

## Der Waldboden lebt – Vielfalt und Funktion der Bodenlebewesen

Marco Walser, Doris Schneider Mathis, Roger Köchli, Beat Stierli, Marcus Maeder und Ivano Brunner



Abb. 1. Bodenlebewesen unter der Lupe. Zeichnung von Hanspeter Läser.

Böden sind Lebensraum für unzählige Lebewesen, die beim Abbau und Umbau von organischer Substanz eine wichtige Rolle spielen. Gesunde Böden sind für die Nachhaltigkeit im Wald eine grundlegende Voraussetzung. Dieses Merkblatt gibt einen Einblick in die Vielfalt der Lebewesen in Waldböden. Es dient der Ausbildung und Information für Forstwart- und Biologielaborant-Lernende, Studierende und weiteren interessierten Personen aus dem Forst- und Umweltbereich.

### Waldböden – was ist das?

Der Boden ist die belebte oberste Schicht der Erdkruste und reicht von der Bodenoberfläche bis zum Ausgangsgestein. Waldböden entstehen durch chemische und physikalische Verwitterung des Ausgangsgesteins und durch die Umwandlung organischer Bestandteile durch Bodenlebewesen. Blätter, Nadeln und Äste, die von den Bäumen und anderen Pflanzen fallen, würden sich im Laufe der Zeit zu riesigen Bergen anhäufen, wenn nicht winzige Bodenlebewesen dieses Material zu Humus zerkleinern und zersetzen würden. Ein Teil dieses Humus wird vollständig abgebaut und in mineralische Form überführt. Dadurch werden Nährstoffe freigesetzt, die von den Wurzeln der Pflanzen wieder aufgenommen

werden können. So schliesst sich der Kreislauf.

Die Bildung von einem Zentimeter Boden kann bis zu 100 Jahre dauern. Die Geschwindigkeit der Bodenbildung ist von verschiedenen Bodenbildungsfaktoren – zum Beispiel lebenden Organismen, Klima oder dem geologischen Ausgangsmaterial – abhängig. Ohne Bodenlebewesen gäbe es keinen nährstoffreichen und intakten Waldboden. Im Gegensatz zu vielen landwirtschaftlichen Böden wird der Waldboden weder gedüngt noch gepflügt. Daher sind Waldböden weitgehend natürlich aufgebaut. Organisches Material, das auf den Boden fällt, wird standortsbedingt verschiedenartig zersetzt, abgebaut und mit der Mineralerde vermischt. Es entstehen verschiedene Humusformen wie Mull, Moder oder Rohhumus. Der Humusabbau und die Nährstofffreisetzung laufen als natürliche Prozesse ab.

Der Waldboden ist keine kompakte Masse, sondern ein offenes und poröses System aus organischen und mineralischen Partikeln, Bodenlebewesen, Wurzeln, Luft und Wasser (Abb. 1). Er ist eine Dauerbaustelle, wo rund um die Uhr Material abgebaut, umgebaut und Neues geschaffen wird. Der Waldboden ist zudem mit seinem Reservoir von Nährstoffen und Wasser ein Lebensraum für Pflanzen und Tiere sowie ein Filter und Puffer für zahlreiche Substanzen.

Viele Waldböden in der Schweiz sind erst 10- bis 15-tausend Jahre alt. Die Bodenbildung konnte erst nach der letzten Eiszeit einsetzen, nachdem sich die Gletscher zurückgezogen hatten und nur blankgeschliffene Felsen und mächtige Schutthalden hinterliessen.

### Die Lebewesen des Waldbodens

Der Waldboden wird durch eine Vielzahl von Bodenorganismen bewohnt, die einen grossen Artenreichtum aufweisen (Abb. 2 und 3, Tab. 1). Dies sind Pilze, Bakterien, Insekten und Würmer, um nur einige zu nennen. Sie benutzen die anfallende Streu als Nahrung, die sie zerkleinern, zersetzen, verdauen und sich hierbei gegenseitig unterstützen. Zahlreiche räuberische Lebewesen wie Raubmilben und Hundertfüsser bewohnen ebenfalls den Waldboden. Sie nutzen die oben erwähnten Primärzersetzer als Nahrungsquelle. Dadurch ergibt sich eine Nahrungskette.

### Die Bodenorganismen im Wald und ihre Funktionen

**Bakterien** (Bacteria und Archaea) sind einzellige Organismen ohne echten Zellkern (Prokaryoten). Sie können kugelförmig, stäbchen- oder schraubenförmig sein und besiedeln den Boden (Abb. 2) in grosser Artenvielfalt und Individuendichte. Bakterien können sich innerhalb weniger Stunden vermehren und bilden häufig grosse Zellketten und -kolonien. So können in einem Gramm Boden über 100 Millionen Bakterien leben. Vorzugsweise leben Bakterien im dünnen Wasserfilm, der die Bodenpartikel umgibt, an Wurzeloberflächen oder im Wurzelraum, der Rhizosphäre. Sie können sich aktiv durch Geisseln oder passiv mit dem Bodenwasser bewegen und reagieren empfindlich auf Austrocknung. Die meisten Bakterienarten ernähren sich von abgestorbener organischer Substanz und Ausscheidungen der Lebewesen, sie sind heterotroph. Heterotrophe Bakterien bevorzugen leicht abbaubare Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen und zersetzen das Substrat durch die Ausscheidung von Enzymen. Aufgrund ihres grossen Enzym-Spektrums sind sie die wichtigsten Reduzenten beziehungsweise Destruenten. Die Zersetzungsprozesse laufen in der Regel im

