



Konzept für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring

Grundlagen und bundesweite Ersterfassung

Impressum

Herausgegeben von:

Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB)

Standort des BfN in Leipzig

Alte Messe 6

04103 Leipzig

Telefon: 0341 30977-229

E-Mail: monitoringzentrum@bfm.de

Internet: www.monitoringzentrum.de

Verfasst von:

Zentrale des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität (NMZB) | BfN

Helen Ballasus, Dr. Christina Lachmann, Dr. Lina Weiß

Bundesamt für Naturschutz (BfN)

Dr. Moritz Nabel, Judith Lenzen

Umweltbundesamt (UBA), Nationales Bodenmonitoringzentrum

Dr. Silvia Pieper, Dr. Frank Glante

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG)

Dr. Heinrich Höper

Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LfU)

Jörn Fröhlich

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Roswitha Walter

Staatsbetrieb Sachsenforst

Frank Jacob

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA BW)

Dr. Christian Bluhm, Carla Ott

gaia – Forschungsinstitut für Ökosystemanalyse und -bewertung e.V.

Dr. Andreas Toschki

IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH

Dr. Anneke Beylich

ECT Oekotoxikologie GmbH

Dr. Jörg Römbke

Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv), Universität Leipzig

Prof. Dr. Nico Eisenhauer, Dr. Christian Ristok



Nationales
Monitoringzentrum
zur Biodiversität

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)

Prof. Dr. François Buscot

Thünen-Institut für Waldökosysteme

Dr. Erik Grüneberg, Dr. Nicole Wellbrock

Thünen-Institut für Biodiversität

Prof. Dr. Christoph C. Tebbe, Dr. Julia Schroeder, Dr. Damien Finn

Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz

Dr. Karin Hohberg, Dr. Nicole Scheunemann, Dr. David J. Russell

Julius Kühn-Institut (JKI)

Dr. Bernd Hommel

Institut für Umweltforschung, RWTH Aachen University

Prof. Dr. Martina Roß-Nickoll

Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Stefan Scheu

Fachhochschule Südwestfalen

Prof. Dr. Lukas Beule

Bildnachweis:

Springschwanz der Gattung Entomobrya © Tomasz Klejdysz – stock.adobe.com

Infografikdesign:

Ellery Studio Berlin

Zitiervorschlag:

Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB) (Hrsg.) (2026). Konzept für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring. Grundlagen und bundesweite Ersterfassung. Leipzig. Bundesamt für Naturschutz. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20152935>

Stand: 05/2026



Dieses Dokument wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>).



Bodenbiodiversität im Sinne des Fachgremiums „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ am Monitoringzentrum ist...

...die strukturelle und funktionelle Vielfalt von Organismen, Arten und Populationen, die ihren gesamten oder einen Teil ihres Lebenszyklus im Boden verbringen oder deren essentieller Lebensraum die Bodenoberfläche darstellt. Sie umfasst die genetische Variation der Organismen und ihre Lebensgemeinschaften mit ihren ökologischen Zusammenhängen und Prozessen, auf der Ebene von Bodenmikrohabitaten bis hin zu Landschaften.

(In Anlehnung an die Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2020).

Inhaltsverzeichnis

Konzeptverständnis	7
Kurzüberblick der Konzeptteile.....	8
Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum.....	9
Teil I: Vision – Bodenbiodiversität als integraler Bestandteil des bundesweiten Biodiversitätsmonitorings	11
1 Notwendigkeit eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings	12
1.1 Bedeutung der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen.....	12
1.2 Gefährdung des Bodenlebens in der europäischen Union	13
1.3 Wissenslücken zu Zustand, Verteilung und Trends der Bodenorganismen	14
1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien	15
2 Status Quo bodenbiologischer Monitoring- und Erfassungsprogramme	18
2.1 Erfassungsprogramme von Bundes- und Landesbehörden	18
2.2 Europäische und internationale Aktivitäten	21
3 Handlungsbedarfe und Vision eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings	24
Teil II: Konzeptionelle Grundlagen – Ziele und Voraussetzungen für die Etablierung eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings.....	27
4 Ziele des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings	28
5 Voraussetzungen für die Umsetzung	31
6 Synergien bestehender Monitoringaktivitäten.....	33
7 Potenziale genetischer Methoden	34
Teil III: Konzeption einer bundesweiten Ersterfassung – Modul 1	36
8 Aufbau einer umfassenden Datengrundlage zur Bodenbiodiversität in Deutschland	36
8.1 Ziele für die bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität	37
8.2 Anforderungen an die Kulisse	37
8.3 Organismenauswahl	39
8.4 Erfassungsmethoden.....	42
8.5 Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.....	46
8.6 Begleitdaten	54
8.7 Anwendung DNA-basierter Methoden	60
8.8 Empfehlung zur Einlagerung von Proben.....	61



Teil IV: Ausblick - Umsetzung und Weiterentwicklung des Monitorings	64
9 Entwicklung eines langfristigen Trendmonitorings auf Grundlage umfassender Daten und definierter Bewertungsmaßstäbe.....	64
9.1 Umsetzung einer „Basiserhebung Bodenbiodiversität“ im Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz	65
9.1.1 Politische Grundlage und Zielsetzung.....	65
9.2 Umsetzung des Projekts „BioDive4Soil“	66
9.3 Ausbau laufender Monitoringaktivitäten und Zusammenführung der Daten und Erkenntnisse	68
10 Konzeption weiterer notwendiger Monitoringmodule für ein zukunftsfähiges Bodenbiodiversitätsmonitoring.....	69
Im Dialog bleiben.....	70
Abkürzungsverzeichnis.....	72
Abbildungsverzeichnis	74
Tabellenverzeichnis.....	74
DIN-Normen	75
Literaturverzeichnis	75
Anhang 1: Erfassung von Bodenbiodiversität auf Länderebene (Stand 01/2024)	88
Anhang 2: Das Rechercheprojekt „Erfassung von Bodenorganismen und deren Funktionen in einem bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitoring: Kenntnisstand und Praxistauglichkeit“	90
Anhang 3: Bioindikatorischer Wert der für die bundesweite Ersterfassung ausgewählten Bodenorganismengruppen	91
Anhang 4: Erfassungsmethoden	95

Konzeptverständnis

Basis für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring. Das vorliegende Konzept dient als Startpunkt für die Entwicklung eines langfristigen, ökosystemaren und modulbasierten Monitorings. Die Konzeptinhalte fokussieren auf die fachlichen Grundlagen und wurden von einem Expertengremium der Bodenbiologie und -ökologie erarbeitet (siehe Kapitel Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum). Sie umfassen die Festlegung übergeordneter und zukunftsorientierter Ziele, Empfehlungen für die methodische Ausgestaltung des harmonisierten Monitorings und eine Identifikation von Synergiepotenzialen mit bereits bestehenden und geplanten Monitoringaktivitäten. Das Konzept enthält Empfehlungen für ein erstes grundlegendes Monitoringmodul 1 - Bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität, dessen Umsetzung wichtige Voraussetzungen schafft für die zukünftige Einrichtung eines umfassenden Trendmonitorings. Konkrete Aspekte des Datenmanagements werden zukünftig im Rahmen der Erarbeitung des Gesamtkonzepts zur Weiterentwicklung des bundesweiten Biodiversitätsmonitorings durch das Monitoringzentrum adressiert und sind nicht im vorliegenden Konzept enthalten.

Ein dynamisches und adaptives Konzept. Das vorliegende Konzept ist dynamisch und wird unter Moderation des Monitoringzentrums in Zusammenarbeit mit dem Fachgremium Bodenbiodiversität sowie weiterer Akteurinnen und Akteure hinsichtlich der Etablierung eines Trendmonitorings weiterentwickelt und ergänzt. Dabei wird auf den erarbeiteten Datengrundlagen und Erfahrungen aus vielfältigen bestehenden Monitoring-Initiativen in den nächsten Jahren aufgebaut werden (siehe Kapitel Status Quo bodenbiologischer Monitoring- und Erfassungsprogramme). Gleichzeitig werden zukünftige Anforderungen und Entwicklungen berücksichtigt, wie sie sich unter anderem aus der Nationalen Biodiversitätsstrategie und der europäischen Bodenrichtlinie ergeben.

Kurzüberblick der Konzeptteile

Teil I: Vision – Bodenbiodiversität als integraler Bestandteil des bundesweiten

Biodiversitätsmonitorings gibt eine Einführung zur Bedeutung und Gefährdung des Bodenlebens sowie den rechtlichen Rahmenbedingungen zu dessen Monitoring. Bestehende und geplante bundesweite Monitoringaktivitäten sind darauffolgend beschrieben. Teil I schließt ab mit einem Resümee zu den bestehenden Handlungsbedarfen für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring und der Vision des Fachgremiums Bodenbiodiversität zur Umsetzung mittels eines ökosystemaren und modularen Ansatzes.

Teil II und Teil III bilden den konzeptionellen Hauptteil. Teil II: Konzeptionelle Grundlagen – Ziele und Voraussetzungen für die Etablierung eines bundesweiten

Bodenbiodiversitätsmonitorings fasst die Anforderungen an ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring in Form von drei übergeordneten Leitfragen zusammen. Aus diesen leiten sich zwölf Monitoringziele ab. Die Erreichung der benannten Ziele erfolgt über einen zeitlich gestaffelten modularen Monitoringansatz, der in den folgenden Konzeptteilen weiter ausgeführt wird. In Teil II werden zudem wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings aufgeführt, die gemeinsam auf einer Fachtagung mit zahlreichen Akteurinnen und Akteuren erarbeitet wurden. Die Zusammenarbeit, die Nutzung von Methodenstandards sowie die Bereitstellung der nötigen personellen und finanziellen Ressourcen und (Daten)Infrastrukturen wurden dabei als Grundvoraussetzungen benannt. Ebenso wird auch das Potenzial kosteneffizienter Methodenweiterentwicklungen wie DNA-basierte Bodenbiodiversitätsanalysen kurz beleuchtet.

Teil III: Konzeption einer bundesweiten Ersterfassung – Modul 1 gibt Empfehlungen für eine repräsentative Erfassung der Bodenbiodiversität in verschiedenen Lebensräumen und integriert bestehende Erhebungen aus laufenden und geplanten Monitoringprogrammen. Über dieses Monitoringmodul kann kurz- bis mittelfristig die Umsetzung erster Ziele aus Teil II erfolgen. Dieses Modul dient als umfassender Leitfaden, der die methodischen Aspekte von den Repräsentativitätskriterien und Zielorganismengruppen (Regenwürmer, Enchyträen, Horn- und Raubmilben, Springschwänzen, Nematoden und das Bodenmikrobiom) bis hin zu den Erfassungsmethoden und Begleitdaten enthält. Ebenso werden Empfehlungen für die Probenarchivierung gegeben.

Teil IV: Umsetzung und Weiterentwicklung des Monitorings stellt einen Blick in die Zukunft dar, in der basierend auf den gewonnenen Daten einer bundesweiten Ersterfassung und entwickelten Bewertungsindikatoren ein langfristiges Trendmonitoring konzipiert und weitere der in Teil II formulierten Zielstellungen adressiert werden können. Bestehende Projekte, deren Daten für eine bundesweite Ersterfassung potenziell berücksichtigt werden könnten, werden aufgeführt. Ab 2030 werden diese Daten die Grundlage für den Ausbau möglicher Synergien, die Weiterentwicklung von Bewertungsindikatoren und die Etablierung einer bundesweiten Kulisse bilden und damit die Entwicklung eines Trendmonitorings (Modul 2) sowie weiterer vertiefender Monitoringmodule ermöglichen.

Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum

Zentrale Aufgabe des ressortübergreifenden Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität (kurz: Monitoringzentrum/NMZB) ist es, Akteurinnen und Akteure im Biodiversitätsmonitoring zu vernetzen und mit ihnen gemeinsam das bundesweite Biodiversitätsmonitoring weiterzuentwickeln. Das Monitoringzentrum wurde beauftragt, ein Gesamtkonzept für das bundesweite Biodiversitätsmonitoring zu entwickeln, das sowohl terrestrische als auch marine und limnische Lebensräume berücksichtigt. Das Monitoringzentrum soll bestehende Lücken aufzeigen und konkrete Weiterentwicklungsvorschläge erarbeiten.

Bereits zur Eröffnung des Monitoringzentrums 2021 wurde die Bodenbiodiversität als ein Schwerpunktthema benannt und noch im gleichen Jahr das Fachgremium „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ (kurz: Fachgremium Bodenbiodiversität) einberufen. Das Fachgremium berät das Grundsatzfachgremium des Monitoringzentrums und wurde beauftragt, die fachlichen Grundlagen für ein bundesweit harmonisiertes Bodenbiodiversitätsmonitoring unter Berücksichtigung bestehender Monitoringaktivitäten zu erarbeiten. Dies ist mit dem vorliegenden Konzept erfolgt.

Das Fachgremium „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“. Im Gremium engagieren sich Expertinnen und Experten der BodenzooLOGIE und Bodenmikrobiologie aus der Monitoringpraxis, der Forschung sowie aus Landesfach- und Bundesbehörden (Abb. 1). Die Erarbeitung dieses Konzepts für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring erfolgte freiwillig und auf unentgeltlicher Basis. Dabei liegt der Fokus auf terrestrischen Böden. Limnische und marine Sedimente, die hinsichtlich Funktionsweise, Organismenspektrum und Untersuchungsmethodik grundlegend verschieden von terrestrischen Systemen sind, bilden keinen Arbeitsschwerpunkt des Gremiums. Die Fachgremienarbeit wird durch Mitarbeitende der Zentrale des Monitoringzentrums koordiniert und organisiert. Bei Bedarf wurde und wird weitere Expertise zu bestimmten Themen in Form von Gastbeiträgen einbezogen. Die Arbeit des Fachgremiums wird in eigenen und externen Veranstaltungen präsentiert und diskutiert. Damit wird der regelmäßige Diskurs mit einem breiten Fachpublikum und Akteurskreis sichergestellt (siehe Fachtagung „Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring“ in Kapitel 4 und Kapitel Im Dialog bleiben).



Abb. 1 Mitglieder des Fachgremiums "Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen" im Zeitraum 2021 bis 2025. Aufgeführt sind alle Mitglieder, die im Fachgremium im genannten Zeitraum dauerhaft oder zeitweise aktiv waren.

Weiterführende Informationen

zur Struktur und den Aufgaben des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität sowie dem Themenbereich Monitoring der Bodenbiodiversität:

- <https://www.monitoringzentrum.de/thema/zentrum>
- <https://www.monitoringzentrum.de/fachgremium-bodenbiodiversitaet>

Teil I: Vision – Bodenbiodiversität als integraler Bestandteil des bundesweiten Biodiversitätsmonitorings



Abb. 2 Inhaltsübersicht Teil I des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.

Ein effektives Biodiversitätsmonitoring erfordert einen Systemansatz, der die verschiedenen Ebenen der Biodiversität nicht isoliert, sondern im Kontext des gesamten Ökosystems betrachtet. Dies schließt ausdrücklich die unterirdischen Lebensräume mit ein. Die Integration der Bodenbiodiversität ist für die Weiterentwicklung des bundesweiten Biodiversitätsmonitorings unerlässlich, um ein vollständigeres Bild zu erhalten und die grundlegenden Interaktionen zwischen unter- und oberirdischem Leben besser zu verstehen.

Das vorliegende Konzept zum bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitoring ist ein entscheidender Baustein, um eine existierende Lücke zu schließen. Es liefert einen wichtigen Beitrag, die Bodenbiodiversität als integralen Bestandteil der gesamten Biodiversität anzuerkennen und zu schützen.

1 Notwendigkeit eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings

1.1 Bedeutung der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen

Böden beherbergen eine enorme Vielfalt an Lebewesen, von mikroskopisch kleinen Pilzen und Bakterien hin zu größeren Tieren wie Regenwürmern oder Tausendfüßern und bodenbewohnenden Wirbeltieren (Russell et al. 2024). Böden sind Lebensraum für fast 60 % aller auf der Erde vorkommenden Arten (Anthony et al. 2023) und gelten damit als schützenswerte Hotspots der Biodiversität (Eisenhauer et al. 2024). Die Bodenlebensgemeinschaft ist ein komplexes Netzwerk, das den Boden gesund und funktionsfähig hält (Abb. 3). Bodenorganismen leisten einen essentiellen Beitrag zur Entstehung von Böden, zur Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit, zur natürlichen Schädlingsregulation und zur Klimaregulation, zum Beispiel durch die Kohlenstoffbindung in Böden (Bardgett und van der Putten 2014; Vogel et al. 2019). Intakte Bodenlebensgemeinschaften fördern zudem die Resilienz von Ökosystemen und machen sie widerstandsfähiger gegenüber Störungen wie Dürren, Überschwemmungen oder Schadstoffeinträgen (Bonato Asato et al. 2025). Die Funktionen der Bodenbiodiversität sind damit von enormem (und oft unterschätztem) Wert für die gesamte Gesellschaft (Scherzinger et al. 2024).

Die Bedeutung der Bodenbiodiversität für regulierende Ökosystemleistungen

„Faktencheck Artenvielfalt“ (Eisenhauer et al. 2024): „Der Bodenbiodiversität kommt eine besondere Bedeutung bei der Bereitstellung von regulierenden Ökosystemleistungen zu. Hier ist besonders die Vielfalt an Körpergrößen und Lebensstrategien der Bodenorganismen – ihre funktionelle Vielfalt – essenziell für die Streuzersetzung und damit für die Mineralisierung, Bereitstellung und Mobilisierung von Nährstoffen. Kleine Bodenlebewesen (Bakterien, Archaeen, Pilzhypen, Protisten) erschließen die komplette Oberfläche des komplexen dreidimensionalen Bodengefüges bis in die engsten Spalten, während größere Bodenlebewesen der Makrofauna (zum Beispiel Regenwürmer, Asseln, Doppelfüßer) organisches Substrat zerkleinern und über Kotproduktion wasserlöslich machen. Kleinste Fadenwürmer und Bodentiere mittlerer Größe (Springschwänze, Milben) aktivieren als Weidegänger die Mikroorganismen und fördern damit indirekt die Mineralisierung. Trotz der hohen Mineralisierungsleistung des Bodenlebens weisen Böden mit hoher funktioneller Vielfalt einen höheren Gehalt an organischem Material auf und entziehen dadurch der Atmosphäre langfristig mehr Kohlenstoff (Lange et al. 2015). Böden mit intakten Gemeinschaften von Bodenlebewesen entziehen der Luft hochwirksame Treibhausgase wie Methan und Lachgas. Pflanzen profitieren von der Interaktion mit einer Vielzahl von bodenbürtigen Mikroorganismen. Eine hohe funktionelle Vielfalt von Bodenlebewesen erhöht die Resistenz von Pflanzenbeständen gegenüber Schädlingen und Krankheitserregern.“

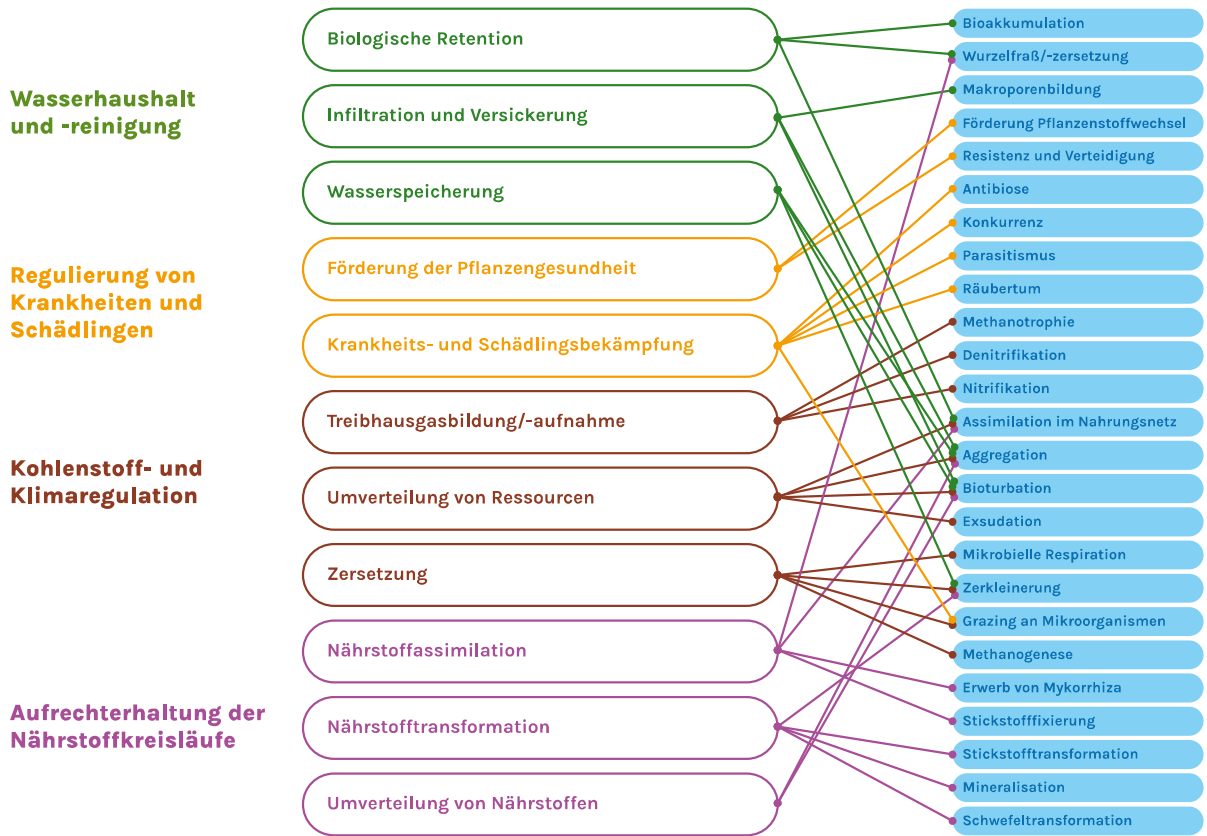


Abb. 3 Beitrag von Bodenorganismen an Prozessen (rechts, blau unterlegt), die eine oder mehrere Ökosystemfunktionen im Boden unterstützen (mittig). Aus dieser Multifunktionalität resultieren die Ökosystemleistungen des Bodens, unter anderem Wasserhaushalt- und -reinigung (grün), Regulierung von Krankheiten und Schädlingen (orange), Kohlenstoff- und Klimaregulation (braun) und Aufrechterhaltung der Nährstoffkreisläufe (lila). Eisenhauer et al. 2024 nach Creamer et al. 2022, verändert.

1.2 Gefährdung des Bodenlebens in der europäischen Union

In einem Report der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) aus dem Jahr 2020 wurden die weltweiten Gefährdungsursachen des Bodenlebens zusammengetragen. Die wichtige Rolle der Bodenorganismen für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen ist in erster Linie durch menschliche Aktivitäten stark beeinträchtigt. Die größten globalen Einflussgrößen sind im Folgenden dargestellt (FAO 2020; Phillips et al. 2024; Tsiafouli et al. 2015). Die ausgegrauten Einflussgrößen werden für Deutschland als weniger relevant eingeschätzt aufgrund der begrenzten räumlichen Ausdehnung und Häufigkeit.

- ▶ die Intensivierung der Landwirtschaft (zum Beispiel Überweidung, Anwendung von Pestiziden, Düngung, Bodenbearbeitung)
- ▶ Klimawandel (vor allem Klimaextremereignisse wie Dürren und Erwärmung)
- ▶ der Verlust von organischem Bodenkohlenstoff
- ▶ Bodenverdichtung und Oberflächenversiegelung
- ▶ Bodenversauerung und Nährstoffüberschüsse
- ▶ Verschmutzung
- ▶ Salinisierung und Sodifizierung,
- ▶ Landdegradation, Urbanisierung
- ▶ Feuer, Rodung
- ▶ Erosion und Erdrutsche sowie
- ▶ die Einwanderung und Einführung invasiver Arten

Die genannten Bedrohungen wirken oft nicht isoliert, sondern verstärken sich gegenseitig (Rillig et al. 2019; Thakur et al. 2018). Es ist beispielsweise bekannt, dass intensive Bewirtschaftungsmethoden die Biodiversität und Funktionalität des Bodens erheblich beeinträchtigen, insbesondere, wenn sie mit dem Auftreten extremer Wetterbedingungen wie Trockenheit zusammentreffen (Wirth et al. 2024). So hat zum Beispiel die Rodung von Wäldern eine erhöhte Erosion zur Folge, die wiederum die Bodenfruchtbarkeit verringert und die Anfälligkeit für weitere Degradationsprozesse wie Verdichtung oder Versalzung erhöht.

Die EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360) führt auf, dass schätzungsweise 60 bis 70% der Böden der europäischen Union degradiert sind und sich weiter verschlechtern.

1.3 Wissenslücken zu Zustand, Verteilung und Trends der Bodenorganismen

Schätzungsweise sind der Wissenschaft circa 75 % der weltweit in Böden vorkommenden Arten noch unbekannt (Russell et al. 2024). Diese Wissenslücke ist unter anderem auf die hohe Artenzahl zurückzuführen. Ebenso besteht die Schwierigkeit, insbesondere für mikroskopisch kleine Organismen anhand äußerlicher oder genetischer Merkmale Artunterschiede oder klare Artabgrenzungen bestimmen zu können. Zudem bestehen große Wissenslücken hinsichtlich der Funktionen und des Zusammenwirkens der verschiedenen Organismen (Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt [KBU] 2022).

Lediglich die Artanzahlen für Regenwürmer (Lumbricidae, 49 Arten), Doppelfüßer (Diplopoda, 118 Arten), Hundertfüßer (Chilopoda, 56 Arten), Ameisen (Formicidae, 116 Arten), Landasseln (Oniscidae, 49 Arten), Webspinnen (Araneae, 992 Arten) und Laufkäfer (Carabidae, 582 Arten) gelten als gut beschrieben in Deutschland (Eisenhauer et al. 2024). Für diese Artengruppen und die Kurzflügelkäfer (Staphylinidae, Schmidl et al. 2021) sind Rote Listen des Bundesamtes für Naturschutz vorhanden (Bundesamt für Naturschutz 2016; Decker et al. 2026; Seifert 2011), deren

Aktualisierung alle 10 Jahre vorgesehen ist. Für wichtige und sehr diverse Bodenorganismengruppen wie beispielsweise Horn- und Raubmilben (Oribatida und Gamasina), Springschwänze (Collembola), Kleinringelwürmer (Enchytraeidae), Fadenwürmer (Nematoda) und Mikroorganismen sind die Informationen lückenhaft bis unzureichend und Kenntnisse zur Endemie sind nicht vorhanden (Eisenhauer et al. 2024). Für Hornmilben ist die Erstellung einer Roten Liste in Erarbeitung.

Für die Bodenbiodiversität gibt es ebenso kaum repräsentative Zeitreihen, die Trendanalysen oder eine Bewertung des ökologischen Bodenzustands erlauben. Zudem gibt es noch keine klare, messbare Definition eines gesunden Bodens. Die EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360) beschreibt gesunde Böden als „Böden, die sich in einem guten chemischen, biologischen und physikalischen Zustand befinden und daher Ökosystemleistungen erbringen können, die für Mensch und Umwelt lebenswichtig sind [...]“. Die Richtlinie gibt aktuell keine Kriterien oder konkrete Bewertungsmaßstäbe für den biologischen Bodenzustand an. Auch national gibt es noch keine etablierten bodenbiologischen Indikatoren für die Charakterisierung gesunder Böden. Folglich sind auch die Bewertungen von Bodenbiodiversität bisher eher fragmentarisch und beziehen sich hauptsächlich auf einzelne Organismengruppen. Dies erschwert die Entwicklung von zielgerichteten Schutzmaßnahmen und die Berücksichtigung der Bodenbiodiversität in politischen Entscheidungsprozessen.

Ebenso ist die Datenlage zur Landbewirtschaftung ist noch lückenhaft, so dass Auswirkungen von Einflussgrößen auf das Bodenleben nicht großflächig analysiert werden können. Da die Resilienz von Bodenökosystemen gegenüber multiplen Stressoren und ihre Regenerationsfähigkeit schwer zu bestimmen sind, gibt es bisher nur wenige Erkenntnisse über kritische Schwellenwerte zu irreversiblen Schäden (Eisenhauer et al. 2024).

