie als kleine rote Knöpfe am Körper auffallen.



Die zahlreich im Boden lebenden **Raubmilben** (Gamasina) sind flinke Räuber, die mit scherenförmigen Mundwerkzeugen den Körper ihrer Opfer aufschneiden, Verdauungssäfte einspritzen und dann den vorverdauten Nahrungsbrei aufsaugen. Sie erbeuten Nematoden, kleine Springschwänze und andere Milben.

Einige Raubmilben verbreiten sich phoretisch, wobei sie sich mit den Beinen an Insekten klammern und sich zu geeigneten Nahrungsquellen, z.B. Aas oder Dung, fliegen lassen. Ein Beispiel dafür ist die **Schmarotzermilbe** (*Poecilochirus carabi*), die sich auf Totengräber als „Taxi“ spezialisiert hat.

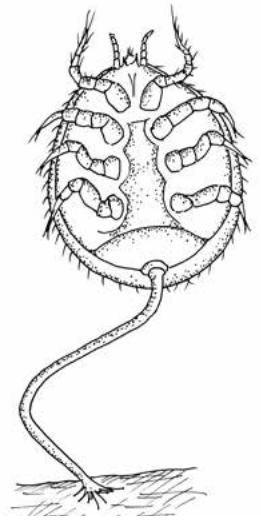




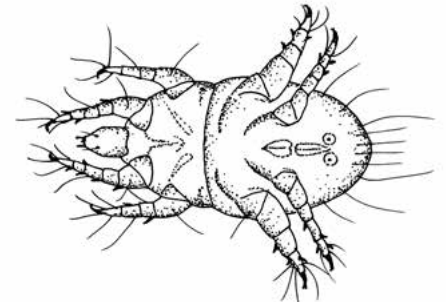
Die plumpen, gut gepanzerten **Schildkrötenmilben** (Uropodina) können ihre Beine in Vertiefungen ihres Körpers zurückziehen. Sie halten sich häufig in verrottetem Material auf, ihre artspezifische Nahrung umfasst eine breite Palette.

„Milbe am Stiel“

Deutonymphen (letztes Entwicklungsstadium) vieler Schildkrötenmilben lassen sich von Insekten in neue Lebensräume verfrachten (**Phoresie**). Dabei scheiden sie aus dem Darm ein Sekret ab, das zu einem Stiel erhärtet, mit dem sie sich vorübergehend an die Oberfläche des Trägers heften.



Die winzigen, unpigmentierten und dünnhäutigen **Wurzelmilben** (*Rhizoglyphus*, im Bild die Unterseite) zählen zu den wirtschaftlich bedeutsamen Schädlingen, deren Bekämpfung meist schwierig ist. Sie leben von Wurzeln, Knollen und Zwiebeln; viele finden sich auch in verrottetem Pflanzenmaterial. Die Ausbreitung erfolgt durch Phoresie.



TAUSENDFÜSSER (Myriapoda)

Der Unterstamm der Arthropoden (Gliederfüßer) mit einem mehr oder weniger langgestreckten Körper, bestehend aus gleichförmigen Rumpsegmenten mit Laufbeinen („myrioi“ = unbestimmt große Zahl), umfasst die Klassen der **Hundertfüßer**, **Zwergfüßer**, **Wenigfüßer** und **Doppelfüßer**.

Hundertfüßer (Chilopoda)

Chilopoden sind durchwegs Räuber, viele sind außerordentlich wehrhaft.

Die mehr oder weniger einheitlichen Körpersegmente tragen je ein Laufbeinpaar, das letzte ist stark verlängert. Die Beute wird durch Kontakt mit den sensiblen Antennen erkannt.

In die Bisswunde der erlegten Beute werden Verdauungssekrete erbrochen und der vorverdaute Brei aufgenommen.



Steinläufer

Steinläufer sind empfindlich gegenüber Austrocknung, daher leben die meisten Arten in der Streu von Wäldern. Der **Gemeine Steinläufer** (*Lithobius forficatus*, Bild vorige Seite und rechts) ist der größte heimische Vertreter (bis 30 mm), der auch Gärten und offenes Gelände besiedelt. Der abgeplattete Körper trägt 15 Laufbeinpaare (bei Jungtieren weniger). Im letzten verlängerten Beinpaar befinden sich Wehrdrüsen, die bei Bedrängnis Klebefäden ausstoßen. Das erste, zu Kiefern differenzierte Beinpaar (**Maxillipeden**) ist mit einer Giftdrüse ausgestattet, sodass auch größere Beutetiere überwältigt werden können.



Die heimischen **Cryptops**-Arten (etwa 30 mm) mit 21 Beinpaaren bevorzugen Böden warmer Wälder. Sie sind nahe Verwandte der Skolopender (bis 15 cm) des Mittelmeerraumes. Die Eier und ersten Jugendstadien werden von der Mutter bewacht und gepflegt (Bild).

Der mediterrane, bis zu 3 cm lange **Spinnenläufer** (*Scutigera coleoptrata*) fällt durch seine langen Beine auf, die ihn zu einem flinken Räuber machen. Er bewohnt Geröll und Steinmauern, dringt aber auch in Häuser ein. Durch menschliche Verfrachtung gelangte er da und dort nach Mitteleuropa, wo er in warmen Regionen, begünstigt durch die Klimaerwärmung, sich teilweise schon zu etablieren beginnt.



Der **Erdkriecher** *Geophilus flavus* lebt nicht nur im Wald, sondern auch in Wiesen und Äckern. Sein dünner, langgestreckter Körper (15–40 mm) mit 49–75 Beinpaaren erlaubt ihm, tief in das Lückensystem des Bodens einzudringen. Seine Blindheit wird durch zahlreiche Sinneshaare (nicht nur an den Antennen, sondern am ganzen Körper) kompensiert. Die Wehrdrüsen befinden sich auf der Bauchseite.

Erdkriecher überfallen erstaunlich große Beutetiere (z.B. kleine Regenwürmer), in die sie sich hineinbeißen und den Bereich um die Wunde äußerlich verdauen. Auch Erdkriecher betreiben Brutpflege.

Doppelfüßer (Diplopoda)

Bei Diplopoden sind jeweils zwei Körpersegmente miteinander verwachsen, sodass der Eindruck von zwei Beinpaaren pro Segment entsteht. Geschlüpfte Jungtiere haben deutlich weniger Segmente als Adulte. Gemeinsames Merkmal ist die große bodenbiologische Funktion als Primärzersetzer. Die Körperformen können sehr unterschiedlich sein.

Die häufigsten Vertreter gehören der Ordnung der **Schnurfüßer** (Julida) an. Durch ihren wurmförmigen, vielgliedrigen, gepanzerten Körper können sie buldozerartig tief in den Boden eindringen („Rammtyp“), wenngleich sie nachts auch an die Oberfläche kommen. So wie Regenwürmer tragen sie zur Bildung von Ton-Humus-Komplexen und zur Lockerung des Bodens bei (vor allem dort, wo Regenwürmer seltener sind). Ihre Nahrung besteht hauptsächlich aus totem Pflanzenmaterial und Pilzgeflechten.



Obwohl feuchter Waldboden der bevorzugte Lebensraum der meisten Diplopoden ist, gibt es Arten, die auch in offenem Gelände leben, wie z.B. der **Feldschnurfüßer** (*Cylindroiulus caeruleocinctus*). Bei Massenvermehrung kommt es im urbanen Raum zu Anhäufungen am Rand von Gebäuden, auf Hausmauern und in Wohnungen, wo die Tiere nach ihren nächtlichen Wanderungen stranden.

Der 8–15 mm große **Getüpfelte Tausendfuß** (*Blaniulus guttulatus*) ist blind, weiß und an den Seiten leuchten die roten Wehrdrüsen durch. Sein Lebensraum reicht von feuchten Wäldern bis zu Äckern. Wird seine natürliche Nahrung (totes Pflanzenmaterial) knapp, nagt er Wurzeln und Feldfrüchte an. Bei anhaltender Trockenheit deckt er so seinen Wasserbedarf und kann dadurch Schäden in der Landwirtschaft verursachen.



Bei Belästigung ringeln sich Schnurfüßer ein, mit dem Kopf im Zentrum. Die Abgabe von **Wehrflüssigkeit** (braune Tröpfchen im Bild) schützt sie vor dem Gefressenwerden.

Bei Juliden bestehen die aggressiven, intensiv riechenden Substanzen aus Chinon-Verbindungen (bei Polydesmiden aus Blausäure und bei Glomeriden aus Alkaloiden). Abgebildet ist der im Mittelmeerraum oft in Massen vorkommende

← ***Pachyiulus varius***.



Die augenlosen **Bandfüßer** (Polydesmida) erkennt man an den breiten, seitlich vorstehenden Rückenplatten, mit denen sie in enge Spalten eindringen können („Keiltyp“). Sie ernähren sich von abgestorbenem Pflanzenmaterial und morschem Holz. Der bis 22 mm lange **Polydesmus complanatus** ist ein häufiger Waldbewohner, den man leicht unter Baumrinden und Totholz findet. Die Spitzen der Rückenplatten sind mehr oder weniger hell gefärbt.



Der **Bohrfüßer** (*Polyzonium germanicum*) lebt im Laubstreu feuchter Lebensräume, wo er sich durch den Boden „bohrt“. Auffallend ist sein gelb-oranger Körper mit halbzyklindrischem Querschnitt. In Österreich findet man die vorwiegend osteuropäische Art nur östlich von Salzburg.

Saftkugler (Glomerida) haben eine asselförmige Gestalt. Bei Gefahr kugeln sie sich ein (Bild links unten) und sind leicht mit Rollasseln zu verwechseln (Seite 17). Alle Körpersegmente sind jedoch im Gegensatz zu Asseln annähernd gleich breit und die hinteren Segmente tragen jeweils zwei Beinpaare. In eingerolltem Zustand ist im Gegensatz zu den Asseln der Kopf nicht sichtbar. Wie auch andere Diplopoden sind Saftkugler mit Wehrdrüsen ausgestattet (Name!). Glomeriden sind vorwiegend Waldbewohner im Auflagehorizont des Bodens und fressen moderndes Laub und mikrobiellen Aufwuchs.

Östlicher Sechsstreifen-Saftkugler (*Glomeris hexasticha*)

Vierbänder-Saftkugler (*Glomeris connexa*)



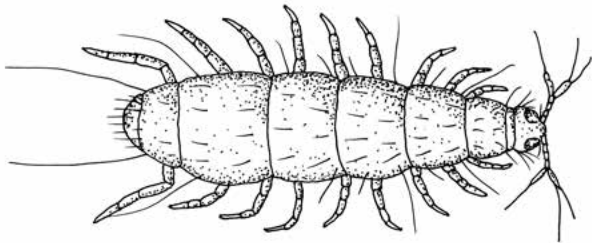
Klein, wurmförmig, unpigmentiert und augenlos, aber ausgestattet mit empfindlichen Mechano- und Chemorezeptoren, das sind die charakteristischen Merkmale **euedaphischer Lebensformen** (Bewohner des Lückensystems tieferer Bodenschichten), die es bei vielen Tiergruppen gibt. Innerhalb der Myriapoden wird dieser Typus von zwei Klassen, den **Symphylen** und **Pauropoden**, repräsentiert. Durch fehlenden Verdunstungsschutz sind sie in ihrem Lebensraum auf hohe Luftfeuchtigkeit angewiesen. Entwicklungsstadien haben weniger Beine als Adulte.

Zwergfüßer (Symphyla)

Die meist nur 5 mm großen Symphylen sind mit zwei langen Antennen, 12 Beinpaaren und zwei kurzen Körperanhängen mit Spinnrüsen ausgestattet. Da sie im Lückensystem bei Angriff durch Räuber wenig Bewegungsfreiheit haben, wehren sie sich durch Ausstoßen von Spinnfäden. *Im Bild **Scutigere** sp.*

In humusreichen Böden können sie hohe Dichten (im Extremfall bis zu mehreren Tausend Individuen pro Quadratmeter) erlangen. Das Nahrungsspektrum der Symphylen reicht von Bakterien, Pilzen und Aas bis zu abgestorbenen Pflanzenteilen.

Einige Arten fressen Wurzelhaare und können dadurch Schäden in der Landwirtschaft verursachen.



Wenigfüßer (Pauropoda)

Die nur 0,5–2 mm großen Pauropoden haben neun Beinpaare und verzweigte Antennen. Sie bevorzugen humose Böden. Neben den meist weißen gibt es auch pigmentierte Arten. Sie beißen Pilzhyphe auf und saugen sie aus.

SECHSFÜSSER (Hexapoda)

Die Klasse der Hexapoden umfasst die primär flügellosen **Entognatha** (mit **Collembolen**, **Dipluren** und den 1–2 mm großen **Proturen**), deren Mundwerkzeuge in einer Tasche liegen – und die **Insekten**. Der Körper ist dreigeteilt in Kopf, Brust (mit drei Beinpaaren) und Hinterleib.

Bei den meisten Insektenordnungen tragen die letzten beiden Brustsegmente je ein Paar Flügel, die bei einzelnen Gruppen rückgebildet sein können. Charakteristisch für Insekten ist die Tracheenatmung (die bereits bei Myriapoden zu finden ist). Tracheen sind ein durch Einstülpungen der Haut entstandenes inneres Röhrensystem, über das Sauerstoff direkt (ohne Umweg über das Blut) an das Gewebe geleitet wird.

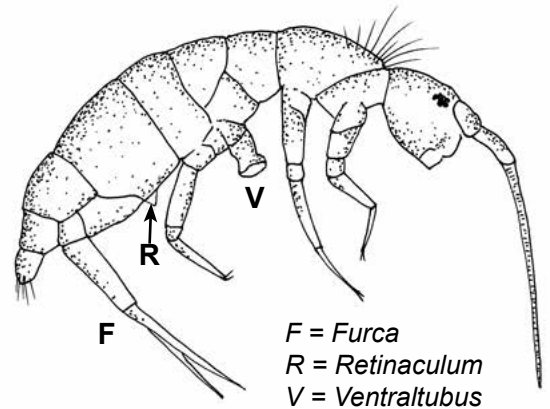
SPRINGSCHWÄNZE (Collembola)

Springschwänze (0,3–7 mm) sind primär flügellose „Urinsekten“, die auf Grund ihres massenhaften Vorkommens von großer bodenbiologischer Bedeutung sind. Namensgebend ist ihre Sprunggabel (**Furca**) am 4. Hinterleibssegment, die in Ruhe nach vorne geklappt in einer Haltevorrichtung (**Retinaculum**) eingerastet ist. Bei Gefahr schnellst die Furca auf die Unterlage, wodurch das Tier je nach Gruppe mit einem Salto vor- oder rückwärts bis zu 35 cm weit springen und der Gefahr entkommen kann.

Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der **Ventraltubus**, ein stempelartiges Organ mit ausstülpbaren paarigen Blasen oder langen Schläuchen (bei Kugelspringern, *Seite 31*). Diese Ausstülpungen dienen dem Wasser- und Ionenhaushalt, zusätzlich auch zum Atmen und zum Anhaften an glatten Unterseiten. Normalerweise erfolgt der Gasaustausch über die Körperoberfläche, nur wenige Arten haben einfache Tracheen entwickelt (Kugelspringer).

Collembolen sind ein wichtiges Glied der Nahrungskette im Boden. Einerseits ernähren sie sich von Pilzen, Bakterien, zerfallenden pflanzlichen oder tierischen Substanzen, Algen und Faeces anderer Bodentiere und tragen so zum Abbau der organischen Substanz und zur Regulation von Pilzpopulationen im Boden bei. Je nach Ernährungstyp sind kauende, schabende, ritzende oder stechend-saugende Mundwerkzeuge im Einsatz.

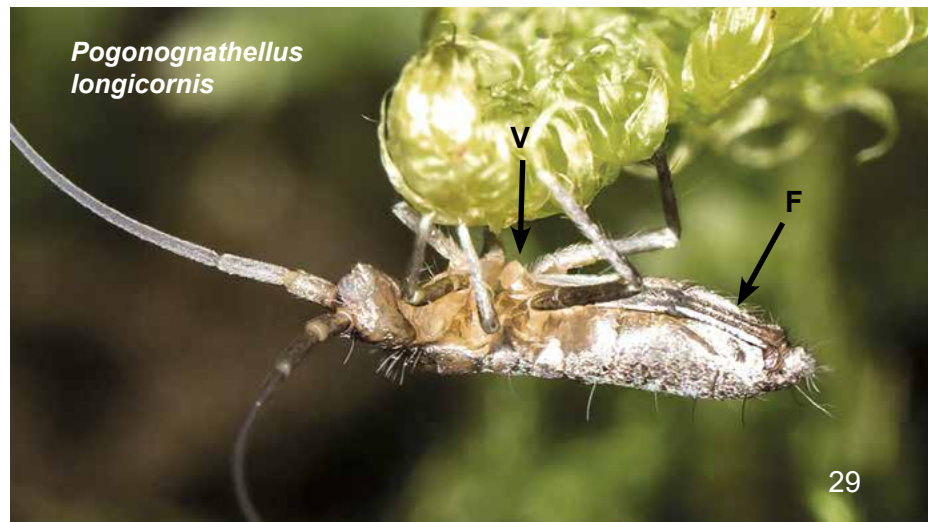
Collembolen wirken als Katalysatoren der mikrobiellen Aktivität, weil ihre Ausscheidungsprodukte die Angriffsfläche für Mikroorganismen verbessern und sie zur Verbreitung von Mikroorganismen beitragen. Andererseits sind Collembolen eine wichtige Nahrungsgrundlage für viele räuberische Bodenorganismen, von Raubmilben über Spinnen bis zu Ameisen und Käfern.



Die Besiedlungsdichte der Collembolen ist abhängig vom Nahrungsangebot, von Hohlräumen (Collembolen können nicht graben) und von möglichst konstanten, feuchten Umweltbedingungen. Die höchsten Dichten findet man daher im Kompost (hohe Individuendichte, aber geringe Artenzahl), in den tiefen Rohhumusschichten von Nadelholzwäldern und in der flachen Vermoderungsschicht von Laubwaldböden. Grün- und Ackerland sind hingegen hohen mikroklimatischen Veränderungen unterworfen und daher unterschiedlich stark besiedelt.

Dank ihrer wasserabstoßenden (hydrophoben) Oberfläche überdauern Collembolen bei Überschwemmung des Bodens in einer Luftblase, die als „physikalische Lunge“ fungiert.

Epedaphische Collembolen leben in der Streuauflage und im Moos. Es sind oft große Arten (3–5 mm), die stark pigmentiert sind und ihren Körper mit vielen Borsten oder Schuppen vor Wasserverlust schützen. Fühler, Beine und Sprunggabel sind lang und kräftig. Mit ihren kauenden Mundwerkzeugen bearbeiten sie auch totes pflanzliches Material.



Tomocerus vulgaris

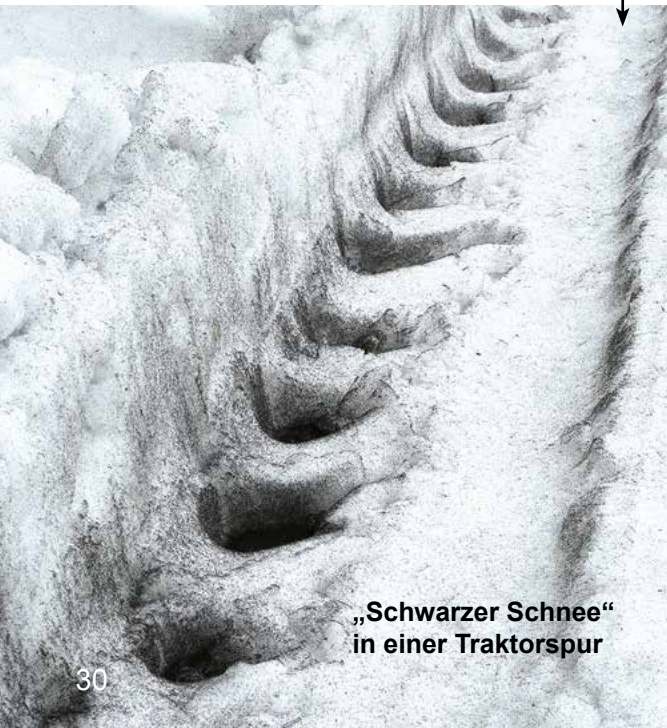


Orchesella flavescens



Collembolen bewohnen auch extreme Lebensräume, wie Wasseroberflächen oder Gletscher. Der Gletscherfloh, dessen Vorzugstemperatur knapp über dem Gefrierpunkt liegt, ernährt sich von Pollen und Algen. Dank seiner Gefrierschutzproteine überlebt er Frost.

Einige Arten der Familie **Isotomidae** sind auch im Winter aktiv: An warmen Wintertagen erscheinen sie an der Oberfläche und färben den Schnee schwarz („**Schneeflöhe**“). Die Massenwanderungen dürften dem Auffinden neuer Lebensräume dienen.



„Schwarzer Schnee“
in einer Traktorspur

Aggregationen und Wanderungen von Springschwänzen findet man auch in der warmen Jahreszeit, z.B. beim feuchtigkeitsliebenden **Sumpfspringschwanz** (*Isotomurus palustris*), dessen braune Ansammlungen in Pfützen, im rechten Bild in einer Ackerfurche, auffallen.





Vertreter der stark pigmentierten **Neanuridae** sind plump gebaut und ihre Sprunggabel ist meist rückgebildet. Man findet sie oft in der Streu oder unter Rinden. Mit ihren Mundwerkzeugen öffnen sie Zellen von Pilzhypen oder Algen und saugen deren Inhalt. Andere Arten weiden mit besenartigen Mundwerkzeugen den gallertigen Bakterien Schleim an Oberflächen ab.

Die meist unter einem Millimeter großen **Kugelspringer** (Sminthuridae) weichen in mehrfacher Hinsicht vom üblichen Collembolen-Muster stark ab und zeigen ein komplexes Paarungsverhalten. Durch ihre großen Köpfe und die zu einer Kugel verschmolzenen Körpersegmente sind sie unverwechselbar. Die ausstülpbaren Schläuche des Ventraltubus werden auch zum Säubern des Körpers verwendet (*weißer Pfeil*). Die plumpen Tiere überraschen mit enormem Sprungvermögen (*roter Pfeil: Sprunggabel*). Viele Arten leben oberflächlich und steigen bei feuchtem Wetter auf Totholz und Baumstämme, wo sie Algen abweiden, so auch der **Dunkelbraune Kugelspringer** (*Allacma fusca*).

Andere Arten knabbern in der Vegetation an Blättern. Der weltweit verschleppte Luzernefloh (*Sminthurus viridis*) kann sogar Schäden in der Landwirtschaft verursachen.



Euedaphische Arten besiedeln das Lückensystem des Bodens, sind klein (oft unter 1 mm) und zeigen zunehmend Tendenz zu einem wurmförmigen Körper mit kurzen Beinen und Fühlern. Die Pigmentierung ist reduziert (viele Arten sind weiß), auch die Augen sind rückgebildet (**Blindspringer**, Onychiuridae).

Die Sprunggabel, im Lückensystem nutzlos geworden, ist ebenfalls rückgebildet oder fehlt vollständig. Als alternativen Schutz vor Fressfeinden haben sie an ihrer Körperoberfläche Abwehrdrüsen (Pseudocellen) entwickelt, deren Sekret Fressfeinde abschreckt.



DOPPELSCHWÄNZE (Diplura)

Die 3–6 mm kleinen, pigmentlosen Dipluren sind Bewohner der Lückenräume oberer Bodenschichten. Die Vertreter der **Campodeidae** haben lange, perlförmige Antennen und Cerci (Körperanhänge), ausgestattet mit einer großen Zahl von Sensillen mit unterschiedlichen Funktionen, die die Augenlosigkeit kompensieren. Die meisten Arten ernähren sich von organischen Abfällen und Pilzmyzel.

Im Mittelmeerraum gibt es auch räuberisch lebende Japigidae mit zangenförmigen Cerci.



FELSENSPRINGER (Machilidae)

Felsenspringer (10–15 mm) zählen zu den ursprünglichsten, primär flügellosen Insekten. Sie sind an das Leben auf Fels angepasst. Man findet sie bis ins Hochgebirge, wo sie sich von Algenaufwuchs und Flechten ernähren und so zur Humusbildung auf felsigen Rohböden beitragen. Ihr tarnfärbiger Körper ist mit Schuppen und Borsten bedeckt. Neben langen Antennen sind drei Körperanhänge (zwei Cerci und ein langer Terminalfaden) charakteristisch. Bei Gefahr retten sich Machiliden durch einen Sprung, indem sie mit dem Abdomen gegen den Boden schlagen. Im Gegensatz zu höher entwickelten Insekten häuten sich Felsenspringer auch nach der Geschlechtsreife.

OHRWÜRMER (Dermaptera)

Die vor allem bei Männchen zangenartigen Cerci der Ohrwürmer spielen bei Verteidigung, Rivalenkämpfen, Paarung und Beutefang eine Rolle. Früher wurden pulverisierte Ohrwürmer als Medizin gegen Ohrenkrankheiten verwendet (daher der Name). Die nachtaktiven Ohrwürmer sind Allesfresser, die sich nicht nur am Boden aufhalten, sondern auch auf Pflanzen klettern und sich dort als Blattlausvertilger nützlich machen. Die Weibchen betreiben intensive Brutpflege (siehe nächste Seite).

Beim **Gemeinen Ohrwurm** (*Forficula auricularia*) sind die häutigen Flügel unter den kurzen Deckflügeln mehrfach zusammengefoldet. Er ist flugfähig, aber keineswegs flugfreudig.





Das Weibchen des **Gemeinen Ohrwurmes** legt 20–80 Eier in ein unterirdisches Bodennest. Während der 2–3-wöchigen Entwicklungszeit bewacht es das Gelege, reinigt die Eier von Pilzbefall und verzichtet dabei selbst auf Nahrungsaufnahme.



Der **Waldohrwurm** (*Chelidurella acanthopygia*) hält sich im Frühjahr und Herbst in der Streu von Laub- und Mischwäldern auf, im Sommer findet man ihn auch im Gebüsch. Er hat seine Flügel zurückgebildet.

GRILLEN (Gryllidea)

Die Vorderbeine der 35–50 mm großen **Maulwurfsgrille** (*Gryllotalpa gryllotalpa*) sind zu Grabschaufeln umgewandelt, mit denen sie in eher feuchten Böden ausgedehnte Gangsysteme mit Kammern anlegt. Ihre Hauptnahrung besteht aus Bodentieren, nur bei Nahrungsmangel vergreift sie sich an lebenden Pflanzenteilen. Schäden können auch durch die Grabtätigkeit selbst entstehen. —→



Die nur 5–6 mm große **Gefleckte Grabschrecke** (*Xya variegata*) legt im sandigen Uferbereich von Gewässern fragile Tunnel aus Sandkörnern an und ernährt sich von Algen und Detritus. In Österreich beschränkt sich das Vorkommen (neben einer zweiten, ähnlichen Art) auf den Osten und Südosten.