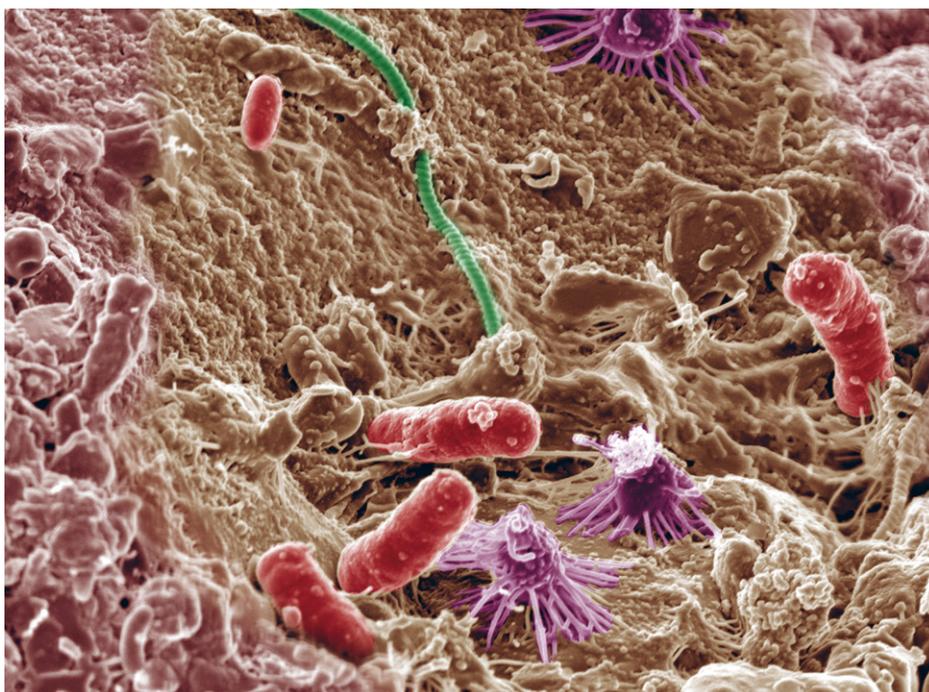


Abb. 2. Bakterien im Boden.

Tab. 1. Mittlere Anzahl Individuen der wichtigsten Bodenorganismen in einem Quadratmeter Boden (nach DUNGER 1983).

Größenklasse	Organismengruppe	Mittlere Anzahl Individuen pro m <sup>2</sup>
Mikroflora (<0,2 mm)	Bakterien (Bacteria und Archaea)	10 <sup>14</sup>
	Pilze (Fungi)	10 <sup>11</sup>
	Algen (Alga)	10 <sup>8</sup>
Mikrofauna (<0,2 mm)	Tierische Einzeller (Protozoa)	100 000 000
	Fadenwürmer (Nematoda)	1 000 000
	Rädertierchen (Rotifera)	10 000
	Bärtierchen (Tardigrada)	1 000
Mesofauna (0,2–2 mm)	Milben (Acari)	70 000
	Springschwänze (Collembola)	50 000
	Weisswürmer (Enchytraeidae)	30 000
Makrofauna (2–20 mm)	Regenwürmer (Lumbricidae)	100
	Doppelfüsser (Diplopoda)	100
	Hundertfüsser (Chilopoda)	100
	Tausendfüsser (Myriapoda)	100
	Käferlarven (Coleoptera)	100
	Zweiflüglerlarven (Diptera)	100
	Schnecken (Gastropoda)	50
	Asseln (Isopoda)	30
	Megafauna (>20 mm)	Amphibien, Reptilien, Säugetiere

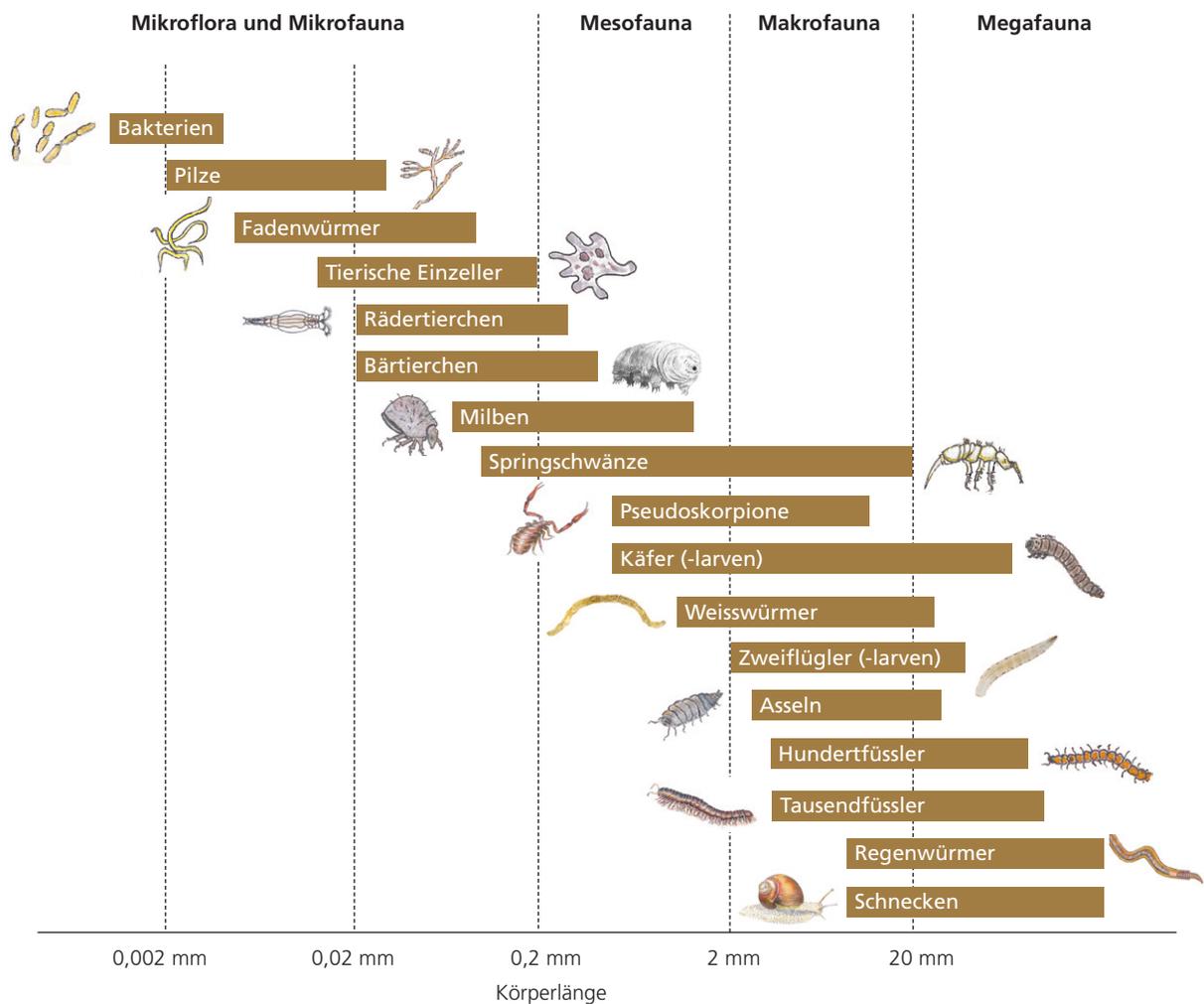


Abb. 3. Körperlängen der Bodenorganismen, respektive Durchmesser der Pilzfäden. Nach BRIONES 2014.

sauerstoffhaltigen Milieu ab, das heisst unter aeroben Bedingungen. Es gibt aber auch anaerobe Bakterienarten, die organische Substanz unter Sauerstoffarmut zersetzen. In der Regel sind dies Gärungs- und Fäulnisprozesse. Im Hinblick auf die Ernährungsweise lassen sich zwei Gruppen unterscheiden:

- **Autotrophe Bakterien** leben ohne organische Fremdstoffe. Sie beziehen die Energie aus dem Sonnenlicht, zum Beispiel die chlorophyllhaltigen blaugrünen Bakterien (Cyanobakterien).
- **Heterotrophe Bakterien** ernähren sich von organischer Substanz.