Mit einem bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitoring wird eine umfassende Datenbasis geschaffen, um bestehende zentrale Wissenslücken zu schließen (Leibniz Research Network Biodiversity, 2024, Kap. 3).

Weiterführende Informationen

Detaillierte Informationen zur Bedeutung des Bodenlebens für Ökosystemleistungen, relevanten Einflussgrößen und Wissenslücken zu Zustand und Trends von Bodenbiodiversität sind dem Gesamtbericht des Faktencheck Artenvielfalt (Wirth et al. 2024) (Kapitel 8, Eisenhauer et al. 2024) zu entnehmen, sowie dem Report der FAO 2020.

- ▶ <https://www.oekom.de/buch/faktencheck-artenvielfalt-9783987260957>
- ▶ <https://openknowledge.fao.org/items/24035f6b-eed4-40a8-a838-b45b866c35c2>

1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien

Diese aktuellen politischen Rahmenbedingungen sind ein wichtiger Motor für den Aufbau eines bundesweit harmonisierten Bodenbiodiversitätsmonitorings (keine umfassende Auflistung):

- ▶ **EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360):** Die Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates vom 12. November 2025 zur Bodenüberwachung und für Bodenresilienz trat zum 16.

Dezember 2025 in Kraft. Sie zielt darauf ab, einen umfassenden Rahmen für das Monitoring der Bodengesundheit zu schaffen, zu der der physikalische, chemische und biologische Zustand der Böden gehören. Für die Bodenbiodiversität wird ein Monitoring der Bodenpilze und Bodenbakterien mittels Metabarcoding auf 5% der noch zu definierenden Bodeneinheiten vorgeschrieben. Zusätzlich können weitere fakultative Deskriptoren der Bodenbiodiversität, beispielsweise zur Diversität und Abundanz von Regenwürmern, berichtet werden. Bewertungskriterien für die Bodenbiodiversität sind derzeit nicht vorgegeben. Die Berichterstattung für die EU-Bodenrichtlinie erfolgt alle 6 Jahre, beginnend mit der ersten Berichtsabgabe 2032. Im Jahr 2033 wird die EU-Bodenrichtlinie evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden.

Juristisch handelt es sich bei der vorliegenden EU-Richtlinie 2025/2360 nicht um ein Gesetz und die Übersetzung des englischen Wortlauts „Monitoring“ in „Überwachung“ wird kritisch betrachtet. Daher wird in diesem Dokument der abkürzende Titel „EU-Bodenrichtlinie“ verwendet entgegen der Wortwahl „Bodenüberwachungsgesetz“, die innerhalb der Richtlinie als Kurztitel angegeben ist. Die Überführung der EU-Bodenrichtlinie in nationale Gesetze ist bis Ende 2028 durch die europäischen Mitgliedstaaten umzusetzen.

EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360): „Die Ziele dieser Richtlinie bestehen darin, einen robusten und kohärenten Bodenüberwachungsrahmen für alle Böden in der gesamten Union zu schaffen, die Bodenkontamination auf ein Niveau zu reduzieren, das nicht mehr schädlich für die menschliche Gesundheit und die Umwelt gilt, die Bodengesundheit in der Union kontinuierlich zu verbessern, einen gesunden Zustand der Böden aufrechtzuerhalten und sämtliche Aspekte der Bodendegradation zu verhindern und anzugehen, um so bis 2050 gesunde Böden zu schaffen, die vielfältige Ökosystemleistungen in einem Umfang erbringen können, der den ökologischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedürfnissen gerecht wird [...]“

- **Nationale Biodiversitätsstrategie 2030 (NBS 2030) und 1. Aktionsplan 2024-2027:** Die NBS 2030 (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUKN] 2024a) ist eine umfassende Strategie der Bundesregierung, um den Verlust der biologischen Vielfalt in Deutschland aufzuhalten und umzukehren. Die NBS 2030 erkennt die Bedeutung der Bodenbiodiversität an und formuliert konkrete Ziele und Maßnahmen zu deren Stärkung im Handlungsfeld 4 Boden. Hierin werden erstmalig nationale Zielvorgaben für die Definition eines guten biologischen Zustands von Bodenökosystemen bis 2030 und deren Erreichung bis 2050 in einem verbindlichen Instrument zur Umsetzung von Verpflichtungen zum Schutz der Biodiversität in Deutschland festgehalten. Die Evaluation der Zielerreichung soll mittels quantifizierbarer bodenbiologischer Indikatoren erfolgen. Hierfür ist unter anderem der Indikator „Zustand der Regenwurmgemeinschaft“ zu entwickeln und die Entwicklung des Indikators „Zustand der Mesofauna und Mikroorganismen“ zu prüfen und gegebenenfalls zu entwickeln. Der 1. Aktionsplan der NBS 2030 (BMUKN 2024b) gibt als konkrete Maßnahme zur Zielerreichung unter anderem die Konzeptentwicklung für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring vor. Das vorliegende Konzept bedient dieses Handlungsfeld 4.1.2.

NBS 2030 1. Aktionsplan: Handlungsfeld 4 - Erhaltung gesunder Böden (4.1.2) (BMUKN 2024b):

„Bis 2025 wird unter Beteiligung unter anderem des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität sowie der Initiative „Nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald)“ ein Konzept für die schrittweise Einführung eines Programms zum umfassenden und artenübergreifenden Monitoring der Bodenbiodiversität in Deutschland entwickelt, das bisherige Aktivitäten aufgreift, einbindet und anschlussfähig ist an Aktivitäten auf europäischer Ebene.“

- **Novelle des Bundeswaldgesetzes/Konzept für ein Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald):** Im Jahr 2024 wurde durch das damalige Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft beantragt, das Bundeswaldgesetz zu ergänzen, um insbesondere die Herausforderungen der Klima- und Biodiversitätskrise in Bezug auf das Waldrecht angemessen zu adressieren und die Rahmenbedingungen für die Erhaltung der Wälder und ihrer unverzichtbaren Ökosystemleistungen im Klimawandel an die aktuellen Erfordernisse anzupassen (BMEL 2024). Ein nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald) soll hierbei die Grundlagen für ein biodiversitätsorientiertes adaptives Management liefern und die nationale und internationale Berichterstattung unterstützen (Bolte et al. 2022). Ein Konzept hierfür wurde durch eine Arbeitsgruppe aus Vertreterinnen und Vertretern von Ressorteinrichtungen des Bundes und der Länder im Bereich Forstwirtschaft und Naturschutz entwickelt (Federführung durch das Thünen-Institut, Bolte et al. 2025). Auch ein Modul zum Bodenbiodiversitätsmonitoring hat darin Einzug gefunden, orientiert an der Vorgehensweise des Projekts Biologische Bodenzustandserhebung im Wald (BBZE-Wald, Kapitel 2.1 Erfassungsprogramme von Bundes- und Landesbehörden). Hierzu erfolgten und erfolgen Abstimmungen zwischen dem Thünen-Institut, dem Nationalen Bodenmonitoringzentrum am UBA sowie dem Monitoringzentrum und den Arbeiten des Fachgremiums Bodenbiodiversität, um die Kompatibilität der Aktivitäten gewährleisten zu können. Die Novellierung des Gesetzes erfolgte in der 20. Legislaturperiode jedoch nicht.

Weiterführende Informationen

Die Richtlinie (EU) 2025/2360 zur Bodenüberwachung und Bodenresilienz, die Nationale Biodiversitätsstrategie 2030 (NBS 2030) mit dem 1. Aktionsplan 2024-2027 sowie das Konzept zum nationalen Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald) können hier bezogen werden:

- **EU-Bodenrichtlinie:** <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj/eng>
- **NBS 2030:** <https://www.bundesumweltministerium.de/download/die-nationale-strategie-zur-biologischen-vielfalt-2030-nbs-2030>
- **NaBioWald-Konzept:**
https://nabiowald.thuenen.de/fileadmin/nabiowald/ThuenenWorkingPaper_267.pdf

2 Status Quo bodenbiologischer Monitoring- und Erfassungsprogramme

2.1 Erfassungsprogramme von Bundes- und Landesbehörden

Bundesweit sind folgende Programme von Bundes- und Landesbehörden mit dem Thema Bodenzustand befasst:

- Die **Bodendauerbeobachtung** (Bundesländer) mit circa 800 Stichprobenflächen wurde vor mehr als 30 Jahren begonnen und fokussiert auf eine Vielzahl chemischer und physikalischer Parameter. Einige Bundesländer erheben zusätzlich bodenbiologische Parameter, wie zum Beispiel Regenwürmer, Kleinringelwürmer oder die mikrobielle Biomasse. Es werden kontinuierlich Daten zur Bewirtschaftung (unter anderem Kulturen, Düngung, Bodenbearbeitung) als wichtige potenzielle Einflussgrößen auf die Bodenbiologie gewonnen. Insgesamt betrachtet werden nur wenige taxonomische Gruppen im Boden untersucht und diese nicht bundesweit. Die Vorgehensweise bei der Bodendauerbeobachtung wird seit den 1990er Jahren zwischen den Bundesländern abgestimmt und an neue Anforderungen angepasst (Barth et al. 2022). Dennoch variieren die Erfassungen hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der methodischen Durchführung, da in den Ländern unterschiedliche Fragestellungen und Problematiken, aber auch verschiedene Verwaltungsstrukturen existieren. Eine weitere länderübergreifende Vereinheitlichung der Methoden und der zu erfassenden Parameter, auch hinsichtlich der Bodenbiologie, wäre wünschenswert, da sich hierdurch die Möglichkeit zur Integration bereits vorhandener Probeflächen in die Kulisse eines Monitorings zur Bodenbiodiversität bietet (Kaufmann-Boll, Kern, Niederschmidt 2020). Aufbauend auf diesen Flächen der Bodendauerbeobachtung wird vom Umweltbundesamt die Etablierung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds mit den vier Schwerpunktthemen organische Substanz, Bodenbiologie, Bodenwasserhaushalt und Erosion angestrebt (Kaufmann-Boll, Kern, Kastler et al. 2020; Kaufmann-Boll et al. 2022). Hierfür wurden aus den Bundesländern und zahlreichen Institutionen 9.000 potenzielle Standorte gemeldet. Dazu gehören auch die weiter unten angeführten Programme. Aus dem Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt (Kaufmann-Boll et al. 2022) geht hervor, dass für die Bodenbiologie in Deutschland derzeit noch keine bundesweiten Aussagen aufgrund mangelnder Datenlage möglich sind.
- Die rasterbasierten **Bodenzustandserhebungen Wald** (BZE-Wald) (BMLEH, Thünen-Institut für Waldökosysteme; circa 1.900 Probenflächen) und **Landwirtschaft** (BZE-LW) (BMLEH, Thünen-Institut für Agrarklimaschutz; circa 3.100 Probenflächen) umfassen regelmäßige Erhebungen von Bodenzustandsgrößen. Die BZE-Wald wurde 1987 begonnen, die BZE-LW im Jahr 2011. Im Rahmen der BZE-LW werden bundesweit Bodenproben landwirtschaftlich genutzter Flächen gewonnen und vor allem im Hinblick auf Parameter des Kohlenstoffhaushalts analysiert. Auf Basis der Agrarböden, die für die erste Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW I) physikochemisch charakterisiert wurden, fand im Projekt Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften (MonViA 2024) unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Managementdaten eine Auswahl von circa 300 Standorten statt, an denen Mikrobiom-Analysen im Zuge der zweiten BZE-LW-Untersuchungskampagne durchgeführt werden (2025-2027). Ein

integratives Konzept zum nationalen Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald, Kapitel 1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien), das maßgeblich auf den Flächen der BZE-Wald aufbaut und ebenso bodenbiologische Erfassungen vorsieht (siehe Abschnitt unten Biologische Bodenzustandserhebung im Wald) liegt ebenfalls vor (Bolte et al. 2025).

- Das **ICP Forests-Programm** (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) ist ein internationales Programm, das zur Überwachung der Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Wälder ins Leben gerufen wurde. ICP Forest umfasst neben den Übersichtsichterhebungen auf rasterbasierten flächenrepräsentativen Level I-Flächen der Waldzustandserhebung- und BZE-Wald-Erhebungen auch ein Intensivmonitoringprogramm auf Level II-Flächen. Dies sind ausgewählte, repräsentative Standorte, an denen zusätzlich zum Level I-Monitoring eine intensivere und kontinuierliche Datenerfassung erfolgt, wie zum Beispiel zu atmosphärischer Deposition, Chemie von Boden und Bodenwasser, Bodenvegetation, Baumwachstum und atmosphärischer Deposition. Diese Messungen ermöglichen ein tieferes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Luftschadstoffen, Klima und dem Waldökosystem.
- Das 2023 gestartete Projekt **Biologische Bodenzustandserhebung** im Wald (BBZE-Wald) zielt darauf ab, die umfangreichen Daten der BZE-Wald mit neu erhobenen Daten zu Biodiversität und biologischer Aktivität im Boden zu verknüpfen. Die Untersuchungen der BBZE finden bundesweit statt und umfassen 432 Level I- und 68 Level II-Flächen des forstlichen Umweltmonitorings. Zielorganismen sind Regenwürmer und Vertreter der Mesofauna (Collembolen, Hornmilben, Enchyträen) auf einer Unterstichprobe von 100 Flächen und das Bodenmikrobiom auf allen 500 Flächen. Die Erfassung der Collembolen und Hornmilben konnte bisher nicht umgesetzt werden. Die BBZE-Wald wird im Rahmen der Bodenzustandserhebung III umgesetzt und ist als ein Modul im integrativen Monitoringkonzept NaBioWald (Kapitel 1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien) vorgesehen.
- Die **Umweltprobenbank** des Bundes (betrieben durch das UBA) ist ein Archiv, in dem unter anderem Bodenproben von 11 verschiedenen Standorten eingelagert werden (Koschorreck et al. 2013). Diese können für spätere Auswertungen, zum Beispiel Analysen der darin enthaltenen Organismen, genutzt werden. Im vom UBA geförderten Projekt „**TrendDNA**“ werden die Langzeitproben der Umweltprobenbank mit modernsten molekularbiologischen Methoden analysiert, um die Veränderung der biologischen Umwelt in den letzten Jahrzehnten zu entschlüsseln.
- Des Weiteren untersuchen wissenschaftliche Forschungsplattformen den Zustand der Bodenorganismen. So sind zum Beispiel in Deutschland 205 **Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche (DFV)** etabliert, die spezifisch zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen betrieben werden (Kaufmann-Boll, Kern, Niederschmidt 2020). Neben physikalisch-chemischen Parametern werden auch biologische Daten zur mikrobiellen Biomasse und Diversität, Enzymaktivität, pflanzenpathogenen Fadenwürmern und Regenwürmern aufgenommen. Seit 2006 werden auch innerhalb der **Biodiversitätsexploratorien** Daten zu Bodenorganismen und deren Funktionen erhoben. Diese umfassen ein Monitoring der Bakterien,

Pilze und Archaea, das alle drei Jahre auf insgesamt 300 Flächen in drei Untersuchungsgebieten durchgeführt wird, die hälftig aus Wäldern und Grünland bestehen und einer unterschiedlich starken Landnutzung unterliegen. Die Verteilung der Probeflächen auf ausschließlich drei Regionen bedingt eine geringe räumliche Repräsentativität für ganz Deutschland.

- Im **bundesweiten Insektenmonitoring**, das gemeinsam vom Bundesamt für Naturschutz und den Bundesländern entwickelt wird und von letzteren umgesetzt werden soll, ist die Erfassung der epigäischen (auf dem Boden lebenden) Insekten und Spinnen auf der Kulisse der bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen im Wald, Agrarland und Grünland konzeptionell entwickelt (Baustein 1C, Ludwig et al. 2025). Ebenso wurde für die repräsentativen Stichprobenflächen im Agrarland durch das Umweltbundesamt eine Konzepterarbeitung für ein integriertes Monitoring zur Erfassung der ökologischen Auswirkungen des chemischen Pflanzenschutzes veranlasst (Toschki, Oellers et al. 2021), das die Erfassung und Integration von Bodenorganismen beinhaltet. Pläne zur Umsetzung bestehen hierfür allerdings bisher nicht. Die Monitoringaktivitäten auf den bundesweit **repräsentativen Stichprobenflächen**, zu denen ebenso das High Nature Value Farmland-Monitoring (HNV), das Monitoring häufiger Brutvogelarten und das in der Pilotphase befindliche Ökosystem-Monitoring zählen, werden damit in Zukunft sehr umfangreiche und verschneidbare Daten generieren. Zu beachten ist hier die Verknüpfung verschiedener Betrachtungsebenen, denn beispielsweise das naturschutzfachliche Monitoring auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen betrachtet Landschaftsausschnitte (1 km²), während bodenbiologische Erfassungen die lokale Standortebene betreffen.

In einem Arbeitsdokument des Fachgremiums „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ am Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität wurde gemeinsam mit den Vertretern der Landesämter **ein Überblick der bodenbiologischen Erfassungen der Bundesländer** erarbeitet (Stand Januar 2024, Anhang 1). Es bezieht neben laufenden Monitoringaktivitäten auch abgeschlossene und in Planung befindliche Programme ein.



Weiterführende Informationen

- ▶ **Bodendauerbeobachtung:** <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/boden-schuetzen/boden-beobachten-bewerten>
- ▶ **Bericht zur Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds:** <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzeption-umsetzung-eines-klimafolgen>
- ▶ **Bodenzustandserhebung Landwirtschaft:** <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/bodenzustandserhebung-landwirtschaft-bze-lw>
- ▶ **MonViA:** <https://www.agrarmonitoring-monvia.de/>
- ▶ **Bodenzustandserhebung Wald:** <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldoekosysteme/projekte/bodenschutz-und-waldzustand/projekte-bodenzustandserhebung/bundesweite-bodenzustandserhebung-im-wald>
- ▶ **NaBioWald:** <https://nabiowald.thuenen.de/>
- ▶ **ICP Forests-Programm:** <https://www.icp-forests.net/monitoring-and-research/monitoring>
- ▶ **Bodenbiologische Zustandserhebung Wald:** <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldoekosysteme/projekte/bodenschutz-und-waldzustand/projekte-bodenzustandserhebung/entwicklung-einer-methodik-zur-stichprobengestuetzten-erfassung-ravesa-i-1>
- ▶ **Umweltprobenbank:** <https://www.umweltprobenbank.de/de>
- ▶ **TrendDNA:** <https://trenddna.de/>
- ▶ **Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche:** <https://www.bonares.de/data-fieldexperiments>
- ▶ **Biodiversitätsexploratorien:** <https://www.biodiversity-exploratories.de/de/>
- ▶ **Insektenmonitoring:** <https://www.bfn.de/insektenmonitoring>
- ▶ **Überblick der bodenbiologischen Erfassungen der Bundesländer in Deutschland (Stand Januar 2024):** https://www.monitoringzentrum.de/sites/default/files/2025-01/Enduebersicht_Bund-Laender-Erfassungen_Bodenbiodiversitaet.pdf
- ▶ **Kaufmann-Boll, Kern, Niederschmidt (2020):** Bodendaten in Deutschland: Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

2.2 Europäische und internationale Aktivitäten

Etablierte globale und europäische Monitoringaktivitäten zur Bodenbiodiversität sowie die 2025 in Kraft getretene EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360, Kapitel 1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien) fokussieren stark auf DNA-basierte Bodenbiodiversitätsanalysen. Zentrale Informationen zum europäischen Monitoring der Bodenbiodiversität werden durch das European Soil Observatory (EUSO) bereitgestellt. Folgend wird ein Auszug wiedergegeben:

- ▶ Im Europäischen Projekt **Land Use and Cover Area frame Survey Soil (LUCAS Soil)** werden in Deutschland auf 2.000 Probestellen Daten zum abiotischen Zustand des Oberbodens erfasst (Orgiazzi et al. 2018). Im Jahr 2018 wurden europaweit an insgesamt 881 Probestellen mittels Metabarcoding auch Daten zu Bakterien, Pilzen, weiteren Eukaryoten, Fadenwürmern, Gliederfüßern und Regenwürmern aufgenommen sowie Enzymaktivitäten, mikrobielle Biomasse und Respiration analysiert (Orgiazzi et al. 2018; Smith et al. 2021). In 2022 wurden erstmals auch funktionelle Gene der Bodenbiodiversität sowie Pestizidrückstände erfasst (Königer et al. 2026). Eine intensivere Kooperation zwischen den Monitoringprogrammen in Deutschland und LUCAS Soil wird angestrebt (Jones et al. 2021).
- ▶ Das **Soil Biodiversity Observation Network (Soil BON)**, wurde 2018 als Teil der Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network (GEO BON), einer Initiative der Vereinten Nationen, gegründet (Guerra et al. 2021). Soil BON ist ein Netzwerk, das sich auf die Bodenbiodiversität konzentriert und weltweit (außer Antarktis) Bodenproben hinsichtlich physikochemischer Parameter untersucht, Nematodenerfassungen und Mikrobiomanalysen durchführt sowie funktionelle Parameter erhebt (Bodenatmung, substratinduzierte Atmung, mikrobielle Biomasse, Enzymaktivität, Streuzersetzung, Bodenaggregatstabilität). Das Soil BON Foodweb Team (Potapov et al. 2022) erweitert das Kernnetzwerk von Soil BON durch die Einbindung lokaler Forschungsgemeinschaften (der Bereiche Bodenzologie und Taxonomie) und die Anwendung zusätzlicher Probenahmeansätze. Das Netzwerk hat sich zum Ziel gesetzt, Bodenorganismengemeinschaften und ihre Nahrungsnetze weltweit einheitlich vergleichend in geschützten und benachbarten ungeschützten Gebieten zu untersuchen. Die Entwicklung einer Trainingsbibliothek durch zunächst manuelle Annotationen hochauflösender Bilder soll die automatisierte Bildanalyse, die Gruppenidentifikation und die Schätzung der Körpergröße von Bodenwirbellosen beschleunigen und zukünftig den Arbeitsaufwand der Datenakquise erheblich reduzieren (Potapov et al. 2022).
- ▶ **Biodiversa+** ist eine Europäische Biodiversitäts-Partnerschaft zur Förderung exzellenter Biodiversitätsforschung mit Relevanz für die Gesellschaft und die Politik. Sie ist Teil der EU-Biodiversitätsstrategie 2030. Das Monitoringzentrum beteiligt sich am Biodiversa+-Pilotprojekt „Soil biodiversity in protected, near-natural forests“. In diesem Pilotprojekt haben elf europäische Mitgliedstaaten mitgewirkt und nach einem einheitliche Protokoll Bodenbiodiversität in naturnahen Wäldern auf insgesamt 64 Waldflächen beprobt (Seeber 2024, Seeber 2025 et al.). In Deutschland wurden hierfür in 2023 und 2024 sechs Waldstandorte bodenbiologisch untersucht. Die Erfassung der Mikroorganismen, Meso- und Makrofauna folgt dem Soil BON-/ Foodweb-Protokoll für die Anschlussfähigkeit an die oben genannten Programme. Die derzeitige Projektphase in 2025 und 2026 konzentriert sich auf die Datenanalyse, die Verbindung zu politischen Maßnahmen und Nationalen Aktivitäten sowie die Optimierung der Datenerhebung. Unter anderem sollen, basierend auf den Pilotdaten, Essential Biodiversity Variables (EBVs) berechnet und Protokolle in Zusammenarbeit mit LUCAS Soil und Soil BON verbessert werden. Weiterhin wird geprüft, wie die aus dem Pilotprojekt gewonnenen Daten für die in der EU-Bodenrichtlinie vorgeschlagenen Deskriptoren (Merkmale zur Beschreibung des Bodenzustands) verwendet werden können. Der Abschlussbericht wird auch

die Bewertung von Chancen, Risiken und Einschränkungen sowie Lösungsvorschlägen für die wichtigsten Themen eines transnationalen Monitoringsystems auf nationaler Ebene und im Zusammenhang mit bestehenden EU-Initiativen betrachten.

Die Entwicklung eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings in Deutschland kann einerseits auf den bestehenden nationalen Aktivitäten, Erfahrungen und Messnetzen aufbauen, andererseits muss die Anschlussfähigkeit an die europäischen und internationalen Vorgaben und Monitoringaktivitäten gewährleistet sein. Durch die Anschlussfähigkeit eines bundesweiten Monitorings an internationale Aktivitäten können die nationalen Ergebnisse in einen übergreifenden Kontext gestellt werden und zu einem umfassenderen Verständnis der Bodenbiodiversität weltweit beitragen. Darüber hinaus ist die internationale Zusammenarbeit wichtig für die Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien, die wiederum die Grundlage für eine international vergleichbare Berichterstattung bildet.

Weiterführende Informationen

- ▶ **European Soil Observatory (EUSO):** <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/euso>
- ▶ **European Soil degradation dashboard:** <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard>
- ▶ **LUCAS Soil:** <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>
- ▶ **Soil BON:** <https://soilbon.org/>
- ▶ **Soil BON Foodweb:** <https://soilbonfoodweb.org/>
- ▶ **The European Biodiversity Partnership (Biodiversa+):** <https://www.biodiversa.eu/>
- ▶ **Beteiligung des Monitoringzentrums am Biodiversa+ Soil Pilot:**
<https://www.monitoringzentrum.de/bodenbiodiversitaet>

3 Handlungsbedarfe und Vision eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings

Aufbauend auf der Betrachtung der bestehenden Wissenslücken zum Zustand, Verteilung und Trends der Bodenorganismen (Kapitel 1.3) und den bestehenden nationalen und internationalen Monitoringaktivitäten der Bodenbiodiversität (Kapitel 2), wurden die wichtigsten Handlungserfordernisse abgeleitet und im Eckpunktepapier zur Weiterentwicklung des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings des Fachgremiums „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ (Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität [NMZB] 2022) festgehalten.

Fazit und Handlungsbedarf (Eckpunktepapier des Fachgremiums NMZB 2022, ergänzt)

- ▶ Der Biodiversität des Bodens und ihrer Funktionen und Ökosystemleistungen kommt aktuell immer mehr Aufmerksamkeit zu, dennoch bedarf es weiterer Anstrengungen, Wissenslücken in der Taxonomie und Funktion von Bodenorganismen zu schließen.
- ▶ Bisher existieren keine repräsentativen, systematischen, langfristig angelegten Monitoringaktivitäten der Bodenorganismen und deren Ökosystemleistungen auf Bundesebene.
- ▶ Die Vergleichbarkeit der bisher erhobenen Daten zur Bodenbiodiversität ist eingeschränkt (*heterogene Methoden, Standorte, Ziele und Zielgrößen*).
- ▶ Eine Bewertung des Zustands und der Veränderung der Bodenbiodiversität auf Bundesebene ist derzeit noch nicht möglich.
- ▶ Eine Ableitung von zielführenden Maßnahmen zum Schutz des Lebensraumes Boden inklusive seiner Bodenbiodiversität und -funktionen auf Bundesebene ist bisher kaum möglich.
- ▶ *Obwohl in terrestrischen Ökosystemen das Zusammenspiel des ober- und unterirdischen Lebens für das Gesamtökosystem entscheidend ist, wird das Monitoring dieser Teilbereiche traditionell getrennt durchgeführt, was ein umfassendes Verständnis der Ökosystemdynamik erschwert.*

Ein bundesweites, standardisiertes Monitoring von Bodenorganismen und Bodenfunktionen soll den Zustand und Veränderungen der Bodenbiodiversität und deren Dynamik dokumentieren. Die Daten sollen die Grundlage dafür liefern, Ursachen der Veränderungen zu erforschen, Maßnahmen zur Erhaltung biodiversitätsbedingter Bodenfunktionen und -leistungen abzuleiten und deren Erfolg zu überprüfen. Ein erster Schritt sollte eine bundesweite Ersterfassung relevanter Bodenorganismen, aufbauend auf bestehenden Monitoring- und Erfassungsaktivitäten sein. Damit können erste Wissenslücken geschlossen und Bewertungsgrundlagen der Bodenbiodiversität in Deutschland weiterentwickelt werden.