SINGZIKADEN (Cicadidae)

Der ohrenbetäubende Gesang zahlreicher Singzikaden ist jedem Sommerurlauber am Mittelmeer bekannt, aber auch in Mitteleuropa leben einige Arten an xerothermen Orten. Die Bergsingzikade kommt über das ganze Land verstreut vor, die restlichen drei Arten nur in Ostösterreich.

Die **Larven** der Singzikaden leben tief im Boden und saugen an Wurzeln. Nach einer mehrjährigen Larvalzeit graben sie sich mit ihren schaufelförmigen Vorderbeinen an die Oberfläche, klettern auf Bäume oder Sträucher und schlüpfen. Die leere Larvenhülle bleibt noch lange im Geäst hängen. —>



AMEISENJUNGFERN (Myrmeleontidae)

Der **Ameisenlöwe** (*Myrmeleon formicarius*), die Larve der Ameisenjungfer (**Netzflügler**, Neuroptera), legt in sandigem, in unseren Breiten vor Regen geschütztem Boden (z.B. unter Felsen oder Brücken) kleine Trichter an (*Bild unten*). Sie dienen als Fallgruben für Insekten, vor allem Ameisen.

Rutscht eine potentielle Beute in den Trichter, wird diese vom Ameisenlöwen mit Sandkörnern beworfen, bis die „Sandlawine“ das Opfer zum Trichterboden befördert. Mit dolchartigen Mandibeln wird das Tier ergriffen, Verdauungssäfte werden hineingepumpt und der verdaute Saft wird aufgesogen.

Die Insektenhülle fliegt in hohem Bogen hinaus. Der Darm des Ameisenlöwen endet blind. Erst bei der Verpuppung werden die wenigen Verdauungsrückstände als Mekonium ausgeschieden.



KÄFER (Coleoptera)

Laufkäfer (Carabidae)

Die artenreichen, fast ausschließlich bodenlebenden Laufkäfer (die meisten haben ihr Flugvermögen eingebüßt) sind vorwiegend nachtaktive, flinke Räuber mit langen Beinen. Neben kleinen Arten, die problemlos in das Lückensystem des Oberbodens eindringen, jagen größere oberflächlich und suchen nur tagsüber Verstecke im Boden auf. Einige ernähren sich auch von Pflanzensamen, wobei sie sich in der Landwirtschaft meist als Nützlinge (*siehe Seite 57*) oder seltener als Schädlinge (Getreidelaufkäfer) erweisen. Die Lebensweise der Larven ist ähnlich der von Adulten. Ihre Beute sind Insekten, Regenwürmer und Schnecken.

Der nachtaktive, bis 3 cm große **Goldglänzende Laufkäfer** (*Carabus auronitens*) bewohnt kühle, feuchte Wälder. Durch seine gold-grün-rot schillernde Färbung ist er auffällig, aber leicht mit dem vorwiegend tagaktiven Goldlaufkäfer (*Carabus auratus*) zu verwechseln. Wie alle *Carabus*-Arten wehrt er sich durch Abgabe eines übel riechenden Sekrets aus der Analrüse.

Der **Feld-Sandlaufkäfer** (*Cicindela campestris*) lebt auf sonnigen, trockenen Stellen vom Flachland bis ins Gebirge. Er ist ein ausgezeichnete Flieger, der nach wenigen Metern wieder landet. Auffallend sind seine mächtigen Kiefer (Mandibeln). Die Larven wohnen in senkrechten, selbstgegraben Röhren, deren Öffnung sie mit ihrem Kopfschild abdecken und auf Beute lauern.



Der **Gewöhnliche Kanalläufer** (*Amara similata*) ist auf Wiesen und Agrarflächen zu finden, wo er sich häufig von Pflanzensamen ernährt.





Die Larven der **Großlaufkäfer** (*Carabus*) sind plump und erinnern an überlange schwarze Asseln. Sie sind gefräßige, nachtaktive Räuber, die es vor allem auf Regenwürmer und Nacktschnecken abgesehen haben (Seite 58). Wie auch die erwachsenen Tiere würgen sie Verdauungssäfte über die Beute und saugen den Nahrungsbrei auf.



Die Larven kleinerer Laufkäferarten sind meist schlank und wendig, z.B. die des **Rotköpfigen Dammläufers** (*Nebria picicornis*), der schottrige Flussufer bewohnt. Die Beute besteht aus angespülten Tieren und schlüpfenden Wasserinsekten.

Kurzflügler (Staphylinidae)

Die typischen Vertreter der sehr artenreichen Familie der Kurzflügler sind an den verkürzten Deckflügeln (Elytren) leicht zu erkennen. Trotzdem sind die meisten Arten flugfähig; die häutigen Hinterflügel sind unter den Elytren (Deckflügeln) zusammengefaltet. Der meist sehr schlanke, bewegliche Körper erlaubt den Kurzflüglern, in das Lückensystem des Oberbodens einzudringen (Bild unten). Viele sind zudem klein. Dadurch entgehen sie weitgehend der Nahrungskonkurrenz der Laufkäfer, die hauptsächlich an der Bodenoberfläche jagen. Die meisten Arten leben räuberisch, teilweise auch von Pilzen und pflanzlichem Material. Wenige Arten sind mit Ameisen vergesellschaftet („Ameisengäste“). Kurzflügler bevorzugen eher feuchte Habitate.



Schnellräuber der Gattung *Tachyporus* sind eine der häufigsten Staphyliniden in der Bodenstreu. Im Bild: *Tachyporus ruficollis*

Die großen Kiefer dieser Kurzflüglerlarve lassen keinen Zweifel über deren Ernährungsweise.

Gauropterus fulgidus





← Die Hämolymphe des tagaktiven, auf sandig/schottrigen Flussufern lebenden **Paederidus rubrothoracicus** enthält eine von Bakterien gebildete, hochgiftige Substanz (Pederin). Sie kann beim Menschen schwere, andauernde Entzündungen verursachen, wenn sie auf empfindliche Hautstellen gelangt.



Kurzflügler schützen sich vor Feinden durch Abgabe ätzender Flüssigkeiten aus der Pygidialdrüse am Hinterleibsende. An Gewässer- ufern lebende **Schmalflugler** (*Stenus* sp.) reiben sich nicht nur den Körper mit diesem (auch antimikrobiell wirksamen) Sekret ein, sie benutzen es auch zur passiven Fortbewegung an der Wasseroberfläche: Ein abgegebener Sekretröpfchen spreitet auf der Oberfläche aus, an dessen



Rand der Käfer vorangetrieben wird (Spreitungsschwimmen). Dank seiner hydrophoben Beinoberfläche geht er nicht unter. Dabei können erstaunliche Geschwindigkeiten von bis zu 40 cm/s erreicht werden. Bemerkenswert ist auch der spezielle Beutefangmechanismus der *Stenus*-Arten: Einem Chamäleon ähnlich schnellen sie ihre Zunge (Labium) vor, fixieren die Beute (z.B. Collembolen) mit Hilfe eines Klebepolsters an der Spitze und führen sie zur Mundöffnung (*Pfeil*).

Mistkäfer (Geotrupidae)

Die hochwertigen Exkremente großer Pflanzenfresser sind ein „kleines Universum“ für sich. Neben Mikroorganismen, Nematoden und Regenwürmern tragen Larven von Fluginsekten maßgeblich zum Abbau bei. Auch viele Räuber lassen nicht lange auf sich warten. Die Larven von koprophagen (kotfressenden) Fliegen und Dungkäfern (Aphodiidae) entwickeln sich im Dung selbst. Andere Käfer vergraben Kotballen in der Erde und tragen dabei zur Verteilung des Materials und zur Durchlüftung des Bodens bei.

Das Weibchen des **Wald-Rosskäfers** (*Anoplotrupes stercorosus*) gräbt mit Unterstützung des Männchens neben dem Dunghaufen tiefe Stollen mit Seitengängen in die Erde. Die Endkammern werden mit Kot und einem Ei bestückt.

Käfermilben (*Parasitus coleoptratorum*) missbrauchen Mistkäfer als Taxi zum nächsten Kuhfladen (Phoresie), wo sie sich von Nematoden ernähren.



Schnellkäfer (Elateridae)



Eine im Holzmulm lebende Schnellkäferlarve.

Die Larven der Schnellkäfer sind langgestreckt, mehr oder weniger stark pigmentiert und sklerotisiert. Sie leben grabend in der Erde, unter Rinden oder im vermoderten Totholz, wo sie sich von lebenden und toten pflanzlichen Stoffen ernähren. Nur wenige sind Räuber.



Unter den Bedingungen in Kulturböden haben sich einige Arten zu Schädlingen („**Drahtwürmer**“) entwickelt. In Österreich sind **mehrere schädliche Schnellkäferarten der Gattung Agriotes** bekannt, die in ihrer, je nach Art zwei bis fünfjährigen Entwicklung an unterirdischen Teilen von Kulturpflanzen fressen.

Wenn der Boden zu trocken wird, fressen sie nicht nur Wurzeln, sondern bohren sich auch in Feldfrüchte ein, um vor allem ihren Feuchtigkeitsbedarf zu decken. Kartoffeln z.B. weisen dann schwarze Bohrlöcher auf und sind nicht mehr vermarktungsfähig (*Bild rechts oben*). Durch die Schädigungen können auch pathogene Mikroorganismen in die Pflanzen eindringen.

Biologische Bekämpfung von Drahtwürmern siehe Seite 61

Blatthornkäfer (Scarabaeidae)

Der **Maikäfer** (*Melolontha melolontha*) kann massive Schäden in der Land- und Forstwirtschaft verursachen. Während seiner 3–4-jährigen Entwicklungszeit lebt er im Boden, ernährt sich zunächst auch von abgestorbenen Pflanzenteilen, dann aber zunehmend von lebenden Wurzeln. Schäden treten vor allem in Jahren der periodisch auftretenden Massenvermehrung auf. Schäden der adulten Käfer durch Blattfraß sind wesentlich geringer.

Engerlinge des Maikäfers, Brachkäfers und des Rosenkäfers sehen sich sehr ähnlich. Ein einfaches Unterscheidungsmerkmal: Auf den flachen Boden gelegt, kriecht die Brachkäferlarve am Bauch, die des Maikäfers torkelt unbeholfen auf der Seite und die des Rosenkäfers (*Seite 51*, häufig im Kompost zu finden) kriecht in Rückenlage!





Die Larven des etwa 1 cm großen, im Mai/Juni fliegenden **Gartenlaubkäfers** (*Phyllopertha horticola*, *rechtes Bild*) ernähren sich von Graswurzeln. Bei Massenbefall kann sich die Grasnarbe ablösen (*Bild oben, die Aufnahmen stammen von einem Golfplatz*).

Die Bekämpfung erfolgt mit dem insektenpathogenen Pilz *Metarhizium anisopliae* (Seite 56), der auf Getreidekörnern aufgebracht wird und auch bei Befall von Maikäfern, Junikäfern und Dickmaulrüsslern erfolgreich ist.



Rüsselkäfer (Curculionidae)

Die Larven der verschiedenen Arten von **Dickmaulrüsslern** (*Otiorhynchus* sp.) können durch Wurzelfraß Schäden an Kulturpflanzen verursachen. Die Bekämpfung erfolgt mit Hilfe von Nematoden. Die erwachsenen, nicht flugfähigen, nachtaktiven Käfer ernähren sich von Blättern und machen sich durch halbkreisförmige Einbuchtungen der Blättränder bemerkbar (*linkes Bild*).



Blattkäfer (Chrysomelidae)

Der **Maiswurzelbohrer** (*Diabrotica virgifera*) ist in den 90er Jahren von Nordamerika nach Europa eingeschleppt worden und hat sich seit 2002 auch in Österreich, ausgehend von der tschechischen Grenze, kontinuierlich nach Westen ausgebreitet. Sowohl Larven als auch Käfer verursachen große Schäden. Die Larven fressen von Mai bis Juni Maiswurzeln bzw. bohren sich in größere Wurzeln hinein, sodass die Pflanze den Halt verliert und umkippt. Die Käfer erscheinen im Juli und fressen Pollen und milchreife Körner. Die wirksamste Bekämpfung ist eine Fruchtfolge. Chemische und biologische Maßnahmen (Nematoden, Pilze) sind oft nur bedingt erfolgreich.



SCHNABELFLIEGEN (Mecoptera)

Der **Winterhaft** (*Boreus westwoodi*) ist eine flugunfähige Schnabelfliege (links das Männchen mit Flügelresten, mit denen bei der Paarung das Weibchen festgehalten wird). Seine allesfressenden, raupenähnlichen Larven leben im Moos von Wäldern. Die Adulten (3,5–4 mm) findet man zwischen November und März an warmen Wintertagen u. a. auf Schneeoberflächen. Bei Störung springen sie bis 20 cm weit und bleiben dann kurzfristig regungslos liegen. Sie überleben Temperaturen bis -17°C .



ZWEIFLÜGLER (Diptera)

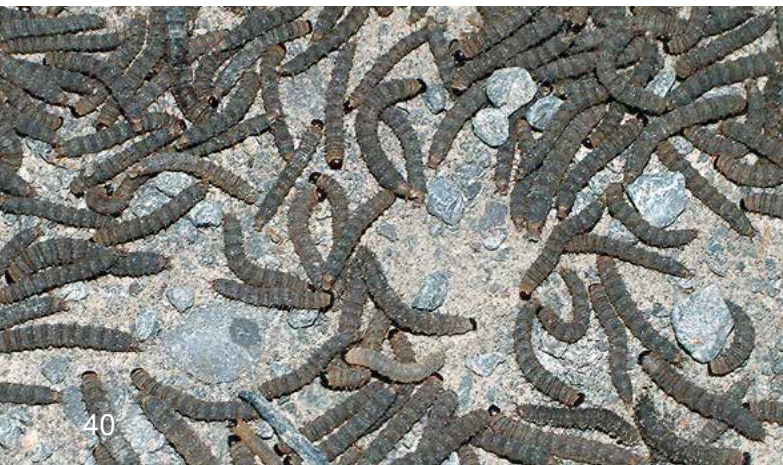
Dipteren haben nur ein Paar Flügel ausgebildet, das hintere Flügelpaar wurde zu Schwingkölbchen (**Halteren**) umgewandelt (dünner Stiel mit einer köpfchenartigen Verdickung am Ende). Während des Flügelschlages schwingen die Halteren mit. Sie liefern wichtige Informationen für die Flugsteuerung. Die meisten Arten bevorzugen eher feuchten Boden und sind gegen Staunässe und Überschwemmungen unempfindlich.

Viele der beinlosen Larven von Dipteren – **Mücken** (Nematocera) und **Fliegen** (Brachycera) – zählen zu den wichtigsten Bodentieren, die zum Abbau organischer Substanzen beitragen.

Die Larven der **Haarmücken** (Bibionidae) sind wichtige Zersetzer in Wäldern und finden sich oft in Massen im Auflagehorizont des Bodens, vor allem in der Nähe von Baumstümpfen. Die Larven sind zunächst stark behaart und tragen später stachelige Fortsätze.

Mückenlarven haben fast immer eine gut entwickelte Kopfkapsel mit meist beißenden Mundwerkzeugen (**eucephale Larven**).

Gnitzen (Ceratopogonidae) saugen je nach Art Hämolymphe von Insekten oder Wirbeltierblut. Sie sind auch Überträger von Krankheiten. Die Larven vieler Arten entwickeln sich im Wasser, andere an Land, wie z.B. **Forcipomyia** sp., die zerfallende pflanzliche Stoffe verwertet. Am Vorderkörper befindet sich ein Fußstummel (mit Larven von Zuckmücken zu verwechseln, die aber keine Borsten tragen).





← Jeder kennt wahrscheinlich die winzigen, schwarzen **Trauermücken** (Sciaridae), die vor allem im Winter in Wohnungen auffallen. Die Larven entwickeln sich dort in Blumentöpfen und knabbern in Ermangelung organischer Substanzen auch an Wurzeln von Zimmerpflanzen. In der Natur bevorzugen sie humose Böden und tragen zum Abbau von Streu bei.

Aufsehen erregend ist die Massenvermehrung des **Heerwurmes** (*Sciara militaris*, eine Trauermückenart), wenn sich bis zu meterlange Prozessionen von dicht aneinander gedrängten Larven durch das Gelände bewegen, um geeignete Verpuppungsplätze aufzusuchen.



Bild rechts: Heerwuminvasion aus Brems Tierleben (1887).



← Die grauen, walzenförmigen **Schnakenlarven** (Tipulidae) sind auf Grund ihrer kräftigen Mundwerkzeuge wichtige Primärzersetzer im Wald. Im Hochgebirge übernehmen sie zusammen mit Enchyträen die Funktion der fehlenden Regenwürmer. Im Kulturland können sie nur bei Massenvermehrung Schäden verursachen, wenn sie aus Futtermangel Wurzeln fressen und nachts an der Oberfläche Jungpflanzen schädigen (Wiesenschnake und Kohlschnake).



Charakteristisch ist das **Hinterende der Schnakenlarven**: Zwei Stigmen (Atemöffnungen), sechs lappige Fortsätze und die ventral gelegene Afterpapille bilden eine Art „Teufelsfratze“.

Nahe verwandt mit den Schnaken ist die **Schneefliege** (*Chionea* sp., eine Stelzmücke). Die erwachsenen Individuen sind flügellos und im Winter oft auf der Schneeoberfläche zu finden. Ihre Larven ernähren sich von organischem Material.





Die Larven der **Pilzmücken** (Mycetophilidae) sind ein Ärgernis eines jeden Pilzsammlers. Daneben gibt es aber auch Arten, deren Larven mikrobielle Beläge von Totholz abweiden und sich vor Feinden tarnen. **Phronia sp.** (links) baut mit ihren Exkrementen ein Hütchen, unter dem sie sich versteckt (Mitte: geöffnetes Hütchen mit der Larve). Andere Arten schützen sich mit einer unauffälligen Schleimhülle (rechts).



Die derbe Haut der Larven von **Waffenfliegen** (Stratiomyidae) macht sie widerstandsfähig gegen ungünstige Umwelteinflüsse. Sie bewohnen Laubwaldböden und ernähren sich von Aufwuchsalgen oder Pflanzenresten. Auffälligere Arten leben aquatisch.

← Die Larven der **Fanniidae** (zu der auch die Kleine Stubenfliege zählt) fallen durch ihre platte Körperform mit verzweigten Anhängen auf. Neben Vertretern, die sich im Mist und in faulenden Abfallstoffen entwickeln, gibt es auch Arten, die im Boden von Laubwäldern leben.



Die langgestreckten Larven der **Luchsfiegen** (Therevidae) findet man von sandigen Böden bis zum Auflagehorizont von Waldböden. Sie ernähren sich räuberisch und mit Hilfe ihres giftigen Speichels erbeuten sie selbst wehrhafte Käferlarven.

Die Kopfkapsel der Larven ist reduziert (hemicephale Larven).

AMEISEN (Formicidae)

Wespen und Bienen legen Brutkammern für ihren Nachwuchs oft im Boden an. Von bodenbiologischer Bedeutung unter den **Hautflüglern** (Hymenoptera) sind aber nur Ameisen, die stellenweise bis zu 70 % der Biomasse der gesamten Insektenpopulation ausmachen. Die meisten lieben Wärme und Trockenheit, sie kommen daher gehäuft dort vor, wo die Dichte anderer Bodentiere geringer ist.

- Ameisen tragen zur Umschichtung von Bodenmaterial bei und übernehmen diesbezüglich in trockenen Habitaten teilweise die Funktion von Regenwürmern.
- Als Räuber bewirken sie ein Gleichgewicht im Ökosystem und einen bedeutenden Eintrag von Stickstoff.
- Sie tragen zur Verbreitung von Pflanzensamen bei.
- Sie bieten Lebensraum für zahlreiche „Ameisengäste“ (z.B. Assel-, Milben- und Käferarten).
- Arten, die im Holz nisten, beschleunigen den Abbau von Totholz.

Die nur 2–4 mm große **Gelbe Wiesenameise** (*Lasius flavus*, *Bild rechts unten*) lebt unterirdisch, vorwiegend auf Grasflächen. Sie kommt kaum an die Oberfläche, außer beim Schwärmen der Geschlechtstiere an warmen Sonnentagen. Meist bemerkt man sie nur an aufgeworfenen, bewachsenen Erdhügeln (*rechtes Bild*) oder unter Steinen. Dichte Bestände von Wiesenameisen können pro Jahr und Hektar bis zu sieben Tonnen Erde bewegen. Sie ernährt sich fast ausschließlich vom Honigtau (Zuckerausscheidungen) der Wurzelläuse (**Trophobiose**), fallweise werden diese auch gefressen.

Die 3–5 mm große **Schwarze Wegameise** (*Lasius niger*) ist sehr anpassungsfähig und oft auch in städtischen Bereichen zu finden. Ihre Bauten fallen durch flache Erdhügel im Rasen auf, sie siedeln aber auch unter Steinen und in Mauerspalten. Sie lebt in Symbiose mit Blatt-, Schild- und Wurzelläusen. ↓



Gelbe Wiesenameise





Waldameise in Abwehrstellung: Die Mandibeln (Kiefer) werden zum Angriff gespreizt und dem Feind wird aus dem nach vorne gebogenen Hinterleib ätzende Ameisensäure entgegengespritzt.

Die **Schwachbeborstete Gebirgswaldameise** (*Formica aquilonia*) ist die dominante Waldameisenart in montanen Nadelwäldern der Ostalpen. Neue Kolonien werden meist als Zweignester gegründet, sodass Superkolonien mit vielen Nestern entstehen (Polydomie). In den Staaten sind jeweils viele Königinnen aktiv (Polygynie). Die Kolonien umfassen mehrere 100.000 Individuen. Je schattiger der Standplatz, desto höher der Ameisenhaufen. Die Arbeiterinnen erbeuten nicht nur tierische Nahrung (Reduktion von Forstschädlingen), ein erheblicher Teil der Nahrung besteht aus Honigtau von Baumläusen.



Die Mund-zu-Mund-Weitergabe von Kropfinhalten (Trophallaxis) dient u.a. auch der Kommunikation innerhalb der Kolonie.

SCHMETTERLINGE (Lepidoptera)



Die dämmerungs- und nachtaktiven **Eulenfalter** (Noctuidae) zählen zu den artenreichsten heimischen Schmetterlingsfamilien.

Im Gegensatz zu den vielfach auffällig gefärbten Raupen sind die sog. **Erdraupen** der Unterfamilie Noctuinae erdfarben, leben tagsüber unterirdisch und kommen erst nachts an die Oberfläche.

← Arten der Gattungen *Agrotis* und *Euxoa* können an Kulturpflanzen erhebliche Schäden verursachen. Wirtschaftlich am bedeutendsten sind die Erdraupen der **Wintersaateule** (*Agrotis segetum*), die an Wurzeln, Speicherorganen, Stängeln und Blättern fressen. Besonders gefährdet sind Setzlinge.

SÄUGETIERE (Mammalia)

Grabende Kleinsäuger haben zwar einen positiven Einfluss auf Bodendurchlüftung, Wasserretention und Bodendurchmischung, sind oft aber bei Landwirten unbeliebt, da die Bearbeitung der Felder erschwert und die Ernte verunreinigt wird. Fraßschäden durch Wühlmäuse sind ein weiteres Problem.



Der **Maulwurf** (*Talpa europaea*) ist perfekt an das Bodenleben angepasst. Mit seinen zu Grabschaufeln umgebauten Vorderbeinen legt er ein ausgedehntes unterirdisches Gangsystem an. Die Erde wird großteils zur Seite gedrückt und fallweise an der Erdoberfläche abgelagert. Die spitzen Zähne weisen auf seine Nahrung aus Bodentieren hin. Regenwürmern werden zum Teil die ersten Segmente (Lage des Zentralnervensystems) abgebissen und anschließend werden sie als lebende Konserve in Vorratskammern gelagert. Die Augen sind winzig klein, dafür ist sein Rüssel mit empfindlichen Tasthaaren und einem ausgezeichneten Geruchssinn ausgestattet.

Unter den bodenlebenden **Nagetieren** sind vor allem die Schermaus und die Feldmaus aus der Familie der **Wühlmäuse** (Cricetidae) bedeutend. Sie unterscheiden sich von Echten Mäusen u.a. durch kürzere Ohren und Schwänze.

Die 13–24 cm große **Östliche Schermaus** (*Arvicola terrestris*) legt knapp unter der Oberfläche feuchter Böden ein ausgedehntes Gangsystem mit Kammern an. Außer den störenden Scherhäufen, die im Gegensatz zu jenen des Maulwurfs flacher und asymmetrisch sind (*Bild rechts*), entstehen Schäden durch Fraß an Wurzeln, Zwiebeln und Knollen. Neben terrestrisch lebenden Populationen gibt es auch amphibische, die ihre Bauten in Uferböschungen anlegen und sich vorwiegend von Wasserpflanzen ernähren. Sie sind ausgezeichnete Schwimmer.



Die nur halb so große **Feldmaus** (*Microtus arvalis*) lebt in großen Kolonien und legt neben unterirdischen auch oberirdische Gangsysteme an, auch unter der Schneedecke, die nach dem Ausapern im Frühjahr gut sichtbar werden (*rechtes Bild*). Der Erdauswurf ist meist unscheinbar.

Feldmäuse haben ein höheres Reproduktionspotential als andere Nagerarten. Weibchen sind nach 2–3 Wochen geschlechtsreif und werden z.T. bereits im späten Säuglingsalter gedeckt. Bei günstigen Bedingungen führt das zu einer explosionsartigen Vermehrung, wodurch in oft regelmäßigen Zyklen von etwa drei Jahren die Population aufgrund von sozialem Stress und Krankheiten zusammenbricht. Feldmäuse ernähren sich von Samen, Wurzeln und Kräutern.



Die **Waldmaus** (*Apodemus sylvaticus*) lebt an Waldrändern und in Saumbiotopen von Agrarlandschaften. Tagsüber in selbst gegrabenen Erdbauten. Leicht mit der etwas größeren Gelbhalsmaus zu verwechseln, die Wälder bevorzugt. Im Gegensatz zu Wühlmäusen haben Echte Mäuse größere Ohren und Augen und längere Schwänze.



