

Die Bodenfauna in den Wäldern Baden-Württembergs: vielfältig, bedeutend und gefährdet

Christian Bluhm, Heike Puhlmann, Peter Hartmann

Kurzfassung

Bodentiere bilden einen wichtigen Bestandteil der Biodiversität, spielen eine bedeutende Rolle für die Fruchtbarkeit von Böden und stellen einen wichtigen Teil des Nahrungsnetzes dar. Aufgrund ihrer geringen Größe und verborgenen Lebensweise ist bislang aber wenig über Vorkommen, Verbreitung und zeitlicher Entwicklung von Bodentiergemeinschaften bekannt. Mit dem hier vorgestellten Projekt soll ein Konzept für ein landesweites Bodenfaunamonitoring für Baden-Württemberg entwickelt werden, das sowohl repräsentative Aussagen zu zeitlichen Trends der Bodenfauna als auch deren Reaktion auf forstliche Managementmaßnahmen abbilden soll. Im Rahmen der Projektphase wurden hierzu in mehreren Probenahmekampagnen Daten zum Vorkommen von Regenwürmern, Hornmilben, Springschwänzen, Laufkäfern und weiteren bodenlebenden Makroarthropoden aufgenommen. Der Einfluss natürlicher Umweltgradienten und forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Dichte bzw. Biomasse, Artenzahl und Gemeinschaftsstruktur der Bodenfauna wurde analysiert.

Insgesamt zeigte sich, dass die Böden Baden-Württembergs eine vielfältige Bodenfauna beherbergen und die einzelnen untersuchten Tiergruppen unterschiedlich stark auf die Umwelteinflüsse wie pH-Wert, Waldtyp, Höhenstufe und Humusform sowie auf Managementeinflüsse wie Bodenschutzkalkungen oder einen Bewirtschaftungsverzicht reagieren. Regenwürmer zeigten eine deutliche Präferenz für Wälder mit höheren Boden-pH-Werten und hohem Laubbaumanteil. Ihr Vorkommen wiederum wirkte sich auf die Ausbildung der Humusform aus, die sich als Einflussgröße für die anderen Tiergruppen zeigte. Während Laufkäfer zahlreicher in Mull-Humusformen zu finden waren, nahmen die Dichten von Hornmilben bei gleichzeitiger Abnahme der Artenzahlen in Richtung Moder- und Rohumusformen zu. Die Gemeinschaften bodenlebender Makroarthropoden unterschieden sich zwischen den untersuchten Baumarten Fichte, Buche, Eiche und Douglasie, wobei interessanterweise die größte Trennung zwischen den beiden Nadelbaumarten Fichte und Douglasie erkennbar war. Die Bodenschutzkalkung führte zu einer deutlichen Zunahme der Regenwurmdichte, -biomasse und -artenzahl sowie zu artspezifischen Reaktionen innerhalb von Hornmilben und Springschwänzen. Laufkäfer zeigten keine Reaktion auf die Bodenschutzkalkung. Ein Bewirtschaftungsverzicht von Wäldern äußerte sich in einer Zunahme von Artenzahlen der Hornmilben und Springschwänze und einer Abnahme von denen der Laufkäfer.

Erkenntnisse über Zusammenhänge von Bodeneigenschaften, Umweltfaktoren und Bewirtschaftungsweise mit der Bodenfaunadiversität bilden die notwendige empirische Datengrundlage, auf deren Basis zukünftig Maßnahmen identifiziert werden können, welche die Bodenfaunadiversität erhalten oder fördern. Ein systematisches, dauerhaft angelegtes Monitoring der Bodenfauna in Wäldern kann zukünftig dazu beitragen, Gefährdungen frühzeitig zu erkennen und ggf. Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Stichwörter

Bodenfauna, Waldböden, Monitoring, Springschwänze, Hornmilben, Regenwürmer, Laufkäfer

Anschrift der Verfasser:

Dr. Christian Bluhm, Dr. Heike Puhmann, Dr. Peter Hartmann
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Abt. Boden und Umwelt
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg

The soil fauna in the forests of Baden-Württemberg: diverse, important and endangered

Abstract

Soil animals form a considerable part of biodiversity, play a significant role in soil fertility, and represent an important part of the food web. However, due to their small size and hidden lifestyle, little is known about the occurrence, distribution and temporal dynamics of soil animal communities. The project presented here aims to develop a concept for a state-wide soil fauna monitoring for Baden-Württemberg, which will provide representative information on temporal trends of soil animals as well as their reaction to forest management practices. During the project phase, data on the occurrence of earthworms, oribatid mites, springtails, carabid beetles and other soil-dwelling macroarthropods were recorded in several sampling campaigns. The effect of natural environmental gradients and forest management practices on density or biomass, species number and community structure on soil fauna was analyzed.

Overall, it was shown that the soils of Baden-Württemberg harbor a diverse soil fauna and that the individual animal groups studied react to varying degrees to environmental influences such as pH, forest type, altitude and humus form, as well as to forestry management measures such as soil protection liming or a cessation of management. Earthworms showed a clear preference for forests with higher soil pH values and a high proportion of deciduous trees. Their occurrence in turn affected the formation of humus form, which was shown to effect the other animal groups. While carabid beetles were more numerous in mull humus forms, densities but not species numbers of oribatid mites increased towards moder and raw humus forms. Communities of soil-dwelling macroarthropods differed among the tree species studied, spruce, beech, oak, and douglas-fir, with, interestingly, the greatest separation between the two conifer species, spruce and douglas-fir. Soil protection liming resulted in a significant increase in earthworm density, biomass, and species number, as well as species-specific responses within oribatid mites and springtails. Carabid beetles showed no response to soil protection liming. The absence of forest management resulted in an increase in species numbers of oribatid mites and springtails and a decrease of carabid beetles species.

Findings on the relationships between soil properties, environmental factors and management practices with soil fauna diversity provide the necessary empirical data on which to identify measures to maintain or promote soil fauna diversity. In the future, a systematic, permanent monitoring of soil fauna in forests can help to identify threats at an early stage and, if necessary, to initiate countermeasures.

Keywords

soil fauna, forest soils, monitoring, springtails, oribatid mites, earthworms, carabid beetles

1. Bodenbiodiversität und ihre Bedeutung für Ökosysteme

Mehr als 40 Prozent aller landlebenden Organismen besiedeln permanent oder periodisch den Boden und es wird vermutet, dass die unterirdische Gesamtbiomasse der oberirdischen entspricht oder diese sogar übersteigt (DECAËNS et al. 2006, FIERER et al. 2009, ANTHONY et al. 2023, FAO 2020). Besonders Waldböden sind dicht mit Lebewesen besiedelt und weisen eine hohe Artenvielfalt auf. Neben mikroskopisch kleinen Einzellern wie Bakterien und Pilzen bilden vor allem wirbellose Tiere wie Springschwänze, Hornmilben und Regenwürmer einen wichtigen Bestandteil der Biodiversität im Boden.

Wie in oberirdischen Lebensräumen besteht auch im Boden ein Zusammenhang zwischen taxonomischer und funktioneller Diversität. Bodenorganismen spielen eine wichtige Rolle für den Abbau toter organischer Substanz und die Bereitstellung von Nährstoffen, die Durchmischung von Bodenschichten oder als Antagonisten von Pflanzenschädlingen (BARDGETT 2005). Der Wegfall von Arten aus ihrem natürlichen Lebensraum infolge von Umweltveränderungen (z.B. Bodenversauerung oder Dürre) kann somit auch in Einschränkungen oder sogar im Verlust von wichtigen Ökosystemfunktionen resultieren. Der Erhalt der natürlichen Vielfalt im Boden ist dementsprechend ein wichtiges Anliegen, um die Funktionen des Waldes sowie seiner Dienstleistungen für den Menschen weiterhin zu gewährleisten (DECAËNS et al. 2006).

Trotz der unbestrittenen Bedeutung für ihre Umwelt sind Bodentiere in ökologischen Studien unterrepräsentiert. Das mag zum einen daran liegen, dass ein Großteil der bodenlebenden Organismen eher klein und unscheinbar ist und zum anderen, dass ihr Lebensraum für direkte Beobachtungen größtenteils unzugänglich ist. Die defizitäre Datenlage erschwert die Beurteilung zur Verbreitungs- und Gefährdungssituation bodenlebender Tierarten. In letzter Zeit wurde jedoch die funktionelle Bedeutung der Bodenorganismen zunehmend erkannt und eine ansteigende Zahl von Forschungsvorhaben widmet sich inzwischen den Interaktionen innerhalb unterirdischer Lebensgemeinschaften sowie ihrer Verbindung zur oberirdischen Welt (HUHTA 2007).