Für den Boden relevante Bakterien lassen sich hinsichtlich ihrer Funktion und Energiegewinnungsweise wie folgt einteilen:

- **Kohlenhydratabbauende Bakterien** bauen kohlenhydrathaltige Substanzen zu Zucker ab (z. B. Zellulose, Hemizellulose, Stärke).
- **Proteinzeretzende und ammonifizierende Bakterien** bauen Proteine zu Aminosäuren, Ammoniak und Ammonium ab.
- **Nitrifikanten** oxidieren Ammonium zu Nitrit bzw. Nitrat. Der Prozess wird als Nitrifikation bezeichnet.
- **Denitrifikanten** reduzieren Stickstoffoxide im anaeroben Milieu bis hin zu elementarem Stickstoff. Der Prozess wird als Denitrifikation bezeichnet (Nitrat zu Nitrit zu Lachgas zu elementarem Luftstickstoff).
- **Stickstoffbindende Bakterien** fixieren elementaren Luftstickstoff und wandeln ihn in organische N-Verbindungen um.
- **Methanbildner** nutzen die Bildung des Methans als Energiequelle. Die Fähigkeit zur Methanbildung findet sich ausschliesslich bei den Archebakterien (Archaeen). Die Methanbildner sind strikt anaerob (z. B. in stark verdichteten Böden).

**Pilze** (Fungi) sind wie die Tiere und die meisten Bakterien heterotroph. Sie ernähren sich von den organischen Nährstoffen ihrer Umgebung, die sie meist durch Abgabe von Enzymen aufschliessen und dadurch löslich und für sich verfügbar machen. Der Vegetationskörper der meisten Pilze besteht aus mikroskopisch feinen Fäden (Hyphen), die ein weitverzweigtes Pilzgeflecht bilden und

sich in oder auf einem festen Substrat, beispielsweise dem Erdboden, Holz oder anderem lebendem oder abgestorbenem organischem Gewebe, ausbreiten (Abb. 4). Viele Pilze bilden Fruchtkörper, die aus dem Boden herausragen (z. B. Steinpilze, Fliegenpilze). Daneben gibt es einzellige Pilze wie die Hefen.

- **Saprotrophe Pilze** wachsen auf totem organischem Material. Das Substrat, auf dem die Pilze siedeln, kann vielfältig sein: totes oder vermoderndes Holz, abgefallene Rinde, Nadelstreu, abgefallenes Laub, vermodernde grüne Teile von Pflanzen oder auch Dung. Saprotroph lebende Pilze zersetzen das Substrat bei der Entnahme der Nährstoffe. Durch die Zersetzung des toten Materials wird zum einen verhindert, dass sich das Material anhäuft, und zum anderen stehen durch die Pilze verwertete Stoffe wieder anderen Lebewesen zur Verfügung. Weissfäulepilze sind holzzersetzende Pilze, welche schwerabbaubares Lignin zersetzen können. Am Schluss bleiben weisse Zellulosefasern übrig. Braunfäulepilze hingegen können das Lignin nicht zersetzen, und deshalb bleibt am Schluss das Lignin in der Form von braunen würfelförmigen Strukturen übrig.
- **Parasitische Pilze** befallen andere lebende Organismen, vorwiegend Pflanzen. Sie wachsen auf oder in Wirtspflanzen und entziehen diesen lebensnotwendige Stoffe, wodurch der Wirt geschädigt wird oder abstirbt. Viele der parasitisch lebenden Pilzarten wie etwa der Hallimasch sind in der Lage, auf die saprotrophe Lebensweise umzustellen, wenn ihr Wirt gestorben ist.
- **Mykorrhizapilze** leben in Gemeinschaft mit den Wurzeln von Bäumen. Dies ist aber für beide Beteiligten von Vorteil (Symbiose). Während der Pilz von der Pflanze Kohlenstoffverbindungen erhält, gibt er der Pflanze Wasser und Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor ab. Einige Pilzarten, wie zum Beispiel der Fliegenpilz, können mit verschiedenen Baumarten vergesellschaftet sein, andere, wie etwa der Lärchen-Röhrling, sind nur auf eine Baumart angewiesen.

**Algen** (Alga) sind eukaryotische Lebewesen, die im Wasser oder auf dem Land leben und Photosynthese betreiben. Die

Algen sind keine einheitliche Gruppe, sie werden anhand ihrer Grösse in zwei Gruppen eingeteilt. Als Mikroalgen werden mikroskopisch kleine Arten zusammengefasst, zu denen insbesondere einzellige Formen gehören. Die Makroalgen dagegen sind mit blossen Auge erkennbar. Ihre Länge reicht von wenigen Millimetern bis zu 60 Metern. Die meisten Grossalgen leben im Wasser.

**Tierische Einzeller** (Protozoa) sind Lebewesen, die das Wasser und den Boden mit einem grossen Artenreichtum besiedeln. Sie sind heterotroph, das heisst, sie benötigen für ihren Stoffwechsel Substanzen von anderen Organismen. Viele Formen leben parasitisch. Zu den Protozoen gehören unter anderem die Wimperntierchen, die Geisseltierchen und die Schalenamöben. Der Begriff «Protozoen» ist veraltet und wird heute in der Systematik nicht mehr verwendet. Aufgrund ihrer Verschiedenartigkeit ist eine einfache systematische Einteilung der Einzeller gar nicht mehr möglich.

**Fadenwürmer** (Nematoda) sind ein sehr artenreicher Stamm des Tierreichs. Meist sind es relativ kleine, weisse bis farblose, fädige Würmchen, die in feuchten Substraten leben (Abb. 5). Auch bei den Fadenwürmern gibt es viele parasitisch lebende Gruppen. Ihr Nahrungsspektrum ist unterschiedlich und reicht von Bakterien und Algen über Pilze, Aas und Fäkalien bis hin zu räuberisch erbeuteten Tieren. Am Mund befinden sich oft kleine Fortsätze, die zur Nahrungsaufnahme oder zum Tasten benutzt werden. Dort wird die Nahrung hineingezogen und durch starke Muskeln zerquetscht.