← Das Vorkommen des **Feldhamsters** (*Cricetus cricetus*) beschränkt sich auf Löss- und Lehm Böden, bevorzugt in Agrarlandschaften, wo er bis zu zwei Meter tiefe, verzweigte Bauten gräbt. Er ist omnivor, braucht aber für die Versorgung im Winter Körner. Der Winterschlaf wird von regelmäßigen Wachphasen unterbrochen, in denen er von den eingelagerten Vorräten zehrt. Sein Bestand ist seit Jahrzehnten rückläufig und derzeit vom Aussterben bedroht. Gründe dafür liegen in der industriellen Feldwirtschaft und den großen Monokulturen, die eine einseitige Ernährung verursachen.



Unterirdische Allianzen

***Wie Bodentiere unsere Felder
gesund halten***



Kupferfarbener Buntgräbläuffer
Poecilus cupreus

Die Artenvielfalt von Tieren in landwirtschaftlich genutzten Böden ist beeindruckend: In einem Quadratmeter Boden können mehrere Hundert Tierarten vorkommen, darunter Protozoen, Milben und Springschwänze sowie Regenwürmer, Käferlarven und Tausendfüßer. Insgesamt beherbergen landwirtschaftliche Böden in Mitteleuropa mehrere Tausend Tierarten, wobei die Vielfalt stark von der Bewirtschaftungsweise, der Bodenstruktur und den Umweltbedingungen abhängt. Extensiv genutzte oder ökologisch bewirtschaftete Flächen weisen in der Regel eine höhere Artenvielfalt auf als intensiv genutzte Böden, weil Bodentiere sehr sensibel auf Störungen ihres Lebensraumes reagieren. Je weniger intensiv die Bodenbearbeitung ist, desto besser kann sich das Leben darin entwickeln. Bodentiere spielen eine zentrale Rolle für die Funktionalität von Böden, indem sie Nährstoffe recyceln, die Bodenstruktur verbessern oder auch Pflanzenschädlinge in Schach halten. Der Boden mit seinen tierischen Bewohnern ist somit als eine wesentliche Komponente von Agrarökosystemen anzusehen.

Welche Tiergruppen gibt es im Boden, und wie kann ihre Diversität erfasst werden?

Ein einfaches Merkmal zur Einteilung von Bodentieren ist ihre Größe: Zu den kleinsten Bodenbewohnern gehört die **MIKROFAUNA**, die nur unter dem Mikroskop gut erkennbar ist. Dazu zählen **Protozoen**, also Einzeller wie Amöben und Wimpertierchen (Seite 8), die sich von Bakterien und Pilzen ernähren und eine wichtige Rolle im Nährstoffkreislauf spielen. Ebenfalls zur Mikrofauna gehören **Nematoden**, mikroskopisch kleine Fadenwürmer, die in fast allen Böden vorkommen. Sie können Pflanzenfresser, Räuber oder Zersetzer sein und beeinflussen die Bodenstruktur sowie die Nährstoffverfügbarkeit.

Die nächstgrößere Gruppe ist die **MESOFAUNA**, die Tiere umfasst, die zwischen 0,1 und 2 Millimeter groß sind. Zu den wichtigsten Vertretern dieser Gruppe gehören **Milben**: winzige Spinnentiere, die äußerst vielfältig sind und verschiedene ökologische Funktionen erfüllen, von der Zersetzung organischer Substanz bis hin zur Kontrolle von Schädlingen (Seite 22). Auch **Collembolen**, besser bekannt als Springschwänze, gehören zur Mesofauna (Seite 29). Diese kleinen, flügellosen Insekten ernähren sich von Pilzen, Bakterien und organischem Material und tragen zur

Zersetzung und Humusbildung bei. Sie sind außerdem eine wichtige Nahrungsquelle für viele im Boden und auf der Bodenoberfläche lebende räuberische Bodentiere. Springschwänze stellen etwa für Laufkäfer, Kurzflügelkäfer und Spinnen, die oftmals eine wichtige Rolle in der Kontrolle von unerwünschten Arten spielen, ein bedeutendes „Grundnahrungsmittel“ dar (mehr dazu weiter unten).

Die **MAKROFAUNA** umfasst größere Bodentiere, die mit bloßem Auge gut sichtbar und unterscheidbar sind. **Regenwürmer** sind wohl die bekanntesten Vertreter dieser Gruppe. Sie graben Gänge, die den Boden belüften, und zersetzen organisches Material, wodurch sie die Bodenfruchtbarkeit verbessern (Seite 83). Auch sehr viele Insektenlarven, wie die von **Käfern** und **Zweiflüglern**, verbringen ihr Leben im Boden und haben im Nahrungsnetz des Bodens ganz unterschiedliche Rollen, wie zum Beispiel die Zersetzung organischer Substanz, den Fraß an unterirdischen Pflanzenteilen oder auch die Erbeutung von anderen im Boden lebenden Tieren. **Hundertfüßer** und **Doppelfüßer** (Seite 24) sind ebenfalls im Boden zu finden: Während erstere als Räuber auf die Jagd nach Regenwurm & Co gehen, sind zweitere wichtige Zersetzer, die abgestorbenes Pflanzenmaterial abbauen, den Boden auflockern und mit ihren Ausscheidungen die Krümelstruktur des Bodens verbessern.

Schließlich gibt es noch die **MEGAFAUNA**, welche die größten Bodenbewohner umfasst, wie Maulwürfe, Mäuse und andere **grabende Säugetiere**. Obwohl sie weniger zahlreich sind, können sie einen erheblichen Einfluss auf die Bodenstruktur haben, da sie durch ihre Grabaktivitäten den Boden durchmischen und belüften. Manche von ihnen bereiten aber in der Landwirtschaft viel Kopfzerbrechen, da sie als Pflanzenfresser große Schäden anrichten können und durch ihre Wühltätigkeit die Bewirtschaftung erschweren.

Bodentiere erfüllen also eine Vielzahl von ökologischen Funktionen im Boden: Durch ihre Bewegungen und Grabaktivitäten verbessern sie die Bodenstruktur, erhöhen die Wasserdurchlässigkeit und fördern die Belüftung. Bei der Zersetzung von organischem Material spielen Bodentiere eine maßgebliche Rolle, da sie tote Pflanzen und Tiere sowie deren Ausscheidungen zerkleinern und verdauen. Damit wird der mikrobielle Abbau wesentlich gefördert und Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor werden freigesetzt, die für das

Pflanzenwachstum essenziell sind. Einige Bodentiere fördern außerdem das Wachstum von Pflanzen, indem sie schädliche Pathogene kontrollieren: Zum Beispiel konsu-

mieren Springschwänze Pilze, die bei Pflanzen Krankheiten hervorrufen, und tragen somit maßgeblich zur Bodengesundheit bei.

Keiner räumt den Mist weg – als in Australien die Dungkäfer fehlten.

Welche Probleme das Fehlen zersetzender Bodentiere verursachen kann, zeigte sich eindrucksvoll in Australien: Nach der Einführung von Nutztieren wie Rindern und Schafen durch europäische Siedler im 18. Jahrhundert sah man sich mit unerwarteten Herausforderungen konfrontiert. Eine der gravierendsten war das Fehlen von Dungkäfern (Seite 37), die in anderen Teilen der Welt eine entscheidende Rolle im Abbau von Tierkot spielen. Vor der Ankunft der Europäer gab es in Australien keine großen Weidetiere wie Rinder oder Schafe. Die einheimischen Dungkäfer waren an den trockenen Kot von Beuteltieren angepasst. Vor allem mit den weichen Kuhfladen der neu eingeführten Millionen Rinder konnten die australischen Dungkäfer nichts anfangen: Er blieb unberührt auf den Weiden liegen und sammelte sich in großen Mengen an, verschmutzte die Weiden und behinderte das Wachstum von Gras und anderen Pflanzen. Zudem wurde der unzersetzte Kot zur Brutstätte für Fliegen und andere Insekten, die Krankheiten verbreiten konnten. Besonders Rinderbremsen und Stubenfliegen wurden zu einer Plage für Tiere und Menschen. Ohne Dungkäfer, die den Kot zersetzen und in den Boden einarbeiten, gingen wertvolle Nährstoffe verloren. Der Kot konnte zudem bei Regen in Bäche und Flüsse gespült werden und die Wasserqualität beeinträchtigen.

George Bornemissza, ein ungarisch-australischer Entomologe, der an der Universität Innsbruck im Jahr 1950 sein Doktorat in Zoologie abschloss, erkannte in den 1950er Jahren das Ausmaß des Problems und hatte eine visionäre Idee: Warum nicht Dungkäfer, die an den Kot von Weidetieren angepasst sind, aus anderen Teilen der Welt nach Australien bringen? Bornemissza war überzeugt, dass diese Käfer das Problem lösen könnten, indem sie den Kot vergraben und zersetzen, wie es in Europa und Afrika geschieht. 1965 startete er das Dungkäfer-Projekt in Zusammenarbeit mit der australischen Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Über mehrere Jahrzehnte hinweg wurden mehr als 50 Arten von Dungkäfern aus Afrika, Europa und Asien nach Australien eingeführt. Diese Käfer wurden sorgfältig ausgewählt, um sicherzustellen, dass sie keine negativen Auswirkungen auf das einheimische Ökosystem haben.

Die eingeführten Dungkäfer erwiesen sich als äußerst effektiv. Sie begannen, den Kot von Weidetieren zu vergraben, wodurch die Weiden sauberer wurden und die Bodenfruchtbarkeit verbessert wurde. Die Käfer trugen dazu bei, die Population von Fliegen und anderen Schädlingen drastisch zu reduzieren. Zudem förderte das Vergraben des Kots die Wasserspeicherung im Boden und verringerte die Verschmutzung von Wasserquellen.

Das australische Dungkäfer-Projekt zeigt eindrucksvoll, wie wichtig Bodentiere für die Funktionsfähigkeit und Gesundheit von Agrarökosystemen sind und wie ihr Fehlen zu großen Problemen führen kann.

Gymnopleurus sturmi war einer der in Australien eingesetzten Dungkäfer, der Kuhfladen bevorzugt, aber auch Schafkot annimmt. Die Käfer fressen nicht nur den Kot, sondern formen daraus eine Kugel, die von Weibchen und Männchen gemeinsam rollend abtransportiert und in einiger Entfernung vergraben wird. In der unterirdischen Brutkammer wird ein Ei abgelegt.



Bodentiere erfassen: keine simple Aufgabe

Die Erfassung der Biodiversität von Bodentieren ist eine komplexe Aufgabe, da im Boden lebende Tiere nicht direkt beobachtet werden können und der Boden ein äußerst heterogener Lebensraum ist, in dem die Bodentiere zudem sehr unregelmäßig verteilt sind. Wissenschaftler:innen verwenden daher eine Vielzahl von Methoden, um die Artenvielfalt, die Zusammensetzung der Gemeinschaften, die genetische Vielfalt und die funktionelle Diversität der Bodentiere zu untersuchen. Oftmals werden Bodenproben entnommen, um Bodentiere der Mikro- und Mesofauna sowie kleinere Vertreter der Makrofauna mit Hilfe von Extraktionsmethoden (z.B. Berlese-Tullgren, Flotationstechnik) zu gewinnen und anschließend zu identifizieren. Regenwürmer werden aber auch durch das Anlegen von Strom oder die Ausbringung von reizenden Flüssigkeiten aus dem Boden getrieben, ohne dass dazu Bodenproben entnommen werden müssen. Auf der Bodenoberfläche lebende Arten wie Laufkäfer oder Wolfsspinnen werden meist mit Becherfallen erfasst, die neben der Vielfalt an vorkommenden Arten auch deren Laufaktivität messen (*Abb. rechts*).



Becherfalle zum Sammeln von oberflächlich lebenden Bodentieren

Genetische Methoden, wie sie schon seit längerem zur Erfassung von Bodenmikroorganismen (z.B. Pilzen, Bakterien) eingesetzt werden, gewinnen auch zunehmend für die Erfassung von Bodentieren an Bedeutung. Insbesondere die Erfassung von Umwelt-DNA (eDNA) ist im Vormarsch: Dabei wird genetisches Material von Bodentieren aus der Umwelt – in diesem Fall aus Bodenproben – extrahiert, um deren Anwesenheit nachzuweisen. Bodentiere hinterlassen DNA-Spuren durch Hautzellen, Kot, Schleim oder abgestorbene Körperteile im Boden. Diese DNA kann isoliert, sequenziert und analysiert werden, um die Artenvielfalt im Boden zu bestimmen, ohne die Tiere direkt zu fangen oder zu beobachten. Das Verfahren wurde bereits erfolgreich bei Regenwürmern und Nematoden angewandt, um ihre Artenzusammensetzung und Verbreitung in landwirtschaftlich genutzten Böden zu analysieren. Die Analyse von eDNA über sogenannte Metabarcoding-Verfahren ist besonders nützlich, da eine große Vielzahl an Arten erfasst und identifiziert werden kann, was mit klassischen mikroskopischen Analysen in der Regel nicht möglich ist.



Der Autor bei der Beprobung von Bodentieren in einem Getreidefeld.

Leben im und auf dem Boden:

Ein komplexes Netzwerk, das maßgeblich durch den Menschen beeinflusst wird.

Im und auf dem Boden lebende Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen stehen in einem engen Zusammenhang und bilden ein komplexes Netzwerk, das für die Stabilität und Funktionalität des Bodenökosystems essenziell ist. Doch wie genau leben Tiere im und auf dem Boden? Und wie beeinflusst die landwirtschaftliche Bewirtschaftung von Acker- und Grünlandflächen das Leben in diesem empfindlichen System? Ein genauer Blick auf diese Fragen zeigt, wie eng das Leben hier miteinander verwoben ist – und wie stark es von menschlichen Eingriffen abhängt.

Ein Leben zwischen zwei Welten: Tiere im und auf dem Boden

Viele Tiere leben sowohl im Boden als auch auf seiner Oberfläche und nutzen beide Lebensräume für unterschiedliche Zwecke. Anözische Regenwürmer (*Seite 83*) sind ein klassisches Beispiel für solche „Grenzgänger“. Sie verbringen den Großteil ihres Lebens unter der Erde, wo sie Gänge graben und damit die Bodenstruktur verbessern. Gleichzeitig kommen sie regelmäßig an die Oberfläche, um abgestorbenes Pflanzenmaterial als Nahrung zu sammeln und dieses in ihre Gänge einzuziehen. Diese Aktivität verbindet die oberirdische und unterirdische Welt und sorgt dafür, dass Nährstoffe zwischen beiden Schichten ausgetauscht werden. Auch viele Insektenarten, wie Käfer und Zweiflügler, bewegen sich während ihres Lebenszyklus zwischen dem Boden und der Oberfläche. Bei den Lauf- und Kurzflügelkäfern (*Seite 35*) nutzen viele Arten als erwachsene Tiere, das heißt als Käfer, die Oberfläche als ihr Jagdrevier. Die Larven dieser Käfer leben jedoch im Boden, wo sie Jagd auf Insekten und Würmer machen. Bei Blatthornkäfern, zu denen Mai-, Juni- und Gartenlaubkäfer gehören, leben die als Engerlinge bezeichneten Larven im Boden, wo sie sich von Wurzeln verschiedenster Pflanzen ernähren. Das Merkmal dieser Käferlarven ist die C-förmige Krümmung ihres Körpers (*Seite 38*). Die Engerlinge des Maikäfers (*Abbildung rechts unten*) können bis zu drei Jahre im Boden leben, während ihre Lebensphase als Käfer in der Regel nur mehr eine oder zwei Wochen dauert. Bei starkem Befall können mehrere hundert Kilogramm Engerlinge in einem Hektar Wiesenboden vorkommen, die in der

Hauptfraßperiode pro Tag oftmals mehr als ihr Körpergewicht an Pflanzennahrung aufnehmen. Damit können sie vom Grünland über den Gemüsebau bis hin zum Obstbau große Schäden anrichten (*Abb. nächste Seite*). Aber Achtung – nicht alle Engerlinge verursachen Schäden an Pflanzen: So ernähren sich zum Beispiel die Larven des Goldglänzenden Rosenkäfers (*Cetonia aurata*) von bereits abgestorbenem Pflanzenmaterial. Sie sind auch in Komposthäufen zu finden und sollten nicht bekämpft werden, da sie einen wichtigen Beitrag als Zersetzer leisten.



Die Larven des Goldglänzenden Rosenkäfers bewegen sich auf flachem Boden am Rücken liegend fort.

Engerlinge des Maikäfers





Die Engerlinge des Maikäfers können bei massenhaftem Auftreten große Schäden verursachen, indem sie die Wurzeln von Pflanzen abfressen, was zu einem großflächigen Absterben der Vegetation führt. Ohne seine Pflanzendecke ist der Boden schutzlos Erosion durch Wind und Regen ausgesetzt.

Gleich wie bei den Käfern entwickeln sich bei vielen Arten der Zweiflügler die Jugendstadien im Boden. Die erwachsenen Fliegen und Mücken leben dann jedoch oberirdisch. Ihre Funktion besteht vor allem darin, für die Ausbreitung und Vermehrung ihrer Art zu sorgen. Insbesondere bei den Mücken (Nematocera) gibt es viele Vertreter, deren Larven bodenlebend sind. Dazu gehören zum Beispiel die Schnaken: Ihre Larven sind an der sogenannten „Teufelsfratze“, dem charakteristisch geformten Hinterleibsende der Larven, gut zu erkennen (Seite 41). Wenn Larven der Wiesenschnake in sehr großer Dichte auftreten, können sie Schäden durch den Fraß an Wurzeln verursachen. Viele der im Boden lebenden Zweiflüglerlarven sind jedoch in den Abbau von organischer Substanz eingebunden und spielen hier eine wichtige Rolle im Nährstoffkreislauf von Böden.

Der Einfluss landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf Bodentiere

Der Boden ist kein homogener Lebensraum, sondern besteht aus einer Vielzahl von Mikrohabitaten, die durch Poren, Wurzelkanäle und organisches Material geprägt sind. Diese räumliche Heterogenität des Bodens ermöglicht es verschiedenen Tierarten, nebeneinander zu existieren, da sie unterschiedliche Nischen im Boden besetzen können. Die Verteilung dieser Tiere im Boden ist alles andere als gleichmäßig. Sie wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst, darunter die Bodenstruktur, die Feuchtigkeit, die Temperatur und die Art der Landnutzung. Besonders in landwirtschaftlich genutzten Böden zeigt sich, wie stark menschliche Eingriffe die tierischen Lebensgemeinschaften im Boden prägen können (siehe Kapitel über regenerative Landwirtschaft, Seite 66). Intensive landwirtschaftliche Praktiken wie der Einsatz von Pflügen, chemischen Düngemitteln und Pestiziden können die Bodenbiodiversität stark beeinträchtigen. Intensive Bodenbearbeitung wie das Fräsen und Pflügen zerstört die natürliche Struktur des Bodens und die Lebensräume vieler Bodentiere, die auf stabile Bodenstrukturen angewiesen sind, und dadurch oft stark dezimiert werden.

Springschwänze (Seite 29) sind besonders in den oberen Bodenschichten und in der Streuschicht zu finden, wo sie von der hohen Verfügbarkeit organischer Substanz profitieren. Ebenso kommen Milben in nahezu allen Böden vor und erfüllen eine Vielzahl ökologischer Funktionen. Einige Milbenarten sind Zersetzer, die sich von abgestorbenem organischem Material ernähren, während andere räuberisch leben und kleinere Bodenorganismen wie Nematoden oder Springschwänze jagen. Neben der bereits angesprochenen Bodenbearbeitung wirkt insbesondere das Fehlen von ausreichendem toten Pflanzenmaterial (Streu) hemmend auf Milben und Springschwänze. Dennoch sind sie oft erstaunlich widerstandsfähig und können sich unter günstigen Bedingungen schnell erholen.

Auch die Anwendung von Pestiziden kann negative Auswirkungen haben, da sie nicht nur Schädlinge, sondern auch nützliche Bodentiere wie räuberische Käfer und Spinnen töten. Spinnen sind zwar keine typischen Bodenbewohner, aber viele Arten leben in der Streuschicht oder in Bodennähe, wo sie als Räuber eine wichtige Rolle spielen. Sie jagen

Insekten und andere kleine Bodenorganismen und tragen so zur Regulation von Schädlingen bei. In landwirtschaftlich genutzten Flächen sind es vor allem schnelle und breitflächige maschinelle Bewirtschaftungsmaßnahmen, die Spinnenpopulationen rasch dezimieren. Maßnahmen wie reduzierte Bodenbearbeitung und eine diverse pflanzliche Bodenbedeckung sowie die Anlage von Blühstreifen (*Bild unten*) und Hecken können dazu beitragen, Rückzugsräume für Spinnen zu schaffen und ihre ökologischen Funktionen zu fördern.



Blühstreifen entlang von Feldern

Nachhaltige landwirtschaftliche Ansätze wie der Verzicht auf Pestizide, die Anlage von Blühstreifen und eine reduzierte Bodenbearbeitung sind daher wesentlich, um die Vielfalt von Bodentieren und ihre Funktionalität für einen gesunden Boden zu erhalten. Auch der Anbau von Zwischenfrüchten, die den Boden bedecken und vor Erosion schützen, fördert die tierische Vielfalt und ermöglicht es Bodentieren in landwirtschaftlichen Flächen, die kalten Jahreszeiten besser zu überdauern. Springschwänze, Milben, Käfer, Zweiflügler, Hundertfüßer, Doppelfüßer und Spinnen sind nur einige der vielen Tiergruppen, die im Boden leben und durch ihre Aktivitäten die Grundlage für gesunde und produktive Böden schaffen. Indem wir ihre Lebensräume durch eine angepasste Bewirtschaftung schützen, tragen wir nicht nur zum Erhalt der Biodiversität bei, sondern sichern auch die langfristige Fruchtbarkeit unserer Böden.

Bodenbiodiversität funktionell betrachtet: Das Boden-Nahrungsnetz als Grundlage des Bodenlebens

Wie wir bereits erfahren haben, sind eine Vielzahl von Bodentieren und anderen Organismen in gesunden Böden zu finden. Sie alle stehen miteinander in Wechselwirkung und bilden ein fein abgestimmtes Netzwerk. Dieses Netzwerk wird als Boden-Nahrungsnetz bezeichnet und ist von zentraler Bedeutung für die Funktionalität von Böden. Doch was genau ist ein Boden-Nahrungsnetz, welche Gruppen an Tieren und anderen Organismen gibt es darin, und wie hängen die verschiedenen Organismengruppen im Boden direkt und indirekt zusammen? Ein genauer Blick auf die Bodentiergruppen und ihre Rolle im Nahrungsnetz zeigt, wie eng das Leben im Boden miteinander verwoben ist.

Das Boden-Nahrungsnetz: die verbundene Gemeinschaft unter unseren Füßen

Ein Nahrungsnetz beschreibt die direkten und indirekten Wechselwirkungen zwischen Organismen in einem Ökosystem, die durch den Fluss von Energie und Nährstoffen miteinander verbunden sind. Im Gegensatz zu einer Nahrungskette, die eine lineare Abfolge von „Wer frisst wen?“ darstellt, ist ein Nahrungsnetz ein vielschichtiges Geflecht aus Beziehungen, in dem Organismen auf verschiedenen Ebenen miteinander interagieren. Im Boden-Nahrungsnetz beginnt dieser Energiefluss mit den Pflanzen, die durch die Photosynthese Sonnenenergie in chemische Energie umwandeln. Diese Energie wird dann sowohl durch pflanzenfressende Tiere als auch durch den Abbau toten Pflanzengewebes von einer Organismengruppe zur nächsten weitergegeben. Das Boden-Nahrungsnetz lässt sich in funktionelle Gruppen nach ihrer Ernährungsweise, die auch als trophische Gruppen bezeichnet werden, unterteilen. Jede dieser Gruppen trägt auf ihre Weise zur Stabilität und Funktionalität des Bodens bei, indem sie sich gegenseitig beeinflussen und regulieren. Dieses Netzwerk ist entscheidend für zentrale Prozesse wie Nährstoffkreisläufe, Humusbildung, Krankheitsunterdrückung und Pflanzenwachstum. Aber wie genau funktioniert dieses Netzwerk? Welche Organismen spielen eine Rolle – und wie hängen sie funktionell miteinander zusammen?

Trophische Gruppen im Boden

Im Boden-Nahrungsnetz lassen sich verschiedene trophische Gruppen unterscheiden. Sie zeigen an, auf welcher Stufe des Energieflusses sich ein Organismus befindet:

Die **Primärproduzenten** sind die Grundlage bzw. der „Motor“ des Boden-Nahrungsnetzes. Dazu gehören vor allem Pflanzen und Algen, die durch Photosynthese Energie aus Sonnenlicht gewinnen. Indem sie wachsen, bilden sie organisches Material, das von vielen Bodentieren entweder in lebender oder bereits abgestorbener Form genutzt wird.

Primärzersetzer (Detritivoren und Sapro-bionten): Sie sind die „Recycling-Spezialisten“ des Bodens. Diese Organismen fressen abgestorbene organische Substanzen – etwa Laub, tote Wurzeln oder abgestorbene Mikroorganismen. Sie bauen organisches Material ab und setzen dabei Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff frei, die von Pflanzen und anderen Organismen genutzt werden können. Zu den wichtigsten Zersetzern gehören Bakterien und Pilze: Bakterien zersetzen vor allem leicht abbaubares Material wie Zucker und Proteine, während Pilze komplexere Verbindungen wie Lignin und Zellulose abbauen.

Bodentiere wie Springschwänze, diverse Insektenlarven sowie Asseln und Doppelfüßer haben jedoch ebenfalls eine wesentliche Funktion im Abbau von organischem Material, da sie abgestorbene Blätter und Stängel zerkleinern und so zugänglicher für Mikroorganismen machen. Auch Regenwürmer zerkleinern organisches Material und mischen es mit mineralischem Boden, wodurch sie die Zersetzung beschleunigen und die Bodenstruktur verbessern.

Primärkonsumenten (Herbivoren): Diese Tiere ernähren sich direkt von lebenden Pflanzen. Unter den Pflanzenfressern sind es vor allem die Larven diverser Insekten, etwa von bestimmten Käfern oder Zweiflüglern, die Wurzeln und andere unterirdische Pflanzenorgane befressen.

Sekundärkonsumenten: Diese Organismen ernähren sich von Primärkonsumenten und größeren Primärzersetzern, indem sie diese fressen oder parasitieren. Dazu gehören größere Räuber wie zum Beispiel Laufkäfer, Hundertfüßer und Spinnen sowie parasitische Insekten wie die Schlupfwespen.