2. Forschungsprojekt als Auftakt für ein langfristiges Monitoring der Bodenfauna in Wäldern

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden und werden im Rahmen des Projekts „Biodiversität von Waldböden: Bodenfauna“ federführend durch die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) zusammen mit verschiedenen Kooperationspartnern (Professur für Bodenökologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz) durchgeführt. Das Projekt ist Teil des Sonderprogramms des Landes Baden-Württemberg zur Stärkung der biologischen Vielfalt (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/naturschutz/instrumente-des->

naturschutzes/foerderung/sonderprogramm). Übergeordnetes Ziel dieses Programms ist es, Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen, die dem beobachteten Artenrückgang entgegenwirken.

Mit dem Projekt soll der Grundstein für ein langfristiges Monitoring der Bodentiere in den Wäldern Baden-Württembergs gelegt werden. Ein solches Monitoring soll zum einen die geographische Verbreitung von Bodentierarten erfassen und deren zeitliche Veränderung beobachten. Zum anderen sollen mit Hilfe eines systematischen Monitorings Risiken für den Erhalt der natürlichen Diversität der Bodentiergemeinschaften, wie etwa klimatische Änderungen oder Einflüsse der Waldbewirtschaftung, erkannt werden.

Hierzu wurden Daten zu Vorkommen repräsentativer Bodentiergruppen entlang verschiedener Umwelt- und Bewirtschaftungsgradienten gewonnen, die als Grundlage für einen dauerhaft realisierbaren Monitoring-Ansatz der Bodenfauna in Waldböden Baden-Württembergs dienen sollen. Um zukünftig die Nutzung potentiell zeit- und kosteneffizienter Erhebungsverfahren zur Erfassung der Bodenmesofauna (DNA-Metabarcoding) zu ermöglichen, wurden in Kooperation mit dem Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz zudem Barcodes von bislang noch nicht in Datenbanken hinterlegten Arten erstellt.

3. Untersuchungsflächen

Für das Monitoring wurden bislang 129 Untersuchungsflächen in den Wäldern Baden-Württembergs ausgewählt, auf denen Abundanz und Gemeinschaftsstruktur relevanter Bodentiergruppen erfasst wurden (Abb. 1). Die ausgewählten Untersuchungsflächen sind vorwiegend Teil bereits bestehender nationaler und internationaler Monitoringprogramme (unter anderem Bodenzustandserhebung und Intensives Forstliches Umweltmonitoring). Die Flächenauswahl erfolgte mit dem Ziel, wichtige natürliche Umweltgradienten, insbesondere die verschiedenen Wuchsgebiete Baden-Württembergs, Höhenstufen, Bodentypen und Humusformen abzudecken („Basismodul“). Durch die Einbeziehung vorhandener Monitoring- und Inventurflächen können die Bodentierdaten mit einer Vielzahl an Umweltvariablen verknüpft werden, die für diese Flächen vorliegen. Langfristig sollen so Erkenntnisse über die Auswirkungen von großräumig ablaufenden Prozessen wie die Bodenversauerung und -eutrophierung, klimatische Veränderungen oder Auswirkungen der Waldbewirtschaftung auf die Bodenfauna abgeleitet werden.

Flächennetze weiterer Projekte der FVA wurden einbezogen, um den Einfluss konkreter Waldmanagementmaßnahmen auf die Bodenfauna zu untersuchen. So werden in den Wäldern Baden-Württembergs Bodenschutzkalkungen durchgeführt, um versauerte Böden zu regenerieren und einer weiteren Versauerung der Böden entgegenzuwirken. Acht Langzeitversuchsflächen in unterschiedlichen Wuchsgebieten, in welchen die Auswirkung von Kalkungen auf chemische und biologische Bodenparameter untersucht wird

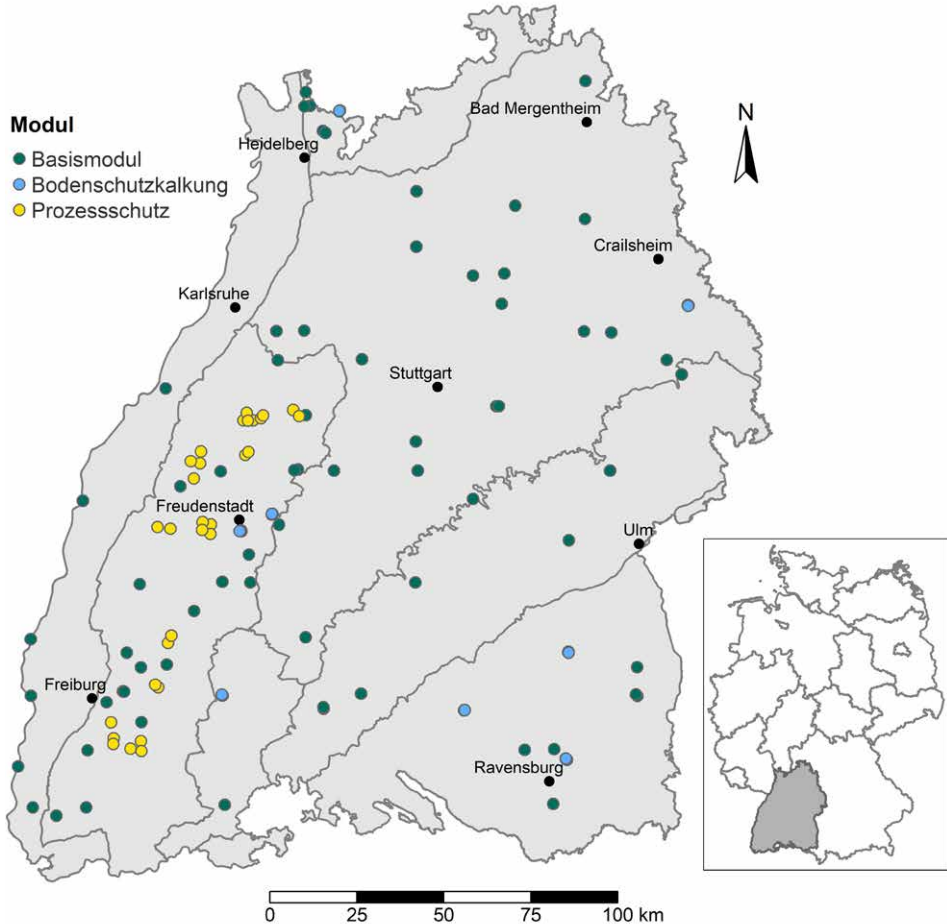


Abb. 1: Geografische Lage der 129 im Rahmen des Projekts bearbeiteten Untersuchungsflächen und deren Modulzugehörigkeit. **Fig. 1:** Geographical location of the 129 plots investigated within the project and their module affiliation.

(JANSONE et al. 2020), bildeten in dem Bodenfaunamonitoring das Modul „Bodenschutzkalkung“. Pro Standort werden jeweils Flächen mit drei Kalkungsvarianten mit einer benachbarten ungekalkten Kontrollfläche verglichen.

Um die Auswirkung eines Bewirtschaftungsverzichts auf die Bodenfauna zu untersuchen, wurden zudem in der ersten Projektphase 15 Flächenpaare verglichen, welche jeweils aus einem naturnah bewirtschafteten Wald und einem benachbarten Prozessschutzwald bestehen (Modul „Prozessschutz“). Die Flächen liegen im Nord- und Südschwarzwald und sind Teil eines Projekts der Abteilung Waldnaturschutz der FVA („Waldbiodiversität entlang eines Bewirtschaftungsgradienten“), das ebenfalls im Rahmen des Sonderpro-

gramms zur Stärkung der Biodiversität durchgeführt wird. In den untersuchten Prozessschutzwäldern ruhte die Nutzung zum Zeitpunkt der ersten bodenfaunistischen Probenahme im Herbst 2018 seit 15 bis 107 Jahren (Mittelwert 41 Jahre).

4. Untersuchte Tiergruppen

Je nach ihrer Körpergröße bzw. dem Körperdurchmesser, die sich auf die Mobilität in der porösen Bodenumgebung auswirken, werden die Bodenorganismen in Mikroflora (Bakterien, Archaeen, Pilze, Algen) und Mikro- (< 0,1 mm; Fadenwürmer, Protozoen u.a.), Meso- (0,1–2 mm; Milben, Springschwänze, Beintastler, Doppelschwänze, Wenigfüßer u.a.) und Makrofauna (> 2 mm; die meisten Insekten, Regenwürmer, Tausendfüßer, Asseln u.a.) unterteilt (SWIFT et al. 1979, Abb. 2).

Aus dieser Vielzahl an bodenbesiedelnden Tiergruppen wurden Regenwürmer, Laufkäfer, Springschwänze und Hornmilben als Repräsentanten für eine genauere Untersuchung ausgewählt (Abb. 2). Die beprobten Artengruppen decken sowohl verschiedene Ernährungsweisen als auch unterschiedliche Größenklassen ab und besiedeln verschiedene Schichten des Bodens.