**Rädertierchen** (Rotifera) sind vielzellige Lebewesen mit einer genetisch festgelegten, gleichbleibenden Anzahl Zellen. Am Kopf befinden sich bewegliche Wimpernkranze, die das sogenannte Räderorgan bilden. Rädertierchen treten in vielen Lebensräumen auf – in Bäumen, in feuchtem Moos oder zwischen Bodenpartikeln. Sie leben entweder dauerhaft an Pflanzen festsitzend, freischwebend im Wasser oder in organischen Substraten.

**Bärtierchen** (Tardigrada) bilden einen Tierstamm innerhalb der Häutungstiere. Die meist weniger als einen Millimeter

grossen, achtbeinigen Tiere erinnern in ihrem Aussehen und ihrer tapsig wirkenden Fortbewegungsweise etwas an Bären, wie auch ihr Name besagt. Sie leben weltweit im Meer, Süsswasser oder an Land in feuchten Lebensräumen, zum Beispiel in Mooskissen. Eine

Eigenschaft dieser Tiere ist die Kryptobiose, ein todesähnlicher Zustand, in dem sie extreme Umweltbedingungen lange Zeit überdauern können. Bärtierchen können sich sowohl vom Inhalt der Pflanzenzellen ernähren als auch räuberisch von kleinen Tieren wie Fadenwürmern

oder Rädertierchen, die sie anstechen und aussaugen.

**Milben** (Acari) gehören zu den Spinnentieren im Stamm der Gliederfüßer. Neben den Raubmilben gibt es solche, die sich von Pflanzen oder Pilzen er-



Abb. 4. Pilzfäden über- und durchwachsen die Streu- und Mineralbestandteile des Bodens für eine verbesserte Nährstoffaufnahme.

Abb. 5. Fadenwürmer leben sehr zahlreich im Boden und fressen vorwiegend Bakterien und Pilzfäden.



Abb. 6. Hornmilben leben vorwiegend im Humus und Boden und spielen eine wichtige Rolle bei der Streuzersetzung.



Abb. 7. Springschwänze gehören zu den Urinsekten und fressen vorwiegend verrottenes Pflanzenmaterial.



Abb. 8. Regenwürmer fressen kleine Erdpartikel, tierische und pflanzliche Abfallstoffe, Humusstoffe, Bakterien, Algen und Pilze.

Abb. 9. Weisswürmer gehören nebst den Regenwürmern zu den wichtigsten Zersetzern der Streue.

nähren, Aas fressen oder von abgestorbenem Gewebe leben (Abb. 6). Ausserdem gibt es unter den Milben viele Parasiten.

**Springschwänze** (Collembola) und Beintastler (Protura) sind zu den Sackkiefeln gehörende Gruppen der Sechsfüsser.

Sie finden sich vor allem in Humusschichten nicht zu trockener Böden (Abb. 7). Die meisten Arten sind Detritus-Fresser, das heisst, sie ernähren sich von verrottem Pflanzenmaterial, Exkrementen oder Aas. Neben diesen Allesfressern gibt es bei den Springschwänzen auch Spezialisten, die nur Algen, Pilze und Pollen

fressen oder Mikroorganismen abweiden.

**Regenwürmer** (Lumbricidae) sind im Erdboden lebende, gegliederte Würmer aus der Gruppe der Wenigborster. Sie fressen sich ständig kreuz und quer durch die Bodenschichten ihres Lebens-



Abb. 10. Doppelfüsser ernähren sich vorwiegend von pflanzlichen Resten.



Abb. 11. Hundertfüsser sind in der Regel nacht-aktive räuberische Tiere.

Abb. 12. Pseudoskorpione leben räuberisch und können bis zu vier Millimeter grosse Beutetiere erlegen.



Abb. 13. Viele Insektenlarven leben in ihrer Jugendphase im Boden. Links: Käferlarve eines Kurzflüglers (Staphylinidae). Rechts: Larve eines Schnellkäfers (Elateridae)



Abb. 14. Asseln fressen bevorzugt abgestorbene Pflanzenteile, Falllaub und morsches Holz.

bereiches (Abb. 8). Die dabei aufgenommene Erde enthält Detritus-Bestandteile, Bakterien, Pilzsporen und zahlreiche Einzeller, die verdaut und als Nahrung genutzt werden. Die Regenwürmer vermengen und verdauen diese Bestandteile und scheiden sie anschliessend als Wurm Kot wieder aus. Dieser enthält wertvolle Humusanteile, die Ton-Humus-Komplexe, in angereicherter Form. Durch die Beschaffenheit der Erde, die der Regenwurm erzeugt, werden die für den Boden nützlichen Mikroorganismen gefördert.

**Weisswürmer** (Enchytraeidae) sind eine artenreiche Familie aus der Gruppe der Wenigborster, zu denen auch die Regenwürmer gehören. Gemeinsam mit Asseln, Springschwänzen und den Regenwürmern sind die Enchytraen die wichtigsten Streuabbauer im Boden (Abb. 9).

Zu den **Tausendfüssern** (Myriapoda) gehören Zwerg-, Wenig-, Hundert- und Doppelfüsser. Zwergfüsser leben hauptsächlich in der obersten Bodenschicht, unter Dunghaufen sowie unter Steinen. Dabei ernähren sie sich von verrottenden oder lebenden Pflanzenteilen. Wenigfüsser besiedeln bevorzugt die oberen Zentimeter lockerer, humoser Böden und ernähren sich von Pilzfäden. Doppelfüsser leben im Boden oder in zerfallendem Holz und ernähren sich dort von pflanzlichem Abfall (Abb. 10).

**Hundertfüsser** (Chilopoda) gehören zu den Tausendfüssern. Sie sind Räuber und leben im Allgemeinen im Laub, unter Steinen, im faulen Holz oder im Erdreich versteckt (Abb. 11).

**Pseudoskorpione** (Pseudoscorpiones) gehören zu den Spinnentieren und sind nur wenige Millimeter gross. Sie kommen vor allem im Boden unter der Laubauflage oder in Moosen und an Pilzgeflechten sowie unter loser Baumrinde vor (Abb. 12). Mit ihren Scheren können sich gewisse Pseudoskorpione an ein Bein oder Haar eines Fluginsektes heften und so grosse Strecken zurücklegen.

**Doppelschwänze** (Diplura) werden den Sechsfüssern zugeordnet. Sie leben im Boden sowie unter Steinen, Laub oder Rindenstücken. Einige Arten sind auch im Moos zu finden, die anderen

sind Höhlentiere. Allgemein sind sie feuchteliebend und lichtscheu. Gewisse Doppelschwänze jagen Springschwänze und leben entsprechend räuberisch, andere Arten ernähren sich von organischem Material im Boden oder von Pilzfäden.