Tertiärkonsumenten: Diese Organismen ernähren sich von Sekundärkonsumenten, indem sie diese fressen oder parasitieren. Dazu gehören größere Räuber wie zum Beispiel Laufkäfer, Hundertfüßer und Spinnen sowie parasitische Insekten wie die Schlupfwespen.

Oftmals ernähren sich Konsumenten von verschiedenen trophischen Gruppen und konsumieren neben Pflanzen auch Tiere. In diesem Fall werden sie als **Omnivore** oder **Allesfresser** bezeichnet.

Eine Larve des **Kupferfarbenen Buntgrabläufers** *Poecilus cupreus* (im Bild rechts, siehe auch Seite 47), einer weitverbreiteten Laufkäferart in Äckern, ist den Tertiärkonsumenten im Bodennahrungsnetz zuzurechnen und erbeutet hier einen Engerling des Gartenlaubkäfers, einem Primärkonsumenten, der sich von Wurzeln diverser Pflanzenarten ernährt.



Die zentralen Bodentiergruppen

Die Vielfalt im Boden ist immens, aber einige Tiergruppen stechen heraus, weil sie besonders häufig sind oder eine zentrale Rolle im Nahrungsnetz spielen.

Regenwürmer: Sie gelten als „Ökosystem-Ingenieure“. Regenwürmer fressen abgestorbene Pflanzenreste und Mikroorganismen, durchmischen den Boden, fördern die Durchlüftung und tragen zur Humusbildung bei. Gleichzeitig sind sie eine wichtige Nahrungsquelle für zahlreiche Räuber – zum Beispiel Laufkäfer oder Maulwürfe. Regenwürmer beeinflussen zudem indirekt die Aktivität anderer Bodenorganismen, indem sie die Mikrostruktur des Bodens verändern.

Springschwänze: Diese kleinen Sechsheiner sind meist Pilzfresser, können aber auch Bakterien oder abgestorbene Pflanzenreste fressen. Sie sind wichtige Regulatoren der mikrobiellen Aktivität, weil sie durch ihre Nahrungsaufnahme das Wachstum von Pilzen kontrollieren. Gleichzeitig sind sie eine Nahrungsquelle für räuberische Milben und Insektenlarven.

Milben: Die Gruppe der Milben ist äußerst vielfältig. Die meisten Bodenmilben sind Zersetzer (Oribatiden), manche aber auch Räuber (Gamasiden). Oribatiden tragen zur Zerkleinerung organischer Substanz bei, während räuberische Milben Springschwänze, Nematoden oder Pilzhypen jagen.

Nematoden: Diese mikroskopisch kleinen Würmer sind besonders vielfältig, was ihre Ernährungsweise betrifft: Es gibt pflanzenfressende, bakterienfressende, pilzfressende und räuberische Nematoden. Sie spielen eine zentrale Rolle im Energiefluss des Boden-Nahrungsnetzes. Die trophische Rolle eines Fadenwurms lässt sich oft an der Form seines Mundapparats erkennen.

Insektenlarven: Viele Insekten verbringen ihre Jugendstadien im Boden, etwa als Larven. Dazu gehören Engerlinge, Schnakenlarven oder Wurzelbohrer. Manche leben von organischer Substanz, andere sind Pflanzenfresser oder Räuber. Einige, wie die Larven von Laufkäfern, sind wichtige Prädatoren (Räuber) im Boden.

Doppelfüßer und Asseln: Diese Tiere sind klassische Zersetzer. Sie zerkleinern organisches Material mechanisch, was Mikroorganismen den Zugang erleichtert. Auch sie sind Beute für viele Räuber.

Spinnen und Laufkäfer: Sie jagen andere Bodenbewohner – teils an der Oberfläche, teils im Boden selbst. Damit regulieren sie die Dichte anderer Gruppen und tragen zur Stabilität des Nahrungsnetzes bei.

Direkte und indirekte Beziehungen im Nahrungsnetz

Wie alle Lebewesen sind auch Bodentiere auf das Vorhandensein von ausreichend Nahrung angewiesen. Es leuchtet daher ein, dass die Verfügbarkeit der Nahrung beziehungsweise Beute die Populationsgrößen bestimmter Tiere beeinflusst: Mehr Futter ermöglicht einer größeren Anzahl an Tieren das Überleben. Umgekehrt hat die Anzahl jener Tiere, die andere Pflanzen, Tiere oder Mikroorganismen fressen, wiederum Einfluss auf die Populationsdichte dieser Arten: Gibt es zum Beispiel viele Drahtwürmer, ist das für die Kartoffelpflanzen keine gute Nachricht. Neben diesen direkten Nahrungsbeziehungen gibt es jedoch auch eine Vielzahl indirekter Effekte, die mitunter schwerer zu erkennen sind – aber dennoch große Bedeutung haben.

Ein Beispiel für solche indirekten Effekte in einem Boden-nahrungsnetz sind trophische Kaskaden: Wenn ein Top-Räuber die Dichte eines kleineren Räubers verringert, kann das indirekt die Dichte der Beute dieses kleinen Räubers erhöhen. Ein Beispiel: Wenn Laufkäfer viele Spinnen fressen, können dadurch mehr Springschwänze überleben, was wiederum das Pilzwachstum beeinflusst. Ein anderes Beispiel sind Springschwänze und Nematoden, die auch Mikroorganismen fressen. Durch diesen Fraß werden Mikroben regelmäßig „erneuert“, und es kommt zur verstärkten Nährstofffreisetzung, was wiederum das Pflanzenwachstum fördern kann. Auch Pflanzen können solche indirekten Interaktionen auslösen: Pflanzenwurzeln geben sogenannte Exsudate ab (Zucker,

Aminosäuren und andere Stoffe), die Mikroorganismen im Wurzelraum (Rhizosphäre) fördern. Diese Mikroorganismen ziehen wiederum Tiere an, die wiederum Pflanzenpathogene reduzieren können. So beeinflussen Pflanzen über Wurzelexsudate indirekt das Nahrungsnetz – und werden gleichzeitig davon beeinflusst.

Es müssen allerdings nicht immer Nahrungsbeziehungen sein, über die sich im Boden lebende Tiere beeinflussen: Ein Beispiel dafür ist die indirekte Interaktion zwischen insektenfressenden Pilzen und Regenwürmern: Der als Grüne Muskardine bezeichnete Pilz *Metarhizium anisopliae* befällt Engerlinge und spielt als natürlich vorkommende oder auch gezielt durch Landwirte ausgebrachte Larvenkrankheit eine wichtige Rolle in der Kontrolle dieser Bodenschädlinge. Die Sporen dieser Pilze werden durch Regenwürmer im Boden verteilt und somit tragen Regenwürmer indirekt zur Kontrolle von Engerlingen bei.



*Ein von *Metarhizium anisopliae* überwuchertes Engerling des Gartenlaubkäfers (Seite 39). Der Pilz wird über Getreidekörner ausgebracht.*

Warum ist die biologische Vielfalt im Boden wichtig?

Die bloße Anzahl an verschiedenen Bodentieren und anderen Lebewesen im Boden ist beeindruckend – aber entscheidender für die Funktionsweise des Bodenökosystems ist die funktionelle Diversität, also wie viele verschiedene Rollen Tiere und andere Organismen im Nahrungsnetz übernehmen und wie sie sich dabei gegenseitig ergänzen (ökologische Komplementarität) und gegenseitig vertreten (ökologische Redundanz) können.

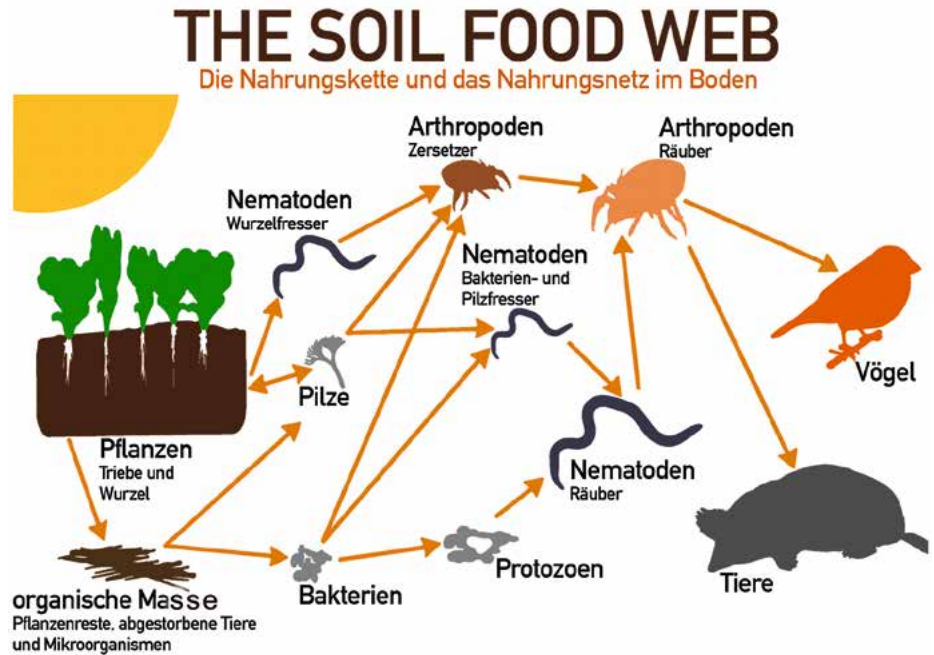
Ökologische Komplementarität bezeichnet das Zusammenspiel verschiedener Arten, die sich in ihren ökologischen Funktionen ergänzen – also nicht redundant, sondern komplementär wirken. Im Bodennahrungsnetz spielt ökologische Komplementarität eine große Rolle, da zum Beispiel verschiedene Bodenorganismen unterschiedliche Abbauprodukte zersetzen und spezifische Stoffkreisläufe antreiben. So lockern Regenwürmer den Boden mechanisch und zersetzen grobes organisches Material, wodurch es für Bakterien und Pilze besser zugänglich wird. Diese Mikroorganismen bauen anschließend die organischen Substanzen weiter ab und setzen Nährstoffe frei. Jede Organismengruppe erfüllt also eine komplementäre Funktion im Zersetzungs- sowie Um- und Aufbauprozess.

Ökologische Redundanz beschreibt das Vorhandensein mehrerer Arten mit ähnlichen ökologischen Funktionen innerhalb eines Ökosystems. Diese „funktionellen Doppelungen“ erhöhen die Stabilität des Systems, da ein Ausfall einer Art durch eine andere mit ähnlicher Funktion kompensiert werden kann. Wenn mehrere Arten von Lauf- und Kurzflügelkäfern zum Beispiel die Larven des Maiswurzelbohrers, eines gefürchteten Schädlings im Mais, fressen, kann der Ausfall oder das geringere Auftreten einer Käferart durch eine andere kompensiert werden und die natürliche Kontrolle des Schädlings bleibt damit stabil.

Wenn sowohl die ökologische Redundanz als auch Komplementarität in einem Bodennahrungsnetz hoch sind, besitzt dieser Boden eine höhere ökologische Resilienz. Ein solcher Boden hat die Fähigkeit, Störungen wie zum Beispiel Trockenheit und Schädlingsbefall besser zu widerstehen, sich nach Belastungen zu erholen und dabei seine grundlegende Struktur, Funktionen und Prozesse aufrechtzuerhalten. Ein solch funktionell diverses Bodennahrungsnetz kann Nährstoffe effizienter umsetzen, Pflanzen mit Nährstoffen versorgen und Krankheiten gezielter abwehren.

Fazit: Das Boden-Nahrungsnetz als Grundlage des Lebens

Das Boden-Nahrungsnetz (Abb. rechts) ist ein faszinierendes und komplexes System, das die Grundlage für die Funktionalität des Bodenökosystems bildet. Die verschiedenen trophischen Gruppen – von Primärproduzenten über Zersetzer bis hin zu Konsumenten und Räubern – sind durch ein dichtes Netz von Wechselwirkungen miteinander verbunden. Jede Organismengruppe erfüllt eine spezifische Rolle, die für die Stabilität und Gesundheit des Bodens essenziell ist. Die Bodentiergruppen, von mikroskopisch kleinen Protozoen bis hin zu größeren Räubern wie Hundertfüßern, sind integraler Bestandteil dieses Netzwerks und tragen dazu bei, Nährstoffe zu recyceln, die Bodenstruktur zu verbessern und die Bodenfruchtbarkeit zu fördern.



Das Verständnis des Boden-Nahrungsnetzes ist nicht nur für die Wissenschaft von Bedeutung, sondern hat auch für Landwirte und Landwirtinnen, die eine nachhaltige Nutzung ihrer Böden anstreben, eine große Bedeutung. Indem wir die Leistungen der oft unsichtbaren Akteure anerkennen und Maßnahmen ergreifen, um ihre Lebensbedingungen zu fördern, tragen wir dazu bei, die Grundlage für das Leben auf der Erde zu sichern. Denn letztlich hängt auch unser eigenes Überleben von der Gesundheit und Funktionalität des Bodens ab.

Kleiner Käfer, große Wirkung: Laufkäfer als natürliche Helfer in der Kontrolle von Unkrautsamen und tierischen Schädlingen

Die Landwirtschaft steht vor zahlreichen Herausforderungen: Einerseits sollen hohe Erträge gesichert werden, andererseits gilt es, den Boden möglichst schonend zu bewirtschaften und den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel wie Herbizide und Insektizide zu reduzieren, um Umwelt und Biodiversität zu schützen. Eine vielversprechende Strategie ist es, natürliche Prozesse der Schädlings- und Unkrautregulierung gezielt zu nutzen. In diesem Zusammenhang sind Laufkäfer (Carabidae) ein interessantes Beispiel: Diese flinken Bodenbewohner spielen eine wichtige Rolle in landwirtschaftlichen Ökosystemen. Viele Arten fressen nicht nur tierische Schädlinge wie Fliegenlarven, Schnecken oder Blattläuse, sondern auch große Mengen an Unkrautsamen.

Dadurch helfen sie, die sogenannte Samenbank im Boden zu reduzieren und den Unkrautdruck langfristig zu senken. Damit Laufkäfer ihre nützlichen Funktionen entfalten können, ist es allerdings entscheidend, dass ihre Lebensräume erhalten bleiben. Schonende Bodenbearbeitungsmethoden sind daher ein Schlüssel zur Förderung dieser natürlichen Helfer, zumal sich die Larven vieler Arten im Boden entwickeln.

Aber wer sind nun diese Laufkäfer?

Laufkäfer sind eine äußerst artenreiche Käferfamilie mit weltweit über 40.000 Arten, von denen in Mitteleuropa mehr als 750 unterschiedliche Spezies vorkommen.

Die meisten Arten leben am Boden, sind schnelle Läufer und besitzen kräftige Mundwerkzeuge. Ihr Körperbau und Verhalten machen sie zu effektiven Jägern. Sie kommen in sehr unterschiedlichen Lebensräumen vor – von Wäldern über feuchte Wiesen bis zu trockenen Ackerflächen – und weisen eine bemerkenswerte ökologische Vielfalt auf. Manche Arten sind reine Fleischfresser, andere ernähren sich sowohl von tierischer als auch pflanzlicher Nahrung, wiederum andere bevorzugen überwiegend Samen. Diese funktionelle Diversität innerhalb der Laufkäferfamilie macht sie besonders wertvoll für die biologische Schädlings- und Unkrautregulation. Durch ihre große Artenfülle, mit der sie unterschiedlichste Lebensraumansprüche abdecken, sind Laufkäfergemeinschaften besonders anpassungsfähig hinsichtlich Umweltveränderungen, reagieren flexibel auf das vorhandene Beuteangebot und tragen durch ihre Jagdaktivität zur Stabilität der Agrarökosysteme bei.

Im Hinblick auf tierische Schädlinge sind Laufkäfer effektive Prädatoren. Viele Arten jagen nachtaktive auf der Bodenoberfläche oder in den obersten Bodenschichten. Sie ernähren sich von einer Vielzahl von Beutetieren: Dazu gehören viele Schädlinge wie zum Beispiel Blattläuse oder pflanzenfressende Käferlarven wie jene des Kartoffel- oder Maikäfers. Bei größeren Laufkäferarten wie *Carabus granulatus* oder *Pterostichus melanarius* stehen auch die in vielen Kulturen gefürchteten Nacktschnecken, besonders deren Jungtiere und Eier, auf dem Speiseplan (Abb. unten). Damit leisten Laufkäfer einen wichtigen Beitrag zur natürlichen Regulierung von diversen Schädlingen, ohne dabei – im Gegensatz zu chemischen Pflanzenschutzmitteln – schädliche Rückstände zu hinterlassen oder Nicht-Zielorganismen zu gefährden.



Laufkäfer gehören zu den am besten untersuchten Insekten, was ihre Nahrungswahl im Freiland, insbesondere in Agrarökosystemen wie Äckern und Wiesen, betrifft. Dabei verwenden Forscherinnen und Forscher DNA-Analysen, um festzustellen, von welchen Beutetieren oder Pflanzensamen sich Laufkäfer ernährt haben.

Dabei gibt es einen „Trick“, wie man diese Information bekommt, ohne dass die Käfer dabei getötet werden müssen. Laufkäfer haben nämlich einen speziellen Abwehrmechanismus: Wenn sie sich bedrängt fühlen, dann erbrechen sie Mageninhalt, was auch als Regurgitieren bezeichnet wird. Man kann daher Käfer im Freiland fangen und sie anschließend im Labor dazu bringen, zu regurgitieren. Das gewonnene Regurgitat (Abb. nächste Seite oben) kann dann mittels DNA-Analyse untersucht werden, um festzustellen, was dieser Käfer in den letzten Stunden und Tagen zu sich genommen hat. Mit dieser Untersuchungsmethode müssen die Käfer nicht getötet werden, sondern sie werden nach der Gewinnung des Regurgitats wieder dort ausgelassen, wo man sie gefangen hat.



Laufkäfer werden zuerst einzeln bestimmt. Danach wird ihr Regurgitat gewonnen, welches als braune Flüssigkeit in Reaktionsgefäß auf dem Foto auf der nächsten Seite zu sehen ist. Dieses Regurgitat wird für die DNA-Nahrungsanalyse verwendet und der Käfer wird wieder an jenem Ort freigelassen, wo er gefangen wurde.

Laufkäferlarve (*Carabus* sp.) beim Verzehren einer Nacktschnecke (äußere Verdauung)

Durch die umfassenden DNA-Analysen konnte gezeigt werden, dass Laufkäfer eine Vielzahl von unterschiedlichen Beutetieren und auch Pflanzensamen konsumieren. Die DNA-Daten haben aber auch gezeigt, dass Springschwänze und kleinere Regenwürmer eine Art Grundnahrungsmittel für die Käfer und Larven darstellen. Sie sichern das Überleben von Laufkäfern das ganze Jahr über in Agrarökosystemen, auch dann, wenn zum Beispiel keine pflanzenfressenden Insekten als Beute vorhanden sind. In Fütterungsexperimenten konnte zudem gezeigt werden, dass Springschwänze eine qualitativ besonders hochwertige Nahrung sind, welche die Entwicklungsgeschwindigkeit, Lebensdauer und Fruchtbarkeit von Laufkäfern positiv beeinflusst. Regenwürmer und Springschwänze sind demnach nicht nur sehr wichtig für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit, sondern unterstützen das natürliche Schädlingsregulationspotential in Agrarökosystemen maßgeblich.

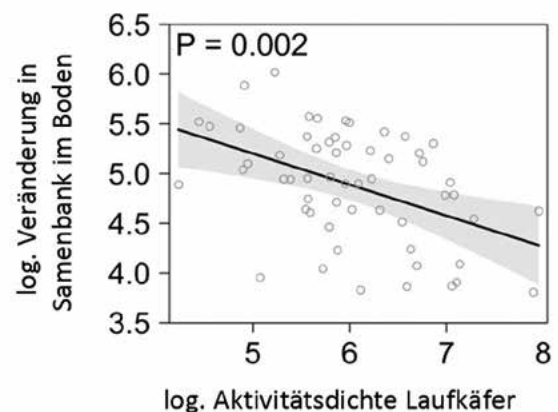
Weniger bekannt, aber nicht weniger wichtig, ist die Rolle von Laufkäfern bei der Regulierung von Unkraut. Viele Arten – insbesondere Vertreter wie der Erdbeersamenkäfer *Harpalus rufipes* (Abb. Mitte) oder verschiedene *Amara*-Arten (Seite 35) – fressen in beachtlichem Umfang Unkrautsamen. Studien haben gezeigt, dass einzelne Käfer mehrere hundert Samen pro Nacht aufnehmen können. Besonders häufig verzehrt werden Samen von Vogelmiere, Hirten-täschel oder Kletten-Labkraut – also Arten, die in der Landwirtschaft oft als problematische Ackerbegleiter gelten. Die Käfer nehmen die Samen direkt von der Bodenoberfläche auf oder graben sie aus flachen Bodenschichten aus. Durch diesen Samenfraß tragen sie zur Reduktion der Samenbank bei – jener Reserve keimfähiger Samen, die über Jahre im Boden überdauern kann. Untersuchungen in Getreidefeldern konnten zudem zeigen, dass die Verringerung der Unkrautsamenbank umso stärker ist, je mehr Laufkäfer sich in den Feldern befinden (siehe Grafik). Anders als Herbizide, die meist nur sichtbare Pflanzen entfernen, wirken Laufkäfer somit an der Wurzel des Problems: Sie verhindern das Auf-laufen neuer Unkräuter, indem sie deren Samen konsumieren, bevor sie keimen können.



Regurgitat für die DNA-Nahrungsanalyse



Erdbeersamenkäfer *Harpalus rufipes* ernährt sich in großem Umfang von Pflanzensamen, verursacht allerdings in Erdbeerplantagen Schäden.



Mit zunehmender Aktivitätsdichte von Laufkäfern (X-Achse) verringert sich die Samenbank von Unkräutern im Boden (Y-Achse) in Getreidefeldern in Österreich, Frankreich, Schweden und Tschechien.
Modifiziert nach Carbonne et al. (2020) <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76305-w>

Laufkäfer fördern

Damit Laufkäfer als natürliche Regulatoren wirksam sein können, müssen bestimmte Lebensraumbedingungen gegeben sein. Dazu gehört vor allem eine möglichst durchgehende Bodendeckung, die Schutz vor Austrocknung und Fressfeinden bietet. Vegetationslose, offene Böden werden von vielen Laufkäferarten gemieden. Mulchschichten, Pflanzenreste oder Zwischenfrüchte sorgen für ein geeignetes Mikroklima und dienen gleichzeitig als Jagd- und Rückzugsraum. Insbesondere für die deutlich empfindlicheren Larven der Laufkäfer sind diese Habitate sehr wichtig. Versteckmöglichkeiten unter abgestorbenem Pflanzenmaterial, Ackerbegleitpflanzen, Mist oder Grasstreifen und Feldraine sind für viele Arten überlebenswichtig. Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Standorttreue vieler Arten: Sie bewegen sich nicht weit, sondern bleiben oft über Jahre in einem bestimmten Habitat. Wird dieses durch intensive landwirtschaftliche Praktiken und den Verlust von Ausweichhabitaten gestört oder zerstört, verschwinden die Populationen – oft dauerhaft.

An dieser Stelle kommt die Bodenbearbeitung ins Spiel. Die Art, wie ein Acker bewirtschaftet wird, hat erheblichen Einfluss auf die Laufkäfergemeinschaft. Konventionelle Verfahren wie tiefes Pflügen wirken sich nachweislich negativ aus: Sie töten direkt viele Tiere, zerstören Eiablageplätze und treffen vor allem die besonders empfindlichen und vorrangig im Boden lebenden Larven der Laufkäfer. Die Folge ist ein deutlicher Rückgang der Artenvielfalt und der Individuenzahlen. Demgegenüber haben sich schonende Methoden der Bodenbearbeitung – etwa reduzierte Bodenbearbeitung (Minimal-Tillage), Direktsaat oder Mulchsaat – als besonders vorteilhaft für Laufkäfer erwiesen. Studien zeigen, dass auf Flächen mit reduzierter Bodenbearbeitung die Laufkäferdichte deutlich höher ist – ebenso wie ihre Aktivität, das heißt ihre tatsächliche Jagd- und Fraßleistung. Bei der Direktsaat etwa erfolgt die Aussaat direkt in die unbearbeitete Bodenoberfläche, wodurch Bodenstruktur und Lebensräume weitgehend erhalten bleiben. Eine Mulchschicht schützt den Boden zusätzlich vor Erosion, Austrocknung und Temperaturschwankungen, was nicht nur Laufkäfer, sondern auch andere Bodenorganismen fördert. Damit wird ein perfekter Lebensraum für diese Käfer geschaffen, in dem sie ausreichend Nahrung, Schutz und ein geeignetes Mikroklima vorfinden.

Auch der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten leistet einen weiteren wichtigen Beitrag: Sie sorgen für eine dauerhafte Vegetationsdecke und vernetzen die Lebensräume der Laufkäfer. Auch eine vielfältige Fruchtfolge kann helfen, unterschiedliche Arten über das Jahr hinweg zu unterstützen. Die Förderung von Laufkäfern funktioniert dabei am besten in Kombination mit anderen biodiversitätsfördernden Maßnahmen wie Blühstreifen, Hecken oder ungemähten Feldrändern. Solche Strukturelemente bieten Rückzugsräume, Nahrung und Überwinterungsmöglichkeiten.

Laufkäfer wirken natürlich nicht allein. Sie sind Teil eines größeren Nahrungsnetzes im Boden. Ihre Aktivität ergänzt die Wirkung anderer Nützlinge wie Spinnen, Kurzflügelkäfer (wie z.B. *Philonthus cognatus*, Abb. unten) oder räuberische Wanzen. Eine vielfältige Gemeinschaft an Prädatoren erhöht die Stabilität des Systems: Fällt eine Art aus bzw. tritt sie in geringerer Populationsstärke auf, da sich die Umweltbedingungen für sie verschlechtern, können andere ihre Funktion übernehmen. Diese funktionelle Redundanz ist entscheidend, um landwirtschaftliche Systeme widerstandsfähiger gegenüber Störungen wie Schädlingen, Trockenperioden oder Krankheitsausbrüchen zu machen. Auch die Pflanzen profitieren von der Anwesenheit der Käfer: Sie wachsen in einem gesünderen Boden, mit weniger Konkurrenz durch Unkraut und weniger herbivoren Tieren, die sie anfressen. Das Ergebnis sind robustere Pflanzen, stabilere Erträge und eine geringere Abhängigkeit von externen Inputs wie Pestiziden oder Düngemitteln.