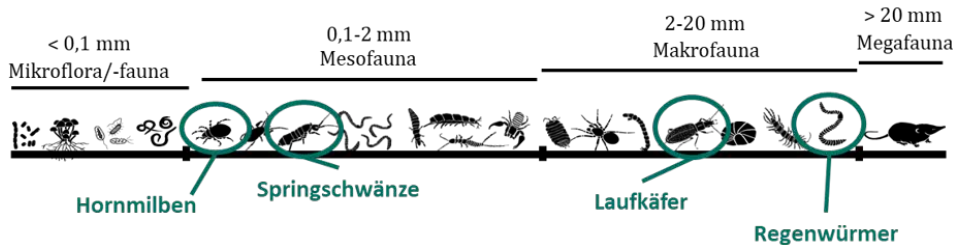


Abb. 2: Klassifizierung der Bodenorganismen nach ihrer Körpergröße (nach SWIFT et al. 1979) und für das Projekt ausgewählte Tiergruppen. © Zeichnungen Bodenorganismen: Dr. Svenja Meyer, Georg-August-Universität Göttingen, Abt. Tierökologie. **Fig. 2:** Classification of soil organisms according to their body size (according to SWIFT et al. 1979) and animal groups selected for the project. © Drawings of soil organisms: Dr. Svenja Meyer, Göttingen University, Dept. of Animal Ecology.

An einem Teilkollektiv der Flächen wurden zudem einmalig verschiedene Artengruppen der Makroarthropoden beprobt und auf größerer taxonomischer Ebene identifiziert (Spinnen (Araneae); Weberknechte (Opiliones); Hundertfüßer (Chilopoda): Steinläufer (Lithobiomorpha), Erdläufer (Geophilomorpha), Riesenläufer (Scolopendromorpha); Doppelfüßer (Diplopoda): Schnurfüßer (Julida), Bandfüßer (Polydesmida), Saftkugler (Glomerida), Pinselfüßer (Polyxenida); Asseln (Isopoda); Käfer (Coleoptera): Imagines, Larven; Zweiflüglerlarven (Diptera); Ameisen (Formicidae): Schuppenameisen (Formicinae), Knotenameisen (Myrmicinae); Pflanzenläuse (Sternorrhyncha); Sonstige: Wan-

zen (Heteroptera), Fransenflügler (Thysanoptera), sonstige Hautflügler (Hymenoptera ohne Formicidae)). Zusätzlich wurden aus diesen Proben Individuen einiger Gruppen der Mesofauna (Zwergfüßer (Symphyla), Wenigfüßer (Pauropoda), Pseudoskorpione (Pseudoscorpiones), Doppelschwänze (Diplura), Beintaster (Protura)) gezählt, die aufgrund zu geringer Dichten in den kleineren Bodenkernen nicht in ausreichendem Maße zur statistischen Auswertung erfasst werden konnten.

Regenwürmer (Lumbricidae)

Die als Makrofauna geltenden Regenwürmer (Abb. 3) fungieren als Primärzersetzer, d.h. sie ernähren sich von totem pflanzlichen Material. Regenwürmer zählen zu den wichtigsten Bodentieren, da sie durch ihre Grabaktivitäten und die damit verbundene Durchmischung der organischen und mineralischen Bodenschichten großen Einfluss auf das Bodengefüge ausüben (EHRMANN 2015). Mit ihren Grabgängen und Ausscheidungen bilden sie wertvolle Mikrohabitate für die Mikro- und Mesofauna. Gleichzeitig können sie aber antagonistisch auf humusbesiedelnde Arten der Mesofauna wirken, da sie deren Habitat und Nahrungsgrundlage reduzieren. In der Regel besiedeln Regenwürmer bevorzugt Standorte mit leicht sauren bis leicht alkalischen Böden. Aufgrund ihrer Lebensweise werden Regenwurmartarten oftmals in drei ökologische Gruppen eingeteilt. Epigäische Arten leben auf der Bodenoberfläche und ernähren sich von der Streuschicht des Bodens.



Abb. 3: Eine typische Regenwurmart (*Lumbricus rubellus*) der meisten Waldstandorte; © Christian Bluhm. **Fig. 3:** A typical earthworm species (*Lumbricus rubellus*) of most forest sites; © Christian Bluhm.

Sie sind daher besonders zahlreich in Böden mit einer gut ausgeprägten Streuauflage anzutreffen. Endogäische Arten graben sich in horizontalen Röhren durch den Mineralboden und kommen in der Regel nur selten oder gar nicht an die Bodenoberfläche. Sie nehmen große Mengen an Oberboden auf, aus dem die organischen Bestandteile gefiltert werden und tragen mit ihrer Losung wesentlich zur krümeligen Struktur des Oberbodens bei. Aneuzische Arten bauen tiefe vertikale Röhren und kommen zur Losung und/oder Nahrungsaufnahme an die Bodenoberfläche. Einige Arten ziehen Streu von der Bodenoberfläche in tiefere Bodenschichten und sorgen somit für eine Anreicherung organischer Substanz im Mineralboden.

Springschwänze (Collembola) und Hornmilben (Oribatida)

Die sehr arten- und individuenreichen Springschwänze und Hornmilben (Abb. 4) besiedeln vorwiegend die Humusauflage von Böden. Neben vereinzelten Pflanzenfressern, Räubern und Primärzersettern handelt es sich bei ihnen vorwiegend um pilz- und bakterienfressende Sekundärzersetzer. Springschwänze und Hornmilben sind Mikroarthropoden mit einer Körperlänge von zumeist 0,2–2 mm und gehören damit zur sogenannten Mesofauna. Obwohl phylogenetisch nicht näher verwandt, haben diese beiden Gruppen

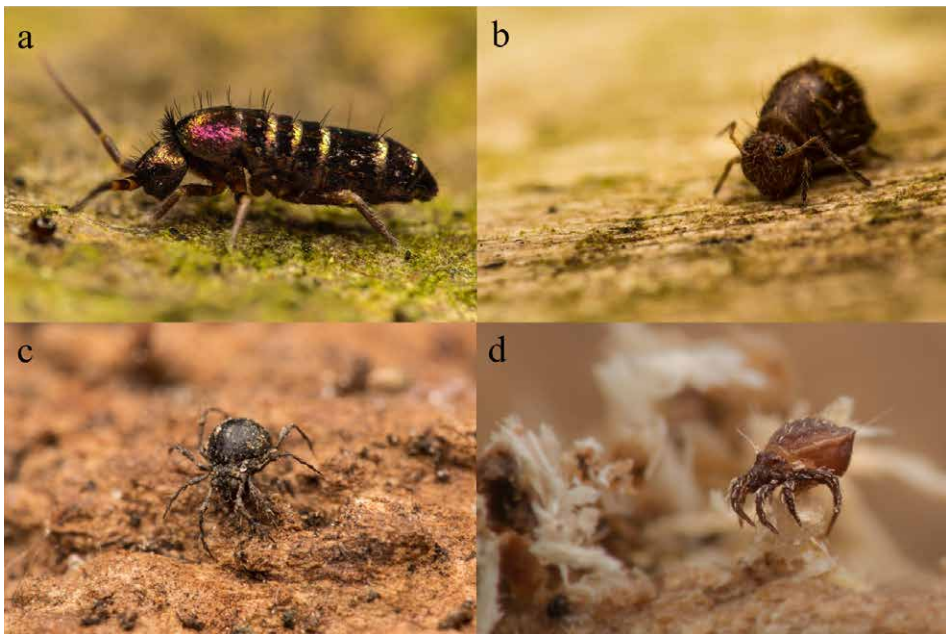


Abb. 4: Beispiele für Vertreter der Springschwänze (a) *Tomocerus vulgaris*, (b) *Allacma fusca* und Hornmilben (c) *Damaeus onustus*, (d) *Nothrus palustris*; © Sarah Bluhm. **Fig. 4:** Examples of springtails (a) *Tomocerus vulgaris*, (b) *Allacma fusca* and oribatid mites (c) *Damaeus onustus*, (d) *Nothrus palustris*; © Sarah Bluhm.

sehr ähnliche Ansprüche an ihren Lebensraum und kommen in der Regel zusammen vor. Sowohl Springschwänze als auch Hornmilben kommen in den meisten Böden in hohen Dichten vor und weisen eine hohe lokale Diversität auf. Generell nimmt ihre ökologische Bedeutung in sauren Böden zu, in denen die Dichten makrofaunaler Zersetzer wie Regenwürmer, Tausendfüßer oder Schnecken gering sind.

Laufkäfer (Carabidae)

Laufkäfer (Abb. 5) bilden eine der artenreichsten Gruppen innerhalb der Käfer. Ein Großteil der Laufkäferarten ernährt sich räuberisch und jagt vorwiegend auf der Bodenoberfläche oder in den oberen Bodenschichten (TRAUTNER 2017). Während sich viele Arten generalistisch ernähren, gibt es jedoch auch einige Arten, die sich auf bestimmte Beutetiere, z.B. Springschwänze oder Schnecken, spezialisiert haben. Je nach Entwicklungsstadium kann sich allerdings sowohl das Beutespektrum als auch das Aktivitätsmuster innerhalb einer Art unterscheiden. Laufkäferzönosen reagieren oftmals empfindlich auf Standortveränderungen und können daher als Bioindikatoren unter anderem für anthropogene Störungen und Belastungen herangezogen werden.