Mehrwert und Anwendungsbezug eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings. In einem Fachartikel des Fachgremiums Bodenbiodiversität, publiziert in der Schwerpunktausgabe 2024 zum Bodenleben der Zeitschrift Natur und Landschaft sind Mehrwert und Anwendungsbezug eines Bodenbiodiversitätsmonitorings aus Sicht des Gremiums dargelegt:

Publikation „Wege zu einem bundesweit harmonisierten Monitoring: Verbesserung der Erfassung der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ (Ballasus et al. 2024):

„Ein fundierteres Wissen zum Zustand der Bodenbiodiversität und zu möglichen Treibern für deren Veränderungen dient sowohl dem vertieften Verständnis von Prozessen der Entstehung und Veränderung von Biodiversität als auch zur Ableitung von Maßnahmen zum Schutz der Bodenbiodiversität. Im Gegensatz zu kurzfristigen Forschungsprojekten mit sehr spezifischen Forschungsfragen kann und soll das Monitoring langfristige Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaften identifizieren und Hinweise auf mögliche multiple Einflussfaktoren geben, zum Beispiel das Zusammenwirken von Klimaveränderungen, Pestizidrückständen in Böden, Schwermetallbelastungen, Fruchtfolgen, Düngung und Bodenbearbeitung. Konkrete Ursache-Wirkungs-Beziehungen können darüber hinaus auf Experimentalflächen unter kontrollierten Rahmenbedingungen gezielt untersucht werden. Ein Mehrwert des Monitorings ergibt sich somit aus einer engen Verzahnung mit der Forschung. Um Auswirkungen von Landnutzungs- und Klimaveränderungen auf Bodenbiodiversität und Ökosystemfunktionen diagnostizieren und rechtzeitig Handlungsoptionen entwickeln zu können, bedarf es zum einen einer stärkeren Verknüpfung bisher vorwiegend abiotisch ausgerichteter Bodenmonitoringprogramme mit Daten zur Bodenbiodiversität (Kaufmann-Boll et al. 2020). Zum anderen müssen funktionelle Verknüpfungen und Wechselwirkungen zwischen ober- und unterirdischer Biodiversität im Biodiversitätsmonitoring zukünftig intensiver Berücksichtigung finden, um die relative Bedeutung der ober- und unterirdischen Biodiversität für Ökosystemfunktionen herausarbeiten zu können (Eisenhauer et al. 2024). Das Bodenbiodiversitätsmonitoring soll die Grundlage für die Evaluierung, Erhaltung und wo möglich Verbesserung der Bodenbiodiversität und Bodengesundheit im Allgemeinen schaffen. Neuere Studien haben gezeigt, dass das lediglich an oberirdischer Biodiversität orientierte Management ausgewiesener Schutzgebiete keine positiven Effekte auf den Schutz der Bodenbiodiversität hat (Cameron et al. 2019; Guerra et al. 2022; Zeiss 2024). In der landwirtschaftlichen Praxis sind wirksame Maßnahmen, um Bodenorganismen und deren Ökosystemleistungen zu schützen, wie etwa konservierende Bodenbearbeitung, vielfältige Fruchtfolgen, organische Düngung, Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten den meisten Betrieben durchaus bekannt, ihre Anwendung aber aus ökonomischen oder arbeitstechnischen Gründen weniger verbreitet. Das Monitoring soll belastbare Daten und Erkenntnisse schaffen, um unter anderem landwirtschaftliche Betriebe zu motivieren, stärker in den Schutz der Bodenbiodiversität und damit in die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit zu investieren. Förderprogramme können dabei finanzielle Anreize schaffen und somit die Implementierung unterstützen“.

Weiterführende Informationen

- **„Wege zu einem bundesweit harmonisierten Monitoring: Verbesserung der Erfassung der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ (Ballasus et al. 2024):**
<https://shop.kohlhammer.de/wege-zu-einem-bundesweit-harmonisierten-monitoring-verbesserung-der-erfassung-der-bodenbiodiversitat-und-ihrer-funktionen-978-3-00-154253-3.html>

Vision eines ökosystemaren und modular aufgebauten Bodenbiodiversitätsmonitorings



Abb. 4 Die Vision eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings umfasst eine modular aufgebaute einheitliche, regelmäßige und bundesweit repräsentative Erfassung der Bodenbiodiversität als auch der oberirdischen Biodiversität.

Böden sind durch komplexe Interaktionen auf Prozess- und Gemeinschaftsebene stark mit den oberirdischen Ökosystemen verknüpft und ermöglichen die Bereitstellung wichtiger Ökosystemleistungen (Eisenhauer 2024; Eisenhauer et al. 2026; Richtlinie (EU) 2025/2360). Die EU-Bodenrichtlinie benennt beispielhaft die Bereitstellung von Lebensmitteln, sauberem Wasser, Kohlenstoffkreislauf und einem Lebensraum für die biologische Vielfalt. Ebenso fordert die EU-Bodenrichtlinie in Artikel 10 eine Analyse der erhobenen Deskriptoren zur Bodenbiodiversität hinsichtlich eines kritischen Verlusts an Ökosystemleistungen. Als Ökosystem wird durch die Richtlinie ein „dynamische[r] Komplex von Pflanzen-, Tier- und Mikroorganismengemeinschaften und ihrer abiotischen Umwelt, die eine funktionelle Einheit bilden“ definiert. Ein ökosystemarer Monitoringansatz, der die Integration ober- und unterirdischer Biodiversitätsdaten ermöglicht, ist daher die grundlegende Richtschnur des Monitorings der Bodenbiodiversität und soll die bestehende Lücke im bundesweiten Biodiversitätsmonitoring schließen. Die Betrachtung der Bodenbiodiversität soll hierfür lebensraumtypbezogen erfolgen und das Zusammenspiel verschiedener Trophieebenen berücksichtigen. Ein modularer Aufbau ermöglicht dabei eine flexible Anpassung an unterschiedliche Fragestellungen und räumliche Skalen, sowie eine effiziente Integration neuer Erkenntnisse.

EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360): „Die Bodenbiodiversität und die Biodiversität über dem Boden sind eng miteinander verknüpft und interagieren durch wechselseitige Beziehungen zwischen Arten, zum Beispiel über Mykorrhizapilze, die Pflanzenwurzeln miteinander verbinden. Daher sollte die Bedeutung der Sammlung und Analyse von Informationen über das Vorhandensein von Bodenbakterien und -pilzen anerkannt werden und als Grundlage für eine mögliche künftige Ausweitung der Überwachung der biologischen Vielfalt dienen.“

Teil II: Konzeptionelle Grundlagen – Ziele und Voraussetzungen für die Etablierung eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings

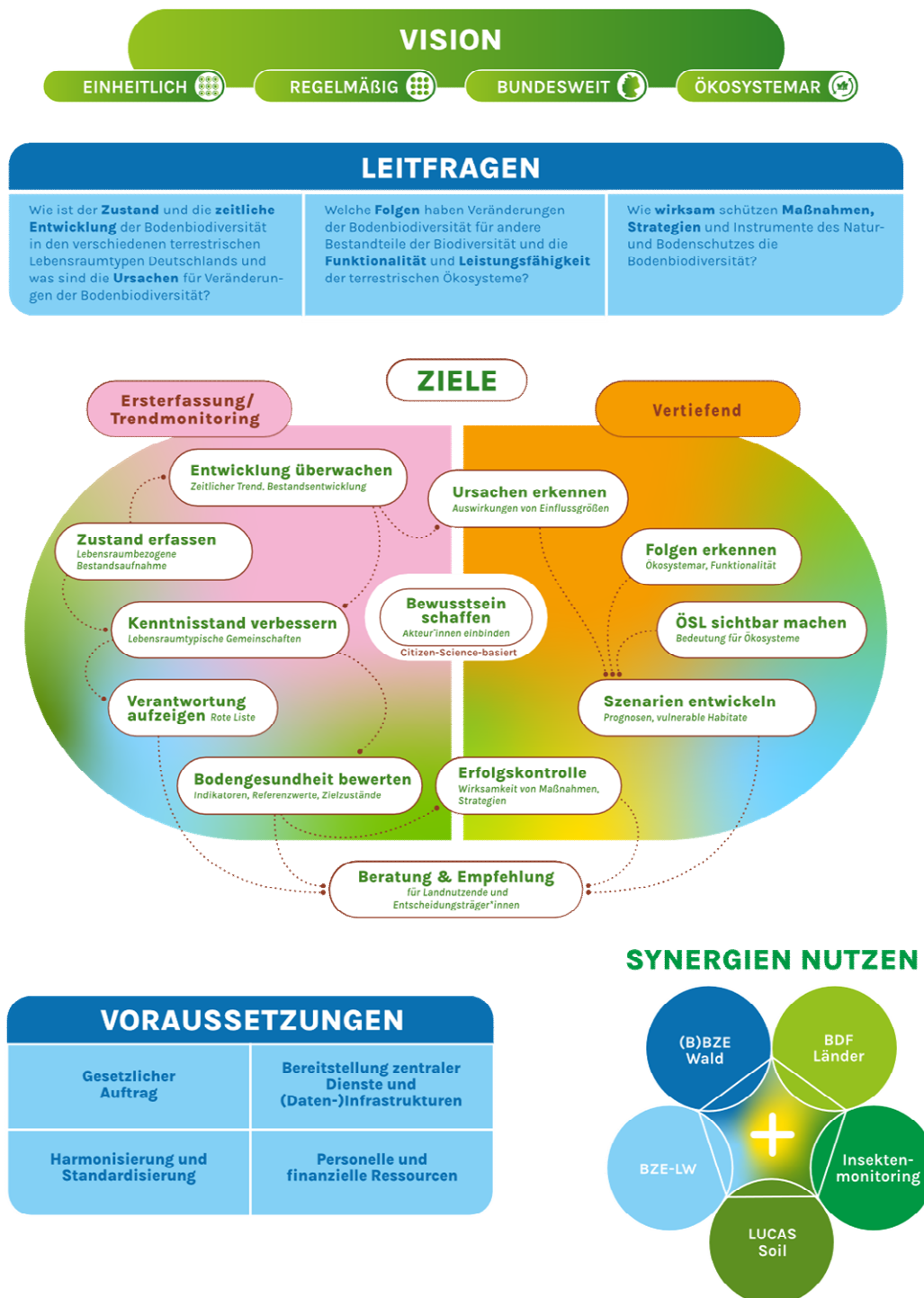


Abb. 5 Inhaltsübersicht Teil II des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.

Nach den in Teil I einleitend dargestellten Rahmenbedingungen und Handlungserfordernissen eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings bilden Teil II und Teil III den konzeptionellen Hauptteil. Der zweite Teil fokussiert auf die **Ausgestaltung** des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings. Darin sind die **Ziele**, die mit diesem Monitoring erreicht werden sollen sowie **die Voraussetzungen** für eine erfolgreiche Implementierung dargelegt. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die **Nutzung von Synergien** durch die Anknüpfung an bereits existierende Monitoringaktivitäten. Weiterhin werden die Einsatzpotenziale **genetischer Methoden** mit dem Fokus Metabarcoding im Bodenbiodiversitätsmonitoring dargelegt.

4 Ziele des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings

Die Erarbeitung konkreter Zielstellungen zur Beschreibung des benötigten Umfangs von Bodenbiodiversitätsdaten und deren Verwendung erfolgte anhand von drei zentralen Leitfragen:

- ▶ Wie ist der Zustand und die zeitliche Entwicklung der Bodenbiodiversität in den verschiedenen terrestrischen Lebensraumtypen Deutschlands und was sind die Ursachen für Veränderungen der Bodenbiodiversität?
- ▶ Welche Folgen haben Veränderungen der Bodenbiodiversität für andere Bestandteile der Biodiversität und die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der terrestrischen Ökosysteme?
- ▶ Wie wirksam schützen Maßnahmen, Strategien und Instrumente des Natur- und Bodenschutzes die Bodenbiodiversität?

Das Fachgremium hat aus den zentralen Leitfragen die folgenden zwölf Ziele für das bundesweite Bodenbiodiversitätsmonitoring abgeleitet (Abb. 6):

Zustand erfassen. Aufgrund mangelhafter Kenntnisse zur lebensraumtypischen Etablierung der Bodenbiodiversität (Kapitel 1.3) ist eine bundesweite Ersterfassung ausgewählter Bodenorganismen-/gruppen und Bodenbiodiversitätsfunktionen einschließlich relevanter Begleitparameter ein grundlegendes Ziel des bundesweiten Monitorings. Dies ist in Teil III: Konzeption einer bundesweiten Ersterfassung – Modul 1 detailliert ausgearbeitet.

Entwicklung überwachen. Das Bodenbiodiversitätsmonitoring soll langfristig angelegt sein, um zeitliche Trends der Bestandsentwicklung zu erfassen. Hierfür sollten unter Berücksichtigung der Praktikabilität ausgewählte aussagekräftige Organismen-/gruppen und Bodenbiodiversitätsfunktionen dauerhaft erfasst und bereits vorhandene Zeitreihen aus bestehenden Monitoringprogrammen/-aktivitäten genutzt werden. Aufgrund der begrenzten Datenlage kann zum aktuellen Zeitpunkt keine konkrete Festlegung hierüber und damit keine Konzeption eines bundesweiten Trendmonitorings erfolgen. Dies wird erst langfristig aufbauend auf der bundesweiten Ersterfassung ermöglicht (Teil IV: Umsetzung und Weiterentwicklung des Monitorings).

Kenntnisstand verbessern. Ersterfassung und Trendmonitoring sollen repräsentative Informationen zu Verteilung und lebensraumtypischer Zusammensetzung der Bodenbiodiversität in Deutschland liefern. Damit soll der Kenntnisstand zu Habitatpräferenzen und autökologischen Bedürfnissen der

Bodenorganismen sowie das Verständnis zu deren Beitrag zur Erfüllung von Bodenfunktionen verbessert werden. Eine Beschreibung lebensraumtypischer Bodenlebensgemeinschaften und -netzwerke sollte sowohl für die Gesamtlandschaft, als auch für naturnahe Standorte als mögliche Hotspots der Bodenbiodiversität erfolgen.

Bodengesundheit bewerten. Zur Bewertung des bodenbiologischen Zustands der Böden Deutschlands sollen anhand der in Ersterfassung und Trendmonitoring erfassten Daten lebensraumbezogene Referenz- und Kennwerte abgeleitet werden. Damit können repräsentative Bodenbiodiversitätsindikatoren entwickelt werden, die zur Überprüfung von Zielzuständen beziehungsweise Leitbildern eines guten ökologischen Bodenzustands dienen.

Verantwortung aufzeigen. Das Monitoring soll eine belastbare Datengrundlage für die Erstellung Roter Listen von Bodenorganismen liefern. In Verbindung mit der Bewertung der Bodengesundheit wird somit die Gefährdungssituation dokumentiert und der vordringliche Handlungsbedarf im Arten- und Ökosystemschutz aufgezeigt.

Ursachen erkennen. Durch das Monitoring sollen Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf Bodenorganismen aufgezeigt werden. Im Trendmonitoring sollen korrelative Beziehungen zwischen Zusammensetzung und zeitlicher Entwicklung der Bodenbiodiversität und beispielsweise Landnutzung(sintensität), Stoffeinträgen und Verschmutzung sowie Klimawandel identifiziert werden. In einem vertiefenden Monitoringmodul sollen dann gezielt kausale Zusammenhänge zwischen bodenbiologischen Zuständen und anthropogenen sowie natürlichen Einflussgrößen untersucht werden.

Folgen erkennen. Folgen der zeitlichen Entwicklung von Bodenbiodiversität(sfunktionen) für andere Bestandteile der biologischen Vielfalt, oberirdisch-unterirdische Interaktionen und die Funktionalität von Ökosystemen sollen in einem vertiefenden Modul ermittelt werden.

Ökosystemleistungen sichtbar machen. Die Bedeutung des Bodenlebens soll durch das Aufzeigen der durch Bodenorganismen(-vielfalt) realisierten Beiträge zur Leistungsfähigkeit von Ökosystemen sichtbar gemacht werden. Durch Bodenbiodiversität erfüllte Ökosystemfunktionen stellen hierbei die Brücke zum Konzept der Ökosystemleistungen dar.

Szenarien entwickeln. Die Monitoringdaten dienen der Entwicklung von Prognosen über zukünftige Trends der Bodenbiodiversität und der Ausweisung vulnerabler Habitate. Der Fokus liegt hierbei auf der Betrachtung der Auswirkungen auf Ökosystemfunktionen und Ökosystemleistungen. Diese Szenarien sollen Entscheidungsträgern als solide Grundlage für die Entwicklung nachhaltiger Landnutzungsstrategien und den Schutz der Bodenbiodiversität dienen.

Erfolgskontrolle. Das Bodenbiodiversitätsmonitoring soll die Grundlage für die Evaluierung, den Erhalt und die Verbesserung der Bodenbiodiversität und Bodengesundheit im Allgemeinen schaffen. Im Rahmen eines vertiefenden Monitorings soll die Wirksamkeit von Instrumenten des Natur- und Bodenschutzes, Agrarumweltmaßnahmen und weiteren Bereichen auf Bodenorganismen ermittelt werden.

Beratung und Empfehlung. Durch die Diagnose von positiven oder negativen Auswirkungen erkennbarer oder prognostizierter Veränderungen von Landnutzung und Klima auf die

Bodengesundheit und -leistungsfähigkeit können Handlungsoptionen entwickelt, Empfehlungen für Entscheidungsträger erarbeitet und Landnutzende praxisnah durch Strategieentwicklung und Maßnahmenempfehlungen beraten werden.

Bewusstsein schaffen. Interessierte, Ehrenamtliche und Citizen Scientists sowie Landnutzer*innen sollen aktiv in das Monitoring eingebunden werden. Ein Citizen Science-basiertes Monitoringmodul kann zur Sensibilisierung der Bevölkerung für das Bodenleben und dessen Bedeutung beitragen. Damit wird nicht nur das Bodenbewusstsein gefördert, sondern ebenfalls ein Beitrag zum Erkenntnisgewinn geleistet.

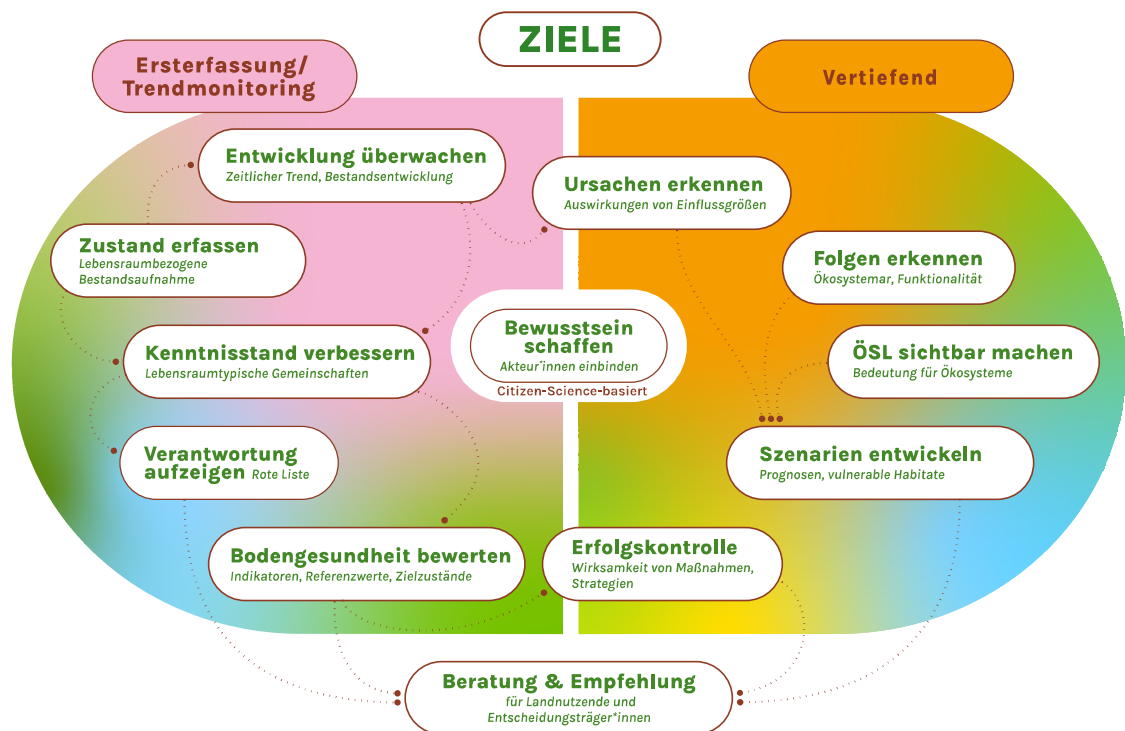


Abb. 6 Ziele des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings.

Weiterführende Informationen

Die Diskussion zu den Zielen des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings ist hier nachzulesen:

- **Tagungsbericht Fachtagung „Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring“ am 05.06.-06.06.2023 (Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität 2024):**
<https://www.monitoringzentrum.de/veranstaltungen/fachtagung-wege-fuer-ein-bundesweites-bodenbiodiversitaetsmonitoring>

5 Voraussetzungen für die Umsetzung

Für den Erfolg eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings ist eine enge Vernetzung und Zusammenarbeit aller beteiligten Akteurinnen und Akteure von entscheidender Bedeutung. Nur durch das Bündeln von Kräften und die Nutzung von Synergien (Kapitel 6) können die notwendigen Ressourcen effizient eingesetzt und fundierte Erkenntnisse für den Schutz der Bodenbiodiversität akquiriert werden.

Auf der Fachtagung „Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring“ 2023 haben Akteurinnen und Akteure aus Forschung, Behörden und Monitoringpraxis ihre Erfahrungen und Perspektiven für die Ausgestaltung des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings eingebracht. Insbesondere aus Sicht der Landesämter, die für die Durchführung von Monitoringaufgaben zuständig sind, wurden Bedarfe und Vorschläge zur Gewährleistung eines harmonisierten Bodenbiodiversitätsmonitoring erörtert:

Benötigte Rahmenbedingungen und Lösungsansätze. Viele Teilnehmende sehen im aktuellen politischen Impuls, unter anderem getrieben durch das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, die EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360) und die Einrichtung des Nationalen Bodenmonitoringzentrums am UBA sowie durch die zunehmende gesellschaftliche Aufmerksamkeit für den Schutz der Böden eine große Chance, um die Prozesse für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring schnell und pragmatisch umzusetzen. Grundlegend hierfür sind:

- ▶ **Gesetzlicher Auftrag:** Vor allem im behördlichen Bereich ist zunächst ein gesetzlicher Auftrag notwendig, um die benötigten Ressourcen mobilisieren zu können (siehe unten Personelle und finanzielle Ressourcen). Zum Zeitpunkt der Fachtagung gab es über die weitgefasste Formulierung des Bundesnaturschutzgesetzes hinaus (§ 6 zur Beobachtung der Natur) keine konkrete und verbindliche Regelung zum Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen. Mit der EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360), in Kraft seit Dezember 2025, ist ein Monitoring der Bodenbiodiversität erstmals vorgeschrieben, verpflichtend für Bodenpilze und Bodenbakterien. Weitere nationale Richtlinien befördern den Prozess zur Entwicklung verbindlicher Bodenbiodiversitätserhebungen über Bodenmikroorganismen hinaus (Kapitel 1.4).
- ▶ **Harmonisierung und Standardisierung:** Die Etablierung eines kontinuierlichen Prozesses zur Weiterentwicklung von bundesweiten Standards für das Bodenbiodiversitätsmonitoring ist unerlässlich, um verlässliche Daten für bundesweite Bewertungen gewinnen zu können. Akteurinnen und Akteure, insbesondere aus der Monitoring-Praxis, sind eng in den Prozess zur Standardentwicklung und -festlegung und Harmonisierung einzubinden. Die Vergleichbarkeit und Anschlussfähigkeit zu bisherigen, zum Teil langjährigen Erfassungsreihen und bereits bestehenden Herangehensweisen ist zu gewährleisten. Neue methodische Standards sollten zunächst parallel zu bisher angewendeten Methoden in die Umsetzung gebracht und entsprechend evaluiert werden. Die wertvollen Zeitreihen bodenbiologischer Erfassungen dürfen keinesfalls durch abrupte Methodenwechsel abgerissen werden. Anpassungen der Standards, beispielsweise an bestimmte Landnutzungstypen oder standörtliche Bedingungen, sind nach Prüfung festlegbar. Im Fachgremium Bodenbiodiversität wurde ein Vorschlag zur Herangehensweise bei der Erhebung der für die bundesweite Ersterfassung empfohlenen

Organismengruppen erarbeitet, der die heterogenen Bedingungen bezüglich bestehender Herangehensweisen und verschiedener Standortbedingungen in Deutschland berücksichtigt (Kapitel 8.4, Anhang 4). Das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität und das Nationale Bodenmonitoringzentrum werden als ressortübergreifende Einrichtungen bei der Moderation von Prozessen zur Festlegung bundesweiter Standards zum Beispiel zu Daten (Erfassungsdaten, Metadaten, Begleitdaten), Methoden, Flächenkulissen, Intervallen und Standorten eng zusammenarbeiten und die Einbindung der Akteurinnen und Akteure sicherstellen. Internationale Prozesse und Agierende werden ebenfalls berücksichtigt.

- **Bereitstellung zentraler Dienste und (Daten-)Infrastrukturen:** Ein primärer Bedarf ist die Bereitstellung von zentralen Diensten und Infrastrukturen. Es werden beispielsweise zentrale (Meta-) Dateninfrastrukturen benötigt beziehungsweise spezifische Schnittstellen zu bestehenden Dateninfrastrukturen und Repositorien, die zielgerichtete Abfragen für das Bodenbiodiversitätsmonitoring sowie Dateneintragungen standardisiert und effizient ermöglichen. Edaphobase (<https://portal.edaphobase.org/>) und das BonaRes Data Repository (<https://www.bonares.de/service-portal/data-repository>) sind hierfür Beispiele. Ebenso bedarf es des Ausbaus der Datenbanken und Repositorien hinsichtlich genomischen Informationen der Bodenbiodiversität sowie eines Angebots an Schulungen und Fortbildungen, beispielsweise in den Bereichen Artenkenntnis, Methodenkompetenz und Datenauswertung.

Darüber hinaus besteht der Bedarf für zentrale (Analytik-)Labore, im Speziellen auch für Metabarcoding-Leistungen. Auch eine Übersicht und eine Vermittlung von Artenkennern und Artenkennerinnen, Auswertungsfachleuten und Datenstewards wurde in diesem Zusammenhang als Bedarf geäußert. Der Aufbau einer Plattform mit zentralen Informationen zu Methoden und Methodenhandbüchern, Protokollen und Veröffentlichungen ist ebenso notwendig. Das Informations- und Vernetzungsportal des Monitoringzentrums befindet sich derzeit in der Entwicklungsphase und wird in 2027 erste Funktionen bereitstellen und die Erfüllung obiger Bedarfe unterstützen. Am Nationalen Bodenmonitoringzentrum entsteht ein Data Hub für Bodeninformationen. Durch eine enge Zusammenarbeit zwischen den Zentren und anderen Initiativen wie umwelt.info sollen Synergien genutzt, Doppelarbeiten vermieden und ein umfassendes und kohärentes Angebot für die Forschungsgemeinschaft und Anwendende geschaffen werden.

- **Personelle und finanzielle Ressourcen:** Personalbedarf besteht vor allem im Bereich der Artenkenntnis, Datenpflege/-kuratierung und Datenanalyse/-auswertung. Dieses Fachpersonal wird sowohl in den Landesfachbehörden als koordinierende und zum Teil ebenfalls direkt umsetzende Organisationseinheit des Biodiversitätsmonitorings benötigt als auch in den beauftragten Gutachterbüros, die maßgeblich bundesweit die Erhebungen umsetzen. Derzeit bestehen starke Limitationen dieses Fachpersonals. Dies begründet sich einerseits in der deutlich begrenzten Verfügbarkeit der Fachkräfte als auch in den stark begrenzten Personalstellen der Landesämter beziehungsweise einem hohen finanziellen Druck und Planungsunsicherheiten für die Gutachterbüros. Für ein kontinuierliches und qualitativ gutes Bodenbiodiversitätsmonitoring ist auch eine Verstärkung im Personalstamm essentiell. Ein konkreter gesetzlicher Auftrag für ein umfassendes Bodenbiodiversitätsmonitoring, der über die derzeitigen Anforderungen der EU-

Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360) hinaus geht, würde nicht nur die notwendigen finanziellen Mittel ermöglichen, sondern auch die Grundlage für die Zusammenarbeit verschiedener Akteurinnen und Akteure darstellen sowie Planungssicherheit und langfristige Perspektiven für Fachkräfte schaffen.