**Zweiflügler- (Diptera) und Käferlarven (Coleoptera):** Viele Larven von Zweiflüglern und Käfern leben in der Streu und im Boden, bis sie sich verpuppen. Dies kann ein oder mehrere Jahre dauern. Sie ernähren sich von organischen Substanzen jeglicher Art (Abb. 13).

**Asseln (Isopoda)** gehören zu den Höheren Krebsen. Die meisten Asseln sind Pflanzenfresser und zählen somit biologisch zu den Ersterzetzern (Abb. 14). Die Kiemen zum Atmen befinden sich an den hinteren Beinen. Verschiedene Arten zeigen jedoch unterschiedliche

Anpassungsstufen an ein Leben an Land. So gibt es neben der Kiemenatmung bei einigen Arten auch andere Atmungsorgane wie Tracheen oder Lungen. Da die Asseln ihre zarten Kiemenanhänge ständig feucht halten müssen, bevorzugen sie feuchte Habitate. Mit ihren Mundwerkzeugen können sie Falllaub und Totholz anfressen.

## Wurzeln in Waldböden

Wurzeln sind die unterirdischen Teile der Pflanzen und verankern diese im Boden. Die Wurzeln dienen auch der Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Boden und dem Transport in die oberirdischen Teile der Pflanze. Die Abgabe von Stoffen, zum Beispiel von Zucker, ermöglicht es den Wurzeln, Symbiosen mit Bakterien und Pilzen einzugehen. Die Fein- und Grobwurzeln durchdringen vor-

### Den Bodentieren auf der Spur

Du kannst die Bodentiere auch selbst beobachten: Durch Aussieben und Sortieren können die Bodenlebewesen in einem Vergrösserungsglas betrachtet werden (Abb. 15). Das Vorgehen ist wie folgt:

- Waldboden durch ein Sieb auf ein weisses Tuch streuen
- die Bodentiere mit einem Pinsel in eine Becherlupe legen
- mit der Becherlupe oder (sofern vorhanden) mit einem Binokular die Bodentiere beobachten
- anhand von Bestimmungstabellen oder Bestimmungsbüchern die Bodentiere bestimmen



Abb. 15. Die Bodentiere lassen sich mit Hilfe einer Becherlupe gut beobachten.

wiegend Grobporen, wogegen die Wurzelhaare auf die groben Mittelporen beschränkt sind. Nach dem Absterben der Wurzeln bilden sie mit offenen Wurzelröhren wichtige Wege für versickern des Wasser und für kleinere Bodentiere. Die absterbende Wurzelmasse trägt wesentlich zur Bildung von Humus bei.

## Der Humus – das Elixier des Waldbodens

Als Humus wird das gesamte tote organische Material eines Bodens bezeichnet. Als Ausgangsbasis dient abgestorbenes organisches Material von Pflanzen (Streu), aber auch von Tieren, Pilzen und Bakterien. Vermischt mit der Mineralerde ist dies der biologisch aktivste und nährstoffreichste Teil des Bodens. An der Humusbildung sind viele verschiedene Bodenlebewesen beteiligt (Abb. 17). Der Abbau der organischen Substanz erfolgt in mehreren Phasen.

### Zerkleinerungsphase

Streustoffe werden von der Makrofauna zerbissen, gefressen und umgewandelt wieder ausgeschieden. Anschliessend werden diese Verbindungen zum Beispiel durch Regenwürmer, Borstenwürmer oder Tausendfüsser in den Boden eingearbeitet. Dies begünstigt die Zugänglichkeit des Humus für die kleineren Bodenorganismen wie Springschwänze, Milben und Fadenwürmer.

### Abbau- und Umbauphase

Wie gut die Streu abgebaut werden kann, ist abhängig von ihrer Zusammensetzung. Entscheidend ist das Verhältnis Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N). Beim Laub von Erle, Esche, Robinie und Ulme liegen diese C/N-Werte in einem tiefen Bereich zwischen 12 und 25. Deshalb wird deren Streu rasch abgebaut. Das C/N-Verhältnis beim Laub von Bergahorn, Birke, Linde, Hagebuche, Pappel und Spitzahorn liegt in einem mittleren Bereich (zwischen 25 und 40), so dass deren Streu bereits deutlich langsamer abgebaut wird. Den langsamsten Abbau verzeichnet das Laub von Buche und Eiche und die Nadeln der Nadelbäume, denn deren C/N-Werte erreichen Werte bis 77. Ein weiteres Kriterium für die Geschwindigkeit des Streuabbaus ist der Lignin-Gehalt der Blätter und Nadeln. Nur spezialisierte Pilzarten sind fähig,

Lignin abzubauen. Bei der Buche, Eiche und Kastanie ist dieser Ligningehalt besonders hoch und der Abbau deshalb deutlich langsamer.

Die organischen Bestandteile werden enzymatisch gespalten, und es kommt zur Freisetzung einfacher anorganischer Komponenten (Mineralisierung). Daneben kommt es aber zu einer relativen Anreicherung von schwer abbaubaren Stoffen wie zum Beispiel Lignin.

Durch die oben beschriebenen Phasen entsteht zunächst Nährhumus, später entsteht Dauerhumus. Je nach Klima, Streu und geologischem Ausgangsmaterial entstehen unterschiedliche Humusformen. Die Humusformen geben uns Hinweise auf das Nährstoffumsetzungsvermögen im Oberboden und somit auch auf die biologische Aktivität im Boden.

Im Schweizer Wald bilden sich unter normal durchlässigen Böden die folgenden drei Humusformen: Mull, Moder und Rohhumus (siehe Abb. 18). Differenzierend sind die Abfolge und die Mächtigkeit der organischen Auflagehorizonte und die Vermischungstiefe von organischer Substanz mit der Mineralerde.

### Mull

Mull ist eine biologisch aktive Humusform. Charakteristisch ist eine meist nur einjährige Streuschicht (L-Horizont) und eine grosse Vermischungstiefe (über

8 cm) der organischen Substanz mit der Mineralerde. Durch diese Vermischung bekommt die Mineralerde eine dunkle, schwärzliche Farbe. Dieser Teil des Bodens wird als Oberboden (A-Horizont) bezeichnet. Hier dominieren die Bodenwühler, insbesondere Regenwürmer, aber auch Asseln, Tausendfüsser und andere Gliederfüsser. Je nach Jahreszeit kann durch die rege biologische Aktivität der Streuhorizont L auch ganz fehlen. Durch die Vermischung von Humusstoffen und Mineralerde entstehen Ton-Humus-Verbindungen, die gute Nährstoffspeicher sind. Die pH-Verhältnisse reichen von sauer bis alkalisch. Entscheidend bei der Zersetzung sind ein nicht zu tiefer pH-Wert und eine leicht abbaubare Streu. Des Weiteren sind für eine hohe biologische Aktivität ausgeglichene Witterungsverhältnisse notwendig. Solche Oberböden sind allgemein gut mit Nährstoffen versorgt: C/N-Verhältnis 9 bis 18.