Abb. 5: Beispiele für Vertreter der Laufkäfer: (a) *Carabus auronitens*, (b) *Cincindela campestris*, (c) *Notiophilus biguttatus*. © Christian Bluhm (a), Sarah Bluhm (b,c). **Fig. 5:** Examples of representatives of carabid beetles. (a) *Carabus auronitens*, (b) *Cincindela campestris*, (c) *Notiophilus biguttatus*. © Christian Bluhm (a), Sarah Bluhm (b,c).

5. Erfassungsmethoden

Bislang fanden insgesamt vier Probenahmekampagnen statt, an denen Erfassungen der ausgewählten Bodentiergruppen in unterschiedlichem Umfang durchgeführt wurden (Tab. 1). Die beprobten Tiergruppen wurden hinsichtlich Abundanz, Artenzahl, Biomasse (nur Regenwürmer und Laufkäfer) und Gemeinschaftsstruktur untersucht. Für die jeweilige Zielgruppe wurden angepasste Beprobungs- bzw. Extraktionsmethoden angewandt, die auch (semi-)quantitative Aussagen über das Vorkommen der einzelnen Bodentiergruppen ermöglichen.

Probenahmetermin	Regenwürmer	Laufkäfer	Springschwänze und Hornmilben	Makroarthropoden (+Mesofauna)
Herbst 2018	–	99	99	–
Frühjahr 2019	96	99	99	–
Herbst 2020	–	–	99	23
Frühjahr 2021	47	–	–	–

Tab. 1: Durchgeführte Beprobungen mit Anzahl der beprobten Flächen für die verschiedenen Bodentiergruppen.
Tab. 1: Sampling campaigns and number of sampled plots for the different soil fauna groups.

Regenwürmer wurden mit einer Kombination aus Elektrofang auf 1/8 m² und anschließender Handauslese auf 1/30 m² an sechs Probepunkten pro Untersuchungsfläche erfasst. Beim Vorkommen anezischer Arten wurde ergänzend eine Austreibung mit AITC (Allylisothiocyanat) vorgenommen. Dazu wurde die Grube der Handauslese auf 1/8 m² erweitert und mindestens 4 l (= 32 l/m²) einer AITC-Lösung (100 mg AITC/l) ausgebracht. Da die Fangquote abhängig von der Lebensweise der Regenwurmarten ist, stellt eine Kombination dieser Methoden sicher, dass die einzelnen Ökotypen (epigäisch, endogäisch und anezisch) möglichst komplett erfasst werden.

Für die Erfassung von Springschwänzen und Hornmilben wurden pro Untersuchungsfläche jeweils vier Bodenkerne mit einem Stechzylinder (Durchmesser 5 cm, Höhe 4 cm) entnommen und anschließend mittels Hitze über einen Zeitraum von 10 Tagen bei gradueller Erhöhung der Temperatur extrahiert (Macfadyen-High-Gradient-Extraktor).

Die Aufnahme von Laufkäfern erfolgte mit Bodenfallen. Pro Untersuchungsfläche und Probenahmetermin wurden drei Fallen installiert und nach zwei und vier Wochen geleert. Da die meisten Laufkäfer aktiv auf der Bodenoberfläche nach Nahrung suchen, stellen Bodenfallen eine effiziente Methode zum Fang dieser Tiergruppe dar. Im Vergleich zu den anderen Beprobungsmethoden ist diese Fangmethode jedoch als semiquantitativ zu betrachten, da sie von der Laufaktivität und den phänologischen Aktivitätsmustern der einzelnen Arten abhängt.

Makroarthropoden wurden mit jeweils acht Stechzylinderproben pro Fläche (Durchmesser 10 cm, Höhe 4 cm + Streuauflage) beprobt. Die Makroarthropoden wurden im Labor

analog zum Extraktionsschema der Mesofauna mittels Hitzeextraktion aus den Bodenkernen ausgetrieben.

6. Ergebnisse

Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes 22 Regenwurm- (5.067 Individuen), 67 Laufkäfer- (8.650 Individuen), 114 Springschwanz- (34.153 Individuen) und 194 Hornmilbenarten (60.704 Individuen) erfasst (Abb. 6). Mehr als Dreiviertel der Arten gehören zu den beiden Mesofaunagruppen Hornmilben (49 %) und Springschwänze (29 %). Die ökologisch bedeutsame Gruppe der Regenwürmer macht bei der Artenvielfalt weniger als 6 % aus, die Laufkäfer nehmen mit ca. 17 % eine Zwischenstellung ein. Die zwei Springschwanzarten *Protaphorura saltuaria* (Pomorski und Kaprus 2007) und *Stenaphorura lubbocki* (Bagnall 1935) sowie die Hornmilbenart *Xenillus salamoni* (Mahunka 1996) stellen potentielle Neufunde für Deutschland dar. Bei der Aussortierung des Probenmaterials wurde zudem die Raubmilbenart *Amblyseius krantzi* (Chant 1959) als Neufund für Deutschland registriert (FARAJI & HOEKSTRA 2021).

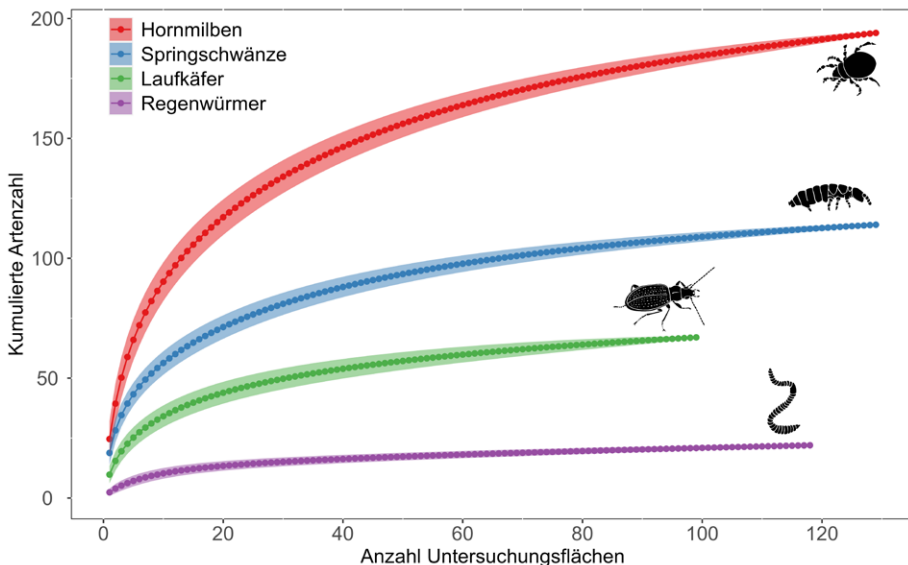


Abb. 6: Artenakkumulationskurven der vier auf Artniveau untersuchten Bodentiergruppen. **Fig. 6:** Species accumulation curves of the four groups of soil animals studied at species level.

Je nach Artenreichtumsschätzer konnten durch unseren Untersuchungsaufwand zwischen 48–88 % der Regenwurm-, 85–91 % der Laufkäfer-, 89–93 % der Springschwanz- und 83–92 % der insgesamt zu erwartenden Hornmilbenarten erfasst werden (Tab. 2).

Untersuchte Artengruppen	Erfasste Arten	Artenreichtumsschätzer			
		Chao	Jackknife 1	Jackknife 2	Bootstrap
Regenwürmer	22	46	29	35	25
Laufkäfer	67	79	81	87	74
Springschwänze	114	128	133	139	123
Hornmilben	194	236	234	254	214

Tab. 2: Extrapolation der Artenzahl mittels verschiedener Artenreichtumsschätzer. Die Differenz aus den tatsächlich erfassten Arten und der durch die jeweiligen Artenreichtumsschätzer berechneten Artenzahlen stellt die Anzahl an Arten dar, die bei höherem Beprobungsaufwand noch zusätzlich auf den untersuchten Flächen zu erwarten gewesen wären. **Tab. 2:** Extrapolation of species numbers using different species richness estimators. The difference between the number of species actually recorded and the number of species calculated by the respective species richness estimators represents the number of additional species that would have been expected on the surveyed plots with increased sampling effort.