Weiterführende Informationen

Informationen zu in Entwicklung befindlichen Dateninfrastrukturen mit Bezug zum Bodenbiodiversitätsmonitoring:

- ▶ Portal des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität:
<https://www.monitoringzentrum.de/portal>
- ▶ Data Hub Boden des Nationalen Bodenmonitoringzentrums:
<https://bodenmonitoringzentrum.info/themen/data-hub>

6 Synergien bestehender Monitoringaktivitäten

Grobkonzept des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität (Deutscher Bundestag 2021):

“Das Monitoringzentrum soll in Zusammenarbeit mit allen Akteurinnen und Akteuren ein übergreifendes Gesamtkonzept für ein bundesweites Biodiversitätsmonitoring [...] entwickeln [...]. Angestrebt wird, dass sich sämtliche bundesweite Monitoringprogramme ergänzen, wo möglich systematisch aufeinander abgestimmt sind und Synergien genutzt werden, um ein [...] systematisch durchdachtes und effizientes bundesweites Biodiversitätsmonitoring zu schaffen.“

Es gibt verschiedene Möglichkeiten und Ansatzpunkte, wie Synergien im bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitoring ausgeschöpft werden können:

- ▶ Schaffen eines räumlichen und zeitlichen Zusammenhangs durch abgestimmte Erfassungsintervalle und messnetzübergreifende Erfassungen
- ▶ Vergleichbarkeit durch Verwendung harmonisierter Methoden beziehungsweise Erforschung von Transferfunktionen zur Vergleichbarkeit von Ergebnissen resultierend aus unterschiedlichen Methoden

Das bundesweite Bodenbiodiversitätsmonitoring soll auf bereits existierenden Monitoringprogrammen aufbauen (Kapitel 2.1 Erfassungsprogramme von Bundes- und Landesbehörden) beziehungsweise deren Daten für einen optimalen Erkenntnisgewinn verschneiden können. So sind zur Interpretation von Bodenbiodiversitätsdaten ebenso Daten der oberirdischen Biodiversität wie Vegetationsdaten zwingend notwendig. Allerdings stellen die unterschiedlichen Betrachtungsskalen (zum Beispiel der großskalige Lebensraum von Raubvögeln oder die Flächengröße von Lebensraum- und Biotoptypen im Vergleich zum kleinskaligen Lebensraum von Bodentieren oder Bodenmikroorganismen) eine erhebliche Herausforderung dar. Diese Daten sind ebenfalls in einem räumlichen und zeitlichen Zusammenhang zu erfassen, der eine

gemeinsame Auswertung zulässt (Kapitel 3 Vision eines ökosystemaren Biodiversitätsmonitorings). Zur Darstellung des ganzheitlichen Kontexts sind existierende langjährige Zeitreihen sehr wertvoll und es ist somit für die Erhebung weiterer Daten sinnvoll, auf solchen teilweise jahrzehntelangen Zeitreihen aufzubauen.

Synergien zwischen bestehenden Monitoringstrukturen und -institutionen können nur dann wirksam werden, wenn neben der inhaltlichen Komplementarität auch eine politische Rahmensetzung erfolgt, die eine koordinierte ressortübergreifende Zusammenarbeit aktiv befördert. Eine Ausschöpfung vorhandener Potenziale bedarf somit nicht allein methodischer und fachlicher Anschlussfähigkeit, sondern setzt gleichermaßen einen politischen Willen zur Integration und finanziellen Absicherung entsprechender Kooperationsvorhaben voraus. Für das Handlungsfeld Boden enthält die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030 konkret das Ziel 4.1.2:

NBS 2030 1. Aktionsplan: Handlungsfeld 4 Erhaltung gesunder Böden (4.1.2) (BMUKN 2024b): „Bis 2025 wird unter Beteiligung unter anderem des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität sowie der Initiative „Nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald)“ ein Konzept für die schrittweise Einführung eines Programms zum umfassenden und artenübergreifenden Monitoring der Bodenbiodiversität in Deutschland entwickelt, das bisherige Aktivitäten aufgreift, einbindet und anschlussfähig ist an Aktivitäten auf europäischer Ebene.“

Die gemeinsame Umsetzung wird der Verantwortlichkeit der drei Ministerien Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN), Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) und dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) zugeordnet.

Konkrete Ansatzpunkte zur Nutzung von Synergien für eine bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität sind im Kapitel 8.2 Anforderungen an die Kulisse dargelegt.

7 Potenziale genetischer Methoden

Die Erfassung des enorm vielfältigen Bodenlebens ist komplex und anspruchsvoll. Der hohe zeitliche und finanzielle Aufwand und die limitierte Verfügbarkeit von Expertinnen und Experten, vor allem für die taxonomische Bestimmung, stellen große Herausforderungen für ein kontinuierliches bundesweites Monitoring dar. Die Implementierung molekularer Technologien kann dabei Entlastung schaffen. DNA-basierte Verfahren haben großes Potenzial als komplementäre Methode zur morphologischen Artidentifikation im (Boden-) Biodiversitätsmonitoring.

Insbesondere die genetische Erfassungsmethode Metabarcoding, die für die qualitative Erfassung der Biodiversität eingesetzt werden kann, hat sich während der letzten Jahrzehnte rasant entwickelt und kann ein leistungsstarkes Werkzeug für das Monitoring sein. Artinformationen und Einsichten in Diversitätsmetriken von Gemeinschaften können aus komplexen organismischen Sammelproben, zum Beispiel Barberfallen, oder direkt aus Bodenproben (eDNA-Methode) gewonnen werden. Die Vorteile liegen vor allem in der zeitlichen und finanziellen Effektivität sowie der Möglichkeit, auch

die große Diversität der Mikroorganismen erfassen zu können. Unabhängig von der Morphologie (Phänotyp, Entwicklungsstufe, Integrität) können mehrere Organismengruppen gleichzeitig objektiv analysiert werden. Insbesondere die eDNA-Methode kann und soll aufgrund des geringen Erfassungsaufwands zukünftig eine wichtige Rolle im Bodenbiodiversitätsmonitoring spielen und wird in der EU-Bodenrichtlinie (Kapitel 1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien) für die Erfassung des Bodenmikrobioms vorgeschrieben. Für die Identifikation des Bodenmikrobioms sind molekulare Methoden vor allem in der Forschung bereits etabliert.

Vor einer routinemäßigen Anwendung des Metabarcodings im Monitoring, insbesondere des Monitorings der Bodenfauna, und der Einführung in die behördliche Praxis sind allerdings Lösungen für wesentliche Herausforderungen zu erarbeiten:

- ▶ bisher unzureichend befüllte Sequenzdatenbanken müssen vervollständigt werden und gut kuratiert, qualitätskontrolliert und öffentlich zugänglich sein
- ▶ Qualitätssicherung und Standardisierung der Prozesse von der Probenahme und Probenaufbereitung über die Metabarcodingleistung hin zur bioinformatischen Auswertung ist für vergleichbare Ergebnisse erforderlich
- ▶ es müssen paarweise Vergleiche (Barcoding versus morphologische Bestimmung) durchgeführt werden, um zukünftig bei Anwendungen nur einer Methode eine Unter- oder Überschätzung von Bodenbiodiversität durch eine angemessene Dateninterpretation und Methodenauswahl zu vermeiden
- ▶ es besteht für alle Bodenorganismengruppen (und -biodiversitätsfunktionen) Forschungsbedarf bei der Erarbeitung und Etablierung von Indikatoren zur Bodenzustandsbewertung, welche die Voraussetzung für eine zielgerichtete Auswertung darstellt

Weiterführende Informationen

zu Potenzialen und Herausforderungen DNA-basierter Biodiversitätsanalysen:

- ▶ **Leese et al. (2023):** DNA-basierte Biodiversitätsanalysen im Natur- und Umweltschutz: Welche Optionen haben wir für eine Standardisierung? Eine Handlungsempfehlung aus Forschung und Praxis. Bundesamt für Naturschutz [Hrsg.], BfN-Schriften 666. DOI: 10.19217/skr666
- ▶ **Schröer et al. (2024):** Hürden und Chancen der Integration DNA-basierter Methoden für ein Boden-Biodiversitätsmonitoring in Agrarlebensräumen. Natur und Landschaft 9+10/2024, 99 (470-479). DOI: 10.19217/NuL2024-09-06
- ▶ **Schaefer et al. (2026):** Identifizierung potenzieller Förderschwerpunkte zu genetischen Sequenzier- und Analysemethoden für das behördliche Monitoring der Bodenbiodiversität. Gutachten für das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB). Leipzig, Bundesamt für Naturschutz. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19352224>

Teil III: Konzeption einer bundesweiten Ersterfassung – Modul 1

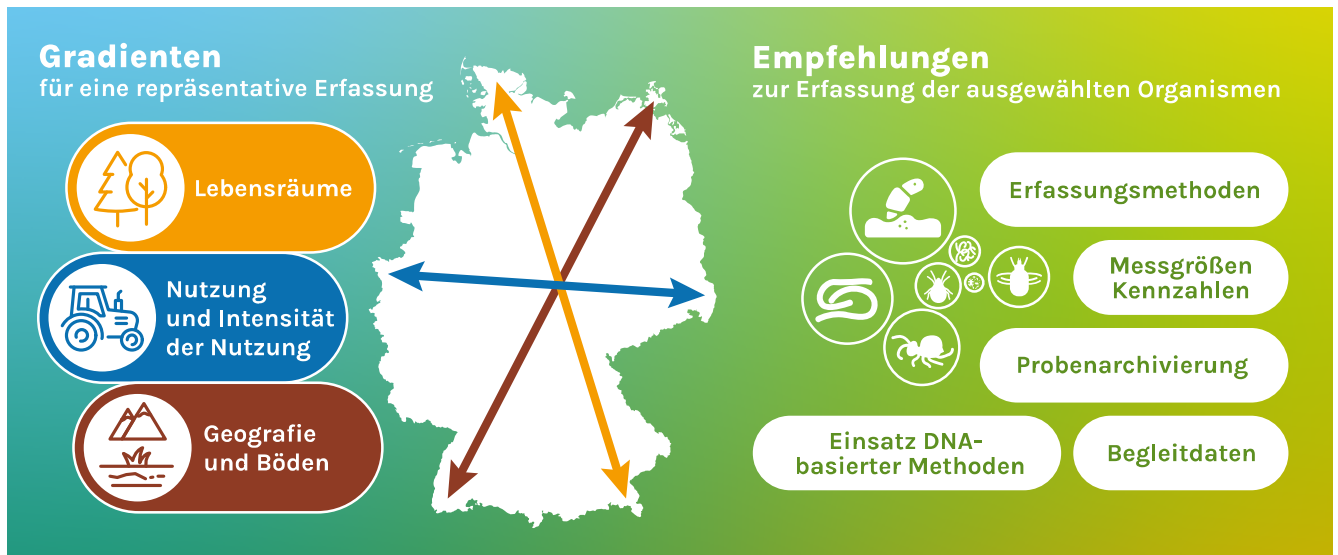


Abb. 7 Inhaltsübersicht Teil III des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.

8 Aufbau einer umfassenden Datengrundlage zur Bodenbiodiversität in Deutschland

Um die Ziele des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings zu erreichen (Kapitel 4) ist zunächst eine bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität notwendig. Dies ist ein grundlegender Schritt, um lebensraumtypische bodenbiologische Referenzwerte zu definieren und messbare Indikatoren zu identifizieren (Abb. 8).

Die im Folgenden formulierten Empfehlungen (thematischer Umfang siehe Abb. 7) wurden mit Fokus auf die bundesweite Ersterfassung entwickelt. Ihre Relevanz reicht jedoch über diese erste Phase hinaus: Die Empfehlungen sind auch für ein langfristiges Trendmonitoring maßgeblich, sofern sie sich in der Umsetzung als praktikabel und aussagekräftig erweisen. Im Zuge der Implementierung eines solchen Trendmonitorings sollten sie evaluiert werden (siehe Teil IV). Beispielsweise könnte sich herausstellen, dass bestimmte Organismengruppen beziehungsweise bodenbiologische Messparameter in spezifischen Lebensräumen für ein langfristiges Monitoring wenig Mehrwert bieten, da sie dort eine eingeschränkte Aussagekraft als Indikatoren aufweisen.

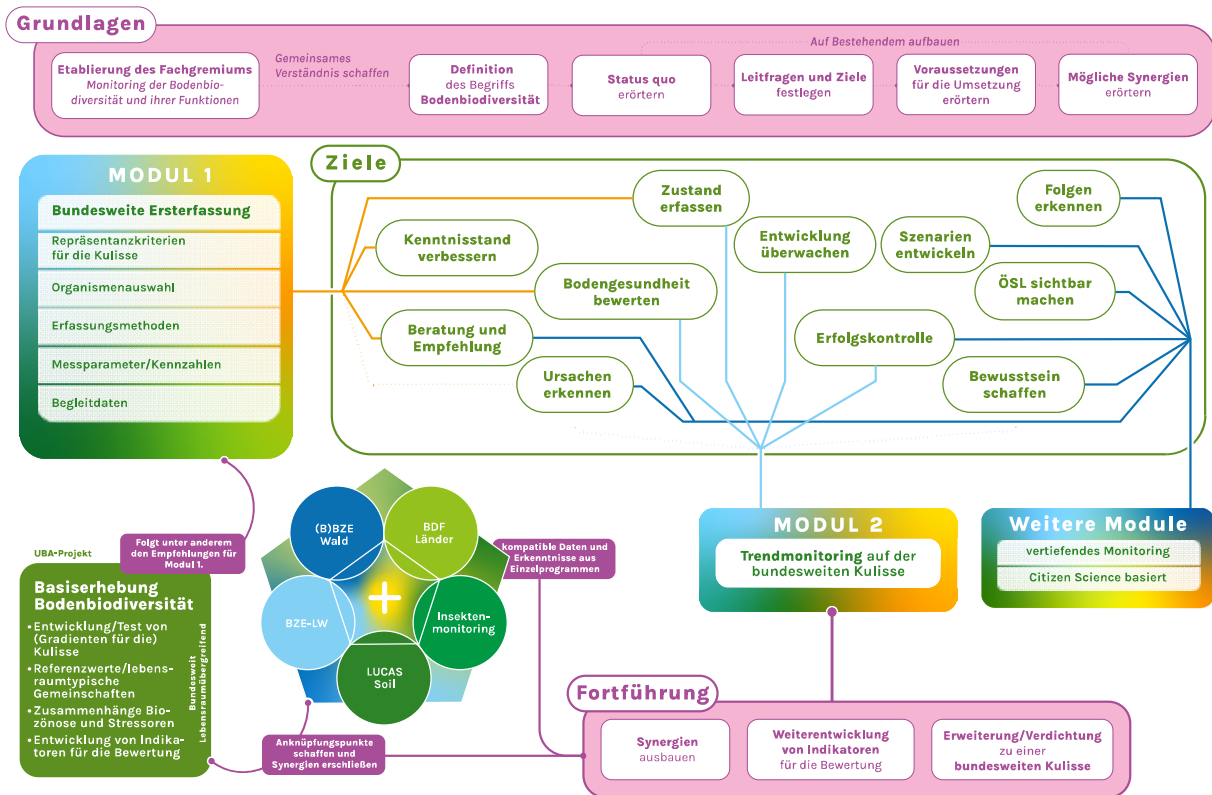


Abb. 8 Schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring. Das Fachgremium Bodenbiodiversität am Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität hat konzeptionelle Grundlagen für ein zukünftiges bundesweites Monitoring der Bodenbiodiversität erarbeitet (Teil II: Konzeptionelle Grundlagen – Ziele und Voraussetzungen für die Etablierung eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings) unter Berücksichtigung bestehender gesetzlicher und fachlicher Anforderungen sowie bestehender Monitoringprogramme und -projekte (Teil I: Vision - Bodenbiodiversität als integraler Bestandteil des bundesweiten Biodiversitätsmonitorings). Es wurde ein erstes Monitoringmodul „Bundesweite Ersterfassung“ ausgearbeitet, dass in Teil III: Konzeption einer bundesweiten Ersterfassung – Modul 1 detailliert beschrieben ist. Wichtige Umsetzungsschritte der bundesweiten Ersterfassung sind in Teil IV: Umsetzung und Weiterentwicklung des Monitorings aufgeführt. Die umfassenden Bodenbiodiversitätsdaten der bundesweiten Ersterfassung bilden die Grundlage für die Etablierung einer bundesweiten Kulisse und eines langfristigen Trendmonitorings (Modul 2) sowie weiterer vertiefender Monitoringmodule, die daher im vorliegenden Konzept noch nicht enthalten sind.

8.1 Ziele für die bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität

Eine bundesweite Ersterfassung trägt wesentlich zur Erfüllung der formulierten Zielstellungen **Zustand erfassen, Kenntnisstand verbessern, Bodengesundheit bewerten, Beratung und Empfehlung** sowie zu **Ursachen erkennen bei** (Kapitel 4; Abb. 8).

8.2 Anforderungen an die Kulisse

Repräsentativitätskriterien für die Kulisse. Für die Ersterfassung sind, orientiert an den Zielstellungen, folgende Repräsentativitätskriterien für die Flächenkulisse zu berücksichtigen: Es ist eine relevante Auswahl verschiedener **Lebensraumtypen** und **Nutzungsgradienten** der

Gesamtlandschaft im Bundesgebiet vorzunehmen, ebenso wie **naturnahe Lebensräume** zu berücksichtigen. Die Auswahl naturnaher Standorte sollte sich vor allem nach dem Potenzial richten, lebensraumtypbezogene Referenzwerte aus den Ergebnissen ableiten zu können, die ebenfalls einen Erkenntnisgewinn für genutzte Lebensraumtypen generieren, zum Beispiel extensives Grünland oder FFH-Lebensraumtypen. Sonderstandorte wie zum Beispiel Dünen werden in der bundesweiten Erfassung daher nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zu vielen anderen Lebensraumtypen, für die naturnahe Systeme existieren, stellt der Acker einen gänzlich anthropogen geschaffenen Lebensraum dar. Genutzte Standorte können und sollten im Zuge der Ermittlung der Referenzwerte nicht ausgeschlossen werden. Vielmehr sollte innerhalb des jeweiligen Nutzungstyps ein Benchmarking mithilfe potenziell nicht bis wenig belasteter Standorte erfolgen. Als Faktoren der Belastung könnten die Bearbeitungsintensität, erhöhte Bodengehalte oder Einträge von Schadstoffen, übermäßige Nitrateinträge oder der Einsatz von Pestiziden in die Betrachtung einbezogen werden. Die Untersuchung solcher Standorte wird besonders hilfreich bei der Unterscheidung der Muster von natürlichen und anthropogenen Einflussgrößen sein.

Neben Lebensraumtypen und Nutzungsgradienten sollte die Monitoringkulisse auch die **Komplexität der Böden** Deutschlands repräsentieren. Dabei sollen jedoch nicht Gradienten von Bodeneigenschaften auf der Ebene von Einzelparametern als Repräsentativitätskriterien für die Kulissenauswahl dienen. Physikochemische Einzelparameter wie zum Beispiel Sand- oder Tongehalte, pH-Wert oder Gehalt an organischer Substanz werden im Zuge der bundesweiten Ersterfassung erfasst (Kapitel 8.6). Sie sind von Bedeutung zur Charakterisierung der Bodenbeziehungsweise Standortverhältnisse als wichtige Treiber der Bodenbiodiversität und damit für die Interpretierbarkeit der Ergebnisse der bodenbiologischen Erhebung. Physikochemische Einzelparameter sollen aber aufgrund ihrer Vielzahl und Vielfältigkeit nicht Merkmalsträger der Grundgesamtheit bei der Stichprobenziehung für die Kulisse sein, da die Stichprobenanzahl damit zu hoch werden würde und eine Beprobung damit unpraktikabel wird. Da sich viele Bodeneigenschaften gegenseitig bedingen, würde die Verwendung mehrerer korrelierter Bodeneigenschaften als Repräsentativitätskriterien zudem zu einer redundanten Stichprobe führen. Daher sollten andere Ansätze verwendet werden, die die Komplexität der Böden berücksichtigen. Die Ausprägung der Lebensraumtypen selbst ist bereits Ausdruck für einen ganzen Komplex von Standortfaktoren, einschließlich des Bodentyps mit seiner physikochemischen und biologischen Charakteristik. Die EU-Bodenrichtlinie schlägt die Verwendung homogener **Bodeneinheiten** vor, die unter anderem **nach klimatischen Bedingungen, Bodennutzung/-bedeckung, Bodentypen** als auch nach Verwaltungszwecken, den **Bodenbezirken**, definiert werden.

Synergien mit bestehenden Monitoringprogrammen nutzen. Beim Aufbau des Messnetzes sind Synergien mit bereits existierenden Monitoringprogrammen zu identifizieren und zu nutzen. Bestehende Infrastrukturen und teilweise langjährige Datenreihen bereits laufender Monitoringprogramme (Kapitel 2) mit Boden(biodiversitäts)fokus können einen erheblichen Mehrwert bieten. Für das bundesweite Bodenbiodiversitätsmonitoring werden vielversprechende Synergiepotenziale vor allem bei den folgenden Monitoringaktivitäten gesehen: Bodendauerbeobachtungsprogramme der Länder, Bodenzustandserhebung Landwirtschaft und Bodenzustandserhebung Wald einschließlich der entwickelten Konzepte und Pilotvorhaben zum

integrativen Biodiversitätsmonitoring, bundesweites Insektenmonitoring auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen und LUCAS Soil.

Im Rahmen einer bundesweiten Ersterfassung der Bodenbiodiversität sollten die existierenden Stichprobenkulissen auf ihre Eignung zur Ableitung von lebensraumtypbezogenen Referenzdaten für die Beurteilung eines guten ökologischen Bodenzustands geprüft werden. Für ein bundesweites Monitoringprogramm müssten sehr große geographische, klimatische und damit auch ökologische Gradienten abgedeckt werden. Durch die statistische Verschneidung der Repräsentativitätskriterien kann eine flächenrepräsentatives Kulissendesign berechnet werden. Dabei sollten bevorzugt bestehende (Boden-)Probenahmepunkte aus den genannten Programmen genutzt werden. Eine Fortsetzung der bodenbiologischen Erfassungen (Trendmonitoring) auf Grundlage der Kulisse der Ersterfassung wird hierfür angestrebt. Dafür sollte, basierend auf den in der Ersterfassung gewonnen in-situ-Daten, die identifizierte Stichprobenkulisse in Hinblick auf ihre Repräsentativität evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden.

8.3 Organismenauswahl

Bodenbiodiversität im Sinne des Fachgremiums „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ am Monitoringzentrum ist...

„...die strukturelle und funktionelle Vielfalt von Organismen, Arten und Populationen, die ihren gesamten oder einen Teil ihres Lebenszyklus im Boden verbringen oder deren essentieller Lebensraum die Bodenoberfläche darstellt. Sie umfasst die genetische Variation der Organismen und ihre Lebensgemeinschaften mit ihren ökologischen Zusammenhängen und Prozessen, auf der Ebene von Bodenmikrohabitaten bis hin zu Landschaften.“

(In Anlehnung an die Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2020)

Die Erfassung von Bodenorganismen ist komplex und anspruchsvoll, weshalb die Auswahl bestimmter Organismengruppen für ein Bodenbiodiversitätsmonitoring ein notwendiger Kompromiss zwischen dem Wunsch nach einer umfassenden Erfassung und bestehenden praktischen Einschränkungen ist.

Für die bundesweite Ersterfassung wurden Bodenorganismen(-gruppen) und Bodenbiodiversitätsfunktionen ausgewählt, die aufgrund des guten Kenntnisstands ihrer Ökologie und bestehenden Sensitivität gegenüber Umwelteinwirkungen einen hohen Informationswert haben und deren Erhebung hinsichtlich des zeitlichen und finanziellen Aufwands, der Verfügbarkeit von Fachleuten und dem Vorhandensein methodischer Standards praktikabel sind. Diese Informationen wurden in einer Auftragsvergabe durch das Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME) zusammengestellt (Diáz und Simon 2023; Anhang 2).

Empfohlene Organismengruppen und deren bioindikatorischer Wert. Organismen mit Schlüsselfunktionen im Ökosystem oder mit wichtigen regulatorischen und verbindenden Rollen stellen biologische Indikatoren für die Bodenqualität dar. Hauptaugenmerk bei der Organismengruppenauswahl lag auf der Bewertung des strukturellen und funktionellen Informationsgehalts einer jeweiligen Organismengruppe. Um die Vielfalt der Bodenbiodiversität

abzubilden, wurden Organismengruppen verschiedener Größenklassen, Lebensweisen und trophischer Ebenen einbezogen, woraus sich die Empfehlung des Fachgremiums zur Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum für die Erfassung folgender Bodenorganismengruppen ergibt: Mikroorganismen (Bacteria, Archaea, Fungi, Protozoa), Fadenwürmer, Hornmilben, Raubmilben, Springschwänze, Enchyträen, Regenwürmer (Abb. 9). Der bioindikatorische Wert dieser Bodenorganismen ist in Anhang 3 aufgeführt. Datenlage und Herangehensweisen zur Entwicklung von Indikatoren der Bodenbiodiversität für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz einschließlich der Durchführung von Fallstudien ist in Kaufmann-Boll et al. (2025) dargestellt.

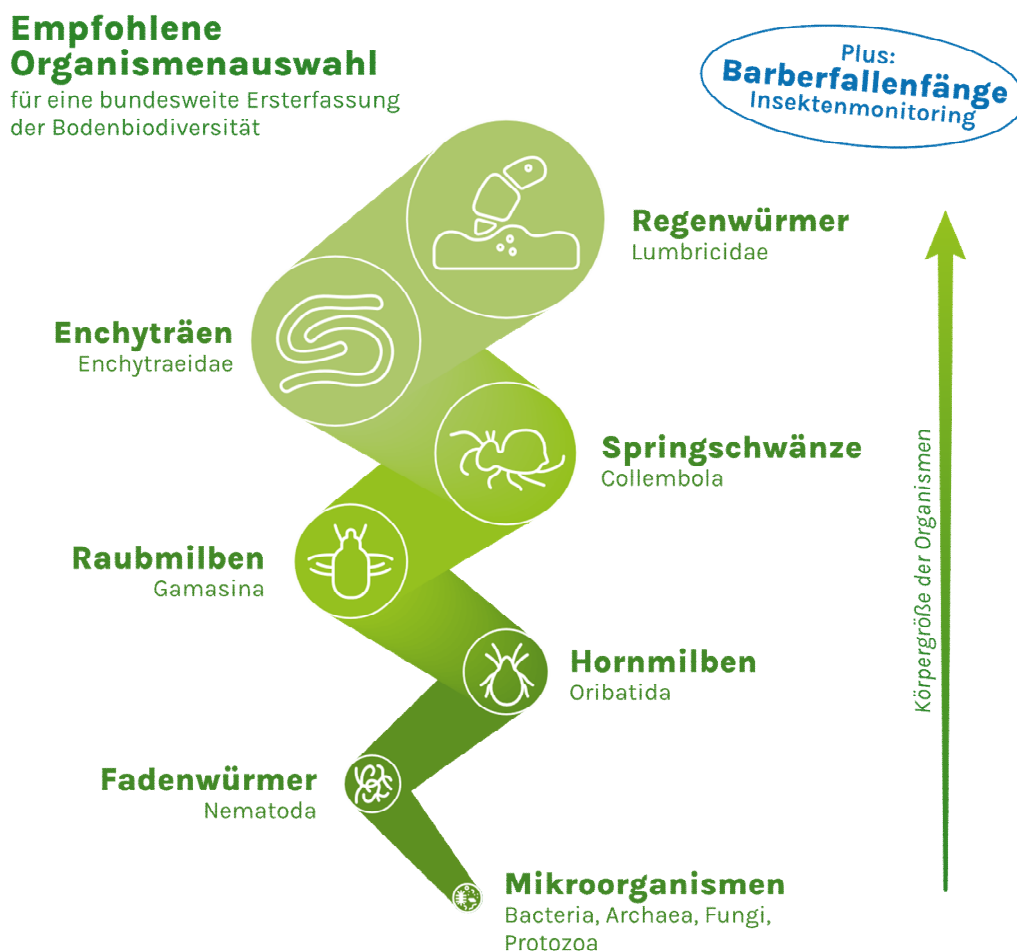


Abb. 9 Empfehlung des Fachgremiums zur Organismenauswahl für eine bundesweite Ersterfassung.