Philonthus cognatus, ein Vertreter der Kurzflügler



Laufkäfer sind demnach viel mehr als unscheinbare Krabbler am und im Boden: Sie übernehmen zentrale ökologische Funktionen in der landwirtschaftlichen Produktion – als Schädlingsjäger, Samenfresser und Bioindikatoren für gesunde Böden. Ihre Förderung ist nicht nur ein Beitrag zur Biodiversität, sondern auch ein praktisches Instrument für eine nachhaltige Landwirtschaft. Schonende Bodenbearbei-

tung, kombiniert mit strukturreichen Landschaftselementen, ermöglicht es, das Potenzial dieser natürlichen Helfer voll auszuschöpfen. In Zeiten des Klimawandels und des Artensterbens ist es angebrachter denn je, mit der Natur zu arbeiten – nicht gegen sie. Wer den Laufkäfern Raum gibt, erntet im wahrsten Sinne des Wortes die Früchte einer naturnahen Bewirtschaftung.

Drahtwürmer im Ackerboden

Unerwünschte Bodenbewohner und ökologische Kontrollstrategien

Drahtwürmer gehören zu den unsichtbaren, aber umso gefürchteteren Schädlingen in der Landwirtschaft. Sie leben verborgen im Boden und fressen dort an den empfindlichen Wurzeln, Keimlingen und Knollen von Kulturpflanzen. Besonders gefährdet sind Kartoffeln, Mais, Getreide, Zuckerrüben und viele Gemüsesorten. Die Schäden, die Drahtwürmer anrichten, sind nicht nur für den einzelnen Landwirt wirtschaftlich bedeutsam – sie stellen auch auf globaler Ebene eine ernstzunehmende Bedrohung für die Ernährungssicherheit dar. Während man die erwachsenen Käfer oft gar nicht bemerkt, sind es vor allem die Larven der Gattung *Agriotes*, die durch ihren zähen, drahtigen Körperbau namensgebend und als Schädlinge berüchtigt sind.

Doch wie leben Drahtwürmer eigentlich, wie verhalten sie sich im Boden – und wie kann man ihnen auf nachhaltige Weise begegnen? In einer Zeit, in der der Einsatz chemischer Bodeninsektizide zunehmend eingeschränkt wird und nachhaltige Bewirtschaftungsformen in der Landwirtschaft immer wichtiger werden, rücken biologische und ökologische Ansätze zur Kontrolle dieser Schädlinge stärker in den Fokus. Besonders die Förderung eines aktiven und vielfältigen Bodenlebens spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Was sind Drahtwürmer?

Drahtwürmer sind die Larven der Schnellkäfer (Familie: Elateridae), von denen es weltweit mehrere Tausend Arten gibt. In Mitteleuropa sind es vor allem die Gattungen *Agriotes*, deren Larven als wirtschaftlich bedeutsame Schädlinge auftreten. Die bekanntesten Schadarten sind *Agriotes lineatus*, *Agriotes obscurus*, *Agriotes sputator* oder *Agriotes ustulatus*. Sie sind in vielen europäischen Ländern weit verbreitet.

Die Entwicklung der Larven ist bemerkenswert: Drahtwürmer durchlaufen einen langen Lebenszyklus, der je nach Art und Umweltbedingungen zwischen zwei und fünf Jahre dauern kann. In dieser Zeit leben sie ausschließlich im Boden, wo sie sich in mehreren Larvenstadien häuten und kontinuierlich an Größe zunehmen. Die ausgewachsenen Larven können bis zu 25 mm lang werden und zeichnen sich durch einen zylindrisch-schlanken, gelblich bis braun gefärbten Körper mit harter, glänzender Cuticula aus – daher auch der Name „Drahtwurm“. Dieser robuste Körper schützt sie nicht nur vor mechanischen Einwirkungen, sondern macht sie auch schwer angreifbar für viele natürliche Feinde wie zum Beispiel Laufkäfer oder insektentötende Nematoden.



Drahtwurm:
Larve von *Agriotes* sp.

Lebensweise und Schadpotential

Drahtwürmer bevorzugen feuchte, lockere Böden mit hohem Humusgehalt. Ihre Aktivität hängt stark von Temperatur und Bodenfeuchte ab: Besonders im Frühjahr und Herbst, wenn der Boden feucht und mäßig warm ist, sind sie besonders aktiv. In trockenen Sommern und im Winter ziehen sich die Larven in tiefere Bodenschichten zurück und pausieren ihre Fraßtätigkeit. Diese Mobilität erschwert nicht nur ihre Bekämpfung, sondern führt auch dazu, dass Pflanzenschutzmaßnahmen, die sich auf eine einzelne Vegetationsperiode beschränken, oft wirkungslos bleiben.

In vielen Böden kann man Larven verschiedener *Agriotes*-Arten finden: Typischerweise treten sie in Flächen mit durchgehend krautiger Vegetation auf. In Wiesen und Weiden erreichen sie ihre höchsten Dichten. Dort verursachen sie auch keinen Schaden, weil es ausreichend Pflanzenwurzeln gibt, von denen sie sich ernähren können. Die Situation ändert sich jedoch im Acker- und Gemüsebau, wo die eigentliche Schadwirkung durch den Fraß an keimenden Saatkörnern, Wurzeln, Keimlingen und unterirdischen Pflanzenteilen entsteht. In Kartoffeln fressen sie runde Löcher in die Knollen, die das Erntegut entwerten (*Abb. unten*). Bei Mais oder Getreide können sie die Keimlinge so stark schädigen, dass die Pflanzen nicht auflaufen oder frühzeitig absterben.



Drahtwürmschäden in einer Kartoffel

Warum chemische Bekämpfung an ihre Grenzen stößt?

In der Vergangenheit wurden Drahtwürmer oft mit synthetischen Bodeninsektiziden bekämpft. Doch der Einsatz solcher Mittel bringt zahlreiche Probleme mit sich: Sie sind teuer, oft wenig zielgerichtet, können nützliche Bodenorganismen schädigen und sind in vielen Ländern zunehmend reguliert oder verboten. Darüber hinaus zeigen Studien, dass die Wirkung vieler Mittel begrenzt ist, da die Larven sich der Behandlung durch Rückzug in tiefere Bodenschichten entziehen können.

Die zunehmenden Umwelt- und Gesundheitsbedenken sowie die wachsende Nachfrage nach nachhaltigen Produkten haben dazu geführt, dass der Fokus in Forschung und Praxis heute stärker auf ökologischen, präventiven und biologischen Bekämpfungsstrategien liegt.

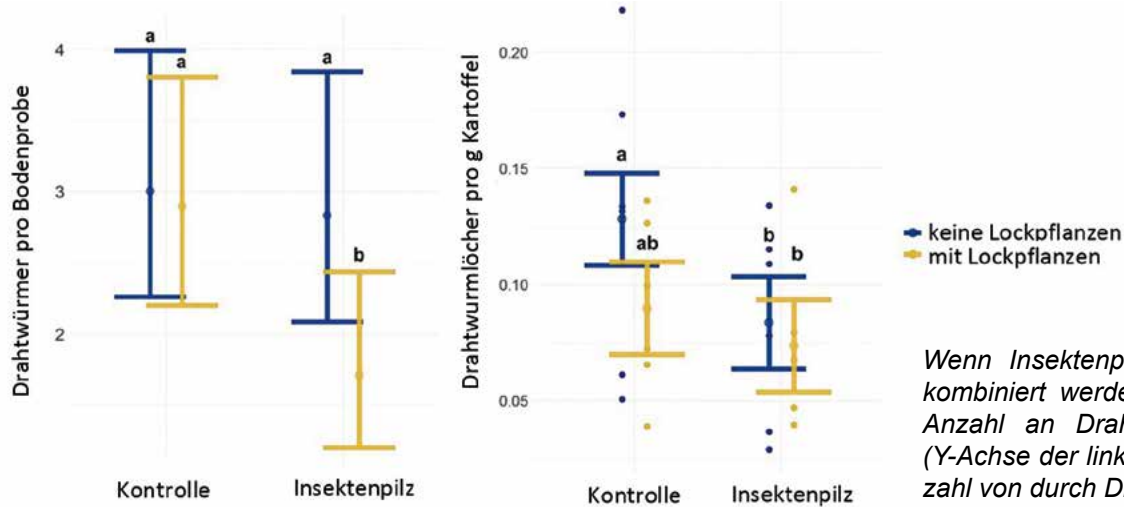
Förderung des Bodenlebens als Schlüssel zur Regulierung

Eine der vielversprechendsten Strategien zur Kontrolle von Drahtwürmern ist die Förderung eines aktiven, vielfältigen Bodenlebens. Zahlreiche Bodenorganismen – darunter Laufkäfer, Kurzflügler, Spinnen, räuberische Nematoden oder auch Pilze und Bakterien – wirken direkt oder indirekt regulierend auf Drahtwurmpopulationen. Laufkäfer beispielsweise fressen nicht nur die jungen Larven der Drahtwürmer, sondern auch deren Eier. Einige parasitäre Pilze, etwa aus der Gattung *Metarhizium*, befallen die Larven und können sie zum Absterben bringen.

Untersuchungen des Institutes für Zoologie an der Universität Innsbruck am Forschungsbahnhof in Imst konnten zeigen, dass durch den Einsatz von sogenannten Lockpflanzen Drahtwürmer von Mais und Kartoffeln abgelenkt werden können. Bis zu 50 % weniger Schaden an den Kulturpflanzen konnte in den Experimenten festgestellt werden, und das alles ohne den Einsatz von Chemie! Die Lockpflanzen werden zwischen die Kulturpflanzen eingesät und beinhalten zum Beispiel Buchweizen, Bohnen oder auch Weizen. DNA-Analysen am Darminhalt der Drahtwürmer zeigten, welche Pflanzenarten besonders gerne von ihnen gefressen werden und damit besonders attraktive Ablenkpflanzen sind.

Kombiniert man diese Lockpflanzen mit *Metarhizium brunneum*, einem Pilz, der besonders *Agriotes*-Larven befällt, zeigte sich, dass eine erhöhte Mortalität zu signifikant weniger Drahtwürmern führt und dass damit auch deutlich weniger Drahtwurmlöcher in den Kartoffeln zu finden sind (siehe Grafik). Die Ursache für die bessere Wirkung des Insektenpilzes in der Kombination mit den Lockpflanzen dürfte im

verbesserten Bodenmikroklima für den Pilz liegen, das durch die Lockpflanzen geschaffen wird. Somit kann man Drahtwürmern mit zwei Strategien begegnen: einerseits durch Weglocken und Ablenkung von den Kulturpflanzen und andererseits durch den Einsatz des *Metarhizium*-Bodenpilzes, der besonders dann gut gegen die Drahtwürmer wirkt, wenn zusätzliche Pflanzen im Acker wachsen und das Bodenleben unterstützen.



Entscheidend ist, dass die natürlichen Gegenspieler der Drahtwürmer stabile und vielfältige Lebensbedingungen benötigen, um sich entwickeln und vermehren zu können. Ein artenreicher, humusreicher Boden mit strukturreicher Vegetation, Mulchschichten oder Zwischenfrüchten bietet genau diese Voraussetzungen. In einem solchen Milieu entstehen komplexe Nahrungsnetze, in denen kein Schädling dauerhaft die Oberhand gewinnen kann.

Drahtwürmer sind zweifellos eine Herausforderung für die moderne Landwirtschaft. Doch anstatt auf kurzfristige chemische Lösungen zu setzen, zeigt sich immer deutlicher, dass der Weg zu einer effektiven und nachhaltigen Kontrolle über das Bodenökosystem selbst führt. Ein lebendiger, gesunder Boden mit hoher biologischer Vielfalt bietet die besten Voraussetzungen dafür, dass Schädlinge wie Drahtwürmer nicht überhandnehmen können. Die Förderung von natürlichen Gegenspielern, der Erhalt der Bodenstruktur, vielfältige Fruchtfolgen und eine reduzierte Bodenbearbeitung sind dabei keine Einzelmaßnahmen, sondern Teil eines integrativen Gesamtkonzepts nachhaltiger Bodenbewirtschaftung in der Landwirtschaft.

Wenn Insektenpilze mit Lockpflanzen kombiniert werden, verringert sich die Anzahl an Drahtwürmern im Boden (Y-Achse der linken Grafik) und die Anzahl von durch Drahtwürmer verursachten Löchern an Kartoffeln nimmt signifikant ab (Y-Achse der rechten Grafik). Unterschiedliche Buchstaben indizieren statistisch signifikante Unterschiede ($P < 0,05$). Diese Ergebnisse wurden durch Versuche des Institutes für Zoologie am Forschungsbauernhof Imst der Universität Innsbruck gewonnen.

Abbildung modifiziert nach Brunner et al. (2024)

<https://doi.org/10.1007/s10340-023-01726-1>

A close-up photograph of a field. The ground is covered with a thick layer of dry, yellowish-brown straw or mulch. Several small, young green plants with heart-shaped leaves are growing through the straw. The plants are vibrant green, contrasting with the dry straw. The lighting is bright, suggesting a sunny day.

Den Ackerboden beleben

Den Ackerboden beleben - eine Anleitung, wie es gelingen kann

Ackerbau lässt sich auf verschiedene Weise betreiben. Im Extremfall nutzt man den Boden nur als Substrat, in dem die Nutzpflanzen wurzeln, man bearbeitet ihn mit schwerem Gerät und fügt die für das Wachstum notwendigen Nährstoffe hinzu. Dadurch geht aber die natürliche Bodenstruktur verloren, Bodenorganismen verschwinden, man setzt den Boden der Erosion durch Wind und Wasser aus, reduziert seine Speicherkapazität für Wasser und CO₂ und handelt sich damit auch negative Folgen für die gesamte Umwelt ein. **Doch es geht auch anders!** Viele Landwirte sind bemüht,

so weit wie möglich die natürliche Kapazität des Bodens mit seinen Organismen, von Bakterien und Pilzen bis zu den Tieren, zu nutzen und mit viel Einfühlungsvermögen eine ertragreiche Ernte zu erzielen. Auf den kommenden Seiten finden Sie neben Zusammenhängen im Ökosystem unserer Äcker viele wichtige praktische Empfehlungen und Anleitungen, wie das gelingen kann. Dabei liegt der Fokus ausschließlich auf der bestmöglichen Förderung des Bodenlebens, egal ob ein Betrieb biologisch oder konventionell geführt wird.

Der Boden im Klimawandel

Durch global steigende Temperaturen sowie zunehmende Extremwetterphänomene wie Starkregen und Überflutungen, aber auch Hitzeperioden und Dürre wird unser Boden starken Belastungen ausgesetzt. Aber gerade der Boden ist ein Puffersystem im Klimawandel. Er ist es, der uns helfen kann, indem er Wasser für Trockenperioden speichert oder bei Starkregen Wasserretention bietet.

Damit das System Boden gut funktionieren kann und stabile landwirtschaftliche Erträge liefert, muss der Boden zu 100 % fit sein. Die Bodenphysik (Aggregate, Poren, Luft, Hohlräume)

muss genauso stimmen wie die Bodenchemie (Nährstoffe) und die Bodenbiologie (alles Leben im Boden). Um im Klimawandel bestehen zu können, müssen all diese Dinge bestmöglich funktionieren, um diese wichtige Pufferfunktion leisten zu können. Gerade hier haben Landwirte durch ihre Bewirtschaftung maßgeblichen Einfluss, all diese Funktionen in die gewünschte Richtung zu beeinflussen. Durch die Intensität sowie Art und Weise der Bodenbearbeitung (oder auch Nichtbearbeitung) haben wir diese Funktionen in unserer Hand.



Wir entscheiden durch die Wahl unserer Feldfrüchte über die Fruchtfolge und über positive oder negative Auswirkungen für den Boden. Wir sind es, die einen Boden im Sommer entweder ungeschützt und offen der Sonne und Starkregen aussetzen oder durch Zwischenfrüchte bewachsen oder mit Stroh bedeckt schützen. Oder ob wir bei zu nassen Verhältnissen Verdichtungen im Boden erzeugen, die sich über Jahre nicht wieder beheben lassen und so die Wasserspeicherfähigkeit negativ beeinflussen sowie viele andere wichtige Funktionen wie die Bodenatmung und den Gasaustausch. Und gerade im Klimawandel kommt dem Boden eine zentrale Rolle zu, ob wir uns anpassen können oder ob sich Wüsten bilden.

Schäden durch Erosion in Steinabrunn 2018 nach 76 mm Niederschlag in einer Stunde.

Einfache Grundsätze

Im Grunde ist es sehr einfach, unseren Boden und unser Bodenleben zu schützen und zu fördern. Wir müssen, einfach gesagt, jedem Lebewesen seinen Raum geben und genügend Nahrungsgrundlagen zur Verfügung stellen. Wie erreichen wir das?

Jede Störung im Boden ist schlecht. Daher ist es wichtig, so wenig wie möglich im Boden zu arbeiten, aber so viel, wie eben nötig ist, um stabile Erträge zu erhalten. Je weniger man eingreift, umso mehr können die Bodenlebewesen sich natürlich entfalten und gedeihen. Die FAO (Welternährungsprogramm der UNO) nennt dieses Prinzip die „**Minimale Bodenstörung**“.

Um das Bodenleben mit ausreichend Nahrung zu versorgen, sind eine biodiverse Fruchtfolge mit vielen Zwischenfrüch-

ten und Untersaaten und am besten **dauernd bewachsene Böden** wichtig. Die Pflanzen produzieren durch Photosynthese Zucker und geben diesen teilweise über die Wurzeln an Bakterien und Pilze im Boden ab, die davon leben. Und jedes Leben im Boden bevorzugt andere Nahrung. Darum ist Vielfalt statt Einfalt angesagt. Die FAO bezeichnet das als „**Maximierung der Pflanzenvielfalt**“.

Unser Leben im Boden braucht aber auch Schutz. Es kann durch Pflanzen und organische Reste bedeckt und damit vor Hitze und Sonne geschützt werden. Es braucht gemäßigte Temperaturen im Boden und nicht bis zu 60°C, wie es bei offenem Boden im Sommer oft der Fall ist.

Daher ist für die FAO „permanente Bodenbedeckung“ als Schutz ein Muss!

Die drei Prinzipien der „Conservation Agriculture“ gemäß FAO lauten:

**Minimale Bodenstörung
Permanente Bodenbedeckung
Maximale Pflanzenvielfalt**

Man kann diese Begriffe gerne noch erweitern um „Umstellung der Denkweise“, „Ganzjährig lebende Wurzeln“ und die „Integration von Tieren“, wie es die „**Regenerative Landwirtschaft**“ postuliert.

Die 6 Prinzipien der Regenerativen Landwirtschaft



Maximale Pflanzenvielfalt: Welchen Einfluss hat die Fruchtfolge auf das Bodenleben?

Angehende Landwirte lernen die Vorteile von Fruchtfolge bereits in ihrer Ausbildung. Sie bekommen eine gute Übersicht, welche Kulturen sich als Vorfrucht oder Nachfrucht gut eignen. Da geht es einerseits um zeitliche Abfolgen und dazwischenliegende „Ruhezeiten“. Aus der Vegetationsabfolge in unseren Breiten ergeben sich in der Praxis natürliche Kombinationsmöglichkeiten.

Darüber hinaus wird aber auch die Wirkung der sogenannten „**Bodengare**“ einer Vorkultur auf die Nachkultur berücksichtigt bzw. der Abbau der Ernterückstände, damit die neue Kultur sich leichter tut.

Betrachtet man, welche Kulturpflanzen welche Art von Nährstoffen mobilisieren und für „bedürftige“ Nachkulturen hinterlassen, kann man ebenfalls kluge Fruchtfolgen erstellen. Klassisches Beispiel sind hier Leguminosen wie z.B. Erbsen, die mithilfe von Knöllchenbakterien Stickstoff aus der Luft erschließen. So kann darauffolgend z.B. Qualitätsweizen (mit hohen Proteingehalten) davon profitieren. Aber darin liegen auch Probleme. So braucht Weizen im Herbst nur wenig Stickstoff. Bei nasser Witterung kann daher der von den Erbsen gelieferte Stickstoff über den Winter in tiefe Bodenschichten oder ins Grundwasser verloren gehen.

Daraus kann auch eine unerwünschte Belastung des Grundwassers mit Nitrat resultieren. Hier wäre es besser, relativ rasch nach der Ernte der Erbsen womöglich Winterraps zu säen, der sehr viel Stickstoff braucht und diesen im Herbst auch gut aufnehmen kann. Doch auch hier ist Vorsicht geboten. Warum? Und da kommen wir auch schon zum nächsten Punkt, den man in der Fruchtfolge berücksichtigen muss. Es geht um die Übertragung oder Unterbrechung von Krankheiten und das Auftreten von Schädlingen. In unserem Beispiel mit Raps nach Erbse muss man wissen, dass die Erbse unter Umständen von Sklerotinia-Pilzen befallen sein kann, die u.U. nahtlos auf den Raps übertragen werden. Das kann den Einsatz von Pflanzenschutz erforderlich machen oder ansonsten Einbußen beim Ertrag mit sich bringen. Es gibt hier noch viele andere Beispiele dazu.

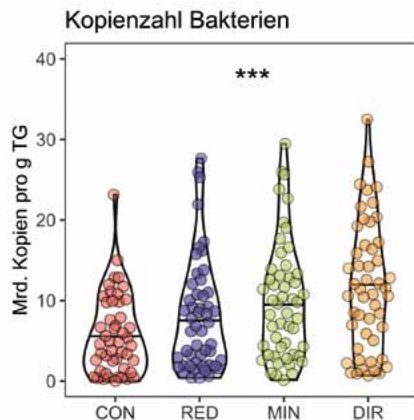
Berücksichtigt man diese Erkenntnisse in der Gestaltung der Fruchtfolge sowie einen Wechsel von Blatt- und Halmfrüchten bzw. Winterkulturen und Sommerkulturen, so kann man nicht nur Dünger einsparen (v. a. Stickstoff), sondern die Pflanzen gesünder erhalten. Das spart wiederum Pflanzenschutzmittel, vor allem Fungizide, Wachstumsregler und Insektizide. Manchmal auch Herbizide, wenn dadurch der Lebenszyklus von Unkräutern durchbrochen wird. So kann z.B. Windhalm (ein einjähriges Süßgras) sehr effektiv durch Sommerkulturen hintangehalten werden.

Gerade Pflanzenschutzmittel belasten das Bodenleben. Schließlich müssen diese von Mikroorganismen abgebaut werden. Man darf nicht vergessen, dass vor allem die natürlich im Boden befindlichen Pilze stark zu kämpfen haben, wenn Fungizide abzubauen sind. Bodenpilze sind aber

sehr nützlich, um Wasser und Nährstoffe für die Pflanzen bereitzustellen. So leben Mykorrhiza-Pilze in Symbiose mit Pflanzen und liefern ihnen Wasser und Nährstoffe im Austausch für Zucker, den sie sich nicht selber herstellen können. So wird unter anderem die Reichweite der Pflanzenwurzeln auf das 2- bis 3-Fache erweitert. Eine sehr wertvolle Gemeinschaft bei trockenen Verhältnissen oder bei niedrigem Phosphorgehalt im Boden!

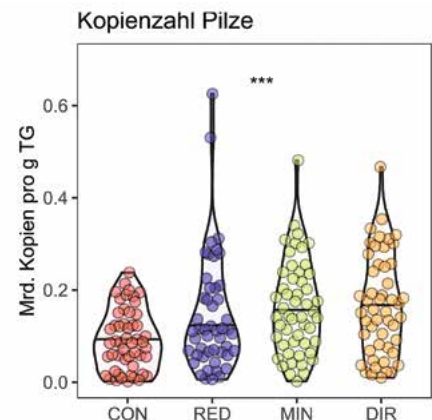
Das *Austrian Institute of Technology (AIT)* in Tulln hat unter anderem im *EIP Agri Projekt Boden.Biodiversität* die Zusammensetzungen von Pilzen und Bakteriengesellschaften im Boden untersucht. Es zeigte sich, dass durch Veränderungen der Bewirtschaftung kaum neue Arten in diese Gemeinschaften gelangen, aber vorhandene Arten in Anzahl bzw. Masse zunehmen. Führt man gezielt neue Arten zu, wird man diese nur kurzfristig finden, ehe sie von den im Feld vorherrschenden Arten wieder verdrängt werden und schließlich kaum noch nachweisbar sind. Die Gesamtmasse der Pilze und Bakterien steigt von der Pflugparzelle bis zur Direktsaatparzelle an (*siehe Grafiken*).

Man kann daher sagen, dass eine Reduktion der Bodenbearbeitung sich grundsätzlich positiv auf das Leben im Boden auswirkt. Würde es gelingen, unter Ackerland Verhältnisse wie in einer Wiese zu schaffen, würde das Bodenleben allgemein stark an Masse zulegen. Am nächsten an diesen Wiesenzustand kommt die **Direktsaat**, also das **No-Till-Verfahren**, heran. Durch diese Bodenruhe (**No-till = keine Bodenbearbeitung**) kann sich das Bodenleben nahezu ungestört entwickeln und für uns positive Arbeit leisten. Das veranschaulichen die folgenden Grafiken.



Vermehrungsrate (Kopienzahl) von Bakterien und Pilzen im Ackerboden bei verschiedenen Bearbeitungsmethoden.

(CON = konventionell,
RED = reduziert,
MIN = minimal,
DIR = Direktsaat)



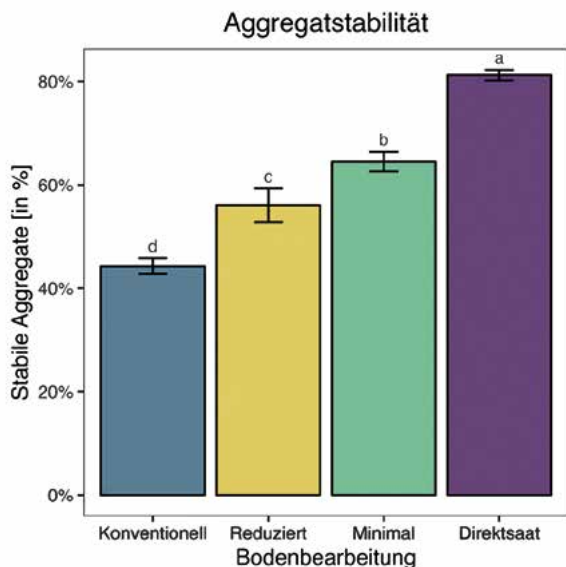
Fassen wir also diesen Themenblock kurz zusammen: Eine ausgeklügelte und **intelligente Fruchtfolge** kann Dünger und auch Pflanzenschutzmittel einsparen helfen. Sie kann den Ertrag positiv beeinflussen sowie bei Krankheiten und Schädlingen vorbeugend wirken. Durch vielfältige Fruchtfolgen sowie die Reduktion (bis zum Verzicht) der Bodenbearbeitung (No-Till) kann das Leben im Boden positiv beein-

flusst werden. Das Leben im Boden wiederum erledigt viele Arbeiten im Boden im Zusammenspiel mit Pflanzen und deren Wurzeln gratis. Man muss sich nur zurücklehnen und abwarten können. Es braucht dazu nur ausreichend Nahrung in Form von organischer Masse wie Stroh, Kompost oder Stallmist und Zwischenfrüchte zur Gründüngung. Sehen wir uns nun den Nutzen der Zwischenfrüchte genauer an!