### Moder

Der typische Moder ist ein saurer Humus mit starkem Pilzbefall, was bei feuchten Verhältnissen den charakteristischen Modergeruch hervorruft. Die Aktivität der Regenwürmer und auch anderer Bodenwühler ist wegen der Säure, Trockenheit oder schwer abbaubaren Streu stark gehemmt. Die Streuzersetzung verläuft sehr langsam, und es bildet sich unter der noch unzersetzten Streu-

### Im Boden ist es laut

Mit hochempfindlichen Mikrofonen können die Geräusche der Bodenlebewesen erfasst werden. Welche Organismen machen welche Geräusche oder wird der Boden sogar als akustisches Kommunikationsmedium benutzt (Abb. 16)? Die Forschung dazu steckt erst in der Anfangsphase. Ein erstes Projekt stammt von Marcus Maeder (Sounding Soil: Acoustic Ecology of Soils).

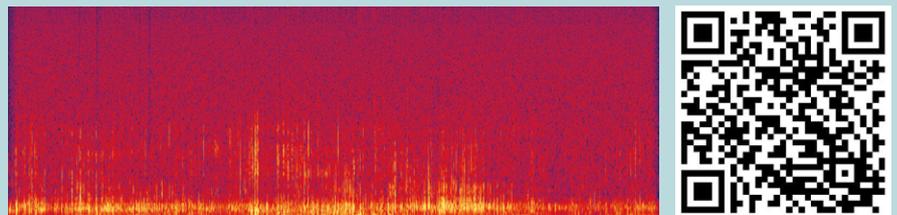


Abb. 16. Spektrogramm der Geräusche («Sonogramm») in der Humusform Mull eines Buchenwaldes bei Othmarsingen (Originalaufnahme von Marcus Maeder, linkes Bild), und dazugehöriger QR-Code, mit dem die Geräusche abgerufen werden können.



Abb. 17. Humusbildung – vom Blatt zum Humus. Eine Vielzahl von Bodenorganismen ist an den Phasen der Humusbildung beteiligt.

schicht (L-Horizont) ein mehrjähriger Fermentationshorizont (F-Horizont). Die Mächtigkeit des Oberbodens (A-Horizont) beträgt weniger als 8 cm. Beim Moder handelt es sich um eine Zwischenform zwischen Mull und Rohhumus. Der Moder ist biologisch weniger aktiv als der Mull aber aktiver als der Rohhumus: C/N-Verhältnis 17 bis 25.

### Rohhumus

Rohhumus entsteht in der Regel auf sauren Böden. Der Abbau der organischen Substanz ist durch die stark saure Bodenreaktion gehemmt. Unter stark sauren Bedingungen fehlen die für den Abbau der organischen Substanz verantwortlichen Bodenlebewesen weitgehend. Die säureresistenten Pilze genü-

gen für einen intensiven Abbau nicht. Deshalb bildet sich, im Gegensatz zum Moder, zusätzlich ein Humusstoffhorizont (H-Horizont). Die einzelnen organischen Auflagehorizonte (L+F+H-Horizonte) sind deutlich ausgeprägt. Die organische Auflage kann sehr mächtig sein, und die Übergänge zwischen den einzelnen Horizonten sind meist deutlich erkennbar. Durch die fehlende Durchmischung (Bioturbation) sind alle Horizonte gut voneinander zu trennen. Die Durchmischung des organischen Materials mit der mineralischen Feinerde findet meist nur noch durch Regenwasser statt. Der Oberboden (A-Horizont) ist daher in der Regel sehr geringmächtig (dünn) und nur schwach ausgebildet: C/N-Verhältnis 20 bis 33.

## Waldböden in Gefahr

### Verlust der Bodenqualität durch Verdichtung

Unsere Böden sind sehr störanfällige Luft-Wasser-Feststoff-Komplexe. Das Hohlraumsystem des Bodens (Porengehalt) ist dabei entscheidend für dessen Luft- und Wasserhaushalt. Durch Befahren mit schweren Holzerntemaschinen können Waldböden verdichtet werden. Vor allem die luftführenden Grobporen gehen dabei verloren, was das Wurzelwachstum und die Bodenlebewelt beeinträchtigt. Da die stärksten Verdichtungen bereits bei den ersten Überfahrten erfolgen, sollen die zum Ernten des Holzes benötigten Maschinen nur auf