Unseren Daten zufolge beherbergt ein Quadratmeter Waldboden in Baden-Württemberg durchschnittlich 12.810 Springschwänze, 27.207 Hornmilben sowie 62 Regenwürmer, letztere mit einer Biomasse von fast 25 g/m². Die durchschnittlichen Aktivitätsdichten bzw. -biomassen von Laufkäfern betragen 44 Individuen bei 12,5 g pro Untersuchungsfläche. Überdies finden sich noch pro Quadratmeter Waldboden folgende Individuenzahlen der Meso- und Makrofauna: 78 Wenigfüßer, 244 Zwergfüßer, 1.080 Beintaster, 225 Doppelschwänze, 37 Pseudoskorpione, 343 Hundertfüßer, 316 Doppelfüßer, 22 Asseln, 283 Spinnen, 1.362 Pflanzenläuse, 11 Wanzen, 48 Fransenflügler, 149 Käferimagines (ohne Laufkäfer), 321 Käferlarven, 364 Ameisen und 149 Zweiflüglerlarven. In Anbetracht der methodisch bedingten Unvollständigkeit der Erfassung und der Begrenzung der beprobten Bodentiefe auf die oberen Zentimeter für die Meso- und Makroarthropoden sind die tatsächlichen Abundanzen vor allem der Mesofauna allerdings als noch weitaus höher einzuschätzen (ANDRÉ et al. 2002). Durch die Aufnahme der Regenwürmer in den Folgejahren der Trockenjahre 2018 und 2020 und die Überrepräsentanz der (sauren) Schwarzwaldstandorte werden vermutlich auch die durchschnittlichen Regenwurmabundanzen und -biomassen unterschätzt.

Natürliche Umweltgradienten

Die Artenvielfalt der untersuchten Bodentiergruppen zeigte sich erstaunlich konstant über die abgedeckten Gradienten (Abb. 7). Insgesamt wiesen aber Laub- und Mischwälder etwas höhere Artenzahlen auf als Nadelwälder, was vermutlich auch eine Folge niedrigerer pH-Werte letzterer Standorte ist. Die Artenzahlen nahmen in allen Artengruppen von Mull- über Moderhumusformen bis Rohhumus moderat ab und könnten damit auf eine höhere Anzahl an ökologischen Nischen für Mullstandorte hindeuten.

Deutlichere Unterschiede als bei den Artenzahlen zeigten sich hingegen bei den Dichten bzw. Biomassen (Abb. 8). So nahm etwa die Regenwurmdichte und -biomasse um ein Vielfaches von sauren Böden in Richtung neutraler Böden zu, ebenso wie mit zunehmen-

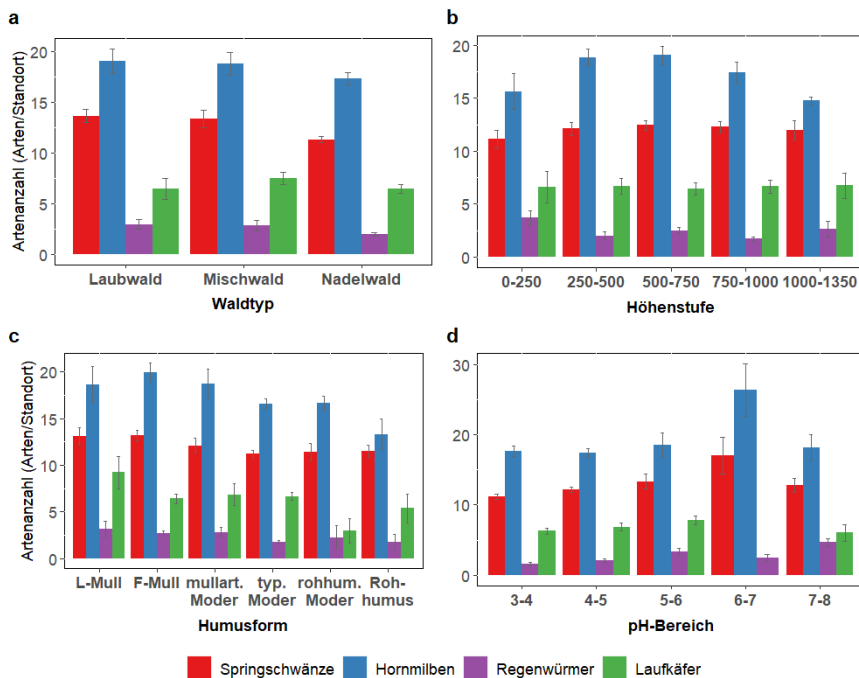


Abb. 7: Artenanzahl der untersuchten Bodentiergruppen entlang verschiedener Umweltgradienten. **Fig. 7:** Species numbers of the studied groups of soil animals along various environmental gradients.

den Laubbaumanteil. Besonders die Böden der Auenwaldstandorte stachen hierbei mit einer Dichte von bis zu knapp 400 Individuen/m² und einer Biomasse von bis zu 180 g/m² hervor. Die starke Auswirkung der Regenwurmaktivität auf den Bodenlebensraum lässt sich durch die starke Korrelation mit der Ausprägung der Humusform erahnen. Die Laufkäfer zeigten mit der Abnahme ihrer Biomassen von Mull über Moder zu Rohhumus ein ähnliches Muster wie die Regenwürmer, während weder für die Höhenstufe oder den Waldtyp noch für den pH-Bereich eine eindeutige Präferenz abgeleitet werden konnte.

Einen gegensätzlichen Trend zu den Regenwürmern zeigten die Dichten der Hornmilben. Diese nahmen mit zunehmendem pH-Wert, Laubwaldanteil, niedrigeren Höhenlagen und „günstiger“ Humusform ab. Wahrscheinlich ist dies eine Folge abnehmender Humusaufgaben entlang dieser Gradienten, die sowohl Habitat als auch Nahrung der Hornmilben darstellen. Für die ebenso vorwiegend streubesiedelnden Springschwänze konnte dieses Muster überraschenderweise jedoch nicht beobachtet werden.

Die Erfassung der Makroarthropoden erfolgte nur auf einer Unterstichprobe des Gesamtflächensets, weshalb hier die für die vorigen Tiergruppen diskutierten Umweltvariablen nicht beurteilt werden können. Die Auswahl der Flächen fokussierte auf den Vergleich der Baumarten Buche, Fichte, Eiche und Douglasie.