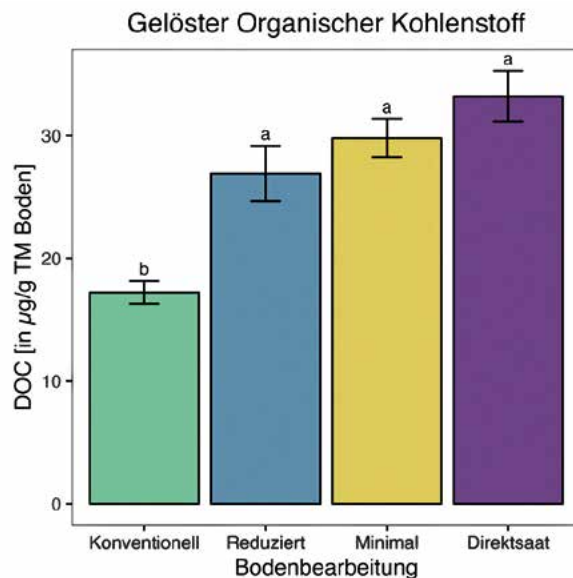
Zwischenfrüchte Der Schlüssel zu mehr Bodenfruchtbarkeit

Bei der Anpassung an den Klimawandel kommt gerade Zwischenfrüchten eine zentrale Stellung zu. Sie lockern die Fruchtfolge auf, bedecken und schützen den Boden (Erosion, Hitze), liefern Nährstoffe und verbessern den Boden, der dann wieder mehr Wasser speichern kann. Neben dem Einsatz von Stallmist und Kompost sind Zwischenfrüchte als Gründüngung hervorragend geeignet, das Bodenleben und die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern. Zwischenfruchtmischungen mit vielen Arten stellen dabei große Mengen an Nährstoffen für das Bodenleben bereit. Beim Wachstum der Pflanzen wird der durch Photosynthese gewonnene Zucker teilweise über die Wurzeln an das Bodenleben in diesem Bereich abgegeben. Das nennt man den „**Liquid Carbon Pathway**“, zu Deutsch den „**Flüssigen Kohlenstoff-Weg**“.

So entstehen regelrechte Hotspots des Lebens um die Wurzelspitzen herum. Die diversen Mikroorganismen wiederum bewirken eine sogenannte „**Lebendverbauung**“ **des Bodens**. Sie sind die Bauarbeiter des Bodens, wenn man so will. Mit ihren Ausscheidungen werden Bodenteile zu stabilen Krümeln zusammengeklebt und verbunden. Dabei spielt auch Kalzium im Boden eine wichtige Rolle. Durch diese Lebendverbauung entstehen **stabile Aggregate** (*linke Grafik*), die sehr widerstandsfähig sind gegenüber jedweder Erosion. Durch die Art und Weise der Bewirtschaftung haben wir maßgeblichen Einfluss darauf, wie gut ein Boden der Erosion standhalten kann. Anhand von Messungen des **leicht löslichen Kohlenstoffs** (*rechte Grafik*) im Boden kann der Einfluss der Bewirtschaftung sehr einfach verdeutlicht werden.



Aggregatstabilität und gelöster organischer Kohlenstoff in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung.





*Raps mit Begleitsaat Ackerbohne, Öllein und Buchweizen.
Biodiverse Zwischenfrüchte schützen den Boden und fördern
alles Leben im und auf dem Boden.*



Neben der massiven Verbesserung der Bodenstruktur durch eine intensive Durchwurzelung mit artenreichen Zwischenfruchtmischungen steigt auch das Porenvolumen im Boden und damit das Wasserspeichervermögen der Böden. Bei No-Till oder stark reduzierter Bearbeitung kann, wie unser Projekt „*Boden. Pioniere*“ zeigt, das Porenvolumen der Mittelporen um bis zu 65 % steigen, was zu einer bis zu 20 % höheren Wasserspeicherfähigkeit des Bodens führt. Dieses Wasser kann gerade in Trockenzeiten entscheidenden Einfluss auf den Ertrag der Kulturpflanzen haben. Eine Verbesserung des Wasserhaushalts beginnt somit bei der Wahl der richtigen Zwischenfruchtmischung, des Anlagezeitpunkts und der Bearbeitungsweise. Es gilt in diesem Fall, so schnell wie möglich nach der Ernte der Hauptkultur eine Zwischenfrucht zu säen und das mit so wenig Bodenbearbeitung wie möglich.

Wie wir aus mehreren Forschungsprojekten (www.hswt.de/forschung/projekt/1609-bonares-catchy-3 und www.dsv-saaten.de/produkte/zwischenfruechte/forschungsprojekt-catchy) wissen, schließen unterschiedliche Pflanzen gemeinsam mit Bodenlebewesen auch unterschiedliche Nährstoffe auf und hinterlassen diese in verfügbarer Form für die nächste Kulturpflanze. Somit ist eine **biodiverse Zwischenfruchtmischung** in der Lage, ein weites Spektrum an Nährstoffen zu erschließen, das an die folgende Kultur weitergegeben wird. Und dabei geht es nicht nur um Stickstoff oder Phosphor, sondern auch um sämtliche Spurenelemente. Man kann daher auch gezielt **Begleitsaaten** oder **Untersaaten** zu Hauptkulturen nutzen, um gezielt Nährstoffe für die Hauptkultur nutzbar zu machen. Daneben wird das Bodenleben gefördert. Im besten Fall helfen sie sogar, Schädlinge oder Krankheiten abzuwehren. Begleitsaaten werden gerne bei Raps genutzt, um vor allem für Pilze im Boden Nahrung heranzuschaffen, da Raps keine Symbiose mit Mykorrhiza-Pilzen eingeht. Leguminosen als Begleitsaat reichern Stickstoff an, somit braucht der Raps weniger Dünger. Und auch der Druck von Schädlingen, wie dem Raps-Erdfloh (Blattkäfer), fällt geringer aus. Untersaaten werden gerne in erosionsanfälligen Kulturen wie Mais oder Sonnenblume verwendet, um eben diese zu verhindern. Nach der Ernte wird dadurch das Feld von selbst grün und der Boden bleibt bedeckt.

Am besten können wir dieses Thema so zusammenfassen: In üppigen, vielfältigen Zwischenfrüchten pulsiert das Leben im und auf dem Boden. Es ist geschützt vor Hitze und Trockenheit und bietet jede Menge Nährstoffe. Dadurch arbeitet das Bodenleben gemeinsam mit den Pflanzen all das, wozu wir sonst Maschinen einsetzen müssten. Es bilden sich, wenn man die Flächen in Ruhe lässt, richtige

Nahrungskreisläufe des Lebens, weil die einzelnen Glieder der vielfältigen Nahrungskette ineinandergreifen und sich einnischen (*siehe Seite 53*). Und alle miteinander erledigen Arbeiten für den Landwirt gratis. Das führt zu mehr Humus im Boden, mehr Wasser und gemäßigten Temperaturen, kurzum auf lange Sicht zu mehr Bodenfruchtbarkeit und stabileren Erträgen.

Bodenbearbeitung – die zentrale Stellschraube

Nichts hat einen größeren Einfluss auf das Bodenleben als die Intensität und Art der Bearbeitung des Bodens. Über Jahrtausende hat sich das Bodenleben an die natürlichen Abläufe und Kreisläufe im Boden angepasst. Jede Art hat ihren Lebensraum besetzt und erfüllt ihre Funktion in einer schier endlosen Kaskade entlang der Nahrungskette. Als die Menschen einst sesshaft wurden und mit Ackerbau sowie Viehzucht begannen, gab es keine Maschinen. Die Menschen haben den Boden mit einfachsten Mitteln, wie Holzwerkzeugen und Steinen, bearbeitet. Dabei haben sie den Boden kaum angeritzt und das Bodenleben nur wenig gestört. Später gab es dann erste Pflüge, die, verglichen mit den heutigen Geräten, auch nur mäßige Eingriffe mit sich brachten. Es gab ja nur Rinder und Pferde oder Menschen, die den Pflug ziehen konnten. Von daher war die Tiefe und Intensität der Bearbeitung limitiert.

Heute stören wir durch Pflügen massiv die natürlichen Abläufe im Boden, wobei manche Lebewesen in den Hintergrund gedrängt werden oder gar verschwinden. Damit werden Kreisläufe entlang der Nahrungskette gestört und das hat oft ungeahnte Folgen. So können sich Schädlinge leichter vermehren, weil durch die Bodenbearbeitung natürliche Prädatoren abhanden kamen. Oder manche Arten finden plötzlich viel bessere Lebensbedingungen vor und vermehren sich dadurch stärker, weil andere fehlen, die sonst dieselben Nischen bzw. dieselbe Nahrung genutzt hätten.

Aber damals, am Ende der Altsteinzeit, begann mit dem Ackerbau das, was wir heute Sukzession nennen. Nämlich die langsame ökologische Transformation von Waldlandschaften über ausgelichtete Wälder, weiter über Wiesen und Weiden und dergleichen bis hin zum Acker von heute. Vergleicht man Waldböden mit einem Acker, so fällt sofort auf, dass bei natürlichen Wäldern alles, was abstirbt, an der

Oberfläche liegen bleibt. Beim Acker hingegen wird jegliche organische Substanz im Boden eingemischt. Das hat unterschiedliche Auswirkungen auf das Bodenleben. Im Wald und, etwas eingeschränkter auch im Grünland, dominieren Pilze gegenüber Bakterien. Sie leben ungestört im Boden, oft in Symbiose mit den Pflanzen. Sie liefern den Pflanzen Wasser und Nährstoffe und erhalten dafür Zucker. Andere Pilze wiederum haben sich auf den Abbau von organischer Substanz spezialisiert und beziehen so ihre Energie aus den organischen Resten.

Eine weitere Gruppe sind pathogene Pilze, die andere Lebewesen besiedeln und schädigen. Bearbeitet man nun den Boden, werden Hyphengeflechte durchschnitten. Passiert das immer wieder und wieder, reduziert sich die Pilzbiomasse zunehmend oder sie wird durch robustere Arten ersetzt. Im Ackerland haben daher die Bakterien die Oberhand gewonnen.

Liegt im Wald das Verhältnis der Masse von Pilzen zu Bakterien bei 10:1 oder darüber, liegt das Verhältnis in heutigen Äckern bei 1:1 oder weniger. Warum ist das so? **Bakterien sind wahre Anpassungskünstler**. Aufgrund ihres Lebens- und Reproduktionszyklus können sie sich sehr schnell an neue Gegebenheiten anpassen. Zudem profitieren sie durch Bodenbearbeitung, da immer wieder Leben im Boden stirbt, welches wiederum Nahrung für andere, wie eben Bakterien, ist. Durch die Bearbeitung kommt Sauerstoff in den Boden und es setzen viele Oxidationsprozesse ein. Es werden Stickstoff und Kohlenstoff freigesetzt, quasi „verbrannt“. Davon leben nicht nur Pflanzen, sondern auch viele Bakterien und Bodentiere. Neben den Pilzen, welche die Bodenbearbeitung nicht vertragen, sind es vor allem Regenwürmer, die unter Bodenbearbeitung, speziell durch den Pflug, besonders leiden (*siehe Seite 83*).

Bodenbearbeitung und Bodentemperatur

Stellen wir uns einen „ordentlich bearbeiteten“ schwarzen Acker im Sommer vor. Je nach Bodenart und Farbe werden mittags bei Sonnenschein Temperaturen zwischen 50 und 60°C und mehr gemessen (Abb. rechts). Lebewesen, die nicht in tiefere und somit kühlere Schichten im Boden flüchten können, werden regelrecht gegart und sterben zu Milliarden!

Durch das Fehlen dieser Lebewesen können die Bodenteilchen nicht mehr miteinander verklebt und verbaut werden. Die Bodenstruktur leidet somit und kann zerstört werden. Und da ja Sommer ist, sind Gewitter nicht weit. Der Boden ist jetzt noch viel stärker Wind und Wetter und somit der Erosion schutzlos ausgeliefert. Starkregen schließt relativ rasch die Oberfläche des Bodens, der Boden verschlämmt. Das Wasser an der Oberfläche bildet kleine Wasserläufe und die fruchtbare Erde wird weggeschwemmt.

Feld nach einem Staubsturm im Feber 2022



Temperaturmessung im „nackten Feldboden“ im Sommer bei Sonnenschein

Der Aufbau von 1 cm gesundem Boden dauert 100 Jahre. Bei einem schweren Erosionsereignis kann daher Boden weggeschwemmt werden (Seite 65), der über mehrere 100 Jahre gebildet wurde! Neben Starkregen kann aber auch starker Sturm alleine Staubwolken bilden und die fruchtbare Erde wegwehen (Abb. links).

Das Ergebnis ist dasselbe – zurück bleibt ein geschwächter Boden, der massiv Ertragskraft und Fruchtbarkeit sowie Leben verloren hat. Das gilt es unbedingt zu verhindern! Und hier ist die gute Nachricht – wir können es!

Ein Getreideacker kann durch eine **Strohdecke** im Sommer geschützt werden (Abb. nächste Seite). Das Stroh wirkt wie eine Isolierung und bewahrt die Feuchtigkeit im Boden und senkt die Temperatur, sodass Bodenleben sich bei 35°C Außentemperatur unter dem Stroh bei ca. 25 °C wohlfühlt. Feuchtigkeitsmessungen im Boden zeigen oft unter Strohbedeckung einen doppelt so hohen Wassergehalt wie im bearbeiteten, unbedeckten Boden.

Als Alternative zur Strohbedeckung ist auch die **Aussaat von Zwischenfrüchten** geeignet. Diese schützen durch ihr Wachstum den Boden vor Sonne und Hitze, verhindern den Abfluss von Wasser bei Starkregen, der wiederum in tiefere Schichten gelangt und gespeichert werden kann. Es entsteht auch ein kleiner Wasserkreislauf durch die Verdunstung der Pflanzen. Und Wasser, das verdunstet, entzieht der Umgebung Wärme. Eine Klimaanlage am Feld sozusagen.

Und hier möchte ich ein Zitat von Allen Savory (Landwirt und Autor in Zimbabwe) in Erinnerung rufen, der einst sagte: „*Es ist nicht die Dürre, die nackten Boden verursacht. Es ist nackter Boden, der Dürren verursacht!*“

Für uns gilt daher als oberste Maxime: **Der Boden muss immer bedeckt sein!** Sei es durch Strohreste (siehe Abb. rechts und Seite 64), Zwischenfrüchte (Seite 69) oder die Kulturpflanze selbst! Nehmen wir uns das zu Herzen! Unser Boden und sein Bodenleben werden es uns durch stabile Erträge danken!

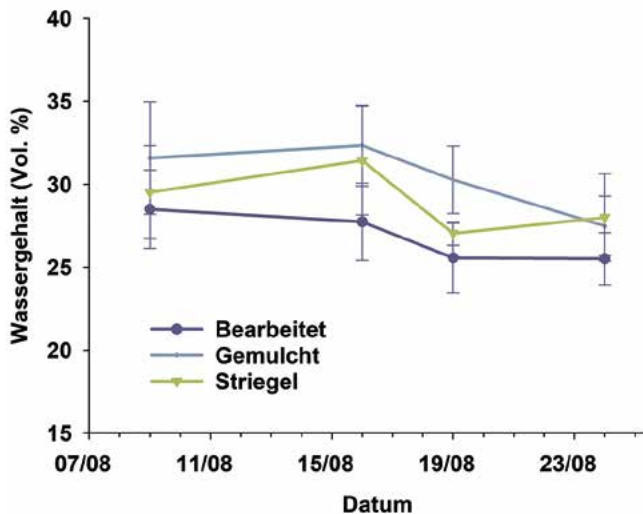


Strohdecke auf einem Acker: **links** nach Einsatz eines Schwerstriegels, **rechts** nach Einsatz eines Mulchers.

Bodenbearbeitung und Wasser

Wen das alles noch nicht überzeugt, der möge einen Blick auf die Wasserbilanz der Böden werfen. Wie weiter oben schon berichtet, kann durch optimale (Nicht)Bearbeitung der Böden die Wasserspeicherfähigkeit der Böden (nutzbare Feldkapazität) um bis zu 20 % gesteigert werden. In einem Versuch mit verschiedenen flachen Bodenbearbeitungsvarianten wurde in verschiedenen Abständen der Wassergehalt im Boden gemessen. Die Grafik zeigt, dass durch Bodenbearbeitung relativ viel Wasser verloren geht, im Gegensatz zur Abdeckung durch Stroh. Dabei waren in dem Versuch nur Geräte zur flachen Bearbeitung eingesetzt worden.

Bei der tiefsten Bearbeitung mit einer Scheibenegge mit 10 cm (nicht in der Grafik enthalten) war im Vergleich zum Strohmulch im schlimmsten Fall nur halb so viel Wasser im Boden enthalten. Hätte man statt flach arbeitenden Geräten auch eine tiefe Bearbeitung mit dem Grubber oder gar Pflug dazu genommen, wäre die Differenz noch größer ausgefallen. In der Schule lernt man, dass zum Beispiel durch den Einsatz des Pfluges 30 bis 40 l Wasser pro m² verloren gehen. Das ist bei einem Boden mit einer nutzbaren Feldkapazität von z.B. 200 l pro m² schon sehr viel, nämlich um 20 %. Um Wasser zu sparen, gilt daher die Devise: Weniger ist mehr! **Weniger Bearbeitung bedeutet mehr Wasser im Boden!**



Zeitverlauf des Wassergehaltes im Ackerboden bei verschiedenen Bearbeitungsmethoden

Wege zum gesunden und fruchtbaren Boden

Als aufmerksame(r) Leser/in wissen Sie ja nun schon, dass Eingriffe in den Boden das Bodenleben stören oder gar töten und Nahrungskreisläufe durcheinanderbringen können. Wie schaffen wir es aber, stabile und hohe Erträge zu generieren, ohne den Boden allzu sehr zu beeinträchtigen? Im Idealfall muss es uns gelingen, einen Acker wie eine Wiese zu bewirtschaften! Soll heißen: keinen Eingriff in den Boden, aber trotzdem Kulturpflanzen wie Weizen, Mais und Co. zu kultivieren. Das ist nur möglich in **No-Till/Direktsaat-Systemen** unter Einsatz spezieller und eigens dafür konzipierter Sätechnik. Es ist aber auch oft schon viel getan, wenn man durch **Mulchsaatverfahren** so wenig wie möglich und so flach wie möglich in das System Boden eingreift. Sehen wir uns beides näher an.

No-Till/Direktsaat Verfahren

In diesen Systemen gibt es keine Bodenbearbeitung!

Es wird lediglich ein kleiner Schlitz im Boden gezogen, in dem das Saatgut abgelegt wird. Die Poren des Bodens bleiben nahezu ungestört und können ihre Funktion weiter erfüllen. Dieser ungestörte Boden hat viele Vorteile. Der Boden kann durch die bessere Bodenstruktur, sein natürliches Porensystem und seine Regenwurmgänge sehr rasch und viel Wasser aufnehmen. Bei Starkregen schluckt dieser Boden nahezu alles Wasser und verteilt es horizontal und vertikal. Durch diese Poren und die intakte Bodenstruktur wirkt dieser Boden wie ein Schwamm: Er saugt sich mit Wasser voll.

Sehr schön zu beobachten ist das bei Zuckerrüben in heißen, trockenen Sommern, wenn klassisch bestellte Rüben die Blätter auf den Boden legen und teilweise absterben. Man spricht hier von „*schlafenden Rüben*“. Und ein Feld weiter sieht man grüne Rüben mit stehenden Blättern auch in der Hitze des Nachmittags. Ein untrügliches Zeichen, dass es hier mehr Wasser geben muss. Daneben schafft die Bedeckung des Bodens auch für das Bodenleben angenehme Temperaturen von maximal 30 °C im Gegensatz zu offenen Flächen mit bis zu 60° C, wir erinnern uns! Ein Multitasking-Wunder: mehr Wasser, niedrigere Bodentemperaturen, aktives Bodenleben und das bei stabil hohen Erträgen. Auch Dünger und Pflanzenschutz können vielfach eingespart werden.

Um einen Umstieg zur Direktsaat ohne Probleme zu schaffen, gibt es dazu eine gute Anleitung eines Pioniers aus Paraguay. Und zwar die **10 Punkte am Weg zur erfolgreichen Direktsaat nach Rolf Derpsch**.

Diese 10 Punkte zeigen sehr anschaulich, dass im Wesentlichen zuerst eine Änderung der Denkweise des

Direktsaat nach Rolf Derpsch

www.rolf-derpsch.com, Berater in Paraguay



1. **Kenntnisse und Erfahrungen sammeln (beson. Unkraut)**
2. **Bodenuntersuchungen (Nährstoffe ausgleichen, pH!)**
3. **Schlecht dränierte Böden vermeiden**
4. **Bodenverdichtungen und Pflugsohlen beseitigen**
5. **Bodenoberfläche einebnen**
6. **Bodenbedeckung herstellen (Stroh, Zwischenfrüchte)**
7. **Direktsaatmaschine kaufen**
8. **Beginnen auf Teilfläche – Erfahrungen sammeln**
9. **Ausgewogene Fruchtfolgen und Zwischenfrüchte einsetzen**
10. **Neue Entwicklungen beachten! Lebenslang dazu lernen! Mehrere Pläne machen für Notfälle!**

Landwirtes passieren muss und man die Zusammenhänge erkennen und verstehen muss. Natürlich muss man den Boden auf die Direktsaat vorbereiten, sowohl chemisch als auch physikalisch und biologisch. Aber ohne Änderung der Denkweise wird das schwer möglich sein. Interessant ist hier auch, dass erst Punkt 7, der Kauf der nötigen Technik, auf der Liste steht. Und **der wichtigste Punkt überhaupt ist lebenslanges Lernen!** Denn es gibt immer wieder Überraschungen, vor allem in No-Till-Systemen. Und das ist mit ein Grund, warum Landwirte vom „althergebrachten Kochrezept“ nicht weg wollen. Es wird mal was schiefgehen und eben nicht klappen. Doch wenn das „weiter wie bisher“ immer weniger funktioniert, ist auch nichts getan für die Zukunft. Wir müssen **aktiv mit dem Klimawandel leben lernen** und die Lösungen aus anderen Teilen der Welt an unsere Gegebenheiten hier in Europa anpassen! **Gemeinsam!**



Sämaschine im No-Till-Verfahren bei der Aussaat einer Zwischenfrucht

No-Till-Systeme führen nach bisherigem Stand des Wissens zu stabilen Erträgen, weniger Schwankungen im Ertrag, mehr Wasser im Boden, nahezu keiner Erosion, deutlich mehr Biodiversität und natürlichen Kreisläufen im Boden. Und langfristig gesehen natürlich zu besseren Einkommen der Landwirte.

Daneben zeigen Untersuchungen der Universität Innsbruck bei Weizenfeldern von No-Till-Pionieren in Niederösterreich eine erstaunlich hohe Vielfalt an nützlichen Insekten im Vergleich zu klassisch bearbeiteten Nachbarflächen.

Planting Green – Direktsaat in lebende Zwischenfrüchte

Eine spezielle Variante in No-Till-Systemen ist die Direktsaat in lebende Zwischenfrüchte. Gerne wird das bei Weizen im Herbst gemacht, um den Sommer über den Boden mit Zwischenfrüchten bedeckt zu halten. Eine andere Variante ist die Saat von Mais oder Soja in Grünschnittroggen. Auch sehr gut funktioniert die Saat von Hanf oder Sorghum in blühende Winterwicke. Allen gemeinsam ist der Schutz des Bodens und des Bodenlebens durch eine Zwischenfruchtdecke. Gerade bei Planting Green profitiert das Leben im und auf dem Boden enorm. Es gibt praktisch keine Störung, es gibt immer Wasser und „Futter“ sowie angenehme Temperaturen. Auch das Wild profitiert von dem üppigen Nahrungsangebot, zudem findet es Schutz und Deckung.

Wie funktioniert es nun in der Praxis? Zeitnah zur Ernte der Vorfrucht wird eine Zwischenfrucht auch in Direktsaat angebaut. In diese Zwischenfrucht wird die Hauptfrucht unter Verwendung der Direktsaattechnik sowie einer Quetschwalze eingesät. Die Quetschwalze ist wichtig, um die alte Zwischenfrucht an vielen Stellen zu quetschen, was die Austrocknung und den Abbau beschleunigt. Das hilft der neuen Hauptkultur, da diese dann leichter durch die Mulchschicht hindurchkeimt. In Versuchen zeigte sich ein positiver Effekt,

wenn die Quetschwalze 10 bis 14 Tage vor der eigentlichen Saat läuft. Der Abbau der organischen Masse startet damit früher und die neue Kultur findet bessere Bedingungen für die Keimung vor. Diese Aussagen gelten vor allem für die Saat von Weizen im Herbst.

Bei Weizen muss man zudem wissen, dass dieser den für die Backqualität nötigen Proteingehalt relativ spät im Juni mit Stickstoff aus tieferen Bodenschichten (bei Trockenheit aus 60 bis 90 cm Tiefe) bildet. Das kann vor allem in trockenen Gebieten manchmal ein Problem sein, weil die Zwischenfrucht im Jahr davor mehr oder weniger die gesamte Menge an freiem Stickstoff im Boden in der grünen Pflanzenmasse bindet. Der Boden ist praktisch leer an Stickstoff. Und wegen Trockenheit geht der Abbau der Zwischenfrucht zu langsam voran, als dass der darin enthaltene Stickstoff rechtzeitig in diesen tiefen Bodenschichten in verfügbarer Form ankommt und vom Weizen aufgenommen wird. Planting Green Weizen weist daher oft einen um ein bis zwei Prozent geringeren Proteingehalt auf, was große ökonomische Unterschiede von 200 bis 500 €/ha weniger bedeuten kann.