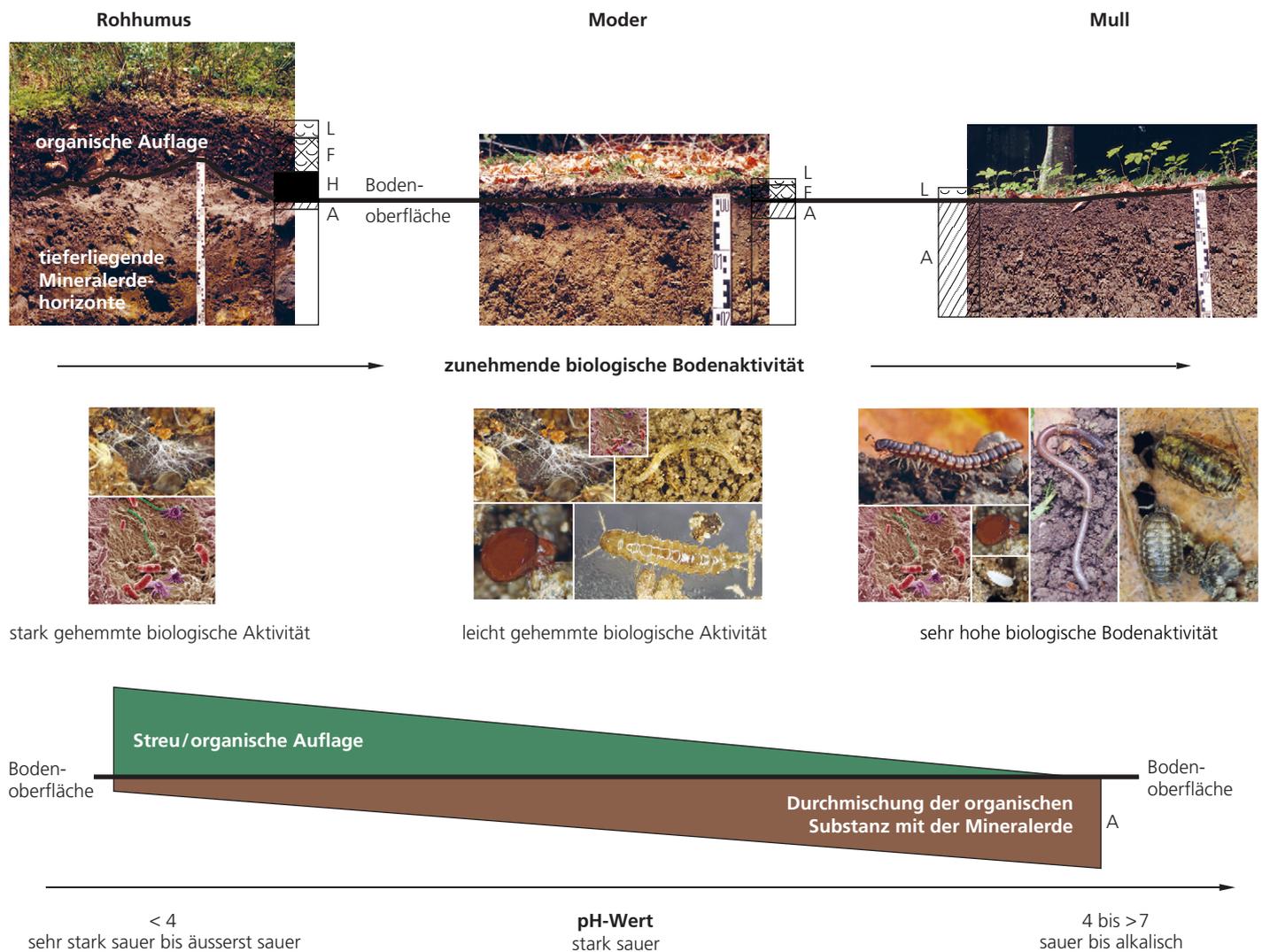


Abb. 18. Biologische Aktivität der verschiedenen Humusformen. Die Humusformen geben Hinweise auf das Nährstoffumsetzungsvermögen im Oberboden und somit auf die biologische Aktivität im Oberboden.

den geplanten Fahrlinien, den sogenannten Rückegassen, fahren.

In der Forstwirtschaft können Humusformen zur Beurteilung der Keim- und Anwuchsphase der verschiedenen Baumarten beigezogen werden. Sie geben uns beim physikalischen Bodenschutz Hinweise auf die Verdichtungsanfälligkeit der Oberböden, aber auch auf die Regenerationsfähigkeit von beeinträchtigten Böden nach einer Befahrung. So lässt sich ein Mull im Vergleich zu den anderen Humusformen leichter zusammendrücken, da er durch die rege Tätigkeit der Würmer sehr locker gelagert ist. Da die biologische Aktivität beim Mull sehr hoch ist, kann er sich allerdings auch schneller wieder erholen.

Beim Befahren eines Moders mit schweren Holzernte-Maschinen ist die Gefahr, dass sich bei nassen Witterungsverhältnissen die Reifen bis in den Unterboden durchdrücken grösser, da der Oberboden viel geringmächtiger ist als bei einem Mull. Böden mit Fahrspuren, bei denen die Eintiefung bis in den Unterboden reicht und die Bodenschichten seitlich ausgepresst und durchmischt werden, sind aus ökologischer Sicht geschädigt. Mit wissenschaftlichen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass im Boden unter solchen Fahrspuren (Spurtyp 3 genannt) anaerobe Verhältnisse herrschen, was sich auf die Bodenlebewesen und das Wurzelwachstum sehr ungünstig auswirkt (siehe FREY und HARTMANN 2013). Mit vielfältigen planerischen und technischen Massnahmen wird bei der Bewirtschaftung des Waldes das Ziel verfolgt, möglichst wenig Fahrspuren vom Spurtyp 3 zu verursachen. Vergleiche dazu auch das WSL-Merkblatt Nr. 45 «Physikalischer Bodenschutz im Wald» (LÜSCHER *et al.* 2010).

### Gefährdung durch Luftschadstoffe

Die mit dem Niederschlag in den Boden eingetragenen Säuren – insbesondere Schwefel- und Salpetersäure – führen allmählich zu einer Versauerung der Böden (Absinken der pH-Werte). Im Extremfall führt dies zu einem Verlust an Nährstoffen und zu einer Mobilisierung giftiger Metalle, die ihrerseits die Bodenlebewelt drastisch beeinträchtigen. Mehr dazu findet sich beispielsweise im Waldbericht 2015 – Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes, Kapitel «Boden» (RIGLING und SCHAFFER 2015).

### Verlust von Bodenmaterial (Erosion)

Fehlt die Vegetation, besteht die Gefahr, dass lose Bodenteilchen verloren gehen. Insbesondere Wind und Regen führen dann zu Erosionserscheinungen und Bodenverlusten. Je steiler das Gelände, desto grösser das Risiko. Durch naturnahe Forstwirtschaft wird ein Verlust von Bodenmaterial durch Erosion weitgehend verhindert.

### Boden und Mensch – Bodenschutz geht uns alle an!

Der Waldboden hat vielfältige Aufgaben und Nutzen, auch für den Menschen: Er saugt wie ein Schwamm den Regen auf und lässt das Wasser nur langsam in die tiefen Bodenschichten einsickern. Dieses durch den Boden gefilterte Wasser ist sauber und dient den Menschen als hervorragendes Trinkwasser. Durch sein grosses Wasserspeichervermögen verzögert der Waldboden den Wasserabfluss und schützt uns so wirkungsvoll vor Hochwassergefahren. Zudem versorgt der Boden die Wurzeln der Bäume und Sträucher mit Nährstoffen, Luft und Wasser und gewährt ihnen eine Verankerungsmöglichkeit. Der Waldboden speichert eine grosse Menge an Kohlenstoff. Der Wald ist das grösste Kohlenstoffreservoir in der Schweiz. Im Waldboden allein sind über 100 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare gespeichert.

Weil der Wald und insbesondere der Waldboden für den Menschen vielfältige Aufgaben erfüllt, gilt es ihn mit besonderen Massnahmen zu schützen und ihm Sorge zu tragen. Mit diesem Merkblatt soll das Verständnis für den Waldboden und insbesondere seine Bodenlebewesen gefördert werden. Es soll in Schulen und Kursen zur Anwendung

kommen und die Menschen bezüglich des fragilen Ökosystems Waldboden sensibilisieren.