Erläuterung zu den Barberfallenfängen des Insektenmonitorings. Im Minimalprogramm des bundesweiten Insektenmonitorings (Ludwig et al. 2025) ist unter anderem die Erfassung von Laufkäfern und bodenlebenden Spinnen in Grünland, Acker und Wald vorgesehen. Dieser Baustein

stellt eine Schnittstelle zum Bodenbiodiversitätsmonitoring dar. Laufkäfer und bodenlebende Spinnen sind gemäß der Definition des Gremiums Bestandteil der Bodenbiodiversität (siehe oben Seite 39). Die biologische Beprobung mittels Bodenfallen kann eine wertvolle Ergänzung zur Extraktion von vorwiegend endogäisch lebenden Bodenorganismen aus Bodenkernen sein. Das erfasste Spektrum an Arten kann durch die Auswertung der Bodenfallenbeifänge (eher epigäisch lebende Organismen) erheblich erweitert werden (Schröer et al. 2024). Das bundesweite Insektenmonitoring nutzt, ebenso wie weitere bereits etablierte oder derzeit erprobte Monitoringprogramme (Brutvogel-, HNV-Farmland- und Ökosystem-Monitoring), die Kulisse der bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen. Bisher finden Monitoring von Boden(-biodiversität) und oberirdischer Biodiversität in der Regel getrennt statt. Eine räumliche Überlagerung des Bodenbiodiversitätsmonitorings mit den laufenden und in Erprobung befindlichen Monitoringaktivitäten auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen bietet Möglichkeiten der Integration beider Kompartimente für ein verbessertes Verständnis der Bedeutung oberirdisch-unterirdischer Interaktionen für funktionsfähige Ökosysteme (Kapitel 3 Handlungsbedarfe und Vision eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings). Darüber hinaus weisen viele Insekten, die als Adulte oberirdisch leben, Lebensstadien im Boden auf, zum Beispiel als Eier, Larven oder Puppen. Für das Messnetz der Bodenzustandserhebung (BZE) wurden integrative Monitoringkonzepte für Wald (NaBioWald, Bolte et al. 2025) und Landwirtschaft (MonVia 2024) entwickelt, deren Umsetzung angestrebt wird (Kapitel 2.1). Für die repräsentativen Stichprobenflächen im Agrarland wurde durch das Umweltbundesamt eine Konzepterarbeitung für ein integriertes Monitoring zur Erfassung der ökologischen Auswirkungen des chemischen Pflanzenschutzes veranlasst (Toschki, Oellers et al. 2021). Hierfür bestehen derzeit keine Umsetzungspläne.

Weiterführende Informationen

- **Diáz und Simon (2023):** Erfassung von Bodenorganismen und deren Funktionen in einem bundesweiten Biodiversitätsmonitoring: Kenntnisstand und Praxistauglichkeit. Bericht für das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB). Leipzig, Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20660961>
- **Kaufmann-Boll et al. (2025):** Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.uba.de/n117489de>
- **Bolte et al. (2025):** Konzept für ein nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald). Thünen Working Paper 267. Braunschweig. <https://doi.org/10.3220/253-2025-29>
- **MonVia. (2024):** MonViA Indikatorenbericht 2024: Bundesweites Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften. <https://www.agrarmonitoring-monvia.de/monvia-das-bundesweite-monitoring-der-biologischen-vielfalt-in-agrarlandschaften/monitoring-der-biologischen-vielfalt>

8.4 Erfassungsmethoden

Morphologische und genetische Bestimmungsmethoden. Aufgrund derzeit noch bestehender Hürden für eine routinemäßige Anwendung von genetischen Biodiversitätsanalysen im Bodenbiodiversitätsmonitoring (Kapitel 7) empfiehlt das Fachgremium (Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum) für die bundesweite Ersterfassung die Anwendung morphologischer Erhebungs- und Bestimmungsmethoden für die ausgewählten Organismengruppen (ausgenommen das Metabarcoding des Bodenmikrobioms, Abb. 9). Die Methoden der Erfassung sollten den geltenden DIN-Normen entsprechen (siehe Seite 75). Diese lassen jedoch Spielraum für Flexibilität beim Beprobungsmuster (Sampling Design) und der Erfassung. Daher ist es erforderlich, die Methoden zu konkretisieren, damit eine ausreichende Vergleichbarkeit der Erhebungen im Rahmen der Ersterfassung gewährleistet ist. Für ein künftiges bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring gilt es hervorzuheben, dass verschiedene bereits langjährig verwendete Methoden (neben den durch das Gremium empfohlenen Vorgehensweisen) ebenfalls gerechtfertigt sind, wenn sie einen Mindeststandard gewährleisten und damit belastbare Ergebnisse hervorbringen.

Probenarchivierung. Zur Qualitätssicherung und um prospektive DNA-basierte Biodiversitätsanalysen zu ermöglichen, sollten die Proben aus der bundesweiten Ersterfassung der Bodenbiodiversität archiviert werden (Kapitel 8.7).

Homogener Untersuchungsstandort. Ziel der bundesweiten Ersterfassung ist eine lebensraumtypbezogene Erhebung für die Ableitung lebensraumtypbezogener Referenzgemeinschaften. Entsprechend sollte der zu beprobende Standort hinsichtlich des zu repräsentierenden Lebensraumtyps homogen sein. Dabei sollten möglichst bereits bei der Auswahl des Untersuchungsplots Makrostrukturen und Störungen ausgeschlossen werden. Elemente wie Trampelpfade, Entwässerungsgräben, Feldränder, Rückegassen, Wildwechsel und weitere in der Landschaft werden somit nicht berücksichtigt, um Verzerrungen zu vermeiden und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Solche Elemente sind jedoch weit verbreitete landschaftstypische Strukturen, deren Einfluss auf die Verteilung von Bodenorganismen beziehungsweise auf bodenbiologische Prozesse eine separate Untersuchung erfordert.

Horizontale und vertikale Beprobungsmuster. Durch ein expertenbasiertes „ad-hoc sampling“ auf dem Untersuchungsstandort ohne vorbestimmtes Beprobungsmuster könnten gezielt typische Mikrohabitate innerhalb des Lebensraumes beprobt werden. Da es abzusehen ist, dass in einem Vorhaben mit bundesweiter Dimension viele verschiedene Bearbeitende mit unterschiedlicher Expertise die Feldarbeiten durchführen, würde ein solches Vorgehen jedoch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einschränken. Es wird daher eine Probenahme unter Anwendung von Beprobungsmustern empfohlen, da diese objektive Auswahl die Effizienz und Planbarkeit der Erhebung verbessert, sowie die statistische Auswertbarkeit vereinfacht. Über die Anzahl der Untersuchungsstandorte und Anzahl der Replikate (Einzelproben) innerhalb eines Untersuchungsstandorts ist eine repräsentative bodenbiologische Charakterisierung verschiedener Lebensraumtypen zu gewährleisten. Neben den Beprobungsmustern zur Lokalisierung und Anzahl der Einzelproben ist ebenfalls ein einheitliches vertikales Beprobungsmuster für die

Bodenbeprobung festzulegen. Zwei Beispiele, orientiert an der Biologischen Bodenzustandserhebung im Wald und am Soil BON-Protokoll, sind vergleichend im Anhang 4: Erfassungsmethoden aufgeführt (Abb. 14, Abb. 15). Für die Wiederauffindbarkeit bei erneuter Beprobung sind die Probenahmestellen zu markieren.

In Bezug auf die Probenahmetiefe sollte möglichst bei allen aus Bohrkernen zu extrahierenden Organismengruppen einheitlich vorgegangen werden, um eine organismengruppenübergreifende Charakterisierung der Bodenlebensgemeinschaften mit räumlichem Bezug auf vertikale Bodenschichten gewährleisten zu können. Auf Ackerstandorten sollte die Probenahmetiefe der Tiefe der üblichen Bodenbearbeitung entsprechen (0 bis 20-30 cm). Vor allem bei der Erfassung von Enchyträen auf Agrarflächen hat sich gezeigt, dass eine Probenahmetiefe von 10 cm auf regelmäßig gepflügten oder tief gegrubberten Standorten nicht ausreichend ist, insbesondere, wenn auch die Ermittlung von Abundanzen erwünscht ist. Im Wald und im Grünland, beides Standorte mit organischer Auflage, gibt es die tiefenstufen- oder horizontbezogene Beprobung. Letztere trennt organische Schichten und Mineralboden. Die beiden Strategien und deren Vor- und Nachteile sind in Anhang 4 Abb. 14 und Abb. 15 aufgeführt. Über alle Lebensraumtypen hinweg sind mindestens die ersten 5 cm des Mineralbodens mit zu beproben und bodenbiologisch zu analysieren. Jede Probe ist genau zu beschreiben einschließlich der Probenahmestelle und -tiefe, den Witterungsbedingungen, Bodenfeuchte und -temperatur. Die Informationen sind schriftlich und fotografisch zu dokumentieren.

Bei sehr mächtigen organischen Auflagen, zum Beispiel Feuchtmöser oder Moorböden, wird mit einer Beprobungstiefe von beispielsweise 10 cm gegebenenfalls nicht der gesamte Aktivitätsbereich der Zielorganismen erfasst. In diesem Fall ist der Beprobungsplan dennoch einzuhalten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Rahmen des Monitoringprogramms zu gewährleisten. Des Weiteren ist die vertikale Aktivität an Feuchtstandorten stark witterungsabhängig. Hingegen ist bei sehr skelettreichen und sehr flachgründigen Böden die Probenahme mit dem Bohrer eventuell nicht bis zur vorgegebenen Tiefe machbar.

Repräsentative Beprobung des Untersuchungsstandorts. Aufgrund des erheblichen Aufwands der Organismenbestimmung kann sich die Anzahl notwendiger Beprobungspunkte an einem Standort (Replikate) lediglich an einem realistischen Minimum und nicht an einem theoretischen Optimum orientieren. Das Minimum muss ausreichend sein, um Spezialisten und subdominante Arten zu erfassen. Im Gegensatz zu Generalisten bilden diese Arten aussagekräftige Muster der Gemeinschaftszusammensetzung aus, welche es ermöglichen den Lebensraum zu charakterisieren. Generell ist eine höhere Anzahl kleinerer Einzelproben (Stechzylinder mit kleinerem Durchmesser, zum Beispiel 5 cm) einer geringeren Anzahl größerer Bodenproben vorzuziehen, um den Einfluss räumlicher Heterogenität zu verringern. Mit der Entnahme mehrerer kleinerer Bodenkerne können die unterschiedlichen Gegebenheiten innerhalb des Untersuchungsgebiets besser berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Analyse der Einzelproben eines Standorts können im Zuge der Auswertung zusammengeführt werden. Dies macht es möglich, die Variabilität innerhalb der Fläche zu erfassen und daraus eine repräsentative Aussage über die charakteristischen Lebensgemeinschaften des homogenen Standorts zu treffen.

Zeitliche Anforderungen and die Beprobung. Beim Beprobungsmuster müssen neben räumlichen auch zeitliche Anforderungen berücksichtigt werden. Gemäß der Phänologie der Bodenlebewesen bieten sowohl das Frühjahr als auch der Herbst gute Voraussetzungen für eine Probenahme (Tab. 1). Im Frühling (April bis Mai) und Herbst (September bis Oktober) gibt es ebenso die meisten Studiendaten zum Vergleich. Jahreszeitliche Schwankungen bezüglich Aktivität, Verteilung und Artenzusammensetzung sind für die meisten Bodenorganismengruppen anzunehmen. Ausgenommen hiervon sind Nematoden. Für diese Organismengruppe gibt es keine Arten, die über das Jahr hinweg nur in bestimmten Zeiträumen zu erwarten sind. Für die bundesweite Ersterfassung ist eine größere Stichprobenzahl einer zweimaligen Beprobung pro Jahr vorzuziehen, um einen flächenrepräsentativen Datensatz generieren zu können. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse empfiehlt es sich, die Probenahmen stets in derselben Jahreszeit durchzuführen. Sollte es nicht möglich sein aufgrund der Vielzahl und räumlichen Ausdehnung der Probestandorte eine Beprobung innerhalb einer Saison abzuschließen, kann eine Aufteilung der Probenahme auf beide Zeiträume Frühjahr und Herbst in Betracht gezogen werden. Dies ist bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen. Eine umfängliche Ersterfassung wird sich aufgrund der Limitationen bezüglich der personellen Kapazitäten vor allem für die Feldarbeiten und die morphologische Bestimmung voraussichtlich über mehrere Jahre erstrecken. Hierbei ist es wichtig, die Auswahl der Probenahmestandorte eines jeden Beprobungsjahres hinsichtlich Lebensraumtyp und geographischen Gradienten zu randomisieren.

Die Beprobung sollte in Abstimmung mit den Auftragnehmenden unter Beachtung der Witterungsverhältnisse erfolgen. Insbesondere auf Ackerflächen sind vor allem im Frühling die Beprobungstermine schwierig mit der landwirtschaftlichen Praxis abzustimmen, um Beprobungen direkt nach Bodenbearbeitung zu vermeiden. Eine Beprobung im Herbst könnte sich für Ackerstandorte als praktikabler erweisen. Aufgrund der klimatischen Veränderungen gibt es regional inzwischen auch im Winter frostfreie Perioden von vielen Wochen oder sogar Monaten mit gleichzeitig ausreichender Bodenfeuchte. Ob diese Perioden langfristig eine Option für bodenzoologische Probenahmen wären, wäre zu prüfen, zumal es im späten Frühjahr inzwischen oft ungünstige Bedingungen durch lange Trockenphasen gibt.

Tab. 1 Empfehlungen für den Zeitpunkt der Probenahme.

Empfehlungen	Unbedingt zu vermeiden
▶ Geeignete Probenahmezeiträume Herbst und Frühjahr, wobei Frühjahr vorteilhaft ist, um den direkten Einfluss von leicht abbaubaren Wurzel-Depositionen auf das Bodenmikrobiom zu minimieren	▶ keine Probenahme in den Sommermonaten (Juni-August); Sommerhitze und Winterfrost sind zu vermeiden
▶ Bodentemperatur, Tagesmittel* in 5 cm Tiefe von mindestens 5°C bis etwa 15°C; bei ausreichender Bodenfeuchte sind etwas höhere Temperaturen möglich	
▶ Ausreichende Bodenfeuchte (Expert*inneneinschätzung, Dokumentation der aktuellen Bodenfeuchte mit TMD-Sonde)	▶ Keine Beprobung unmittelbar nach Extremwetterereignissen (zum Beispiel langanhaltende Dürre, Hochwasser)
▶ Karenzzeit nach Bodenbearbeitung gemäß Expert*inneneinschätzung; Eingriffe auf der Fläche sind immer zu dokumentieren.	▶ Landwirtschaftlich genutzte Flächen: keine Beprobung unmittelbar nach Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngemittel- und Pestizideinsatz.

*Übersichtskarten zum Tagesmittel der Bodentemperatur sind beim Deutschen Wetterdienst abrufbar:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodentemperatur5_dl/bodentemperatur5dl.html?nn=380288

Allgemeine organisatorische Hinweise. Generell ist eine enge Zusammenarbeit mit den Landwirtinnen und Landwirten sowie Privatwaldbesitzern für die Planung der Probenahme notwendig, um rechtzeitig Informationen zur landwirtschaftlichen Bearbeitung zum Beispiel zu geplanten Fruchtfolgen oder dem Zeitpunkt der Düngemittelausbringung zu erhalten. Eine Aufwandsentschädigung für die Bereit-/Zusammenstellung der Bewirtschaftungsinformationen durch die Landnutzenden sollte erwogen werden. Ausweichflächen sollten für den Fall einkalkuliert werden, dass die ursprünglich geplanten Standorte nicht mehr zugänglich sind oder die Bedingungen nicht mehr den Anforderungen der Untersuchung entsprechen zum Beispiel durch eine geänderte Bewirtschaftung.

Optionale Vorgehensweisen bei der Erfassung. Die in Anhang 4 aufgeführten Empfehlungen für die Erfassung im Zuge einer bundesweiten Ersterfassung lassen teilweise verschiedene Optionen bei der Vorgehensweise zu. Gründe hierfür sind:

- ▶ Fachliche Aspekte:
 - die verschiedenen Vorgehensweisen haben je nach Gegebenheiten am Standort unter anderem gemäß der Nutzung und abiotische Standortcharakteristika Vor- beziehungsweise

Nachteile. So ist beispielsweise im Wald oder bei Beprobungen in Hanglagen die Elektrofangmethode von Regenwürmern möglicherweise zu bevorzugen (Anhang 4 Tab. 13).

- Die letztendliche Entscheidung für eine bestimmte Vorgehensweise ist auch von den gewünschten Messparametern, die für die lebensraumtypbezogene Referenzwertbildung hinzugezogen werden, abhängig. Die Festlegung auf eine Methode sollte nach der Entwicklung der entsprechenden Auswertestrategie erfolgen zum Beispiel die Abwägung zwischen tiefen- beziehungsweise horizontbezogener Beprobung bei Standorten mit organischer Auflage.

► Praktikabilität:

- Bekannte Limitationen bei der Verfügbarkeit der Materialien beziehungsweise Chemikalien können die Wahl der Methode einschränken. Beispielsweise kann es Schwierigkeiten bei der Beschaffung und Lagerung von Allylisothiocyanat geben. In solch einem Fall ist auf eine andere Vorgehensweise zurückzugreifen, damit die Ersterfassung praktikabel bleibt.
- Zeitliche Verfügbarkeiten und die Expertise von Erfassungs- und Bestimmungspersonal müssen aufgrund der generell stark limitierten personellen Kapazitäten optimal genutzt werden. Zum Beispiel gibt es bodenbiologische Expert*innen, die ausschließlich eine Lebendbestimmung und keine Totbestimmung von Regenwürmern durchführen. Dies erfordert eine gewisse Flexibilität bei den Vorgaben zur Erfassung.

8.5 Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen

Die bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität dient der Erstellung eines umfangreichen Datensatzes, der die Grundlage liefert für:

- die Ableitung von lebensraumtypischen Referenzgemeinschaften und
- die Etablierung von Indikatoren für ein zukünftiges Trendmonitoring.

Die zu erhebenden Messparameter sind so zu wählen, dass sie die Entwicklung robuster, zuverlässiger und widerstandsfähiger biologischer Indikatoren zur Überwachung der Bodenqualität ermöglichen, um ein Frühwarnsystem für potenzielle Verluste der Multifunktionalität der Böden einzurichten. Es ist zu beachten, dass diese Indikatoren und die damit verbundenen Zielgrößen je nach Bodenart und Nutzung variieren können.

Die Untersuchung einer Bodenorganismengruppe ermöglicht es meist, mehrere biologische Messparameter zu sammeln. Häufig verwendete biologische Metriken berücksichtigen in der Regel die Abundanz, Diversität und Gemeinschaftsstruktur von Bodenorganismen. Darüber hinaus ist auch die Rolle der Bodenorganismen für Bodenfunktionen einzubeziehen, beispielsweise für den Nährstoffkreislauf oder Wasserhaushalt. Dies wird über Aktivitäts- oder Funktionsparametern erfasst. Funktionsparameter stellen unter anderem die Verteilung der Bodenorganismen auf ökologische Kategorien wie trophische Ebenen, funktionelle Gruppen oder Lebensformen dar. Für die Ersterfassung wird empfohlen, die im folgenden aufgeführten bodenbiologischen Messparameter und Kennzahlen zu erheben.

Tab. 2 Regenwürmer (Lumbricidae): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.

Parameter	Erläuterungen
Gesamtabundanz: Anzahl Individuen pro Flächeneinheit (in der Regel pro m ²)	▶ Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021). Vergleichswerte für Regenwurmabundanzen nach Landbedeckungsart existieren bereits (Schweiz: Pfiffner 2022; für Acker und Grünland in Bayern: Walter und Burmeister 2022). ▶ Teil des Indikators „Trend des Zustandes von Regenwurmgemeinschaften“ in MonViA (MonViA 2024)
Artenreichtum: Anzahl der Arten	▶ für morphologisch bestimmbare adulte Tiere
Abundanz je Taxon: Anzahl Individuen pro Taxon (in der Regel pro m ²)	▶ auch relativ in %, wenn Gesamtabundanz pro Fläche ermittelt wurde ▶ Abundanz und Biomasse der Leitartart <i>Lumbricus terrestris</i> ist Teil des Indikators „Trend des Zustandes von Regenwurmgemeinschaften“ in MonViA (MonViA 2024)
Gesamtbiomasse in g pro Flächeneinheit (in der Regel pro m ²)	▶ Bodenzoologischer Indikator der biologischen Aktivität im Boden (Beylich und Graefe 2010)
Biomasse je Taxon in g aller Individuen pro Taxon	▶ Funktionelle Diversität: nicht nur die Gesamtbiomasse, sondern auch die Verteilung der Biomasse auf verschiedene Arten ist entscheidend; siehe unten: Biomassedominanz
Verhältnis adulte/juvenile Individuen	▶ Altersstruktur der Population, Teil des Indikators „Trend des Zustandes von Regenwurmgemeinschaften“ in MonViA (MonViA 2024)
Abundanzdominanz und Biomassedominanz der Regenwurmart	▶ „Zeiger für die ökologische Bedeutung der Arten“ (Beylich und Graefe 2010) ▶ Betrachtung im Verhältnis zur Abundanz
Diversität/Abundanz der funktionellen Gruppen (epigäisch, anözisch, endogäisch)	▶ Indikator für die Habitatqualität und Bodenfunktionen (Pulleman et al. 2012); Teil des Indikators Regenwürmer in MonViA (MonViA Verbundprojekt 2024)

Tab. 3 Enchyträen (Enchytraeidae): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.

Parameter	Erläuterungen
Gesamtabundanz: Anzahl Individuen pro Bodenfläche- oder Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m ²)	▶ Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021).
Artenreichtum: Anzahl der Arten	▶ nur für adulte Tiere anwendbar, eine morphologische Artbestimmung ist bei Juvenilen nicht möglich
Abundanz je Taxon: Anzahl Individuen pro Taxon pro Bodenfläche- oder Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m ²)	▶ auch relativ in %, wenn Gesamtabundanz pro Fläche ermittelt wurde ▶ Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021).
Zusammensetzung der Gemeinschaft	▶ Ökologische Klassifizierung: Zeigerwertgruppen und Strategietypen (A-/K-/r-Strategen) (Graefe und Schmelz 1999) ▶ zur Beschreibung und Charakterisierung der ökologischen Bedingungen von Bodenstandorten und für eine biologische Bodenqualitätsbewertung (Beylich et al. 1995; Didden et al. 1997; Graefe 1997). ▶ Eine bundesweite Ersterfassung kann genutzt werden, um die Kenntnisse zu ökologischen Ansprüchen der Arten zu erweitern und gegebenenfalls für weitere Arten Zeigerwerte zu vergeben.
Vertikalverteilung der Enchyträen insgesamt sowie auf Gattungs- und Artebene	▶ „vertikale Ausdehnung und Stärke der biologischen Aktivität“ (Beylich und Graefe 2010)

Tab. 4 Mikroarthropoden (Collembolen, Oribatida, Gamasina): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.

Parameter	Erläuterungen
Gesamtabundanz: Anzahl Individuen pro Bodenfläche- oder Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m ²)	▶ Für alle Mikroarthropoden insgesamt, sowie jeweils Gesamtabundanz der Gruppen Collembolen, Oribatida, Gamasina ▶ Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021).
Artenreichtum: Anzahl der Arten	▶ pro Gruppe, nur für adulte Tiere anzuwenden, eine morphologische Artbestimmung ist bei Juvenilen nicht möglich
Abundanz je Taxon: Anzahl Individuen pro Taxon pro Bodenfläche- oder Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m ²)	▶ auch relativ in %, wenn Gesamtabundanz pro Fläche ermittelt wurde ▶ Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021).
Zusammensetzung der Gemeinschaft	▶ Alle Organismengruppen könnten hinsichtlich ökologischer Gruppen ausgewertet werden, das heißt Kennarten, Grundarten edaphischer Gruppen und weitere ▶ Populationsgröße epi-, hemi- und euedaphischer Collembolen (FAO 2020; Jeffery und Gardi 2010; Karaban et al. 2012) ▶ Das Lebensformsystem spiegelt die vertikale Schichtung der Collembolengemeinschaft wider, abhängig von Porengröße, hydrothermischen Bedingungen, Nahrungsangebot (Chernova 1977; Karaban et al. 2012; Rusek 1998) ▶ Oribatiden: Gruppierungen möglich in „höhere“ versus „niedere“; parthenogenetische versus anderer, Größenklassen und weitere
Körperlänge Collembolen	▶ Beurteilung der Auswirkungen von Störungen wie Bodenbearbeitung oder Pestizidbehandlungen auf die lokale Collembolengemeinschaft (Chassain et al. 2023)
Fortpflanzungstyp Collembolen (sexuell, parthenogenetisch)	▶ Indikator für die Regeneration oder Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen; der Fortpflanzungstyp steht für die Fähigkeit der Springschwänze, ein Gebiet nach Störungen wie Bodenbearbeitung wieder zu besiedeln, da parthenogenetische Populationen nach Störungen eine höhere Regenerationsfähigkeit besitzen (Chassain et al. 2023)

Collembolen: Individuen- und Artenzahl Wärme- und Kühlezeiger	► Abbildung klimatischer Trends
Gamasina: Maturity Index (Reifeindex)	► Basiert auf r-K-Werten von Familien; der Index stellt anthropogene und natürliche Störungen dar (Čoja und Bruckner 2006; Ruf 1998; Ruf 2000).

Tab. 5 Nematoden (Nematoda): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.

Parameter	Erläuterung/Hinweis
Gesamtabundanz: Anzahl Individuen pro Bodenraum- oder Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m ²)	► Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021). ► Die Angabe als Anzahl Tiere je 100 g ist weitverbreitet. Ebenso ist die Anzahl der Tiere pro Volumeneinheit anzugeben als Grundlage weiterer Auswertungen wie den Berechnungen von Energieflüssen und Nahrungsnetzen. Je nach Art der Probenahme können hierfür die Maße der Stechzylinder oder die ermittelte Bodendichte herangezogen werden
Artenreichtum: Anzahl der Arten	► pro Gruppe, nur für adulte Tiere anzuwenden, eine morphologische Artbestimmung ist bei Juvenilen nicht möglich
Abundanz je Taxon: Anzahl Individuen pro Taxon pro Bodenraum- oder Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m ²)	► auch relativ in %, wenn Gesamtabundanz pro Bodenraum- oder Bodenmasseeinheit ermittelt wurde ► Stellt einen häufig gemessenen Parameter dar (Campiche 2021).