Um diesen Mangel auszugleichen, müsste man bereits im Herbst in die Zwischenfrucht **organische Dünger** ausbringen, die langsam über die Zeit in diese tiefe Bodenschicht gelangen. In Versuchen mit dem organischen Dünger „Kartoffelrestfruchtwasserkonzentrat“ konnten gleiche Proteingehalte erreicht werden. Zu berücksichtigen aus Sicht des Grundwasserschutzes ist aber, dass man die Witterung über den Winter nie vorhersagen kann. Es ist daher durchaus möglich, dass bei warmen Temperaturen über den Winter dieser an sich fest gebundene Stickstoff durch Bodenbakterien im Boden in eine pflanzenverfügbare und somit auswaschbare Form umgewandelt wird und durch größere Niederschläge in tiefere Schichten bis zum Grundwasser gelangen kann. Wobei gerade in üblicherweise trockenen Gebieten das Risiko dafür gering erscheint.

Neben dem geringeren Proteingehalt kann auch ein um 10 bis 30 % geringerer Ertrag die Folge sein, wieder vor allem in trockenen Gebieten. Warum? Nun wissen wir schon, dass nahezu der gesamte Stickstoff von der Zwischenfrucht „ausgeräumt“ wird. Daher ist es extrem wichtig, den Weizen rechtzeitig mit ausreichend Dünger zu versorgen. Jedoch liegt im Frühjahr immer noch eine dicke Mulchschicht auf dem Boden. Feste Düngekörner liegen obenauf und müssen durch Wasser gelöst werden und durch Regen zur Wurzel der Pflanzen gelangen. Das ist in trockenen Klimaten nicht immer gegeben und Dünger kann durch Umwandlungsprozesse in die Luft verloren gehen bzw. gleich für den Abbau

der organischen Masse genutzt werden und gar nicht zu den Wurzeln gelangen. Daher resultiert dieser negative Ertragseffekt. Abhilfe schafft hier das **Cultan-Düngeverfahren** (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition), eine Depotdüngung von Ammoniumdünger, bei dem flüssiger Stickstoff-Schwefel-Dünger mittels Injektionsrädern direkt zu den Wurzeln platziert wird. Um im Trockengebiet ähnliche Erträge und Qualitäten wie bei normalen No-Till-Flächen zu erreichen, sind bei Planting Green daher die organische Düngung im Herbst und die Injektion von Flüssigdünger im Frühjahr sinnvoll.

Man darf bei der Zwischenfrucht nicht vergessen, dass diese teils mehrere Tonnen an Trockenmasse bildet und für deren Abbau vor allem Stickstoff nötig ist. Und wenn wir Humus aufbauen wollen, braucht es eben pro Tonne Kohlenstoff in etwa 0,1 Tonnen Stickstoff, wobei ein Teil aus Leguminosen in der Zwischenfrucht selbst stammt. Aber eben nicht alles. Vieles spricht aber dafür, dass die aufgezeigten Probleme nach einigen Jahren abklingen. Durch die ständige Zufuhr von organischer Substanz und Stickstoff stellt sich irgendwann ein neues Humus- und Stickstoffniveau im Boden ein. Und wenn der C/N-Kreislauf auf einem höheren Niveau wieder stabil ist, finden laufend Nachlieferungen aus den bereits aufgebauten Humuspools statt und die Pflanzen werden wieder gut mit Nährstoffen versorgt. Langjährige Praktiker teilen diese Meinung.

Aussaat von Weizen direkt in eine lebende Zwischenfrucht im Oktober 2021



Bei der Saat von Mais und Soja in Grünschnittroggen ist hingegen der Entwicklungsstand des Roggens wichtig. Dieser muss unbedingt blühen, damit er gequetscht am Boden liegen bleibt. Das ist in unseren Breiten in etwa Mitte Mai bis Anfang Juni erst so weit. Fährt man zu früh, stellt sich der Roggen wieder auf und wächst weiter. In der Blüte bleibt er am Boden liegen und stirbt langsam ab.

Durch die dicke Mulchschicht kann es vor allem in nassen Jahren aber zu Problemen mit Schnecken kommen, die in seltenen Fällen zum totalen Ausfall führen können. Vorbeugend hilft hier nur, langfristig die Population der Laufkäfer zu fördern, die sehr effiziente Jäger sind (*siehe Seite 57*), oder der Einsatz von Schneckenkorn, das aber wiederum Regenwürmer schädigen kann.

Zudem muss festgehalten werden, dass durch das weite C/N-Verhältnis (Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis) des Roggenstrohs viele Nährstoffe, allen voran Stickstoff, zum Abbau der organischen Masse benötigt werden, was wiederum Probleme mit der Nährstoffversorgung der Hauptkultur bringen kann, vor allem bei Mais. Bei Soja ist das eigentlich von Vorteil, da die Pflanzen gezwungen werden, mit den (beimpften) Knöllchenbakterien eine enge Symbiose einzugehen, um an den Stickstoff zu kommen. Hohe mineralische Stickstoffgehalte im Boden signalisieren dem Soja: Es gibt genug Nährstoffe, ich brauche die Knöllchenbakterien nicht. Das rächt sich spätestens in einer Hitze- und Trockenperiode oder eben, wenn der vorliegende Stickstoff aufgebraucht ist.

Möchte man wegen der Zeit, die Mais und Soja zur Reife im Herbst brauchen, nicht so lange mit der Saat zuwarten, bis der Roggen blüht, so ist der Einsatz von Totalherbiziden eine Möglichkeit. Damit kann der Roggen im Schossen beseitigt werden und die Saat von Mais und Soja kann in etwa zum üblichen Zeitpunkt um Ende April herum erfolgen. Auch im Schossen des Roggens ist genügend Strohmasse vorhanden, um den Boden zu schützen und eine gute Mulchschicht zu erhalten. Aber auch hier muss der Roggen durch eine **Quetschwalze** auf den Boden gelegt werden. Es ist aber weit weniger organische Masse am Feld, die wiederum weniger Stickstoff zum Abbau benötigt, und auch die Probleme mit Schnecken sind geringer. Beim Ertrag ist dieser Soja oder Mais in etwa gleich zu herkömmlicher Saat. Bei der Saat in blühenden Roggen ist jedoch mit Mindererträgen zu rechnen, weil neben Problemen mit der Saat und Keimung selbst im Herbst die Zeit für die Einkörnung fehlen



Aussaat von Soja in stehenden Roggen

kann. Diese Variante wird eigentlich nur von Biobetrieben gewählt.

Eine relativ neue Anwendung des Verfahrens ist die Saat von Soja und Sorghum in blühende Winterwicke. Alternativ zu Wicke können auch Wintererbsen verwendet werden. Sowohl Hanf als auch Sorghum benötigen für gutes Wachstum relativ große Mengen an Stickstoff, welchen die Zwischenfrucht in großer Menge hinterlässt. Durch das enge C/N-Verhältnis der Wicken oder Erbsen wird diese organische Masse relativ schnell abgebaut, wodurch nur wenig Probleme bei der Keimung der neuen Kultur zu erwarten sind. Zeitlich gesehen sprechen wir hier von einer Saat um Mitte bis Ende Mai, manchmal Anfang Juni im Fall von Wicken, bei Wintererbsen doch zwei Wochen früher. Die Wicke scheint aber einen Vorteil bei Schneckenproblemen zu haben, was wahrscheinlich daraus resultiert, dass Wicken Selen mobilisieren, das für Schnecken giftig sein dürfte. Dies ist aber nur eine Hypothese, welche wissenschaftlich nicht belegt ist. Die bisherigen Erfahrungen im biologischen Landbau dazu zeigen, dass die Erträge durch diese Art der Saat in einem Fall bei Hanf sogar verdoppelt wurden. Zumindest liegen sie aber mindestens gleich mit herkömmlichen Verfahren mit dem massiven Plus für die Umwelt und das Bodenleben.

Betrachtet man die **Treibhausgasbilanzen** (Berechnung aller CO₂-Äquivalente gemäß Standardberechnungen des Weltklimarates IPCC) von Planting-Green-Verfahren, so sieht man sehr deutlich, dass vor allem die Speicherung von

CO₂ im Boden durch die Zwischenfrucht sowie das No-Till-Verfahren deutlich steigt. Gleichzeitig wird die Freisetzung von CO₂ so gut wie vermieden, da keine Bodenbearbeitung stattfindet, die sonst massiv zur Freisetzung beitragen würde. Kann man gleichzeitig die Emissionen verringern, wobei diese vor allem durch mineralischen Stickstoffdünger verursacht werden, so ist eine neutrale und teilweise positive CO₂-Bilanz möglich. Ein möglicherweise greifbarer ökonomischer Vorteil für die Landwirte samt ökologischen Vorteilen für die Umwelt und deren Biodiversität. Eine echte Win-win-Situation!



Links: Plantig-Green Aussaat von Hanf und zwei Monate später am selben Standort (rechts)

Mulchsaat oder Strip-Till-Verfahren

Anders als bei No-Till-Verfahren wird bei beiden Verfahren eine gewisse Bodenbearbeitung vorgenommen. Dabei gilt das Prinzip: So wenig wie möglich, so viel wie nötig. Am besten noch umgesetzt wird das bei **Strip-Till-Verfahren**. Hier wird nur der Streifen bearbeitet, wo das Saatgut platziert wird. Daneben ist unbearbeiteter Boden, der sich frei entwickeln kann. Die Verbreitung dieser Bearbeitung ist derzeit auf wenige Betriebe beschränkt.

Bei **Mulchsaat** wird meistens mit Grubber und/oder Scheibeneggen versucht, so flach und minimalinvasiv wie möglich zu arbeiten. Es ist an sich ein weit verbreitetes Verfahren heutzutage, was sowohl von konventionellen Betrieben als auch von Biobetrieben praktiziert wird. Die nötige Technik dazu ist weit verbreitet und es werden auch hier mehr oder weniger Zwischenfrüchte eingesetzt, jedoch tendenziell weniger als bei Direktsaatbetrieben.

Diese Verfahren stellen sowohl für das Bodenleben als auch für den Erosionsschutz und die Anpassung an den Klimawandel deutliche Verbesserungen gegenüber dem Pflugeinsatz dar. Jedoch sind dem auch rasch Grenzen gesetzt. Speziell Erosion ist letztendlich nur mit No-Till-Verfahren ausreichend hintanzuhalten.

Man muss sich nur vergegenwärtigen, was passiert, wenn Starkregen auf frisch bearbeitete Flächen fällt und die lockere Erde mitgerissen wird. Das Gleiche gilt für Wind. Und auch bei Strip-Till ist die bearbeitete Erde der Erosion ausgesetzt.

Zusammenfassend, wie gesagt, eine deutliche Verbesserung des Status quo in vielen Belangen, aber am Ende nicht immer ausreichend auf dem Weg zu klimaresilienter Landwirtschaft.



Aussaat von Weizen mit leichter Einarbeitung der Zwischenfrucht in den Boden.



Zuckerrüben gelten aufgrund der langen Zeitdauer mit unzureichender Bodenbedeckung zwischen Saat und ausreichender Bodenbedeckung als erosionsanfällige Kultur. Mulchsaat mit mindestens 30% Bodenbedeckung verringert das Erosionsrisiko erheblich.

Einfluss der Bodenchemie und Bodenphysik

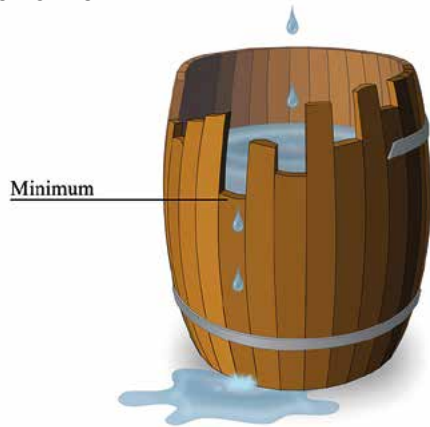
Neben der Art und Weise der Bodenbearbeitung haben auch die Bodenchemie und die Bodenphysik einen entscheidenden Einfluss auf die Ertragskraft der Böden und damit auch auf das Bodenleben. Auch das Bodenleben braucht Nährstoffe, um gedeihen zu können, sowie den nötigen Lebensraum. Beides können Landwirte aktiv in die gewünschte Richtung lenken. Gelingt dies, profitiert nicht nur das Bodenleben, sondern auch die Erträge entwickeln sich positiv.

Bodenchemische Einflüsse

Allein über die Bodenchemie könnte man ganze Bücher füllen. Beschränken wir uns hier aber nur auf die wichtigsten Dinge, die von den Landwirten beeinflusst werden können. Wie nahe in manchen Bereichen Biologie, Chemie und Physik sind, zeigt sich nirgends so deutlich wie bei der Bodenstruktur. So ist die **Bodenstruktur** zunächst eine physikalische Eigenschaft, also ob die Bodenteilchen größer oder kleiner, rund oder kantig geformt sind. Das Material, aus dem sie bestehen, gehört wiederum ins Reich der Chemie. Aber erst die Bodenbiologie gemeinsam mit der Bodenchemie und -physik ergibt stabile **Bodenaggregate** und somit den uns bekannten Boden. Und ganz maßgeblich für eine gute Bodenstruktur ist das Verhältnis von Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) im Boden. Über das genaue Verhältnis gehen die diversen Lehrmeinungen auseinander. So empfiehlt die Bodenanalyse nach Albrecht ein anzustrebendes Verhältnis von 68 Ca : 12 Mg, bezogen auf die sogenannte **Kationenaustauscherkapazität (KAK)**.

In Österreich gilt gemäß des Fachbeirats für Bodenfruchtbarkeit die Empfehlung von 75 – 90 Ca : 5 – 15 Mg. Den Rest der KAK bilden Kalium, Natrium, andere Basen sowie Wasserstoff. Wichtig ist das Verhältnis von Ca zu Mg deshalb, weil damit wichtige Bodeneigenschaften verbunden sind. Sind Böden reich an Magnesium, sind sie meist schwere, eher nasse Böden, die nicht leicht austrocknen und schwer zu bearbeiten sind. Sind sie reich an Kalzium, sind sie meist leichter, teils trockener, auch anfälliger für Erosion und eher leicht zu bearbeiten. Im idealen Fall hat man einen gut zu bearbeitenden krümeligen Boden, der gut Wasser hält und nicht zu Erosion neigt. Anhand von Bodenanalysen kann der Landwirt dann den Boden durch Düngung mit Ca- oder Mg-haltigen Düngemitteln in die gewünschte Richtung bringen. Das dauert allerdings einige Jahre, bis sich der gewünschte Erfolg einstellt.

Neben einem guten Verhältnis von Ca zu Mg im Boden ist die **Ausgewogenheit** der anderen Nährstoffe wichtig. Gemäß Justus von Liebig müssen alle Nährstoffe im richtigen Verhältnis zueinander vorhanden sein, um ein gutes Wachstum von Pflanzen zu ermöglichen. Es bringt nichts, wenn z.B. sehr viel Kalium vorhanden ist, aber auf der anderen Seite z. B. Zink zur Erreichung des guten Wachstums und somit Ertrages fehlt. Sehr anschaulich stellen diese Zusammenhänge das sogenannte Liebigsche Fass oder die **Liebigsche Tonne** dar.



Es ist daher sowohl für den Ertrag als auch für das Bodenleben sehr wichtig, alle Nährstoffe im richtigen Ausmaß im Boden vorhanden zu haben. Wir dürfen nicht vergessen, dass unser Bodenleben mit den Pflanzen fest verbunden ist. Nur wenn die Pflanzen gut gedeihen, bekommt das Bodenleben am Beginn des Nahrungskreislaufes ausreichend Energie in Form von Zuckerverbindungen. Und im Nahrungskreislauf des Bodens leben dann alle anderen Bodenlebewesen davon.

Am Beginn steht aber die Pflanze, ohne die keine Energie in Form von Kohlenstoffverbindungen in den Boden gelangen

würde. Als Landwirt ist es daher sehr wichtig, die **Nährstoffgehalte im Boden genau zu kennen** und die nötige Düngung gemäß Bodenanalysen und den daraus resultierenden Empfehlungen durchzuführen.

Vor allem im Klimawandel mit Hitze und Trockenheit ist es wichtig, die Pflanzen ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen, damit diese länger dagegen standhalten können. Geschwächte Pflanzen, denen bestimmte Nährstoffe fehlen, sind anfälliger und reagieren viel empfindlicher auf abiotische Stressfaktoren. Sie bringen gerade in solchen Szenarien weniger Ertrag und auch weniger Qualität.

Da bei fehlenden Nährstoffen der Stoffwechsel der Pflanzen nicht voll funktioniert, können diese auch leichter krank oder von Schädlingen befallen werden. Das hat wiederum den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zur Folge. Aber auch die **Übersorgung mit Nährstoffen** kann den Stoffwechsel der Pflanzen beeinträchtigen und damit auch zu Schädlingsbefall oder Krankheiten führen. Besonders oft tritt das bei übermäßiger Stickstoffdüngung auf, vor allem beim Einsatz von Nitratdüngern. Nitrat wird von der Pflanze automatisch mit dem benötigten Wasser aufgenommen. Zu viel Nitrat in der Pflanze überlastet deren Stoffwechsel, wodurch der in den Blättern gebildete Zucker nicht mehr richtig zu den Wurzeln transportiert werden kann. Dieser „überschüssige“ Zucker in bzw. an den Blättern und Stielen lockt wiederum Blattläuse und Zikaden an, die sich davon ernähren. Auf klebrigen Zuckerresten können sich auch Pilzsporen besser festsetzen und gedeihen. Es obliegt daher dem Landwirt, eine **ausgewogene Düngung** durchzuführen, um die Pflanzen gesund und ertragreich zu halten. Damit kann durch vorbeugend eingesetzte ausgewogene Düngung Pflanzenschutz in Form von Wachstumsreglern, Fungiziden oder Insektiziden vermindert oder sogar verhindert werden. Somit spart eine ausgewogene Düngung Pflanzenschutzmittel und hilft damit der Umwelt und den Bodentieren!

Bodenphysikalische Einflüsse

Wir beschränken uns auf die Faktoren, die vom Landwirt beeinflusst werden können. Um gesunde, ertragskräftige Böden zu bekommen, sind neben einer guten Nährstoffversorgung und einem aktiven Bodenleben auch **ausreichend Bodenluft**, eine **gute Bodenstruktur** mit vielen **Poren** und **Hohlräumen** sehr wichtig. Die Bewirtschaftung des Bodens muss daher darauf abzielen, die natürlichen Hohlräume und Poren weitestgehend zu erhalten und zu fördern. Das gelingt nur mit so wenig Bearbeitung und Überfahrten wie möglich und so viel wie nötig. Dabei soll der Boden möglichst trocken sein, um Verdichtungen und Schmierhorizonten vorzubeugen. Die Gewichte der verwendeten Traktoren und Maschinen sollen so gering wie möglich sein. Jedes zusätzliche Kilogramm Gewicht drückt auf den Boden und verdichtet die natürlichen

Aggregate und Poren. Schmierhorizonte verhindern das Eindringen des Wassers in den Boden, wodurch der Unterboden nicht ausreichend mit Wasser versorgt wird. Der Oberboden ist dadurch anfälliger für Staunässe und Erosion. Pflanzenwurzeln können diese Verdichtungen auch nur schwer durchdringen. Die Pflanzen müssen mit weniger Lebensraum auskommen und können nicht die üblichen Erträge liefern. Auch durch die verwendeten Arbeitswerkzeuge auf den verschiedenen Geräten entstehen im Boden Verdichtungen. Verdichtungen und Schmierhorizonte können durch das Bodenleben und Pflanzenwurzeln nur langsam wieder repariert werden.

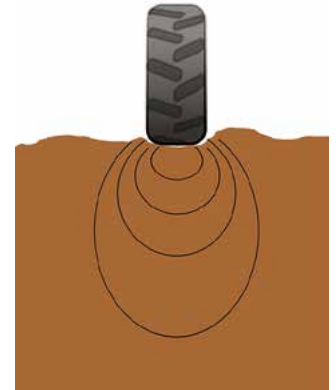
Bei Tonböden sind natürliche Quellungs- und Schrumpfungsprozesse hilfreich bei der Reparatur. Daneben kann Frost im Winter mithelfen, die Klumpen zu sprengen. Doch die Winter sind nicht mehr so kalt wie früher und der Frost schafft es meist, nur wenige Zentimeter in den Boden einzudringen. Es dauert daher immer länger, bis Verdichtungen wieder verschwinden, oft mehrere Jahre oder gar Jahrzehnte!

Reifendruckanlage (siehe Pfeile)



Auch die **Wahl der Reifen** und des darin verwendeten **Luftdrucks** spielen eine große Rolle. Aufgrund des Gewichts der Traktoren und Geräte braucht es große und möglichst breite Reifen, deren Wirkung gegenüber kleinen Reifen aber tiefer in den Boden reicht. Man spricht hier von sogenannten „**Druckzwiebeln**“, die bei sehr großen Gewichten, wie bei der Rübenerntemaschine in vollem Zustand mit durchaus 50 t Gewicht, bis zu 2 m in die Tiefe reichen können.

Bei sehr kleinen Traktoren mit geringen Gewichten, wie sie bis in die 1980er bzw. 1990er Jahre oft verwendet wurden, war die Verdichtung eher gering.



Das Dilemma ist, dass bei der Fahrt zum Feld der Luftdruck in den Reifen ausreichend hoch sein muss, um sicher dahin zu gelangen. Das spart auch Kraftstoff, da der Rollwiderstand geringer ist als bei niedrigen Luftdrücken. Am Feld selbst benötigt man aber eine große Aufstandsfläche der Reifen, um das Gewicht je cm^2 herabzusetzen und den Boden zu schonen.

Neben der Vorbeugung von Verdichtungen erhöht ein niedriger Luftdruck die Zugkraft der Traktoren und reduziert den Treibstoffverbrauch sowie den Schlupf der Reifen. Hier wird sehr schnell klar, dass ein einziger Luftdruck in den Reifen für alle Arbeiten nicht ausreicht. Eine Anpassung des Luftdrucks an die jeweiligen Bedingungen ist daher sinnvoll. Umzusetzen ist das allerdings recht schwierig und arbeitsaufwendig. Mittlerweile wurden aber sogenannte „**Reifendruckregelanlagen**“ (Abb. links, siehe Pfeile) entwickelt, die fest am Traktor montiert, diese Arbeit massiv erleichtern. Mit einem Druck auf einen Knopf oder am Bildschirm wird Luft am Feld abgelassen und nach der Arbeit wieder gefüllt. Die Kosten dafür werden zu 40 % gefördert. Für den Landwirt ergeben sich durch diese Anlagen neben der Verbesserung der Zugkraft und Bodenschonung auch Einsparungen beim Treibstoff von 15 bis 20 %. Es ist dies eine der sinnvollsten Maßnahmen, die man auf der technischen Seite für seinen Boden und den betriebswirtschaftlichen Erfolg umsetzen kann.

Einfache Bodentests

Um Verdichtungen und Schmierhorizonte zu finden oder einfach nur seinen Boden zu erkunden, kann man einfache Geräte einsetzen. Unter bodenkoffer.at können Geräte und Anleitungen dazu bezogen werden.

Mittels einer **Spatenprobe** (Abb. oben Mitte) lässt sich der Boden bis etwa 25 cm Tiefe sehr schön ausstechen. Man beurteilt dabei die Bodenstruktur, schaut, wie die Wurzelgänge verlaufen oder wie Poren, Aggregate bzw. Regenwurmgänge ausgeführt sind. Man kann dabei auch oft Verdichtungen und Schmierhorizonte herausfinden.



Mithilfe einer **Bodensonde (Penetrometer)**, welche behutsam in den Boden gesteckt wird, findet man ebenfalls Verdichtungszone(n) (Abb. rechts). Geht man damit über seine Äcker, bekommt man einen guten Eindruck, wie es um den Boden bestellt ist, und kann danach gezielt Maßnahmen setzen, um ev. Strukturprobleme zu beheben, soweit dies technisch oder auch biologisch über tiefwurzelnde Pflanzen überhaupt möglich ist. Bei Verdichtungen gilt daher immer: Besser vermeiden als reparieren!



Slake-Test

Beim Slake-Test geht es um die Aggregatstabilität des Bodens. Dabei wird ein kleiner Klumpen Boden in eine Schale mit Löchern oder ein Netz gelegt und in Wasser getaucht. Es wird die Stabilität des Bodens unter Wasser bewertet. Sind die Aggregate des Bodens stabil, zerfällt der Klumpen in Wasser nur wenig und bleibt über Stunden im Wasser intakt (*rechte Seite im Bild*). Die Trübung des Wassers darunter ist kaum vorhanden und auch nur wenig Erde fällt vom Klumpen ab. Diese Böden können bei Starkregen große Mengen an Wasser aufnehmen, sind biologisch stabil, tragfähig und gut mit Bodenleben ausgestattet. Sie halten bei Starkregen stand, erodieren nicht und können viel Wasser speichern.

Ist der Boden im Wasser nicht stabil und zerfällt binnen weniger Minuten (*linke Seite im Bild*), stimmt die biologische Aktivität des Bodens nicht. Diese Böden machen bei Starkregen „zu“, sie verschlämmen und nehmen nur wenig Wasser auf. Sie sind nicht ausreichend tragfähig und weisen zu wenig Bodenleben auf. Sie sind sehr anfällig für Erosion und können viel weniger Wasser speichern. Hier müssen dringend Gegenmaßnahmen gesetzt werden.



Trübungs- oder Flaschentest:

Hier geht es darum, die Infiltrationsrate von Böden zu bewerten sowie auch indirekt deren biologische Aktivität und die Aggregatstabilität. Dabei werden größere, intakte Bodenklumpen vorsichtig in eine offene Plastikflasche mit Löchern im Boden gegeben. Diese Flasche wird dann in eine andere offene Flasche gesteckt. Nun wird der Boden vorsichtig mit Wasser beaufschlagt. Das Wasser wird durch den Boden in die untere Flasche „gefiltert“. Je nachdem, wie der Boden das Wasser durchlässt beziehungsweise welche Menge an Boden durch das Wasser mitgenommen wird, sieht man deutliche Unterschiede zwischen den Böden.

Wird Wasser gut „drainiert“ und nur wenig Bodenmaterial mitgenommen (*linke Seite im Bild*), kann man davon ausgehen, dass dieser Boden große Mengen an Starkregen aufnehmen kann. Das Bodenleben ist dort intakt, die Aggregate stabil und der Boden somit sehr stabil gegen Erosion. Dieser Boden besitzt ein gutes Porenvolumen und eine gute Speicherfähigkeit für Wasser.

Macht der Boden hingegen „zu“ und verschlämmt sehr leicht und lässt nur wenig Wasser durch, kann man davon ausgehen, dass dieser Boden bei Starkregen wenig Wasser aufnimmt und starke Schäden durch Erosion erleiden wird (*rechte Seite im Bild*). Zusammen mit wenig Speichervermögen für Wasser kann dieser Boden seine Funktionen nicht mehr erfüllen und wird daher auch weniger Erträge liefern. Hier gilt es, durch schonende Bewirtschaftungsmaßnahmen und Zwischenfruchtanbau gegenzusteuern.