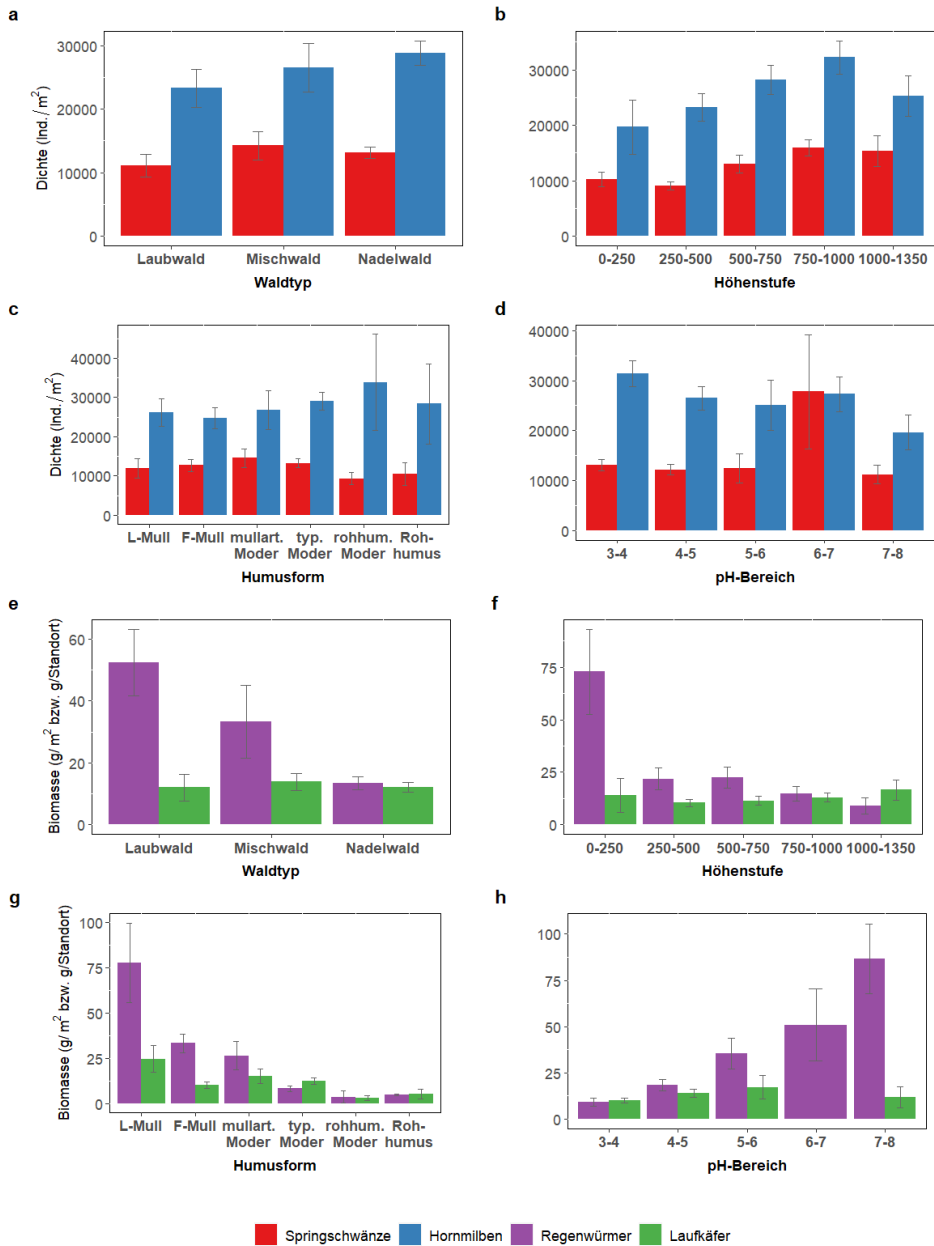


Abb. 8: Dichten und Biomassen von (a)–(d) Springschwänzen und Hornmilben bzw. (e)–(h) Regenwürmern und Laufkäfern entlang verschiedener Umweltgradienten. Biomasse Regenwürmer in g/m²; Biomasse Laufkäfer in g/Standort (Fänge aus drei Bodenfallen innerhalb von vier Wochen). **Fig. 8:** Densities and biomasses of (a)–(d) springtails and oribatid mites (e)–(h) earthworms and carabid beetles along different environmental gradients. Earthworm biomass in g/m²; carabid beetle biomass in g/site (catches from three pitfall traps within four weeks).

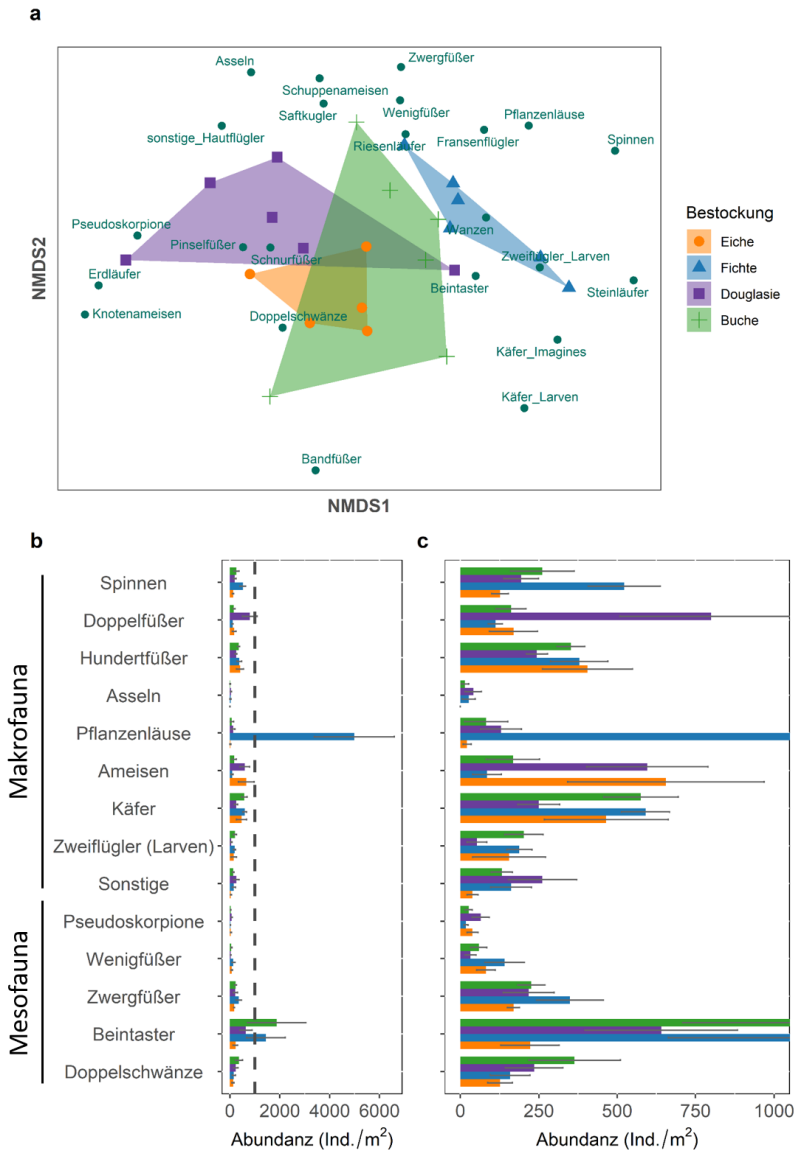


Abb. 9: Einfluss der Bestockung auf (a) Gemeinschaftsstruktur und (b, c) Dichte bodenlebender Makro- sowie einiger Mesofaunagruppen. Die Darstellung der Gemeinschaftsstruktur erfolgte mit einer Nichtmetrischen Multi-dimensionalen Skalierung (NMS) mit Bray-Curtis-Unähnlichkeitsmaß ($k = 3$, Stress = 0,141). Aufgrund stark unterschiedlicher Dichten der einzelnen Tiergruppen wurde der in (b) mit einer gestrichelten Linie markierte Abschnitt zur besseren Lesbarkeit in (c) vergrößert dargestellt. **Fig. 9:** Influence of forest type on (a) community structure and (b, c) density of soil-dwelling macro- as well as some mesofaunal groups. Community structure was analysed using a Nonmetric Multidimensional Scaling (NMS) with Bray-Curtis dissimilarity measure ($k = 3$, stress = 0.141). Due to widely varying densities among animal groups, the section marked with a dashed line in (b) was enlarged in (c) for better readability.

Die Zusammensetzung der Makrofauna (inklusive einiger Mesofaunagruppen) unterschied sich signifikant zwischen den Baumarten, wobei interessanterweise die größte Trennung zwischen den beiden Nadelbaumarten Fichte und Douglasie erkennbar ist (Abb. 9a). Besonders auffällig war die hohe Dichte an Pflanzenläusen in Böden von Fichtenwäldern, die mehr als 230-fach so hoch wie in Eichen- und immerhin 60- bzw. 38-fach so hoch wie in Buchen- bzw. Douglasienwäldern war und auf eine starke baumartspezifische Bindung hinweist (Abb. 9b, c). Ebenso kamen Spinnen in Fichtenwäldern mit mehr als doppelt so vielen Individuen im Vergleich zu Wäldern anderer Baumarten vor, wo sie möglicherweise von den hohen Blattlausdichten profitiert haben.

Doppelfüßer erreichten ihre höchsten Dichten in Douglasienwäldern, hauptsächlich durch das besonders hohe Vorkommen an Pinselfüßern, die in unserem Untersuchungsgebiet nur durch eine Art (*Polyxenus lagurus*) repräsentiert wird. Die häufig unter Baumrinde, aber auch in Bodenhabitaten lebende Art scheint eine Vorliebe für trockene Standorte zu haben, an denen sie sich von epiphytischem Aufwuchs wie Flechten und Algen ernährt (ALEXANDER 2006). Wir vermuten daher, dass das vermehrte Auftreten eher auf die Standortbedingungen als auf die Baumart zurückzuführen ist. Erwähnenswert ist auch das tendenziell höhere Vorkommen von Beintastern in Fichten- und Buchenwäldern. Für diese Bodentiergruppe konnte kürzlich mit molekularen Methoden erstmals eine Spezialisierung für Ektomykorrhizapilze nachgewiesen werden; insofern könnten die erhöhten Dichten auf höhere Biomassen dieser Pilzgruppe hinweisen (BLUHM et al. 2019).

Bodenschutzkalkung

Die Bodenschutzkalkung führte zu einer Verdreifachung der Abundanz und Artenzahl und einer Verdopplung der Biomasse von Regenwürmern, unabhängig von der Kalkungsvariante (Abb. 10). Dieser Unterschied ist vor allem auf das Vorkommen mineralbodenbe-

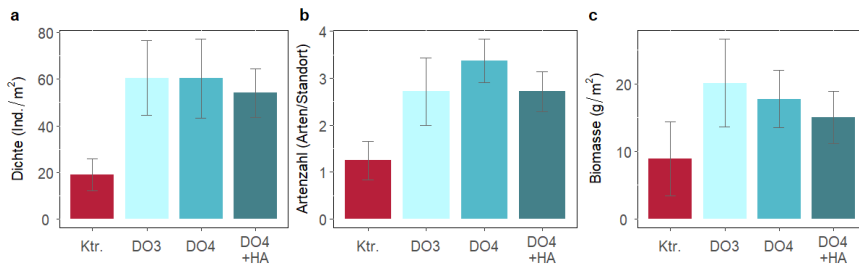


Abb. 10: Dichte, Artenzahl und Biomasse von Regenwürmern in Abhängigkeit unterschiedlicher Varianten der Bodenschutzkalkung. Ktr. = unbehandelte Kontrolle; DO3 = 1980er: 3 t/ha Dolomit, 2003: 6 t/ha Dolomit; DO4 = 1980er: 3 t/ha Dolomit, 2003: 6 t/ha Dolomit, 2015: 3 t/ha Dolomit; DO4+HA = 1980er: 3 t/ha Dolomit, 2003: 6 t/ha Dolomit, 2015: 3 t/ha Dolomit/Holz-asche-Gemisch. **Fig. 10:** Density, number of species and biomass of earthworms in dependence of different variants of soil protection liming. Ktr = untreated control; DO3 = 1980s: 3 t/ha dolomite, 2003: 6 t/ha dolomite; DO4 = 1980s: 3 t/ha dolomite, 2003: 6 t/ha dolomite, 2015: 3 t/ha dolomite; DO4+HA = 1980s: 3 t/ha dolomite, 2003: 6 t/ha dolomite, 2015: 3 t/ha dolomite/wood ash mixture.