Gesamtbiomasse je Haupternährungstyp in g pro Bodenraum- oder- Bodenmasseeinheit (in der Regel pro m²)

- ▶ Körperlänge und -breite werden gemessen und die Körpermasse mit einer Formel näherungsweise berechnet
- ▶ für die Indikation von Funktionsparametern beziehungsweise Bodenqualität ist die Biomasse der Haupternährungstypen entscheidender als ihre Individuenanzahl (Körpermassenunterschiede der Individuen bis zu Faktor 1000)
- ▶ Ausblick: Im Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz wird derzeit an einer Bildgebungsmethode gearbeitet, bei der eine ganze Probe (Gemeinschaft von Nematoden) fotografiert und die Gesamtbiomasse aus der Fläche der Körper abgeleitet wird. Mithilfe von machine learning sollen so zukünftig auch Ernährungstypen zu unterscheiden sein (siehe unten Zusammensetzung der Gemeinschaft; mündliche Mitteilung Karin Hohberg, Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz)

Zusammensetzung der Gemeinschaft

- ▶ Auf Grundlage trophischer Gruppen (Haupt-Ernährungstypen: bakterivor, fungivor, herbivor, omnivor, carnivor), die morphologische bestimmbar sind
- ▶ Detailliertere Ernährungstypen können den Familien und Gattungen zugeordnet werden.
- ▶ funktionelle Gilden als Kombination aus trophischen Gruppen und colonizer-persister-Gruppen (cp-Typ: zum Beispiel Bakt cp-2)

Verhältnis von pilz- zu bakterienfressenden Nematoden (F/B)	▶ Populationsgröße und Biomasse fungivorer Nematoden, Populationsgröße und Biomasse bakterivorer Nematoden: geben Hinweis auf dominante mikrobielle Dekompositionswege, Nahrungsverfügbarkeit im Boden, mögliche Anzeichen für Umweltbelastungen beispielsweise durch Pestizide
Enrichment Index (EI), Structure Index (SI), Basal Index (BI) und Channel Index (CI)	▶ diagnostische Indizes für Bodennahrungsnetze und Stickstoff-Verfügbarkeit (Ferris et al. 2001) ▶ EI: Nahrungsverfügbarkeit und Nährstoffanreicherung ▶ SI: Struktur oder Komplexität des Nahrungsnetzes ▶ BI: Zustand des Bodennahrungsnetzes ▶ CI: Hauptweg des Abbaus organischer Substanz (bakteriell oder pilzlich)
Maturity Index (MI) (Bongers 1990) und Modifikationen: ΣMI (Yeates 1994), MI2-5 (Korthals et al. 1996)	▶ Maß für Umweltstörungen wie eutrophierungsbedingter Stress, Belastungen durch Umweltverschmutzung unter anderem Schwermetalle und andere Chemikalien, auch Indikator für Sukzessionsalter nach Störung (Sekundärsukzession) oder Bodenneubildung (Primärsukzession)
Plant-parasitic nematodes (PPI)	▶ Entspricht dem maturity index für wurzelsaugende Nematoden und korreliert positiv mit der Bodenstörung
Metabolic Footprints (MFs)	▶ Metabolic footprints berücksichtigen das durchschnittliche Körpergewicht und damit die Kohlenstoffnutzung adulter Weibchen pro Ernährungstyp oder Gilde, um das Ausmaß der von der Nematodengemeinschaft erfüllten Ökosystemfunktionen und -leistungen abzuleiten (Ferris 2010).

Tab. 6 Bodenmikrobiom (Bacteria, Archaea, Fungi, Protozoa): Molekularbiologische Messparameter und Kennzahlen.

Parameter	Erläuterung/Hinweis
Diversität, Gemeinschaftsstruktur, Relative Abundanz	▶ Durch Hochdurchsatzsequenzierung von DNA-Zielregionen, zum Beispiel ITS für Pilze oder 16S-rRNA für Bakterien, kann die taxonomische Vielfalt von Bodenmikroorganismen bestimmt werden. ▶ Bioinformatische Analysen und Vergleich mit Referenzdatenbanken ermöglichen die Berechnung von Artenvielfalt und Gemeinschaftsstruktur zum Beispiel Relative Abundanz, Evenness und weitere.
Biomasse pro g Feinboden	▶ Bestimmung der mikrobiellen Biomasse durch etablierte Methoden wie Chloroform-Fumigation-Extraktion oder Substrat-induzierte Respiration (Barth et al. 2022) ▶ Mikrobielle Biomassewerte sind schwer interpretierbar und die Analysemethoden variationsanfällig.
Netzwerkstruktur: Identifikation von Leistungsträgern	▶ Korrelationsnetzwerkanalysen zur Unterscheidung von Zufallsorganismen und Leistungsträgern (Indikator Bodenmikrobiom in MonViA 2024). Die Netzwerkstruktur gibt Aufschluss über die Effizienz und Resilienz von mikrobiell vermittelten Ökosystemdienstleistungen.
Biomasseverhältnis Pilze: Bakterien	▶ Dient als Indikator für die Art der Metabolisierung organischen Materials. Ein höheres Pilze:Bakterien-Verhältnis deutet auf einen effizienten Abbau komplexer Streu hin, während ein niedrigeres Verhältnis auf einen schnellen, bakterienbasierten Abbau einfacher Substanzen schließen lässt (Wang & Kuzyakov 2024). ▶ Ermittlung durch verschiedene etablierte Methoden möglich: Phospholipid-Fettsäuren-Analyse (Laine et al. 2025), Fettsäure-Methylester-Analyse (Smith et al. 2021), quantitative Polymerase-Kettenreaktion (Djemiel et al. 2023), Substrat-induzierte Respiration (siehe Quellenzusammenstellung in Barth et al. 2022). ▶ Die Methode ist für die bundesweite Ersterfassung einheitlich festzulegen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Es wird empfohlen, sich auf eine der genannten Methoden zu einigen.

Funktionelle Gruppen

- Zuordnung zu funktionellen Gruppen wie pathogen, symbiontisch oder saprotroph durch Vergleich mit Funktionsdatenbanken; jedoch ist die Validität der Vorhersage des funktionellen Potenzials aus taxonomischen Profilen von Mikrobiom-Datensätzen bei short-read Amplicons eingeschränkt; die Kombination von Messungen tatsächlicher Funktionen und vorhergesagter funktioneller Potenzialprofile ist ein leistungsstarker Ansatz zum Verständnis der mikrobiellen Funktion (Heidrich und Beule 2022).

Mit der Bestimmung der Arten und ihren Häufigkeiten können weitere häufig verwendete Biodiversitätsindizes wie der Shannon-Index, Simpson-Index oder Evenness für alle Organismengruppen ermittelt werden. Organismengruppenübergreifende Auswertemöglichkeiten unter Einbeziehung der Begleitdaten (Kapitel 8.6) wie Zusammenhangsanalysen oder Netzwerkanalysen sind in diesem Kapitel nicht adressiert.

8.6 Begleitdaten

Kontextbezogene Interpretation und Bewertung des Zustands der Bodenbiodiversität. Die im Rahmen des Bodenbiodiversitätsmonitorings zu erhebenden Begleitdaten dienen der kontextbezogenen Interpretation und Bewertung des Zustands der Bodenbiodiversität vor dem Hintergrund der herrschenden Umweltbedingungen. Die Zusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaften an einem Standort wird beeinflusst durch zahlreiche standortprägende biotische, abiotische und anthropogene Faktoren (Kaufmann-Boll et al. 2022). Standortfaktoren wie Relief, Habitat oder pedogenetische Parameter beschreiben die grundlegenden Eigenschaften eines Ortes und bieten Kontext für die Interpretation und Vergleichbarkeit der Bodenbiodiversitätsdaten von verschiedenen Standorten und Regionen. Die begleitende Erfassung von anthropogenen Einflussgrößen wie Landnutzung und Einträge stofflicher Belastungen ermöglichen eine korrelative Betrachtung möglicher Ursachen für Biodiversitätsveränderungen und ermöglichen gegebenenfalls ebenso die Erstellung von Prognosen zukünftiger Veränderungen und der daraus abzuleitenden Maßnahmenentwicklung zum Schutz und zur Förderung der Bodenbiodiversität.

Empfehlung Begleitdatenset bundesweite Ersterfassung. Das Fachgremium empfiehlt für die bundesweite Ersterfassung ein Begleitdatenset, das die im Projekt „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für Bodenbiologie und organische Bodensubstanz“ (Kaufmann-Boll et al. 2022) identifizierten Standort- und Einflussfaktoren für die Bodenbiodiversität umfasst. Im Zuge eines Workshops in 2023 auf der Fachtagung „Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring“ (NMZB 2024) wurden in der gemeinsamen Diskussion mit einem erweiterten Kreis von Expertinnen und Experten weitere Begleitdaten identifiziert, die vor allem die stoffliche Belastung und relevante Standortparameter für Waldökosysteme adressieren. Die genannten Begleitdaten sollten im Optimalfall an jedem Standort erfasst oder ermittelt werden (Abb. 10). Daten zu stofflichen Belastungen sind sensibel zu behandeln und besonders im

Agrarsektor wird mit geringer Akzeptanz der Flächeneigentümer*innen gerechnet. Da die Flächeneigentümer*innen der Vor-Ort-Erhebung einiger Begleitparameter zustimmen müssen, kann es hierbei zu Einschränkungen kommen. Es sollte dann geprüft werden, ob gegebenenfalls Ausweichflächen zur Verfügung stehen. Einige der genannten Begleitdaten sind nicht direkt zu messen, sondern können aus anderen Messparametern abgeleitet werden, werden also indirekt erhoben. Der Mehraufwand, diese indirekten Parameter zu generieren, wird demnach als gering eingeschätzt (Tab. 7). Die Feldteams sollten über grundlegende vegetationskundliche und bodenkundliche Kenntnisse und praktische Erfahrungen verfügen, vor allem in Hinblick auf die Biotoptyp-/Vegetationskartierung und die Humusansprache.

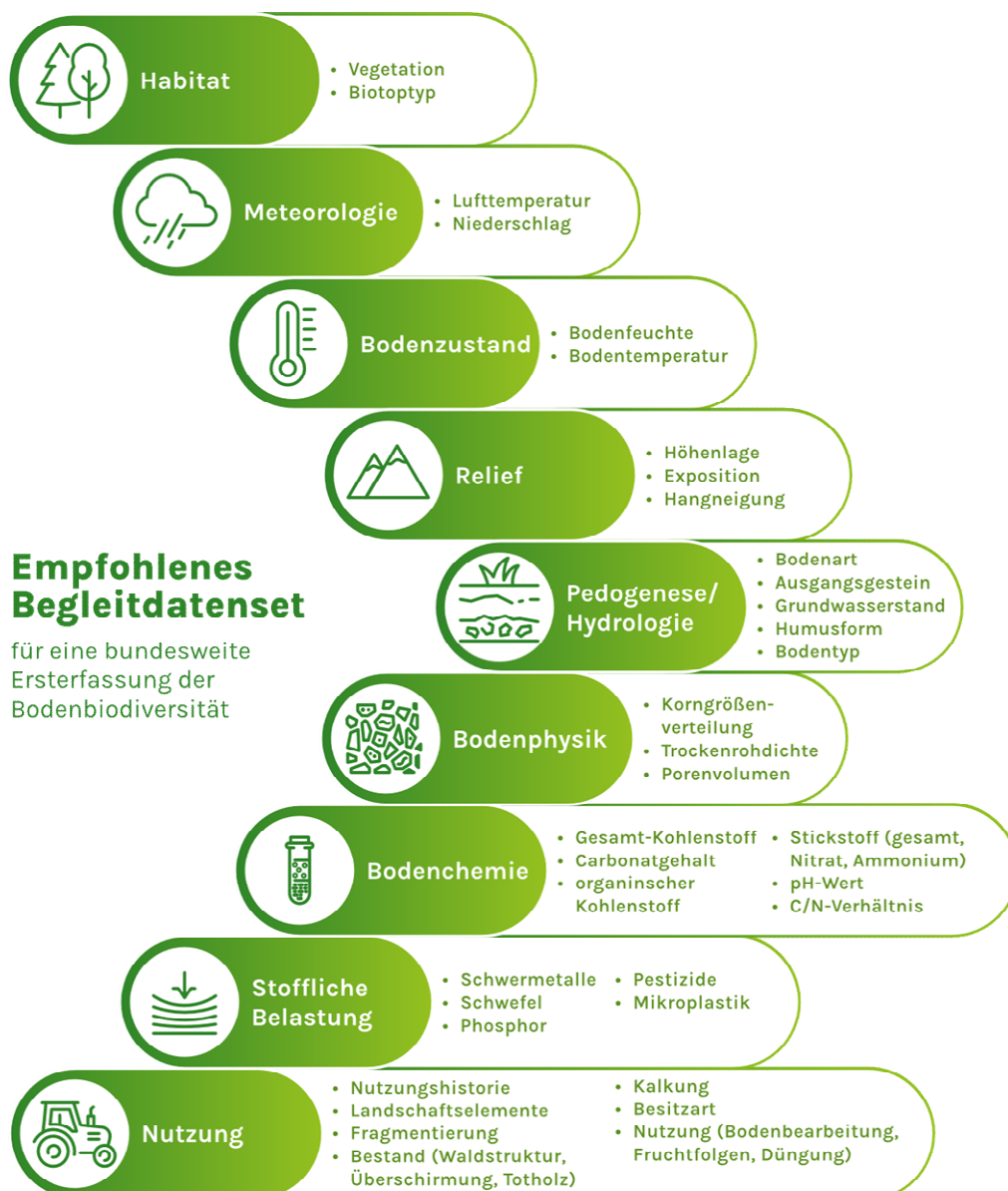


Abb. 10 Empfohlenes Begleitdatenset für eine bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität.

Tab. 7 Begleitdaten: Ableitbare indirekte Parameter.

Indirekter Parameter	Abzuleiten aus
C/N-Verhältnis	Gesamt C, Gesamt N
C_{org}	Gesamt C, Carbonat (entweder direkte C _{org} -Bestimmung durch C _{ges} -Bestimmung nach Zerstörung von Carbonaten oder indirekte C _{org} -Bestimmung als Differenz von C _{ges} – Carbonat)
Bodenart	Korngrößenverteilung

Identifizierung von Synergien. Angesichts der großen Fülle und des zum Teil erheblichen Aufwands, den die Erfassung dieser Begleitgrößen erfordert, sollten zunächst Synergien mit bestehenden Monitoringprogrammen hinsichtlich ihres Begleitdatenspektrums erschlossen werden. Dies trägt dazu bei, Ressourcen zu schonen und Redundanzen zu vermeiden. Die Kulisse des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings sollte eine größtmögliche räumliche Überschneidung mit bestehenden Monitoringprogrammen haben (Kapitel 2 und Kapitel 8.2). Ein großer Vorteil hierbei besteht darin, dass die Stichprobenflächen dieser Programme zum Teil bereits umfangreich hinsichtlich ihrer standortspezifischen Einflussgrößen charakterisiert sind. Beispielsweise werden die Beprobungsstandorte der Bodenzustandserhebung Wald und Landwirtschaft beziehungsweise der Bodendauerbeobachtungsprogramme der Länder seit Jahrzehnten bodenkundlich analysiert. Es ist allerdings zu prüfen, inwiefern die Daten vorhandener Programme zugänglich und vergleichbar sind.

Zeitliche Konstanz und Variabilität von Begleitdaten. Standortfaktoren und die meisten bodenkundlichen Parameter wie Korngröße, Trockenrohdichte und Schwermetallgehalte gelten als sehr stabil, sodass auch auf ältere Messdaten (circa 5-10 Jahre) homogener und repräsentativ beprobter Untersuchungsflächen zurückgegriffen werden kann. Mesostabile und labile dynamische bodenkundliche Kenngrößen wie pH-Wert, C/N und Bodenzustandsparameter (Feuchtigkeit, Temperatur) sollten hingegen aktuell erhoben werden. Angaben zur Nutzung eines Standorts, die stoffliche Belastung und meteorologische Informationen sind ebenfalls zeitlich kongruent zur Erfassung der Bodenbiodiversität zu erheben.

Erhebung von Begleitdaten vor Ort. Insofern nicht, beziehungsweise eingeschränkt, auf Begleitdaten aus bestehenden Monitoringaktivitäten zurückgegriffen werden kann, sollte gemäß der im Folgenden erläuterten Stufen vorgegangen werden. Einige der Parameter aus dem empfohlenen Begleitdatenset sind während der Feldarbeit direkt vor Ort zu erheben (Tab. 8). Hierzu zählen beispielsweise die Vegetations- und Biotoptypkartierung, die durch Personen mit entsprechender Expertise durchgeführt werden. Handreichungen mit genauen Anweisungen zum Vorgehen im Gelände (Arbeitsanleitung BZE-Wald III, Wellbrock et al. 2022) sind sowohl für die bodenbiologische Erfassung selbst, als auch für die Begleitdatenerhebung essenziell für eine harmonisierte vergleichbare Erhebung.

Informationen zur Nutzung eines Standortes sind von den Flächennutzenden einzuholen. Diese Abfrage ist vor allem für den Agrar- und Grünlandbereich relevant, da hier vielfältige Nutzungsmerkmale erfasst werden müssen. Diese Daten können durch Informationen aus der Fernerkundung, zum Beispiel Kartenprodukte des Thünen-Fernerkundungsatlas, ergänzt werden. Im Gegensatz dazu sind die im Wald zu erhebenden Nutzungsparameter meist visuell erkennbar, abgesehen von möglichen Kalkungsmaßnahmen. Die Nutzung und auch die Nutzungshistorie sind auf langjährig betriebenen Beobachtungsflächen bekannt und dokumentiert. Dort, wo dies nicht der Fall ist, beziehungsweise aktuelle Bewirtschaftungsdaten aus dem Beprobungsjahr sowie -vorjahr benötigt werden, sind entsprechend Informationen der Flächennutzenden abzufragen, gegebenenfalls in Form eines Fragebogens. Dieser ist kurz, prägnant und klar strukturiert bereitzustellen mit eindeutigen Antwortmöglichkeiten. Um die Ausfüllbereitschaft zu erhöhen, ist er möglichst sowohl analog als auch digital zur Verfügung zu stellen.

Tab. 8 Begleitdaten: Direkt im Feld zu ermittelnde Parameter

Ohne Bodenprobe- nahme im Feld zu ermittelnder Parameter	Hilfsmittel oder Anmerkung
Höhenlage	GPS-Gerät
Exposition	Kompass, (Inclinometer, GPS-Gerät)
Hangneigung	Inclinometer, (GPS-Gerät)
Vegetation	Kartierung in unmittelbarer Nähe der Bodenprobenahmepunkte zur Organismenerfassung, Vorgabe Kartierschlüssel und -methode
Biotoptyp	Kartierung vor Ort, gegebenenfalls können auch verschiedene länderspezifische Kartierschlüssel verwendet werden. Das Bundesamt für Naturschutz (BfN) hat im Zuge des Ökosystemmonitorings (ÖSM) Zuordnungslisten erstellt (Ackermann et al. 2020) als „Übersetzer“ zwischen Länder-Biotoptypen und den ÖSM-Biotoptypen des BfN.
Humusform	Direktansprache im Feld nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA6 (AG Boden 2024); optional ist eine nachträgliche Plausibilitätsprüfung durch Abgleich mit C/N, pH-Wert und C_{org}
Waldstruktur, Überschirmung, Totholz, Landschaftselemente, Fragmentierung	Waldstruktur, Überschirmung und Totholz ergeben den Waldbestand (lediglich im Wald relevant); vor Ort visuell zu bestimmen, unter zu Hilfenahme relevanter Handreichungen (zum Beispiel Referenzbilder für Überschirmung)
Bodenfeuchte, Bodentemperatur	Dokumentation mittels Time Domain Reflectometry (TDR)-Sonde und Thermometer

Laboranalytische Erhebung von Begleitdaten an Bodenproben. Bodenphysikalische, bodenchemische sowie stoffliche Parameter sind laboranalytisch zu ermitteln (Tab. 9). Eine Probenahme am Untersuchungsstandort ist demnach erforderlich. Die Vorgehensweise sollte möglichst minimal-invasiv und ressourceneffektiv sein sowie gängigen bodenkundlichen Standards entsprechen, sodass eine Vergleichbarkeit mit Daten aus bestehenden Monitoringprogrammen gegeben ist. Dies erleichtert auch die Beauftragung geeigneter Labore. Zur Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter Trockenrohdichte und Porenvolumen sowie der Messung der Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Probenahme bietet es sich an, die für die Mikroarthropodenerfassung gewonnenen, ungestörten Bodenkerne zu nutzen (gravimetrisches Analyseverfahren). Diese haben bekannte Maße (Höhe und Durchmesser, Anhang 4: Erfassungsmethoden). Im Zuge der Organismenextraktion werden die Bodenkerne getrocknet. Dies ermöglicht ebenso die nachfolgende Bestimmung von Trockenrohdichte und Porenvolumen. Logistische Anforderungen beider Analysen können dennoch die separate Aufnahme dieser Parameter erfordern, beispielsweise wenn diese in unterschiedlichen Laboren erhoben werden. Das Extraktionsverfahren basiert auf einem verhaltenssteuernden Verfahren, in dem aktive Lebensstadien durch Herbeiführen eines Temperaturgefälles im Bodenkern extrahiert werden. Der obere Teil des Kerns wird hierbei auf 45 bis 50 °C erwärmt. Die standardisierte Vorgehensweise bei der bodenchemischen Analyse ist eine Trocknung von Bodenproben bei maximal 40 °C zur Vermeidung von Substanzverlusten zum Beispiel von temperaturempfindlichen organischen Verbindungen. Es ist zu bedenken, dass die Trocknung darüber hinaus einen Einfluss auf die Nährstofflöslichkeit und den Boden-pH-Wert hat. Es wird daher empfohlen, für die bodenchemischen Analysen zusätzliche Proben zu gewinnen. Hierfür sind gestörte Proben ausreichend, zu erheben zum Beispiel mit Stechzylinder, Spatenstich oder per Stechrahmen/-zylinder für die Auflage im Wald. Dies ist auch deshalb notwendig, um ausreichend Probenmaterial für die Vielzahl der vorgesehenen Analysen zu erhalten.

Um Ursache-Wirkungsbeziehungen definierter Stoffe auf Bodenorganismengruppen zu identifizieren und daraus Maßnahmen zum Bodenbiodiversitätsschutz abzuleiten, wäre die Konzeptionierung eines speziell darauf ausgerichteten frageorientierten vertiefenden Monitoringmoduls notwendig (Kapitel 4, Kapitel 10). Die einmalige Möglichkeit der bundesweiten Ersterfassung sollte dennoch genutzt werden, um wichtige stoffliche Belastungen als Hintergrundwerte zur Charakterisierung des Standorts mit zu erfassen (Tab. 9). Die Kosten für die Messung stofflicher Belastungen werden im Vergleich zur taxonomischen Bestimmung der Arten als überschaubar eingeschätzt. Erfahrungen aus dem Kleingewässermonitoring (MonViA) haben gezeigt, dass Befragungen der Landnutzenden allein nicht ausreichen, sondern Messungen erforderlich sind, da sowohl persistente als auch andere dem Landwirt oder der Landwirtin unbekannte Substanzen auf den Flächen vorliegen.

Tab. 9 Begleitdaten: Laboranalytisch zu bestimmende Parameter.

Laboranalytisch zu ermitteln	Anmerkungen und benötigte Probenmenge
C_{org}, C_{anorg} (Carbonat), C_{ges}	500 g
pH-Wert	Es gibt verschiedene etablierte Methoden zur Messung: ▶ in H₂O: mindestens 5 ml gesiebte Humus- oder Bodenprobe ▶ in KCl: mindestens 5 ml gesiebte Humus- oder Bodenprobe ▶ in CaCl₂: 20 g gesiebte Bodenprobe, 5 g gesiebte Humusprobe Die Methode ist für die bundesweite Ersterfassung einheitlich festzulegen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Es wird empfohlen, sich auf eine der drei genannten Methoden zu einigen.
Gesamt N	500 mg; Weniger als 500 mg Probemenge sind nur bei Korngrößen < 200 µm zulässig.
Nitrat, Nitrit, Ammonium	je circa 50–100 g Probenmaterial
Korngrößenverteilung	Einwaage 10 g trockener Mineralboden (< 2mm) bei > 40 % Sandgehalt oder sehr hohen C_{org}-Gehalten Erhöhung auf bis zu 30 g möglich, bei Tongehalten > 50 % Einwaage auf bis 5 g reduzierbar Bei Röntgenabsorptionsverfahren ist eine Einwaage von 20 g üblich.
Trockenrohdichte, Porenvolumen, Bodenfeuchte	Gravimetrisch am ungestörten Bodenkern zu ermitteln (gegebenenfalls Verwendung der Mikroarthropodenprobe)
Schwermetalle, Schwefel, Phosphor	Königwasseraufschluss: mindestens 1 g gemahlene oder mindestens 3 g gesiebte Probe
Pestizide	Auswahl prioritärer organischer Stoffe (Persistierende organische Schadstoffe, sehr persistente und sehr bioakkumulierbare Stoffe, prioritäre Pflanzenschutzmittel)

Mikroplastik

Es besteht großer Forschungsbedarf zu (Mikro)Plastik und Eintragspfaden in Böden. Dieser Begleitparameter ist daher gegebenenfalls nicht zeitnah umfänglich umsetzbar.

mögliche Vorgehensweise: Probenahmemethode für Böden zur anschließenden Untersuchung auf (Mikro)Plastik aus dem Projekt PLASBo (<https://dafne.at/projekte/plasbo>)

visuelle Analytik (< 1 mm): 1 kg Mineralboden und 0,4 kg Feuchtmasse für Humusauflagen, Angabe in Stück und mg pro kg Trockenmasse

Mikroplastikanalytik (0,05 – 1 mm) mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR): 1 kg Mineralboden und 0,4 kg Feuchtmasse für Humusauflagen, Angabe in Stück pro kg Trockenmasse

Begleitdaten aus externen Datenquellen. Einige der Begleitdaten sollten aus anderen Messprogrammen abgefragt beziehungsweise aus bestehenden Produkten oder Karten verwendet werden siehe Tab. 10.

Tab. 10 Begleitdaten: Aus externen Datenquellen zu ermitteln.

Begleitdaten	Externe Datenquelle
Ausgangsgestein, Bodentyp	Geologische Karten (GK), Bodenübersichtskarte (BÜK200) Der Bodentyp sollte vor Ort überprüft und validiert werden (Pürckhauer), Geologische Dienste könnten hierbei Unterstützung leisten.
Grundwasserstand	Hydrogeologische Karten (modellierte Daten) und Validierung anhand der Bodentypansprache für eine höhere Genauigkeit
Lufttemperatur, Niederschlag	Daten des Deutschen Wetterdiensts (DWD)

8.7 Anwendung DNA-basierter Methoden

Das Fachgremium (Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum), empfiehlt, bereits mit der bundesweiten Erstfassung der Bodenbiodiversität den routinemäßigen Einsatz des Metabarcodings im Bodenbiodiversitätsmonitoring voranzutreiben.

Befüllung der Referenzdatenbanken. Parallel zu den morphologischen Bestimmungen sollten die Referenzdatenbanken stufenweise mit Referenz-Barcodes (inklusive Referenzmetadaten) der Bodenorganismen befüllt werden. Die Befüllung der Referenzdatenbanken ist ein aufwendiger und

langwieriger Prozess, der dabei als eigenständiges Projekt konzipiert werden sollte, um die Routineabläufe der morphologischen Bestimmungen nicht zu überlasten.

Vergleiche morphologischer und molekularer Artbestimmung. Paarweise Vergleiche zwischen Barcoding und morphologischer Bestimmung an Community-Proben extrahierter Bodenorganismengruppen sollten zur Methodvalidierung durchgeführt werden. Hiermit lässt sich unter anderem das Ausmaß der Über-/Unterschätzungen der Biodiversität beziehungsweise bestimmter Gruppen abschätzen. Auch dieser Prozess sollte als eigenständiges Teilprojekt für ein reduziertes Stichprobenset konzipiert werden, um die Effizienz der Erfassungs-Aktivitäten der Ersterfassung nicht zu beeinträchtigen.

Prozess der Standardisierung des Metabarcodings. Im Projekt MetaInvert-ISO (<https://metainvert-iso.senckenberg.science/de/>) werden derzeit Standardverfahren zur Erfassung verschiedener terrestrischer Invertebratengruppen, unter anderem extrahierter Enchyträen, Mikroarthropoden und Nematoden mithilfe von Hochdurchsatz-Sequenzierungsverfahren erarbeitet mit dem Ziel der Erstellung einer Final-Draft-ISO-Richtlinie. Standardisierungen sind hinsichtlich Vergleichbarkeit und Reproduktion von Monitoringergebnissen entscheidend für die Anwendbarkeit von genetischen Bodenbiodiversitätsanalysen.