Zusammenfassung

Unser Boden ist die Grundlage für eine ertragreiche, nachhaltige und biodiverse Landwirtschaft. Artenreiches Bodenleben kann durch die beschriebenen Maßnahmen massiv gefördert werden.

Die hier beschriebenen Methoden sind für alle oberflächlich geernteten Feldfrüchte und auch für Rüben geeignet. Selbst bei Kartoffeln gibt es schon Anbaumethoden, bei denen der Boden nur wenig bewegt wird und diese Störungen durch das Bodenleben selbst in kurzer Zeit wieder korrigiert werden. Dieselben Ziele sind auch für den Gemüseanbau anzustreben, wenngleich hier die Möglichkeiten je nach Art des Gemüses sehr unterschiedlich und teilweise schwierig umzusetzen sind. Hier bedarf es weiterer Innovationen und Pioniere, um auch in diesem Bereich mehr Bodenschutz zu erreichen.

Die Maßnahmen zur Förderung des Bodenlebens führen zu stabilen Erträgen in Zeiten des Klimawandels und halten das Wasser in der Region. Auch damit einher gehen eine massive Verbesserung der Ökosysteme, eine Reduktion des Pflanzenschutzmittel- und Düngereinsatzes, eine massive Reduktion der Erosion und des CO₂-Ausstoßes bis hin zur langfristigen CO₂-Bindung im Boden durch Humusaufbau sowie eine Reduktion der negativen Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Umwelt. Alles zusammen ein massiver Gewinn für eine lebenswerte Zukunft mit gesunden, intakten Böden und einer regionalen, ertragreichen Landwirtschaft unter Einhaltung hoher gesetzlicher Standards!

REGENWÜRMER

symbolisieren das Potential von Ökosystemleistungen und das Zusammenspiel von Bodenleben, Bodenphysik und Bodenchemie für einen nachhaltigen Pflanzenbau.

Der Lebensraum für Regenwürmer ist nicht unbedingt nur der Boden, denn es gibt nicht nur den einen Regenwurm, es gibt viele verschiedene Arten. Diese Arten haben unterschiedliche Ansprüche an ihren Lebensraum und eine Gemeinschaft setzt sich häufig aus 3 bis 8 Arten zusammen. Ein artenreicher Lebensraum mit vielen Strukturen wie Wiese, Wald und Totholz kann auch 12 oder mehr Arten beherbergen (Seite 13).

Was aber alle Regenwürmer zum Leben benötigen, kann man auf drei wesentliche Faktoren reduzieren: Alle Regenwürmer brauchen Wasser (Niederschlag), Ruhe (keine Störungen) und Futter.

Tauwurm in seiner selbst gegrabenen Erdröhre



Der Tauwurm nimmt in der Regenwurm-gemeinschaft eine Schlüsselfunktion ein.

Der **Tauwurm** (*Lumbricus terrestris*) ist der bekannteste Regenwurm und ein **Tiefgräber** (anözisch). Er kommt nur nachts oder an Regentagen zur Nahrungssuche an die Erdoberfläche. Er bewohnt zeitlebens eine einzige Wohnröhre und verlässt diese nur mit der vorderen Körperhälfte. Auf diese Weise kann er sich schnell vor Fressfeinden zurückziehen. Dadurch beschränkt sich sein oberirdischer Lebensraum auf einen Radius von etwa 15 cm um den Röhreneingang. Rund um die Wohnröhre sammelt der Tauwurm alles, was Nahrung und Schutz bietet, und verschließt die Röhre mit einem Deckel aus Stroh, Erde und Steinen, dem sog. „**Komposthaufen**“ (Abb. rechts). Dieser bewahrt die Wohnröhre vor dem Austrocknen und schützt den Nachwuchs. Junge Tauwürmer leben eine Zeit lang in der Wohnröhre, bevor sie sich eine verlassene Wohnröhre suchen oder eine neue graben.

Im Komposthaufen findet der Abbau von Pflanzenresten durch Mikroorganismen statt. Dies macht den Tauwurm für die Landwirtschaft besonders wichtig, da im Komposthaufen und entlang der Wohnröhre der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff und Phosphor ansteigt.



*Bild oben:
„Komposthaufen“
aus Stroh und Kot*

*Bild unten:
Zur Not können es
auch Steine sein,
mit denen der
Tauwurm seine
Wohnröhre ver-
schließt.*



Die Gemeinschaft der Regenwürmer im Acker

Die verschiedenen Regenwurmartens leben mit- und nebeneinander. Unabhängig von der Bodenbearbeitung ist der Anteil der **endogäischen Regenwürmer (Flachgräber**, z.B. den Kleinen Ackerwurm, *Seite 13*) rund um eine Tauwurmhöhle bis zu dreimal höher als ohne Tauwurm. Grund dafür sind das Nahrungsangebot durch Pflanzenreste und Mikroorganismen. Tauwurmhöhlen haben zusätzlich eine höhere Feuchtigkeit und die zuckerhaltigen Hautsekrete der Tauwürmer machen sie zu einem biologischen Hotspot für Mikroorganismen.

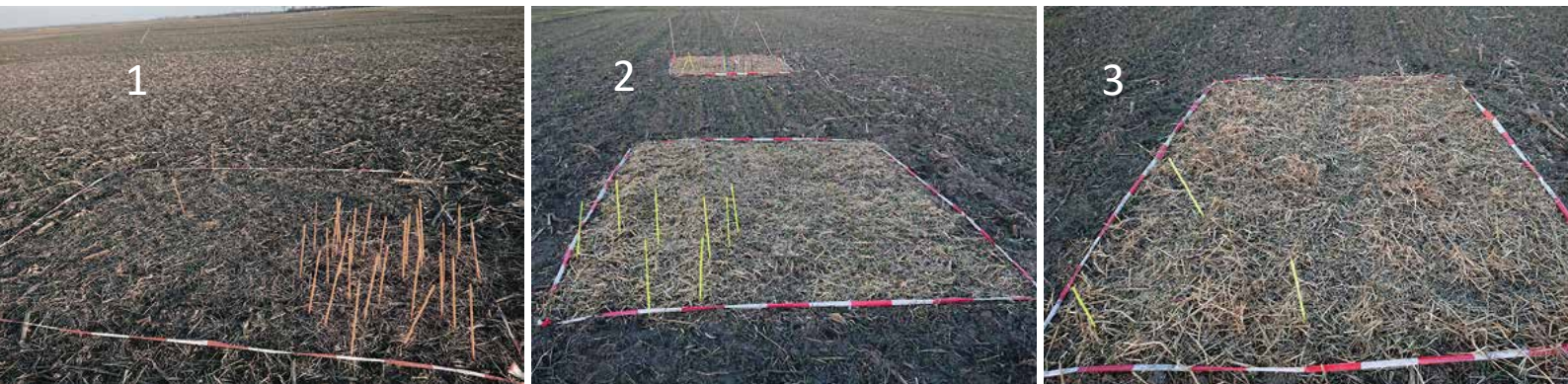
Tauwürmer verkitten ihre Wohnröhren mit ihren Hautsekreten und mit der Hilfe von Mikroorganismen, um sie stabiler zu machen. Die Mikroorganismen ernähren sich von diesen Mehrfachzuckern (Polysacchariden), zersetzen und vorverdauen die Pflanzenreste für die Tauwürmer. Zusätzlich kann durch die so stabilisierten Wohnröhren bis zu 1 Liter pro Minute Regenwasser in den Boden fließen, was vor Bodenerosion schützt und die Bodenfeuchtigkeit erhöht.

Das Leben der Regenwürmer im Acker wird vor allem durch die Bodenbearbeitung beeinflusst (*siehe Abb. unten*). Je intensiver und tiefer der Boden bearbeitet wird, desto weniger Regenwürmer sind zu finden. Dies ist auf die Bodenbearbeitung selbst und auf das Nahrungsangebot zurückzuführen.

Durch die Bodenbearbeitung werden die Wohnröhren der Regenwürmer zerstört und die Regenwurmpopulation stark dezimiert.

Tauwürmer gehören zwar zur Gruppe der **Tiefengräber**, durch ihre Körpergröße und Lebensweise sind sie aber keine sehr guten Gräber. Tauwürmer graben sich als junge Regenwürmer einmal eine Röhre, in der sie lebenslang bleiben. Ihre Lebenserwartung liegt zwischen 4 und 8 Jahren. Anders als Flachgräber (endogäische Arten) fressen sich Tiefengräber nicht durch den Boden, sondern drücken sich durch den Boden. Dies erfordert einen enormen Kraftaufwand und wird mit zunehmender Körpergröße immer schwieriger.

Fazit: Wer sich keine neue Wohnröhre graben kann, kann sich auch nur schwer aus einer verschütteten Wohnröhre befreien. Dazu muss man wissen, 1. dass sich Regenwürmer bei Trockenheit und Frost in tiefere Bodenschichten zurückziehen und 2. dass Bodenbearbeitung nur bei abgetrocknetem Boden stattfindet, wenn sich die Regenwürmer zurückgezogen haben. Die Tauwürmer werden also in ihrer Wohnröhre verschüttet. Der Unterschied zwischen den Bodenbearbeitungssystemen liegt für Regenwürmer in der Bearbeitungstiefe. Es ist leichter, sich aus 10 cm Tiefe auszugraben, als aus 25 cm.



Drei verschiedene Bodenbearbeitungssysteme, die sich in der Bearbeitungstiefe unterscheiden. 1: In der Direktsaatfläche wurden ca. 30 Komposthaufen von Tauwürmern pro m² gefunden und markiert (orange), 2: beim Grubber 8 pro m² (gelb) und 3: beim Pflug nur noch 3 pro m² (gelb).

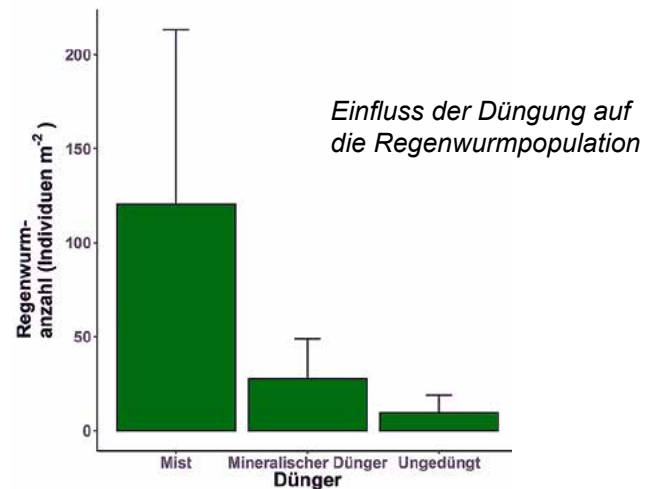
Für dieses Experiment wurde zusätzlich Stroh auf die Versuchsfläche ausgebracht, um die Komposthaufen sichtbar zu machen. Normalerweise findet man keine Stroh-, Streu- oder Mulchschicht nach dem Pflügen und nur eine reduzierte Mulchschicht nach dem Grubbern. Nur die Direktsaat hat immer eine Mulchschicht.

Aber nicht nur Tauwürmer werden durch die Bodenbearbeitung reduziert, sondern alle Regenwurmarten sind davon betroffen. **Flachgräber** werden eher verletzt als verschüttet und **Streuwürmer (epigäische Regenwürmer)** finden durch das Pflügen keine Streu- oder Mulchschicht als Lebensraum. Nach dem Pflügen bleibt ein „reiner Tisch“ ohne Pflanzenreste zurück. Dies dient vor allem der Unkrautunterdrückung und dem Pflanzenschutz, nicht aber dem Bodenleben.

Regenwürmer kann man also durch reduzierte Bodenbearbeitung oder Direktsaat (Seite 74) und durch die Wahl des richtigen Futters fördern. Je nach Futterqualität ändert sich die Kokonproduktion. In einer Laborstudie mit Birkenblättern (Laubfall vom Herbst) und Pferdemist zeigte sich, dass die Tauwürmer über 12 Monate ca. 7–8 Kokons pro Monat legten. Dann war der Vorrat an Herbstblättern aufgebraucht und es mussten neue Birkenblätter im Sommer gesammelt werden. Diese getrockneten „Sommerblätter“ wurden verfüttert und plötzlich vervielfachte sich die Kokonproduktion. Dies war durch die nährstoffreichen Sommerblätter bedingt. Fazit: Je qualitativ hochwertiger das Futter ist, desto höher ist die Kokonproduktion. Dasselbe ist auch auf dem Acker bei der „Fütterung“ mit Zwischenfrüchten zu beobachten.

Pflügen ist die Hauptursache für den Rückgang der Regenwurmpopulation. Doch die Futterqualität kann die Vermehrungsrate erhöhen und die Bodenbearbeitung kompensieren.

Dies wurde in einem Versuch an der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf (BOKU) untersucht. Der Ewigroggenversuch wurde 1906 in der damals typischen Dreifelderwirtschaft mit Winterroggen, Sommergerste und Schwarzbrache angelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Düngung einen großen Einfluss auf die Regenwurmpopulation hat (*siehe Grafik*). Die höchste Anzahl wurde bei Düngung mit Stallmist (120/m²) gefunden, gefolgt von Mineraldünger (27/m²) und ungedüngt (8/m²). Diese Regenwurmdichte ist im Vergleich zu anderen Feldern in Groß-Enzersdorf (ca. 200/m²) gering und kann durch die Dreifelderwirtschaft und die Bodenbearbeitung erklärt werden, aber der Stallmist hat das Pflügen kompensiert.



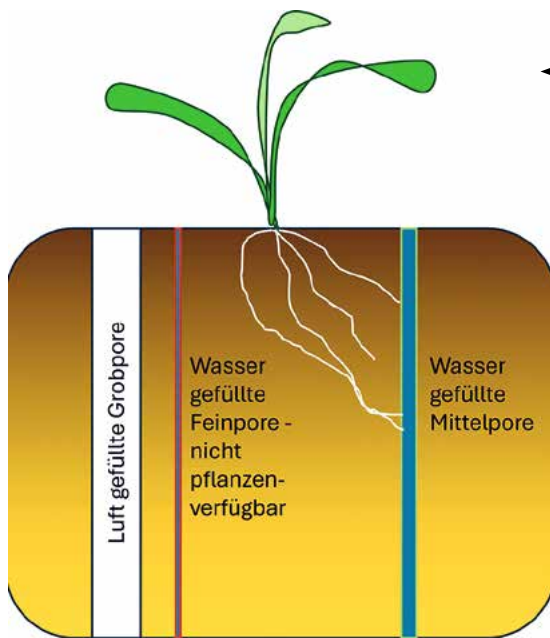
Ökosystemleistungen der Regenwürmer

Ökosystemleistungen sind Leistungen, die uns die Natur „kostenlos“ zur Verfügung stellt. Regenwürmer haben einen breiten Katalog an Leistungen, die sie erbringen und die wir nutzen können, wenn wir Regenwürmer fördern. Regenwürmer können zum Beispiel helfen, die Landwirtschaft klimafit zu machen. Das heißt, sie helfen uns, Wetterextreme wie Starkregen und Trockenheit abzumildern.

1. Einfluss auf den Wasserhaushalt des Bodens

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens ist abhängig vom Bodentyp, dem Porenvolumen und den Anteilen von Sand, Schluff und Ton. Der Zwischenraum zwischen Steinen, Sandkörnern, Schluff und Ton ist der Ort, wo Bodentiere leben können und die Pflanzen Wasser und Nahrung finden. **Feinporen** (< 0,2 µm) sind fast immer mit Wasser gefüllt (Kapillarkräfte). Dies ist für die Pflanzen aber nicht verfügbar, da die Saugspannung (= Kraft, mit der Pflanzen Wasser

aus dem Boden ziehen können) nicht ausreichend ist. In **Mittelporen** (2–10 µm) ist pflanzenverfügbares Wasser nach Regen oder bei Grundwasseranschluss. In **Grobporen** (>10 µm) läuft das Wasser nach unten ins Grundwasser ab (*siehe Abb. nächste Seite*). Einen erheblichen Einfluss auf das Porenvolumen hat die Bodenbearbeitung. Pflügen zum Beispiel erhöht das Porenvolumen, was wiederum große Auswirkungen auf das Bodenleben hat.



In Grobporen kann das Wasser nicht gehalten werden, in Mittelporen bleibt es stehen und kann von Pflanzen genutzt werden, in Feinporen wird es festgehalten und ist nicht pflanzenverfügbar.



Wasser rinnt entlang der Regenwurmgänge von der Oberfläche in den Boden (dunkle Flächen). Das führt zu einer besseren Durchfeuchtung des Bodens. Außerdem sind Teile der in die Röhre hineingezogenen Laubblätter zu erkennen.

Extreme Wetterereignisse von Trockenheit bis Starkregen verursachen große Schäden in der Landwirtschaft. Regenwürmer können helfen, die Felder dagegen widerstandsfähiger zu machen.

Das Zusammenspiel von Tauwürmern und flachgrabenden Regenwurmartarten führt von einer breiten, vertikalen Röhre zu einem engeren, horizontalen Gangsystem, das Regenwasser auch seitlich zu den Pflanzenwurzeln verteilt und so die Bodenfeuchte erhöht.

Darüber hinaus kann eine einzelne Tauwurmröhre 19 bis 1.008 ml Wasser pro Minute aufnehmen. Das macht bei der Direktsaat mit durchschnittlich 30 Tauwürmern pro m² theoretisch 646 bis 34.272 ml pro m² aus und ist damit 7-mal robuster gegen Starkregen als die Pflugvariante. Damit leistet der Tauwurm einen wertvollen Beitrag zum Erosionsschutz. Auf Direktsaatflächen mit hoher Tauwurmdichte rinnt der Boden deshalb nicht ab und das Wasser versickert im Boden.

2. Ertrag und Stickstoff

Fonte et al. (2023) analysierten den Anteil von Regenwürmern an der Getreideproduktion und fanden heraus, dass Regenwürmer in Europa bis zu 7,4 % zum Getreideertrag beitragen. Jedoch nimmt die Anzahl der Regenwürmer mit zunehmender Intensität der Bodenbearbeitung stark ab. Abhängig von der Witterung und Bodenart kann das Verhältnis zwischen Direktsaat und Pflug 4:1 betragen.

In einem Maisversuch der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf und der Fachschule Hollabrunn konnte gezeigt werden, dass mehr Regenwürmer auch zu höheren Stickstofferträgen im Korn (10,8–14,1%) und in der Restbiomasse (12,6–18,8 %) führen. Auch der Maisertrag war mit den zusätzlichen Regenwürmern um 10–13 % höher als mit der Ausgangspopulation.

3. Bodenaggregatstabilität

Zusätzlich wird durch die Grab- und Fraßtätigkeit auch die Aggregatstabilität des Bodens erhöht. Ein Vergleich zeigt, dass der Boden mit „Komposthaufen“ etwa dreimal stabiler ist als der Boden mit reduziertem Regenwurmorkommen. Je stabiler der Boden ist, desto besser kann der Boden Wasser aufnehmen, Pflanzennährstoffe transportieren, einen Lebensraum für Bodentiere bieten und ist vor Erosion geschützt.

4. Pflanzenkrankheiten

Regenwürmer können auch Pflanzenkrankheiten wie Sklerotinia-Pilze (Erreger der Weißstängeligkeit) reduzieren. In einer Feldstudie wurden die Pilze in Netzschräuchen im Boden vergraben. Manche Netze waren zu eng für Regenwürmer (1x1 mm) und andere weit genug (3x10 mm), so dass die Regenwürmer hindurchkriechen konnten. Von Juli bis Oktober geschah kaum etwas, aber von Oktober bis März wurden die Pilze in den weitmaschigen Netzen fast halbiert. Das lag einerseits an der Zugänglichkeit der Netze für Regenwürmer, andererseits an der vorhandenen Feuchtigkeit. Die Regenwürmer waren im trockenen und warmen Sommer nicht aktiv und haben erst ab dem Herbst angefangen, die Pilze zu reduzieren.

Zusammenfassung der Ökosystemleistungen von Regenwürmern

1. Höhere Erträge durch Regenwürmer

Weltweit sorgen Regenwürmer für einen 6,5 % höheren Getreideertrag, in Europa erhöhen sie diesen sogar auf 7,4 %. Auch die Biomasse insgesamt erhöht sich um 23 %.

2. Anpassung an Starkregeneignisse

Tiefgrabende Regenwürmer können vor Überflutungen schützen. So kann in einer Minute bis zu 1.000 ml Wasser in eine Regenwurmröhre fließen. Bei der Direktsaat können es bis zu 30 l/m² pro Minute sein. Das fördert auch die Grundwasserneubildung.

3. Mehr Wasser für Pflanzen

Flachgrabende Regenwürmer verteilen das Regenwasser seitlich zu den Pflanzenwurzeln und sie erhöhen die Wasserspeicherkapazität um 16 %. Dadurch gibt es im Trockengebiet bis zu 3 % mehr Bodenfeuchtigkeit (zwischen Mai und Oktober).

4. Erosion reduzieren

Regenwurm Kot ist 5-mal stabiler als gepflügter Boden, das erhöht die Bodenstabilität. Der Boden wird zusammengehalten und vor Wind- und Wassererosion geschützt. Durch Erosion gehen durchschnittlich jährlich 7 t/ha an Oberboden und Nährstoffen verloren.

5. Mehr pflanzenverfügbare Nährstoffe

Regenwürmer produzieren bis zu 5 t Regenwurm Kot pro Hektar und Jahr mit bis zu 45 % mehr Phosphor, Stickstoff und Kali im Vergleich zum umliegenden Boden, und der pH-Wert erhöht sich um 0,5 Einheiten.

6. Förderung von Mykorrhiza

Durch den Schutz von Regenwürmern wird auch *Mykorrhiza* gefördert. *Mykorrhiza* sind Pilze, die den Pflanzen (in Symbiose) zu einer besseren Nährstoff- und Wasserversorgung verhelfen. Insbesondere dient es der verbesserten Phosphor- und Kaliumversorgung.

7. Mit Regenwürmern weniger Pflanzenkrankheiten

Regenwürmer können auch Pflanzenkrankheiten reduzieren und fressen beispielsweise *Fusarium*, *Sclerotinia* und *Rhizoctonia*.

8. Einsparungen

Regenwürmer übernehmen die Bodenbearbeitung gratis, durchlüften den Boden und graben bis zu 1,5 km Röhre pro m³. Auch beim Einarbeiten der Erntereste helfen Regenwürmer mit. Sie arbeiten rund 6 t Pflanzenreste im Jahr und pro Hektar ein. Dadurch wird weniger Diesel verbraucht und CO₂ eingespart.

9. Bodenfruchtbarkeit

Regenwürmer steigern die Bodenfruchtbarkeit und fressen 1,6 t/ha Boden pro Jahr. Der Regenwurm Kot hat einen 48 % höheren Anteil an organischem Material als der umliegende Boden. Außerdem ist Regenwurm Kot reich an Zuckern, die wiederum als Futter für Mikroorganismen dienen. Damit startet ein kompliziertes Zusammenspiel von Regenwürmern und Mikroorganismen, dem Aufbau von Bodenstruktur und der Freisetzung von Nährstoffen. All dies erhöht schließlich die Fruchtbarkeit und die Widerstandskraft des Bodens.

10. Wiss' ma eh schon seit 1789

„... Würmer scheinen die großen Förderer der Vegetation zu sein, die ohne sie nur lahm verlaufen würde...“

“Würmer fördern die Vegetation, indem sie den Boden durchbohren, durchlöchern und auflockern und ihn durchlässig für Regen und Pflanzenfasern machen; indem sie Stroh und Halme hineinziehen; und vor allem, indem sie so unendlich viele Erdklumpen aufwerfen, die man Wurm Kot nennt und die, da sie ihre Exkremente sind, ein guter Dünger für Getreide und Gras sind” (Gilbert White, 1798).

Bildnachweis

US2, 83O : Alexander Bruckner
5, 14LO : Thomas Peham
10LM : Michael Plewka
12LM : Gargominy O.
(creative commons CC BY-NC-SA)
15RU : Hieronymus Dsatych
23LO : Anna Seniczak
50U, 58R, 59O : Corinna Wallinger
51U, 52, 54, 59U, 63 : Michael Traugott
56 : Hermann Strasser
65, 81RU, 82 : Lorenz Mayr
57, 66, 71R : Johannes Zauner
76, 81OM : Johannes Zauner
67 : Markus Gorfer
68, 72L : Gernot Bodner
69, 71L, 72R, 73, 75 : Hans Gnauer
78L, 80L : Hans Gnauer
74, 77 : Franz Brunner
83 M+U, 84, 85, 86L : Pia Euteneuer

Die restlichen (152) Fotos
und alle Zeichnungen: Rudolf Hofer
(www.focusnatura.at)

Wikimedia
(creative commons CC BY-SA)

US4 : Colette Kessler
8RU : Thierry Arnet
10RU : Vyzhdova V
20RM : Tomasz Górny
23RU : 5sanake5
33LO : Thom Oates
35LU : Horst D.Wermbter
39RU : Scott Bauer
41RO : Alfred Brehm
45LO : Christoph Moning
46LU : katanski
46RU : BlueBreeze
50O : Mnolf
53 : Luc Viatour
59M : UrSchmidt
64 : Maggilautaro
79 : DooFi
81RO: HPsy

Seitenangaben:

US= Umschlagseite, L= links, R= rechts, O= oben, U= unten, M= Mitte

Wikipedia
(creative commons CC BY-SA)

8RM : SmallRex
30LU : Rolf Schlagenhaft
40LU : Frank Kämmler
78R : Volker Prasuhn
80R : Ariser

Fotoagenturen

US1 : Adobe Stock, Lothar Lenz
6M : Pixabay, Karin Schulz
9RO : Pixabay, adege
39UM : iStock, Thomasz Klejdys
43RM : Fotolia, ireding01
45LU : Fotolia, Erni
46LO : Fotolia, creativenature.nl

Dank

an alle externen Fotografen/Fotografinnen, die ihre Bilder kostenlos zur Verfügung gestellt haben.

Dank

für die Unterstützung bei der Bestimmung von Arten:

Florian Glaser, Sieglinde und Erwin Meyer, Yvonne Kiss, Timo Kopf, Thomas Peham,
Irene und Heinz Schatz, Barbara Thaler-Knoflach
und Thomas Peham für die Durchsicht des Manuskripts.

Hainlaufkäfer - *Carabus nemoralis*)



**Laufkäfer sorgen für
Gleichgewicht**

***Aufbauende
Landwirtschaft***