### Weiterführende Literatur

- BARDGETT, R.D.; VAN DER PUTTEN, W.H., 2014: Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515: 505–511.
- BÄHRMANN, R., 1995: Bestimmung wirbelloser Tiere. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- BRIONES, M.J.I., 2014: Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. *Frontiers in Environmental Science* 2: 1–22.
- BRUCKNER, G., 1988: Lebensraum Boden. Kosmos Verlag, Stuttgart.
- BRUSSAARD, L., 1997: Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil. *Ambio* 26: 563–570.
- DUNGER, W., 1983: Tiere im Boden. Ziemsen Verlag, Wittenberg.
- FREY, B.; HARTMANN, M., 2013: Biodiversität von Waldböden. Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. In: Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6: 61–69.
- JEDICKE, E., 1989: Boden: Entstehung, Ökologie, Schutz. Otto Maier Verlag, Ravensburg.
- JEFFERY, S.; GARDI, C.; JONES, A.; MONTANARELLA, L.; MARMO, L.; MIKO, L.; RITZ, K.; PERES, G.; RÖMBKE, J.; VAN DER PUTTEN, W., 2010: European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- KLAUSNITZER, B. (Hrsg.), 2011: Stresemann – Exkursionsfauna von Deutschland. Wirbellose: Insekten. Spektrum Akademischer Verlag. 11. Auflage. 2: 976 S.
- LÜSCHER, P.; FRUTIG, F.; SCIACCA, S.; SPIJEVAK, S.; THEES, O., 2010: Physikalischer Bodenschutz im Wald. 2. Auflage, WSL Merkblatt für die Praxis 45: 1–12.
- RIGLING, A.; SCHAFFER, H.P. (Eds.), 2015: Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 144 S.

### Themenverwandte Merkblätter für die Praxis

Merkblatt Nr. 52: Totholz im Wald. Entstehung, Bedeutung und Förderung. T. LACHAT *et al.* 2014. Merkblatt Nr. 49: Pilze schützen und fördern. B. SENN-IRLET *et al.* 2012. Merkblatt Nr. 45: Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. P. LÜSCHER *et al.* 2010. Merkblatt Nr. 35: Mykorrhiza. Eine faszinierende Lebensgemeinschaft im Wald. S. EGLI *et al.* 2011.

Download oder Bestellung unter [www.wsl.ch/merkblatt](http://www.wsl.ch/merkblatt)

WALTHERT, L.; ZIMMERMANN, S.; BLASER, P.; LUSTER, J.; LÜSCHER, P., 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Region Jura. Hep Verlag, Bern.

ZETTEL, J., 2003: Blick in die Unterwelt: Ein illustrierter Bestimmungsschlüssel zur Bodenfauna. Verlag Agrarökologie, Bern, Hannover.

## Kontakt

Marco Walser, Doris Schneider Mathis

Eidg. Forschungsanstalt WSL  
Zürcherstrasse 111  
8903 Birmensdorf

marco.walser@wsl.ch  
doris.schneider@wsl.ch

## Fotos

Hanspeter Läser und Marco Walser (Abb. 1), Alice Dohnalkova/Pacific Northwest National Laboratory (Abb. 2), Marcus Mäder (Abb. 16), Marco Walser und Doris Schneider Mathis (alle anderen).

## Zitierung

WALSER, M.; SCHNEIDER MATHIS, D.; KÖCHLI, R.; STIERLI, B.; MAEDER, M.; BRUNNER, I., 2018: Der Waldboden lebt – Vielfalt und Funktion der Bodenlebewesen. *Merkbl. Prax.* 60. 12 S.

## Weiterführende Informationen

[www.wsl.ch/waldboden](http://www.wsl.ch/waldboden)

## Merkblatt für die Praxis ISSN 1422-2876

### Konzept

Im **Merkblatt für die Praxis** werden Forschungsergebnisse zu Wissenskonzentratoren und Handlungsanleitungen für Praktikerinnen und Praktiker aufbereitet. Die Reihe richtet sich an Forst- und Naturschutzkreise, Behörden, Schulen und interessierte Laien.

Französische Ausgaben erscheinen in der Schriftenreihe **Notice pour le praticien** (ISSN 1012-6554). Italienische Ausgaben erscheinen in loser Folge in der Schriftenreihe **Notizie per la pratica** (ISSN 1422-2914).

### Die neuesten Ausgaben (siehe [www.wsl.ch/merkblatt](http://www.wsl.ch/merkblatt))

Nr. 59: Der Schweizer Wald im Klimawandel: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? B. Allgaier Leuch *et al.* 2017. 12 S.

Nr. 58: Kupferstecher und Furchenflügeliger Fichtenborkenkäfer. B. Forster 2017. 8 S.

Nr. 57: Das Eschentriebsterben. Biologie, Krankheitssymptome und Handlungsempfehlungen. D. RIGLING *et al.* 2016. 8 S.

Nr. 56: Siedlungs- und Landschaftsentwicklung in agglomerationsnahen Räumen. Raumansprüche von Mensch und Natur. S. TOBIAS *et al.* 2016. 16 S.

Nr. 55: Die Eiche im Klimawandel. Zukunftschancen einer Baumart. P. BONFILS *et al.* 2015. 12 S.

Nr. 54: Der Kastanienrindenkrebs. Schadsymptome, Biologie und Gegenmassnahmen. D. RIGLING *et al.* 2014. 8 S.

Nr. 53: Lebensraumvernetzung in der Agrarlandschaft. Chancen und Risiken. D. CSENSICS *et al.* 2014. 8 S.

Nr. 52: Totholz im Wald. Entstehung, Bedeutung und Förderung. T. LACHAT *et al.* 2013. 12 S.

### Managing Editor

Martin Moritzi  
Eidg. Forschungsanstalt WSL  
Zürcherstrasse 111  
CH-8903 Birmensdorf  
martin.moritzi@wsl.ch  
[www.wsl.ch/merkblatt](http://www.wsl.ch/merkblatt)

Die WSL ist ein Forschungsinstitut des ETH-Bereichs.

Layout: Jacqueline Annen, WSL

Druck: Rüegg Media AG



**klimaneutral**

powered by ClimatePartner°

Druck | ID 11726-1503-1001



Mix

Produktgruppe aus vorbildlicher  
Waldwirtschaft und anderen kontrollierten  
Herkünften  
[www.fsc.org](http://www.fsc.org) Cert no. SCS-COC-100271  
©1996 Forest Stewardship Council