Europäische und internationale Anschlussfähigkeit. Das Fachgremium empfiehlt die Orientierung an der methodischen Vorgehensweise des Metabarcodings gemäß Soil BON-Protokollen und LUCAS Soil-Erhebungen der Bodenbiodiversität zur Sicherung der internationalen Kompatibilität (Kapitel 2.2) Dies schließt unter anderem die Wahl der DNA-Extraktionskits, der Primer und den Prozess der Bioinformatik ein.

8.8 Empfehlung zur Einlagerung von Proben

Veranlassung. Die Einlagerung von Proben im Rahmen eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings ist ein wichtiger Baustein für die Beobachtung langfristiger Bodenbiodiversitätsveränderungen. Durch gut dokumentierte und standardisierte Probenarchive können Monitoringprogramme um eine konservierende und rückblickende Komponente ergänzt werden. Neben der Qualitätssicherung und Nachprüfbarkeit von Monitoringergebnissen besteht ein großer Mehrwert darin, zukünftig durch die Weiterentwicklung von Analysemethoden neue Informationen aus bereits gelagerten Proben zu gewinnen. In diesem Zusammenhang bieten genetische Methoden wie DNA-Metabarcoding ein hohes Potenzial für rückblickende Bewertungen der Artenvielfalt.

Referenzpunkt. Das Archivierungsvorhaben soll vorrangig der Ergebnissicherung des Bodenbiodiversitätsmonitorings dienen und Optionen prospektiver molekularbiologischer (vorrangig DNA-basierter) Biodiversitätsanalysen gewährleisten. Eine erstmalige bundesweite Erfassung der Bodenbiodiversität dient nicht nur der Etablierung von Referenzwerten für verschiedene Lebensraumtypen, sondern ermöglicht auch die Weiterentwicklung und den Ausbau von Indikatoren zur Messung und Bewertung der Bodenbiodiversität. Ihr kommt damit eine hohe Bedeutung als Referenzpunkt für die Messung und Bewertung von Veränderungen der Bodenbiodiversität im Laufe der Zeit zu. Dafür ist die Sicherung der Proben aus einer bundesweiten Ersterfassung von zentraler

Bedeutung. Die Proben sollten daher unter optimalen Bedingungen gelagert und damit für vielfältige Nachnutzungen zugänglich gemacht werden. Es wird empfohlen, parallel zum DNA-Extrakt, eine repräsentative Bodenprobe für jeden Untersuchungsstandort unter Kryobedingungen einzulagern. Durch die Lagerung bei ultratiefen Temperaturen bleiben sämtliche chemische und biologische Informationen einer Probe bewahrt. Die Sicherung des Roh-Referenzmaterials ermöglicht nicht nur vielfältige Folgeanalysen in der Zukunft, sondern kann zudem für die Kalibrierung und Validierung neuer Analysemethoden verwendet werden. Abzusehen sind Weiter-/Neuentwicklungen von Indikatoren, Schadstoffanalysen, genetischen Analyseverfahren und bioinformatischen Anwendungen.

Taxonomische Revisionen. Darüber hinaus wird empfohlen, repräsentative Anteile der für die morphologische Bestimmung ausgetriebenen Bodenorganismen, sortiert nach Bodenorganismengruppen aufzubewahren. An den Standorten, an denen gegebenenfalls Synergien mit dem bundesweiten Insektenmonitoring realisiert werden können (Kapitel 2.1 bundesweites Insektenmonitoring und Kapitel 8.3 Erläuterungen Barbarfallen Insektenmonitoring), sind die Beifänge aus den Bodenfallen aufzubewahren. Die Einlagerung der Proben stellt gegenüber der aufwändigen Probenahme einen relativ geringen Mehraufwand dar, der einen erheblichen Mehrwert für die taxonomische Nachnutzung generiert, zum Beispiel für taxonomische Revisionen. Eine kurz- bis mittelfristige Einlagerung der organismischen Proben ist voraussichtlich auch aus logistischer Sicht notwendig, um ein schrittweises „Abarbeiten“ der morphologischen Artidentifikation zu gewährleisten.

Probenarchivierung in einem langfristigen Monitoring. In einem zukünftig zu etablierenden Trendmonitoring der Bodenbiodiversität ist das für die bundesweite Ersterfassung vorgeschlagene Vorgehen zur Probeneinlagerung kaum praktikabel. Hierfür ist prospektiv eine Priorisierung der Probenart- und des Probenumfangs für die Einlagerung vorzunehmen. Noch ungewisse wissenschaftliche (zum Beispiel zu Indikatoren- und Bewertungssystemen), logistische und finanzielle Rahmenbedingungen eines zukünftigen Trendmonitorings müssen für die Entwicklung eines Archivierungskonzepts abgewogen werden. Beispielsweise können DNA-Verbindungen unter bestimmten Voraussetzungen auch langfristig beständig sein, wenn sie bei - 20°C beziehungsweise gefriergetrocknet bei Raumtemperatur gelagert werden. Ein solches Vorgehen wäre womöglich deutlich praktikabler. Die EU-Bodenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2025/2360, Kapitel 1.4 Anforderungen aus Gesetzen und Strategien) fordert die Archivierung repräsentativer Teilmengen der Bodenproben der Erhebungen in den Mitgliedsstaaten für mindestens zwei Monitoringzyklen (entspricht 12 Jahre). Die Mitgliedsstaaten haben die Möglichkeit die repräsentativen Teilmengen der Bodenproben in das Bodenarchiv der EU-Kommission zu übertragen.

Technische Aspekte der Probenarchivierung:

- ▶ **Aliquote:** Einzulagernde Proben (DNA-Extrakte und Bodenproben) sind zu aliquotieren, um zur Gewährleistung der DNA-Stabilität mehrere Gefrier-Auftauzyklen in der Nachnutzung zu vermeiden.
- ▶ **Probenmenge:** Für molekularbiologische Analysen sind kleine Probenmengen von wenigen Gramm ausreichend. Die Herstellung eines probenrepräsentativen Aliquots ist jedoch

herausfordernd. Für eine optimale Homogenisierung wird das Vermahlen des gefriergetrockneten Ausgangs-Bodenprobenmaterials (circa 50 g Bulk sample) vorgeschlagen, denn die Homogenisierung von frischem Boden ist nicht ideal. Bei der Entwicklung der Probenahmestrategie sollte eine vereinheitlichte DNA-konservierende Handhabung des Probenmaterials, das für genetische Analysen vorgesehen ist, berücksichtigt werden. Kontaminationen mit Fremd-DNA und DNA-Abbau durch physikochemische oder biologische Prozesse ist weitestgehend zu vermeiden.

- ▶ **Organismische Proben:** Die Anforderungen an die Aufbewahrung sind organismengruppenspezifisch. Ethanol ist als häufig verwendetes Konservierungsmittel DNA-freundlich, allerdings sind beispielsweise Nematoden und Enchyträen derart eingelagert nicht mehr morphologisch bestimmbar. Sind für diese Organismengruppen DNA-Analysen und parallel morphologische Artidentifikation gewünscht, ist eine repräsentative Aufteilung der extrahierten Tiere direkt nach Extraktion vorzunehmen. Für im Vergleich zu den Nematoden weniger individuenreiche Gruppen wie Enchyträen müsste dafür die Probenzahl beziehungsweise das Probenvolumen erhöht werden.
- ▶ **Lagerungsinfrastruktur.** Die einzulagernden Proben einer bundesweiten Ersterfassung sollten in einem spezialisierten Archiv aufbewahrt werden. Probenarchive wie die Biobank (<https://bonn.leibniz-lib.de/de/biobank>) des Leibniz-Instituts zur Analyse des Biodiversitätswandels (LIB) oder die Umweltprobenbank des Bundes (<https://www.umweltprobenbank.de/de>) bieten die Infrastruktur und die Ressourcen, um Proben über lange Zeiträume unter höchsten Qualitätsansprüchen sicher zu lagern. Sie verfügen über Fachpersonal für eine standardisierte Probenkonservierung, -verwaltung und -dokumentation. Die Probenarchivierung im Zuge einer bundesweiten Ersterfassung sollte in Kooperation mit der LIB-Biobank und in enger Abstimmung mit der Umweltprobenbank zur Nutzung der vorhandenen wertvollen Expertise in der Lagerung von Bodenproben erfolgen. Weitere Synergieeffekte könnten durch eine Zusammenarbeit mit dem LIB bei der genetischen Charakterisierung (DNA-Barcoding) von Bodenorganismen zur Weiterentwicklung der Referenzdatenbanken geschaffen werden (Kapitel 8.7).

Weiterführende Informationen

Integrierung einer DNA-konservierenden Probenlagerung im Biodiversitätsmonitoring:

- ▶ **Zizka, V. M. A. et al. (2022):** Long-term archival of environmental samples empowers biodiversity monitoring and ecological research. *Environmental Sciences Europe* 34, 40. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00618-y>

Teil IV: Ausblick - Umsetzung und Weiterentwicklung des Monitorings

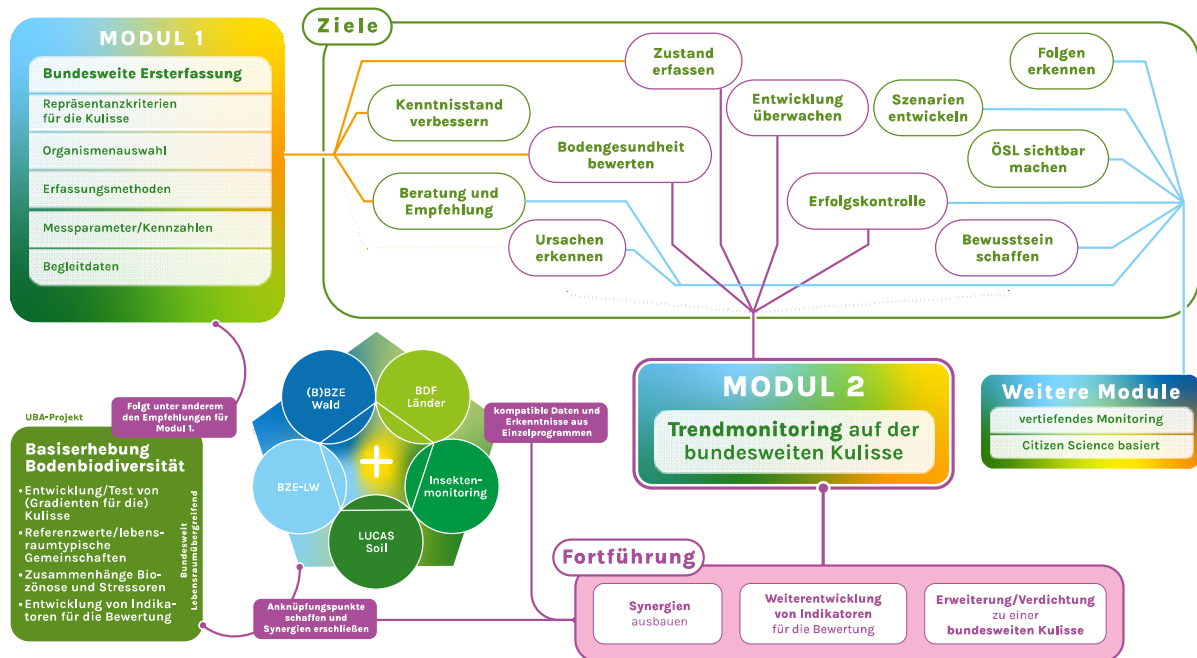


Abb. 11 Inhaltsübersicht Teil IV des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts mit Schwerpunkt der Entwicklung eines langfristigen Trendmonitorings und dem Ausblick auf weitere, vertiefende Monitoringmodule.

9 Entwicklung eines langfristigen Trendmonitorings auf Grundlage umfassender Daten und definierter Bewertungsmaßstäbe

Das Monitoring-Modul 1 „bundesweite Ersterfassung“ (Teil III) stellt einen umfassenden Leitfaden zur systematischen Datenerhebung dar, der die Definition von Repräsentanzkriterien für die Untersuchungskulisse, Zielorganismengruppen, Erfassungsmethoden, Messparameter und Begleitdaten umfasst. Das Projekt "Basiserhebung Bodenbiodiversität" des Umweltbundesamtes (Kapitel 9.1.2) fußt unter anderem auf diesem Konzept des Fachgremiums, adressiert aber auch zusätzliche spezifische Fragen und schafft eine fundierte datenbasierte Ausgangsbasis. Mit seinen Ergebnissen wird der Grundstein für die Ableitung von lebensraumtypischen Referenzwerten sowie die synergistische Zusammenführung bestehender Monitoringaktivitäten gelegt. Für die Konzeptionierung und angestrebte Etablierung eines bundesweiten Trendmonitorings sind die Erkenntnisse des UBA-Projekts und die Ergebnisse weiterer bestehender Monitoring-Initiativen zu berücksichtigen (Abb. 11, Kapitel 9.2). Weitere vertiefende Monitoring-Module (Kapitel 10) tragen dazu bei, ein noch detaillierteres Verständnis der Bodenbiodiversität, ihrer Veränderungen und Folgen dessen zu gewinnen, um die Ziele des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings umfänglich zu erreichen (Kapitel 4). Die Einbindung von Citizen Scientists bietet Potenziale, nicht nur die Datenbasis zu vergrößern, sondern auch das Bewusstsein und das Verständnis für die Bedeutung der Bodengesundheit und -biodiversität maßgeblich zu fördern (Kapitel 10, Absatz Citizen Science-basiertes Monitoring).

9.1 Umsetzung einer „Basiserhebung Bodenbiodiversität“ im Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz

9.1.1 Politische Grundlage und Zielsetzung

Das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK). Das am 29. März 2023 (BMUV 2023) beschlossene Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz der Bundesregierung zielt darauf ab, durch die Stärkung der Ökosysteme einen entscheidenden Beitrag zum Klimaschutz und zur Verbesserung ihres Zustands zu leisten. So betrachtet das ANK unter anderem ein Handlungsfeld, welches die wichtigen Funktionen des Bodens für den Klimaschutz und die Ökosysteme hervorhebt. Darin ist eine Maßnahme zur Stärkung der Bodenbiodiversität als unverzichtbarer Beitrag für den Natürlichen Klimaschutz enthalten:

Maßnahme 6.4. des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz „Stärkung der Bodenbiodiversität als unverzichtbarer Beitrag für den Natürlichen Klimaschutz“

„Wir vereinheitlichen Methodenstandards und führen eine Basiserhebung für verschiedene Nutzungsarten durch, um lebensraumtypbezogene bodenbiologische Referenzdaten für einen guten ökologischen Bodenzustand zu sammeln, und leiten daraus geeignete Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Klimakrise sowie messbare Indikatoren für die Erfolgs-, Wirksamkeits- und Effizienzkontrolle hinsichtlich der Maßnahmen ab. Die Etablierung eines bundesweiten Messnetzes zur Bodenbiodiversität erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen dem Umweltbundesamt, dem Bundesamt für Naturschutz, dem Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität, dem Thünen-Institut, dem Julius Kühn-Institut sowie dem neu einzurichtenden Nationalen Bodenmonitoringzentrum. Der Aufbau des Messnetzes soll bereits vorhandene Aktivitäten mit einbeziehen.“

In einem Positionspapier der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU) heißt es: „Die Auswertung der Basiserhebung wird die Grundlagen für ein langfristiges, über das Ende des ANK hinaus bestehendes, bundesweites Bodenbiodiversitäts-Monitoring schaffen, indem aussagekräftige und bundesweit umsetzbare Indikatoren einschließlich der notwendigen Stichprobenzahlen identifiziert werden können. Dies ermöglicht auf lange Sicht, geeignete Maßnahmen zum Klimaschutz, zur Klimaanpassung und zum generellen Schutz der Ökosystemleistungen des Bodens abzuleiten und deren Erfolg zu überprüfen (KBU 2022).

Weiterführende Informationen

zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK)

- **Kabinettsbeschluss vom 29.03.2023:** <https://www.publikationen-bundesregierung.de/pp-de/publikationssuche/aktionsprogramm-klimaschutz-2234076>
- **Weiterentwicklung ANK:** www.natuerlicher-klimaschutz.de/

9.2 Umsetzung des Projekts „BioDive4Soil“

Das Projekt „Vorbereitung und Durchführung einer bundesweiten Basiserhebung Bodenbiodiversität zur Ableitung lebensraumtypischer Referenzwerte für einen guten ökologischen Bodenzustand; Untersuchung des Wirkungsgefüges, Etablierung eines bundesweiten Messnetzes“

(FKZ 3724NK6010; Kurztitel: „Basiserhebung Bodenbiodiversität“, UBA 2024) dient der Umsetzung der ANK-Maßnahme 6.4 (Kapitel 9.1). Das Projekt mit einer Laufzeit von 2025-2030 umfasst Konzeption und Planung, Durchführung und Auswertung einer Basiserhebung Bodenbiodiversität und wird vom Umweltbundesamt fachlich begleitet. Die Basiserhebung der Bodenbiodiversität liefert wichtige Erkenntnisse über die aktuelle Situation der Bodenbiodiversität in Deutschland. Die Basiserhebung bietet eine einzigartige Gelegenheit, die Herausforderungen und Chancen eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings zu erkunden und ein bundesweites Messnetz aufzubauen. Mit der Durchführung können wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, beispielsweise hinsichtlich der logistischen Umsetzung und der Zusammenarbeit verschiedener Akteurinnen und Akteure.

Die darin erhobenen Daten sollen es ermöglichen, „typische Bodenlebensgemeinschaften für einen guten Bodenzustand zu charakterisieren und Ursachen für Abweichungen zu identifizieren“ (UBA 2024, Leistungsbeschreibung „Basiserhebung Bodenbiodiversität“). Die Erhebung umfasst gemäß Leistungsbeschreibung drei ineinandergreifende Untersuchungsstränge:

- ▶ Erfassung der Bodenbiodiversität in verschiedenen Lebensraumtypen in Deutschland, die wenig anthropogen überprägt sind, um **Referenzwerte für die Bodenbiozöten** zu definieren;
- ▶ Erfassung der Bodenbiodiversität in verschiedenen Lebensraumtypen, die unterschiedlich stark anthropogen beeinflusst sind, um **repräsentative Erhebungen der Biozöten in den Böden der sogenannten Normallandschaft** zu erhalten und mögliche Einflussgrößen und Belastungen zu identifizieren;
- ▶ Erfassung der Bodenbiozönose an wenigen ausgewählten Standorten über zeitlich und räumlich intensive Beprobungen, um **kausale Zusammenhänge zwischen Zustand der Biozönose und Einflussgrößen** zu untersuchen (**Wirkungsmonitoring**)

Die in Abb. 12 dargestellten Arbeitspakete sind für die Basiserhebung Bodenbiodiversität vorgesehen. Die fachlichen Ausarbeitungen und Empfehlungen des Monitoringzentrums und seines Fachgremiums Bodenbiodiversität (Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum; Kapitel 8) fließen in mehreren zentralen Aspekten des Projekts ein. Die durch das Fachgremium festgehaltenen Methodenbeschreibungen für die Erfassung der Bodenorganismen (Kapitel 8) dienen als Grundlage für die zu erstellenden Standardarbeitsanweisungen, um eine qualitätsgesicherte Durchführung der Basiserhebung zu gewährleisten (AP 5 in Abb. 12). Darüber hinaus dienen die fachlichen Empfehlungen und Erkenntnisse des Fachgremiums bezüglich der relevanten Boden- und Standortfaktoren sowie potenzieller Einflussgrößen und die fachlichen Vorarbeiten dazu als wichtige Grundlage für die Auswahl der zu erfassenden Begleitgrößen im Projekt, um fundierte Wirkungsanalysen auf die Bodenbiodiversität zu ermöglichen (AP 4 in Abb. 12). Empfehlungen zur langfristigen Archivierung der Bodenproben und der extrahierten DNA werden berücksichtigt und Konzepte für DNA-basierte Analysen als komplementäre Methode zu

morphologischen Bestimmungen werden adressiert, sodass die Basiserhebung Bodenbiodiversität mit dem Projekt BioDive4Soil zur stufenweisen Befüllung von Referenzdatenbanken beitragen wird. Dies wird unter anderem das das DNA-Barcoding von bis zur Art bestimmten Bodenorganismen der Bodenfauna umgesetzt.

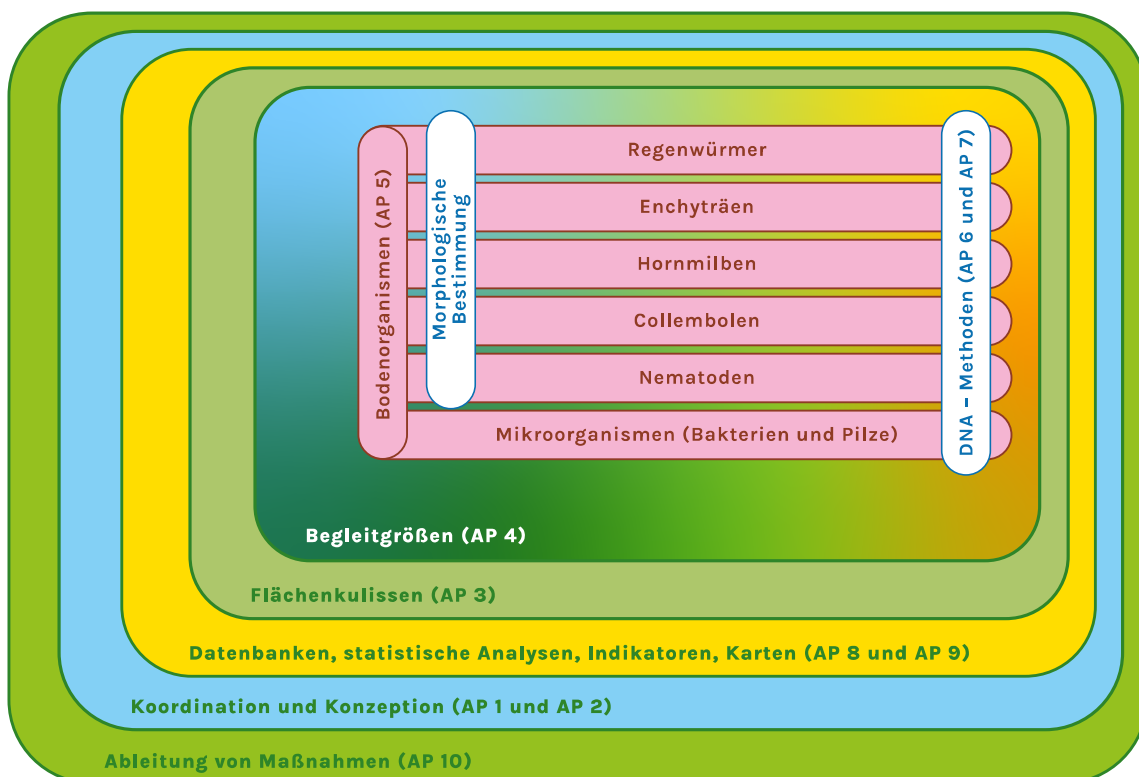


Abb. 12 Arbeitspakete des UBA-Projekts „Basiserhebung Bodenbiodiversität“ (aus der Leistungsbeschreibung des Projekts FK 3724 NK 601 0).

Basierend auf den Zielen der oben genannten drei Untersuchungssträngen sowie den Anforderungen der Repräsentativität der Kulisse unter Berücksichtigung verfügbarer Ressourcen und den Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie werden Suchräume in Deutschland für den Aufbau eines Projekt-Messnetzes identifiziert. Potenzielle Messflächen werden randomisiert innerhalb der Suchräume bestimmt. Es wird angestrebt, Synergien mit etablierten Monitoringprogrammen umzusetzen (unter anderem Kapitel 2; Abb. 11) und die Koordinatoren der entsprechenden Monitoringprogramme frühzeitig zu kontaktieren. Im Verlauf wird die Verlagerung der randomisierten Punkte auf vorhandene Messflächen geprüft. Es wird angestrebt, diesen integrativen Prozess, in dem die Ergebnisse und Aktivitäten anderer Projekte und Programme berücksichtigt werden, über das Projekt hinaus fortzuführen

Das Projekt „Basiserfassung Bodenbiodiversität“ wird durch einen fachlich beratenden wissenschaftlichen Beirat mit Expertise in den Bereichen Monitoring, Bodenbiodiversität und

Bearbeitung beziehungsweise Auswertung komplexer biologischer Daten(pakete) unterstützt. Vertretende der Zentrale des Monitoringzentrums sowie des Fachgremiums „Monitoring der Biodiversität und ihrer Funktionen“ sind Teil des Beirats und damit fachlich in die Feinkonzeptionierung und Auswertung eingebunden.

9.3 Ausbau laufender Monitoringaktivitäten und Zusammenführung der Daten und Erkenntnisse

Ausschöpfen von Synergien. Entscheidend für die künftige Etablierung eines robusten Trendmonitorings ist das Ausschöpfen von Synergien aus bereits bestehenden und fortlaufenden Monitoring-Initiativen. Für die Konzeptionierung und angestrebte Etablierung eines bundesweiten Trendmonitorings werden die Erkenntnisse des UBA-Projekts „Basiserhebung Bodenbiodiversität“ (Kapitel 9.1.2) und die Ergebnisse anderer bestehender Monitoring-Initiativen berücksichtigt und wo möglich zukünftig gemeinsam ausgewertet, um Indikatoren und Bewertungsschemata fundiert, robust, praktikabel und aussagekräftig zu entwickeln. Projekte wie die Bodenbiologische Zustandserhebung/NaBioWald, Bodendauerbeobachtungsprogramme der Länder, Bodenzustandserhebung Landwirtschaft/MonViA und LUCAS Soil tragen mit ihren Erfassungen relevanter Bodenbiodiversitätsparameter und Einflussfaktoren, teils mit bundesweit repräsentativem Charakter für bestimmte Lebensraumtypen (zum Beispiel in Wäldern), maßgeblich zum Erkenntnisgewinn bei (Kapitel 2; Abb. 11). Das Fachgremium Bodenbiodiversität (Hintergrund – das Fachgremium Bodenbiodiversität am Monitoringzentrum) empfiehlt die Etablierung eines ökosystemaren Monitorings, durch welches umfangreich trophische Beziehungen auch in der Verlinkung ober- und unterirdischer Biodiversität dargestellt werden könnten (Kapitel 3). Eine Möglichkeit dafür besteht in der Verknüpfung bodenbiologischer Erfassungen mit dem bundesweiten Insektenmonitoring (Kapitel 2.1; Kapitel 8.3). Bodenmonitoringzentrum und Monitoringzentrum kooperieren dabei mit dem Bundesamt für Naturschutz (Fachgebiet II 1.3 „Monitoring der terrestrischen Biodiversität“). Ein erster Schritt zur Erprobung dieser Verknüpfung könnte im Rahmen der bundesweiten Basiserhebung erfolgen (Kapitel 9.1.2) Ebenso sieht das Konzept der NaBioWald Initiative ein integratives Monitoring ober- und überirdischer Biodiversität im Wald vor (Bolte 2025).

Entwicklung von Indikatoren. Um künftig ein umfassendes und repräsentatives Trendmonitoring zu ermöglichen, ist die (Weiter-)Entwicklung von Indikatoren essentiell. Dies ebnet den Weg für den Einzug solcher Indikatoren in gesetzliche Texte und Richtlinien, wodurch der Schutz und die nachhaltige Nutzung der Bodenbiodiversität langfristig und verbindlich verankert werden können. Ziel ist es, nicht nur zu reagieren, sondern aktiv die Grundlagen für eine informierte und wirksame Politikgestaltung im Bereich des Boden- und Biodiversitätsschutzes zu schaffen.