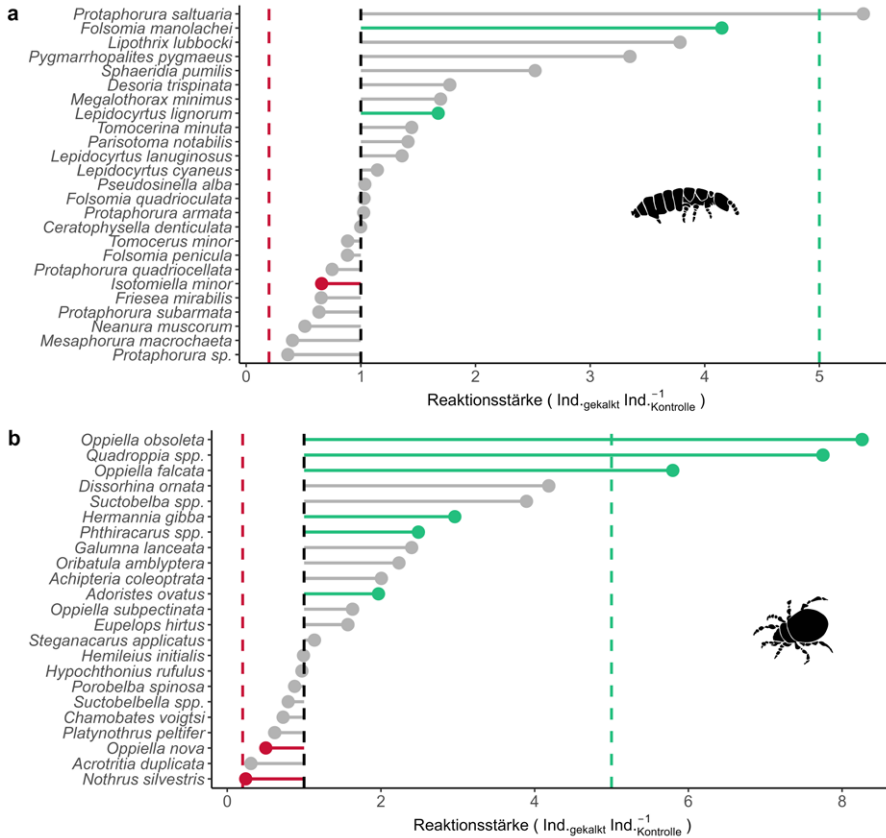


Abb. 11: Reaktion von (a) 25 Springschwanz- und (b) 23 Hornmilbenarten auf Bodenschutzkalkungen. Signifikant positiv auf die Kalkung reagierende Arten sind in grün, negativ reagierende in Rot gekennzeichnet. Je näher sich die Arten an der schwarz gestrichelten Linie befinden, desto geringer der Kalkungseffekt. Die rot und grün gestrichelte Linie dient der Einordnung der durch die Quotientenbildung verzerrten Effektstärken und zeigt eine Verringerung der Abundanz auf ein Fünftel bzw. eine Erhöhung der Abundanz auf das Fünffache in Bezug zu den Kontrollflächen an. Für die Analyse wurden Abundanzen der drei Kalkungsvarianten DO3, DO4 und DO4+HA gemittelt. Nur Arten, die auf mindestens zehn Flächen vorkamen, wurden berücksichtigt. **Fig. 11:** Response of (a) 25 springtail and (b) 23 oribatid mite species to soil protection liming. Species responding significantly positive to liming are indicated in green, negatively responding species in red. The closer the species are to the black dashed line, the lower the liming effect. The red and green dashed lines are used to classify effect sizes biased by quotient formation and indicate a reduction in abundance to one-fifth and an increase in abundance to five-fold, respectively, relative to control plots. For the analysis, abundances of the three liming options DO3, DO4, and DO4+HA were averaged. Only species that occurred in at least ten plots were considered.

wohnender Arten zurückzuführen, die auf den Kalkungsvarianten mehr als ein Drittel der Individuen ausmachten, während diese gänzlich auf den Kontrollflächen fehlten. Springschwänze und Hornmilben zeigten teils stark positive, aber auch negative artspezifische Reaktionen auf die Kalkung, bei insgesamt unveränderter Abundanz, Artenzahl und Diversität (Abb. 11). Eine Veränderung des pH-Wertes bewirkte bei diesen Gruppen also

eine Verschiebung der Dominanzverhältnisse zwischen „säuremeidenden“ und „säuretoleranten“ Arten. Laufkäfer zeigten keine Veränderungen infolge der Bodenschutzkalkung, was darauf hindeutet, dass der pH-Wert eine untergeordnete Rolle bei der Strukturierung der Lebensgemeinschaften spielt.

Prozessschutz

Der Prozessschutz, also die Aufgabe der forstlichen Nutzung bzw. Flächenstilllegung, hat im bisherigen Datensatz keinen Einfluss auf die Individuendichte der untersuchten Bodentiergruppen. Allerdings konnten Unterschiede in der Gesamtanzahl gefundener Arten sowie der mittleren Artenanzahl pro Untersuchungsfläche festgestellt werden (Abb. 12, 13). Während in naturnah bewirtschafteten Wäldern pro Untersuchungsfläche etwa 10 Springschwanzarten vorkamen, waren es auf den Prozessschutzflächen im Mittel etwa 12. Ein ähnliches Muster zeigten die Hornmilben. Die erhöhte Artenvielfalt der beiden Mesofaunagruppen könnte eine Folge einer höheren Habitatheterogenität unbewirtschafteter Wälder sein.

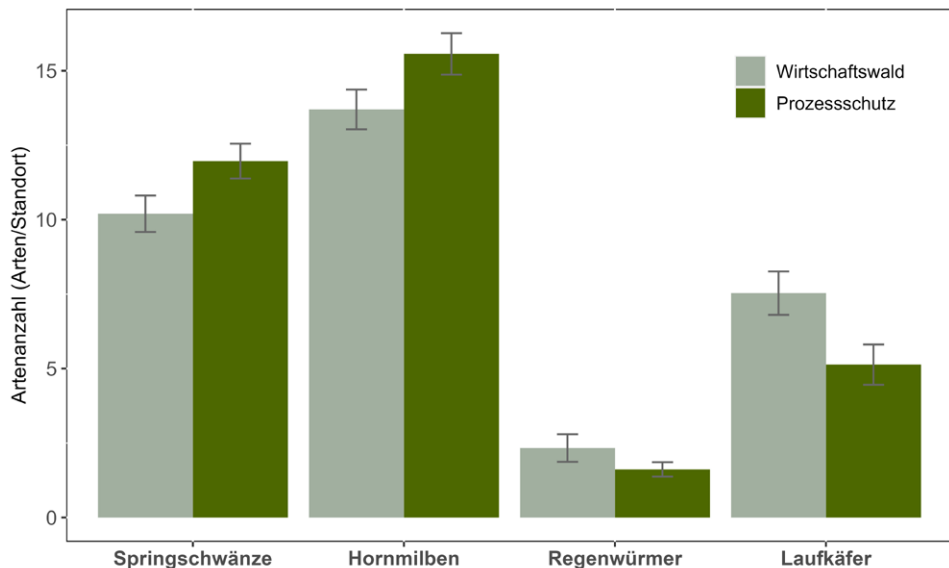


Abb. 12: Durchschnittliche Artenanzahl pro Untersuchungsfläche der untersuchten Bodentiergruppen in bewirtschafteten (Wirtschaftswald) und unbewirtschafteten (Prozessschutz) Wäldern des Schwarzwaldes. Die Artenzahlen stellen Mittelwerte beider Untersuchungstermine (Herbst 2018 und Frühjahr 2019) dar. **Fig. 12:** Average number of species per study plot of the investigated soil animal groups in managed forests and unmanaged forests in the Black Forest. Species numbers represent mean values of both samplings (autumn 2018 and spring 2019).

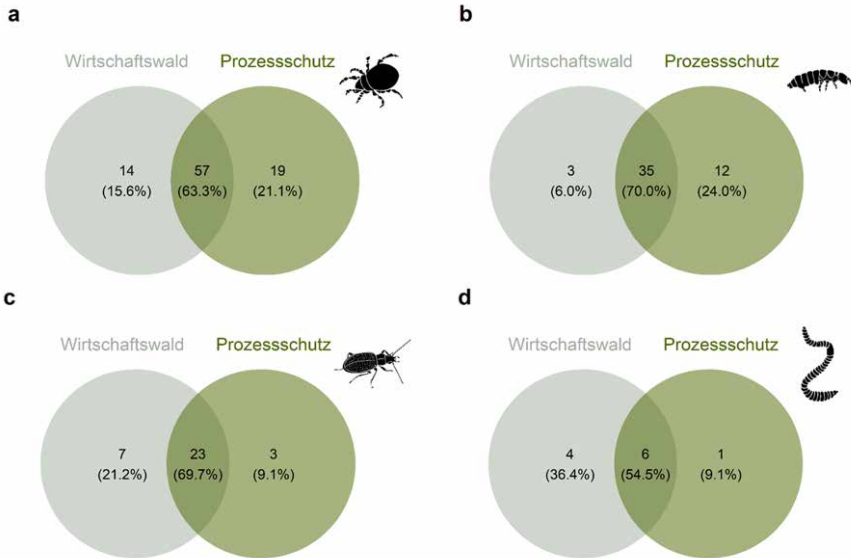


Abb. 13: Absolute Artenzahlen von (a) Hornmilben, (b) Springschwänzen, (c) Laufkäfern und (d) Regenwürmern in bewirtschafteten (Wirtschaftswald) und unbewirtschafteten Wäldern (Prozessschutz). **Fig. 13:** Absolute species numbers of (a) oribatid mites, (b) springtails, (c) carabid beetles, and (d) earthworms in managed and unmanaged forests.

Die durchschnittliche Artenanzahl von Laufkäfern war hingegen auf stillgelegten Flächen um ein Viertel niedriger als in den benachbarten Wirtschaftswäldern. Ebenso war die Gesamtanzahl an gefundenen Laufkäferarten auf den bewirtschafteten Flächen mit 30 im Vergleich zu den unbewirtschafteten Waldflächen (26) etwas höher. Möglicherweise ist dies auf die weniger dichte Kronenstruktur und den höheren Anteil an Wegen bzw. Rückegassen bewirtschafteter Wälder zurückzuführen, welche das Vorkommen Offenlandpräferenzender Arten begünstigen (HELIÖLÄ et al. 2001). Der höhere Artenreichtum in den genutzten Waldflächen war allerdings nicht auf mehr Spezialisten, sondern auf mehr Generalisten zurückzuführen, eine Beobachtung, die auch beim Vergleich von genutzten und ungenutzten Wäldern in Belgien (DE WARNAFFE & LEBRUN 2004) sowie in mehreren Regionen Deutschlands (LANGE et al. 2014) gemacht werden konnte. Regenwürmer zeigten bislang keine (statistisch signifikante) Reaktion auf den Bewirtschaftungsverzicht.

7. Fazit

Bodenorganismen stellen einen bedeutenden Anteil der Biodiversität dar und spielen eine wichtige Rolle für den Abbau toter organischer Substanz und der damit einhergehenden Verfügbarmachung von Nährstoffen. Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass

die vielgestaltigen Wälder Baden-Württembergs auch eine reiche Bodenfauna beherbergen. Laub- und Mischwälder mit höheren pH-Werten und Mull-Humusformen wiesen dabei insgesamt eine höhere Artenvielfalt als saure Nadelwälder mit Moder oder Rohhumus auf. Die Dichte und Biomasse der einzelnen Tiergruppen waren vorwiegend mit Humusform, Höhe und pH-Wert korreliert, wobei die untersuchten Artengruppen teils deutlich unterschiedliche Präferenzen zeigten.

Veränderungen der Bodenchemie und -struktur durch Stoffeinträge sowie Klimaänderungen und Wechsel in der Bewirtschaftungsweise können aufgrund der kurzen Generationszyklen von Bodentieren äußerst rasche und starke Auswirkungen auf die Bodentiergemeinschaft haben. Allerdings zeigt das Beispiel der Bodenschutzkalkung auch, dass negative Auswirkungen, wie sie z.B. in der Folge des Eintrags starker Säuren in einer Artenarmut unnatürlich versauerter Waldböden resultieren, mit geeigneten, standortsangepassten Maßnahmen auch wieder umkehrbar sind.

Erkenntnisse über Zusammenhänge von Bodeneigenschaften, Umweltfaktoren und Bewirtschaftungsweise mit der Bodenfaunadiversität sind die notwendige empirische Datengrundlage, auf deren Basis Maßnahmen identifiziert werden können, welche die Bodenfaunadiversität erhalten oder fördern. Ein systematisches, dauerhaft angelegtes Monitoring der Bodenfauna in Wäldern kann zukünftig dazu beitragen, Gefährdungen frühzeitig zu erkennen und ggf. Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Danksagung

Für die Durchführung der Regenwurmprobenahmen und die fachliche Unterstützung danken wir Prof. Dr. Friederike Lang, Jonas Flade, Julian Brokötter, Lukas Jetter (alle Abteilung Bodenökologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg) und Dr. Otto Ehrmann (Büro für Bodenmikromorphologie und Bodenbiologie), sowie den vielen Hilfskräften, die für solch umfangreiche Probenahmen notwendig waren. Ulrike Knollmeyer, Sebastian Müller und Carla Ott danken wir für die Unterstützung bei der Entnahme der Bodenkerne und der anschließenden mikroskopischen Sortierung der Meso- und Makrofaunaproben.

8. Schriftenverzeichnis

- Alexander, K.N.A. (2006): The habitat preferences of *Polyxenus lagurus* (Linné). Bulletin of the British Myriapod and Isopod Group, 21: 12–13.
- André, H.M., Ducarme, X., Lebrun, P. (2002): Soil biodiversity: myth, reality or conning? Oikos, 96(1): 3–24.

- Anthony, M. A., Bender, S. F., van der Heijden, M. G. (2023): Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(33): 1–9.
- Bardgett, R. (2005): *The Biology of Soil: A Community and Ecosystem Approach*. Oxford University Press.
- Bluhm, S.L., Potapov, A.M., Shrubovych, J., Ammerschubert, S., Polle, A., Scheu, S. (2019): Protura are unique: first evidence of specialized feeding on ectomycorrhizal fungi in soil invertebrates. *BMC Ecology*, 19(10): 1–7.
- De Warnaffe, G.D.B., Lebrun, P. (2004): Effects of forest management on carabid beetles in Belgium: implications for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 118(2): 219–234.
- Decaëns, T., Jiménez, J.J., Gioia, C., Measey, G.J., Lavelle, P. (2006): The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42: 23–38.
- Ehrmann, O. (2015): Regenwürmer in Böden Baden-Württembergs – Vorkommen, Gefährdung und Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i.Br.*, Bd. 105.
- FAO (2020): *State of Knowledge of Soil Biodiversity – Status, Challenges and Potentialities*, Report 2020. Rome, <https://doi.org/10.4060/cb1928en>.
- Faraji, F., Hoekstra, P.H. (2021): Discovery of two phytoseiid species (Acari: Mesostigmata): First records for Germany and Spain with the proposal of a synonymy. *Revista Ibérica de Aracnología*, 38: 31–35.
- Fierer, N., Strickland, M.S., Liptzin, D., Bradford, M.A., Cleveland, C.C. (2009): Global patterns in below-ground communities. *Ecology Letters*, 12(11): 1238–49.
- Heliölä, J., Koivula, M., Niemelä, J. (2001): Distribution of carabid beetles (Coleoptera, Carabidae) across a boreal forest–clearcut ecotone. *Conservation Biology*, 15(2): 370–377.
- Huhta, V. (2007): The role of soil fauna in ecosystems: A historical review. *Pedobiologia*, 50: 489–495.
- Jansone, L., von Wilpert, K., Hartmann, P. (2020): Natural recovery and liming effects in acidified forest soils in SW-Germany. *Soil Systems*, 4(3): 38.
- Lange, M., Türke, M., Pašalić, E., Boch, S., Hessenmöller, D., Müller, J., Prati, D., Socher, S.A., Fischer, M., Weisser, W.W., Gossner, M.M. (2014): Effects of forest management on ground-dwelling beetles (Coleoptera; Carabidae, Staphylinidae) in Central Europe are mainly mediated by changes in forest structure. *Forest Ecology and Management*, 329: 166–176.
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M. (1979): *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Trautner, J. (2017): *Die Laufkäfer Baden-Württembergs*. 2 Bde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 2023

Band/Volume: [113](#)

Autor(en)/Author(s): Bluhm Christian, Puhmann Heike, Hartmann Peter

Artikel/Article: [Die Bodenfauna in den Wäldern Baden- Württembergs: vielfältig, bedeutend und gefährdet 237-259](#)