10 Konzeption weiterer notwendiger Monitoringmodule für ein zukunftsfähiges Bodenbiodiversitätsmonitoring

Vertiefendes Monitoring. Bei der Entwicklung weiterer vertiefender Monitoringmodule sollte ein Fokus auf die Prozesse, Funktionen und Leistungen, die von der Bodenbiodiversität erbracht werden, liegen. Dies umfasst beispielsweise Kohlenstoffbindung, Wasserhaushaltsregulierung, die Beteiligung an Nährstoffkreisläufen und die Fähigkeit des Schadstoffabbaus (Abb. 3 Kapitel 1). Im Rahmen der Erfassung der Bodenorganismengruppen und Begleitdaten (Kapitel 8) besteht die Möglichkeit, Rückschlüsse auf Funktionen und funktionelle Diversität in Form von Aktivitäts- oder Funktionsparametern, wie beispielsweise die Verteilung der Organismen auf ökologische Kategorien (trophische Ebenen, funktionelle Gruppen, Lebensformen) zu ziehen. Bislang ist wenig darüber bekannt, wie sich die funktionelle Diversität der Bodenorganismen quantitativ auf wichtige Ökosystemfunktionen auswirkt (Wirth et al. 2024). Im Zuge der durch das UBA koordinierten Basiserhebung sollen „neben der strukturellen Bodenbiodiversität auch funktionelle Summenparameter erfasst werden. Dies betrifft die Ermittlung der Biomasse der Mikroorganismen und ihrer Aktivität mittels der Verfahren der Chloroform-Fumigation-Methoden (DIN 14240-2) und substratinduzierten Atmung (DIN 14240-1)“ (Umweltbundesamt 2024).

Die Möglichkeit und Notwendigkeit intensiverer Erhebungen, um Muster in den Beziehungen zwischen Bodenbiodiversität und Ökosystemfunktionen zukünftig vertiefend zu untersuchen, sollte erörtert werden. Wissenslücken bezüglich der Bewertungen von kausalen Mechanismen, die Bodenbiodiversität mit Bodenökosystemfunktionen (und damit verbundenen Ökosystemleistungen) verbinden, könnten dadurch geschlossen werden.

Citizen Science-basiertes Monitoring. Ein vielversprechender Ansatz zur Erweiterung des Monitorings ist die Einbindung Interessierter und Landnutzender (aus Forst- und Landwirtschaft) durch ein Citizen Science-Modul. Orientiert an erfolgreichen Projekten wie „Expedition Erdreich“, „Beweisstück Unterhose“ oder „Sounding soils“ könnten im Rahmen des Bodenbiodiversitätsmonitorings Bürger*innen dazu eingeladen werden, Bodenproben zu entnehmen oder einfache Untersuchungen durchzuführen. Landwirte und Landwirtinnen können durch die Anwendung praxisnaher Monitoringmethoden mehr über die biologische Aktivität ihrer Ackerböden erfahren, beispielhaft kann hier die Schnellansprache der Regenwürmer per Spatenstich für die Abschätzung des Regenwurmbesatzes genannt werden. Durch eine breite Beteiligung könnten nicht nur umfangreiche Datensätze, die zur Verbesserung unseres Verständnisses der Bodenökosysteme beitragen, generiert, sondern auch das Bewusstsein für die Bedeutung der Bodenbiodiversität in der Bevölkerung gestärkt werden.

Weiterführende Informationen

- **Projekt „Expedition Erdreich – Mit Teebeuteln den Boden erforschen“:**
<https://www.bonares.de/expedition-erdreich>
- **Projekt „Beweisstück Unterhose“ aus der Schweiz:**
<https://www.agroscope.admin.ch/de/beweisstueck-unterhose>



- ▶ **Informationen zum Forschungs- und Kunstprojekt „Sounding Soils“:**
<https://www.soundingsoil.ch/>
- ▶ **Methode der Schnellansprache der Regenwürmer mittels Spatenstich in Ackerböden:**
https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/merkblaetter/regenwuermer-ackerboeden_lfl-merkblatt.pdf
- ▶ **Bodentierhoch4-App:** <https://bodentierhochvier.de/>

Im Dialog bleiben

Im November 2024 hat die Kommission Bodenbiologie der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) gemeinsam mit dem Arbeitskreis Bodenökologie der Gesellschaft für Ökologie sowie der Georg-August-Universität Göttingen einen Workshop zum Thema „Zukunft des Boden-Biodiversitätsmonitorings“ veranstaltet. Der lebhafte Austausch zwischen Wissenschaftler*innen und Behördenvertreter*innen über Methoden, Datenakquise, Organisation und Herausforderungen des Bodenbiodiversitätsmonitorings hat wichtige Impulse für das vorliegende Konzept und die Weiterentwicklung des Bodenbiodiversitätsmonitorings geliefert. Die Teilnehmenden äußerten den Wunsch, den interdisziplinären Dialog zum Thema Monitoring fortzuführen, vorzugsweise in Form eines regelmäßigen Workshop-Formats im 2-Jahres-Turnus. Den nächsten Workshop werden die beiden Monitoringzentren (Bodenmonitoringzentrum und Monitoringzentrum zur Biodiversität) im Januar 2027 ausrichten und in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit der DBG (Kommission Bodenbiologie und Bodenökologie) und GfÖ (Arbeitskreis Bodenökologie) ausgestalten.

Danksagung

Den Mitarbeitenden der Koordinierungsstelle des Bodenmonitoringzentrums am UBA und den Verantwortlichen der Initiative NaBioWald danken wir für die vertrauensvolle, partnerschaftliche und produktive Zusammenarbeit zum Kooperationsthema Bodenbiodiversitätsmonitoring.

Das Team des Monitoringzentrums möchte zudem allen Teilnehmenden der Fachtagung „Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring“ herzlich danken. Ihre vielfältigen Perspektiven, ihre aktiven Beiträge und der lebhafte Austausch haben wesentlich zur Weiterentwicklung unseres Konzepts beigetragen.

Unser Dank gilt weiterhin Jonas Astrin, Jan Koschorreck und Dustin Kuhlanek für ihre wertvolle beratende Unterstützung bei der Erstellung der Archivierungsempfehlung! Die Zusammenarbeit hat die Bedeutung einer engen Vernetzung der Monitoringgemeinschaft mit Bio- beziehungsweise Umweltprobenbanken aufgezeigt.

Ebenso möchten wir all jenen danken, die unsere Arbeit durch Befragungen oder die Teilnahme an Abfragen zum Zusammentragen relevanter Informationen zur Entwicklung des Konzepts unterstützt haben beispielsweise zu Monitoringaktivitäten und Archivierungskapazitäten der Länder oder Vorhandensein bodenbiologischer Expertise und Kapazitäten.

Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit mit allen Beteiligten, um ein harmonisiertes Monitoring der Bodenbiodiversität in Deutschland weiterentwickeln und etablieren zu können und so einen wichtigen Beitrag zum Schutz des Bodenlebens zu leisten.

Das Fachgremium Bodenbiodiversität und das Team der Zentrale des Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität



Abkürzungsverzeichnis

ANK	Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
BBZE	Biologische Bodenzustandserhebung im Wald
BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen der Bodendauerbeobachtungspogramme der Länder
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMEL /BMLEH	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft / Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (seit 05/2025)
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMUV / BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz / Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (seit 05/2025)
BZE-LW	Bodenzustandserhebung Landwirtschaft
BZE-Wald	Bodenzustandserhebung Wald
DBG	Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft
DFV	Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche
eDNA	environmental DNA
EBV	Essential Biodiversity Variables
ENVASSO	Environmental Assessment of Soil for Monitoring
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FFH	Fauna-Flora-Habitat (-Gebiet/-Richtlinie/-Lebensraumtyp)
HNV	High Nature Value Farmland-Indikator/-Monitoring
KBU	Kommission Bodenschutz im Umweltbundesamt
LIB	Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels
LUCAS Soil	Land Use/Cover Area Frame Survey Soil
Monitoringzentrum/NMZB	Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität
MonViA	Bundesweites Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften
NaBioWald	Nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald



NBS 2030	Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030
ÖSF	Ökosystemfunktionen
ÖSL	Ökosystemleistungen
ÖSM	Ökosystemmonitoring
PLFA	Phospholipid-Fettsäuren
qPCR	quantitative Polymerase-Kettenreaktion
Soil BON	Soil Biodiversity Observation Network
UBA	Umweltbundesamt



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Mitglieder des Fachgremiums "Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen"	10
Abb. 2	Inhaltsübersicht Teil I des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.	11
Abb. 3	Beitrag von Bodenorganismen an Prozessen	13
Abb. 4	Die Vision eines bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings	26
Abb. 5	Inhaltsübersicht Teil II des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.	27
Abb. 6	Ziele des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings.	30
Abb. 7	Inhaltsübersicht Teil III des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.	36
Abb. 8	Schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring.....	37
Abb. 9	Empfehlung des Fachgremiums zur Organismenauswahl für eine bundesweite Ersterfassung.	40
Abb. 10	Empfohlenes Begleitdatenset für eine bundesweite Ersterfassung der Bodenbiodiversität.	55
Abb. 11	Inhaltsübersicht Teil IV des Bodenbiodiversitätsmonitoringkonzepts.....	64
Abb. 12	Arbeitspakete des UBA-Projekts „Basiserhebung Bodenbiodiversität“	67
Abb. 13	Überblick zum Aufbau (stark vereinfacht) des Rechercheprojekts „Erfassung von Bodenorganismen und deren Funktionen in einem bundesweiten Biodiversitätsmonitoring: Kenntnisstand und Praxistauglichkeit“	90
Abb. 14	Beschreibung horizont- und tiefenstufenbezogener Beprobung im Wald und Grünland.	95
Abb. 15	Vor- und Nachteile horizont- beziehungsweise tiefenstufenbezogener Beprobung	96
Abb. 16	Probenahmedesign gemäß Soil BON-Protokoll	104
Abb. 17	Probenahmedesign der Biologischen Bodenzustandserhebung im Wald	104

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Empfehlungen für den Zeitpunkt der Probenahme.	45
Tab. 2	Regenwürmer (Lumbricidae): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.	47
Tab. 3	Enchyträen (Enchytraeidae): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.....	48
Tab. 4	Mikroarthropoden (Collembolen, Oribatida, Gamasina): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.	49
Tab. 5	Nematoden (Nematoda): Bodenbiologische Messparameter und Kennzahlen.....	50
Tab. 6	Bodenmikrobiom (Bacteria, Archaea, Fungi, Protozoa): Molekularbiologische Messparameter und Kennzahlen.	53
Tab. 7	Begleitdaten: Ableitbare indirekte Parameter.	56
Tab. 8	Begleitdaten: Direkt im Feld zu ermittelnde Parameter	57
Tab. 9	Begleitdaten: Laboranalytisch zu bestimmende Parameter.	59
Tab. 10	Begleitdaten: Aus externen Datenquellen zu ermitteln.	60
Tab. 11	Tabellarische Übersicht zu laufenden und eingestellten Programmen der Erfassung von Bodenbiodiversität auf Länderebene.	88
Tab. 12	Tabellarische Übersicht zu laufenden und eingestellten Programmen der Erfassung von Bodenfunktionen auf Länderebene.	89
Tab. 13	Regenwürmer: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.	97
Tab. 14	Enchyträen: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.....	99
Tab. 15	Mikroarthropoden (Springschwänze und Milben): Empfehlungen zur Erfassungsmethode.	100
Tab. 16	Nematoden: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.....	101
Tab. 17	Bodenmikrobiom: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.....	103

DIN-Normen

DIN EN ISO 23611-1:2018-10 Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 1: Handauslese und Extraktion von Regenwürmern

DIN EN ISO 23611-2:2024-09 Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 2: Probenahme und Extraktion von Mikroarthropoden (Collembolen und Milben)

DIN EN ISO 23611-3:2020-01 Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 3: Probenahme und Extraktion von Enchytraeen

DIN EN ISO 23611-4:2023-12 Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 4: Probenahme, Extraktion und Bestimmung von Boden bewohnenden Nematoden

DIN EN ISO 23611-6:2013-11 Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 6: Anleitung für die Planung der Probenahme von Wirbellosen im Boden

Literaturverzeichnis

Ackermann, W., Fuchs, D. & Tschiche, J. (2020). *Ökosystem-Monitoring auf bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen (ÖSM-I): Abschlussbericht des gleichnamigen F+E-Vorhabens (FKZ: 3516 82 1100)*.

BfN-Skripten: Bd. 586. Bundesamt für Naturschutz.

<https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript586.pdf>

<https://doi.org/10.19217/skr586>

AG Boden. (2024). *Bodenkundliche Kartieranleitung, 6. Aufl. – Band 1: Grundlagen, Kennwerte und Methoden; Band 2: Geländeaufnahme und Systematik*.

Al-Maliki, S., Al-Taey, D. K. & Al-Mammori, H. Z. (2021). Earthworms and eco-consequences: Considerations to soil biological indicators and plant function: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 41(6), 512–523. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.02.003>

Anthony, M. A., Bender, S. F. & van der Heijden, M. G. A. (2023). Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(33), e2304663120.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>

Ballasus, H., Beylich, A., Bluhm, C., Buscot, F., Cordsen, E., Eisenhauer, N., Fröhlich, J., Glante, F., Grüneberg, E., Hommel, B., Höper, H., Jacob, F., Lachmann, C., Nabel, M., Pieper, S., Puhmann, H., Römbke, J., Roß-Nickoll, M., Russell, D. J., . . . Weiß, L. (2024). Wege zu einem bundesweit harmonisierten Monitoring: Verbesserung der Erfassung der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen. *Natur und Landschaft*, 99(9/10), 452–458. <https://doi.org/10.19217/NuL2024-09-04>

Bardgett, R. D. & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>

Barth, N., Borho, W., Cordsen, E., Heller, C., Höper, H., Ludwig, B., Marx, M., Meesenburg, H., Spörlein, P. & Weller, M. (2022). *Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen*:

Redaktionsgruppe „Bodendauerbeobachtung“ des ständigen Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).

Behan-Pelletier, V. M. (1999). Oribatid mite biodiversity in agroecosystems: role for bioindication. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3), 411–423. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00046-8)

Beylich, A., Fründ, H.-C. & Graefe, U. (1995). Environmental monitoring of ecosystems and bioindication by means of decomposer communities, 4, 25–34.
https://www.researchgate.net/publication/313040873_Environmental_monitoring_of_ecosystems_and_bioindication_by_means_of_decomposer_communities

Beylich, A., Graefe, U. (2010). Regenwürmer und Kleinringelwürmer als Bioindikatoren im Bodenmonitoring. *Gefahrstoffe. Reinhaltung der Luft*, 70(4), 119–123.

Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P., Sousa, J., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A. & Römbke, J. (2009). Indicators for monitoring soil biodiversity. *Integrated environmental assessment and management*, 5(4), 717–719. <https://doi.org/10.1897/IEAM-2009-064.1>

Bispo, A., Peres, G., Cluzeau, D., Graefe, U., Römbke, J., Rutgers, M., Fuchs, M., Sousa, J., Schulte, R., Dombos, M., Simon, B., Gál, A., Cortet, J., Chaussod, R., Ritz, K., Creamer, R., Winding, A., English, M., Boixadera, J. & Rubio, J. L. (2007). *ENVASSO (Environmental assessment of soil for monitoring) WP 5 – Decline in soil biodiversity*. EU Contract No. 022713, 22 pp.

Bolte, A., Ammer, C., Blaschke, M., Bräsicke, N., Caspari, S., Degen, B., Elmer, M., Eusemann, P., Gärtner, S., Goßner, M. M., Katzenberger, J., Kätzel, R., Kleinschmit, J., Krüger, I., Meyer, P., Michler, B., Pertl, C., Printzen, C., Sanders, T., . . . Kroiher, F. *Konzept für ein nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald)*. Thünen Working Paper 267.

https://nabiowald.thuenen.de/fileadmin/nabiowald/ThuenenWorkingPaper_267.pdf
<https://doi.org/10.3220/253-2025-29>

Bolte, A., Ammer, C., Kleinschmit, J., Kroiher, F., Krüger, I., Meyer, P., Michler, B., Müller-Kroehling, S., Sanders, T. & Sukopp, U. (2022). Nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald. *Natur und Landschaft*, 97(8), 398–401. <https://doi.org/10.19217/NuL2022-08-04>

Bonato Asato, A. E., Ebeling, A., Wirth, C., Eisenhauer, N. & Hines, J. (2025). Positive plant diversity effects on soil detritivore feeding activity and stability increase with ecosystem age. *Soil Biology and Biochemistry*, 200, 109637. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109637>

Bongers, T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 83(1), 14–19. <https://doi.org/10.1007/BF00324627>

Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.). (2016). *Schriftenreihe "Naturschutz und Biologische Vielfalt": 70(4). Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 4: Wirbellose Tiere (Teil 2)*. Bundesamt für Naturschutz.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2024). *Entwurf eines Vierten Gesetzes zur Änderung des Bundeswaldgesetzes. Referentenentwurf. Bearbeitungsstand: 31.10.2024*.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

<https://www.bmleh.de/SharedDocs/Gesetzestexte/DE/4-gesetz-aend-bundeswaldgesetz.html>

Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2024a). *Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030 (NBS 2030): Beschluss des Bundeskabinetts vom 18. Dezember 2024*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/nbs_2030_strategie_bf.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2024b). 1. Aktionsplan zur Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030 (NBS 2030). Zeitraum 2024 -2027.: Beschluss des Bundeskabinetts vom 18.12.2024. https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nbs_2030_aktionsplan_bf.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2023). *Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK): Kabinettsbeschluss vom 29.03.2023*. <https://www.bmu.de/download/aktionsprogramm-natuerlicher-klimaschutz>

Cameron, E. K., Martins, I. S., Lavelle, P., Mathieu, J., Tedersoo, L., Bahram, M., Gottschall, F., Guerra, C. A., Hines, J., Patoine, G., Siebert, J., Winter, M., Cesarz, S., Ferlian, O., Kreft, H., Lovejoy, T. E., Montanarella, L., Orgiazzi, A., Pereira, H., . . . Eisenhauer, N. (2019). Global mismatches in aboveground and belowground biodiversity. *Conservation Biology*, 33(5), 1187–1192. <https://doi.org/10.1111/cobi.13311>

Campiche, S. (2021). *Biologische Bodeneigenschaften – Recherche zum Stand der Technik von Methoden und Geräten zur Bestimmung: Teil Bodenfauna*. (KOBO-Bericht Nr. 2). Kompetenzzentrum Boden.

Chassain, J., Joimel, S. & Vieublé Gonod, L. (2023). Collembola taxonomic and functional diversity in conventional, organic and conservation cropping systems. *European Journal of Soil Biology*, 118, 103530. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103530>

Chernova, N. M. (1977). *Zoological successions in the course of decomposition of plant remains*. Nauka Publ. House.

Coffey, V. & Otfinowski, R. (2019). Legacies of afforestation on soil nematode community composition, structure, and diversity in a northern Canadian prairie. *Plant and Soil*, 435(1/2), 437–447. <https://www.jstor.org/stable/48703690>

Čoja, T. & Bruckner, A. (2006). The maturity index applied to soil gamasine mites from five natural forests in Austria. *Applied Soil Ecology*, 34(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.01.003>

Conti, E. & Mulder, C. (2022). Chemistry-driven Enchytraeidae assemblages acting as soil and ecosystem engineers in edaphic communities. *Ecological Indicators*, 144, 109529. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109529>

Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G. & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108561>

Culliney, T. (2013). Role of Arthropods in Maintaining Soil Fertility. *Agriculture*, 3(4), 629–659. <https://doi.org/10.3390/agriculture3040629>

Decker, P., Burkhardt, U., Hauser, H., Lindner, E. N., Moritz, L., Reip, H., Spelda, J. & Voigtländer, K. (2026). *Rote Liste und Gesamtartenliste der Hundertfüßer und Doppelfüßer (Myriapoda: Chilopoda et Diplopoda) Deutschlands: Rote Liste der Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands (12)*. BfN-Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag. <https://doi.org/10.19217/RL17012>

Delgado-Baquerizo, M., Reith, F., Dennis, P. G., Hamonts, K., Powell, J. R., Young, A., Singh, B. K. & Bissett, A. (2018). Ecological drivers of soil microbial diversity and soil biological networks in the Southern Hemisphere. *Ecology*, 99(3), 583–596. <https://doi.org/10.1002/ecy.2137>

Deutscher Bundestag (2021). Grobkonzept für das nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität: Unterrichtung durch die Bundesregierung. ISSN 0722-8333(Drucksache 19/26454). <https://dserver.bundestag.de/btd/19/264/1926454.pdf>

Díaz, C. & Simon, M. (2024). *Erfassung von Bodenorganismen und deren Funktionen in einem bundesweiten Biodiversitätsmonitoring: Kenntnisstand und Praxistauglichkeit.: Bericht für das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20660961>

Didden, W., Fründ, H.-C. & Graefe, U. (1997). Enchytraeids. Fauna in soil ecosystems. *Recycling processes, nutrient fluxes, and agricultural production*, 135–172. <https://research.wur.nl/en/publications/enchytraeids-fauna-in-soil-ecosystems/>

Djemiel, C., Dequiedt, S., Bailly, A., Tripied, J., Lelièvre, M., Horrigue, W., Jolivet, C., Bispo, A., Saby, N., Valé, M., Maron, P.-A., Ranjard, L. & Terrat, S. (2023). Biogeographical patterns of the soil fungal:bacterial ratio across France. *mSphere*, 8(5), e0036523. <https://doi.org/10.1128/msphere.00365-23>

Du Preez, G., Daneel, M., Goede, R. de, Du Toit, M. J., Ferris, H., Fourie, H., Geisen, S., Kakouli-Duarte, T., Korthals, G., Sánchez-Moreno, S. & Schmidt, J. H. (2022). Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 169, 108640. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108640>

Du Preez, G. C., Daneel, M. S., Wepener, V. & Fourie, H. (2018). Beneficial nematodes as bioindicators of ecosystem health in irrigated soils. *Applied Soil Ecology*, 132, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.008>

Eisenhauer, N. (2010). The action of an animal ecosystem engineer: Identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods. *Pedobiologia*, 53(6), 343–352. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2010.04.003>

Eisenhauer, N., Ristok, C., Guerra, C. A., Tebbe, C. C., Xylander, W., Babin, D., Bartkowski, B., Burkhard, B., Filser, J., Glante, F., Hohberg, K., Kleemann, J., Kolb, S., Lachmann, C., Lehmitz, R., Rillig, M., Römbke, J., Rueß, L., Scheu, S., . . . Toschki, A. (2024). Bodenbiodiversität. In C. Wirth, H. Bruehlheide, N. Farwig, J. Marx & J. Settele (Hrsg.), *Faktencheck Artenvielfalt: Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland*. oekom Verlag.

Eisenhauer, N. (2024). Warum das Bodenleben für den Naturschutz so wichtig ist: Zusammenhänge ober- und unterirdischer Biodiversität – Einblicke aus 20 Jahren Forschung im Jena Experiment. *Natur und Landschaft*, 99(9/10). <https://doi.org/10.19217/NuL2024-09-02>

Eisenhauer, N., Sünemann, M., Pollierer, M. M., Sun, X., Bardgett, R. D., Bartkowski, B., Delgado-Baquerizo, M., Dirilgen, T., Guerra, C. A., Mathieu, J., Niklaus, P. A., Romero, F., Ristok, C., Seeber, J.,

- Steinwandter, M., Stewart, J., van der Heijden, M. G. A., van der Putten, W. & Potapov, A. (2026). Soil biodiversity effects on ecosystems. *Nature Reviews Biodiversity*, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00123-z>
- Richtlinie (EU) 2025/2360 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. November 2025 zur Bodenüberwachung und für Bodenresilienz (Bodenüberwachungsgesetz) (2025). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj/eng>.
- FAO, ITPS, GSBI, SCBD, and EC. (2020). *State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities*. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Feketeová, Z., Mangová, B. & Čierniková, M. (2021). The Soil Chemical Properties Influencing the Oribatid Mite (Acari; Oribatida) Abundance and Diversity in Coal Ash Basin Vicinage. *Applied Sciences*, 11(8), 3537. <https://doi.org/10.3390/app11083537>
- Ferris, H. (2010). Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web. *European Journal of Soil Biology*, 46(2), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.01.003>
- Ferris, H., Bongers, T. & Goede, R. G. M. de (2001). A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*, 18(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(01\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00152-4)
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
- Fierer, N., Wood, S. & Mesquita, C. de. (2021). *How microbes can, and cannot, be used to assess soil health*. <https://doi.org/10.32942/OSF.IO/T9D5Y>
- Finn, D. R., Schroeder, J., Samad, M. S., Poeplau, C. & Tebbe, C. C. (2023). Importance of sample pre-treatments for the DNA-based characterization of microbiomes in cropland and forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 184(1), 109077. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109077>
- Förster, B., Römbke, J., Knacker, T. & Morgan, E. (1995). Microcosm study of the interactions between microorganisms and enchytraeid worms in grassland soil and litter. *European Journal of Soil Biology*(31), 21–27. <https://www.semanticscholar.org/paper/Microcosm-study-of-the-interactions-between-and-in-F%C3%B6rster-R%C3%B6mbke/de5150d8192791e4c0ad939a54cf354027d6b52a>
- Gergócs, V., Hufnagel, L. (2009). Application of oribatid mites as indicators (Review). *Applied Ecology and Environmental Research*, 7(1), 79–98. https://doi.org/10.15666/aeer/0701_079098
- Girgan, C., Du Preez, G., Marais, M., Swart, A. & Fourie, H. (2020). Nematodes and the effect of seasonality in grassland habitats of South Africa. *Journal of Nematology*, 52, 1–22. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-118>
- Graefe, U. (1997). Bodenorganismen als Indikatoren des biologischen Bodenzustands. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 85, 687–690.
- Graefe, U. & Schmelz, R. M. (1999). Indicator values, strategy types and life forms of terrestrial Enchytraeidae and other microannelids. *Newsletter on Enchytraeidae*, 6, 59–67. <https://www.ifab-hamburg.de/documents/GraefeSchmelz1999.pdf>

- Griffiths, B., Bonkowski, M., Roy, J [Jacques] & Ritz, K. (2001). Functional stability, substrate utilisation and biological indicators of soils following environmental impacts. *Applied Soil Ecology*, 16(1), 49–61. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00081-0)
- Guerra, C. A., Berdugo, M., Eldridge, D. J., Eisenhauer, N., Singh, B. K., Cui, H., Abades, S., Alfaro, F. D., Bamigboye, A. R., Bastida, F., Blanco-Pastor, J. L., los Ríos, A. de, Durán, J., Grebenc, T., Illán, J. G., Liu, Y.-R., Makhalanyane, T. P., Mamet, S., Molina-Montenegro, M. A., . . . Delgado-Baquerizo, M. (2022). Global hotspots for soil nature conservation. *Nature*, 610(7933), 693–698. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05292-x>
- Guerra, C. A., Wall, D. H. & Eisenhauer, N. (2021). Unearthing soil ecological observations. *SOIL ORGANISMS*, 93(2), 79–81. <https://doi.org/10.25674/so93iss2id164>
- Gulvik, M. E. (2007). Mites (Acari) as indicators of soil biodiversity and land use monitoring: A review. *Polish Journal of Ecology*, 55(3), 415–440. https://www.researchgate.net/publication/253931521_Mites_Acari_as_indicators_of_soil_biodiversity_and_land_use_monitoring_A_review
- Hanisch, J., Engell, I., Linsler, D., Scheu, S. & Potthoff, M. (2022). The role of Collembola for litter decomposition under minimum and conventional tillage. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(4), 529–538. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200077>
- Heidrich, V. & Beule, L. (2022). Are short-read amplicons suitable for the prediction of microbiome functional potential? A critical perspective. *iMeta*, 1(3), e38. <https://doi.org/10.1002/imt2.38>
- Hermans, S. M., Buckley, H. L., Case, B. S., Curran-Cournane, F., Taylor, M. & Lear, G. (2017). Bacteria as Emerging Indicators of Soil Condition. *Applied and environmental microbiology*, 83(1). <https://doi.org/10.1128/AEM.02826-16>
- Hopkin, S. P. (1997). *Biology of springtails: (Insecta: Collembola)*. Oxford Univ. Press. <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0605/96034592-d.html>
- Jeffery, S. & Gardi, C. (2010). *European Atlas of Soil Biodiversity*. European Commission, Publications Office of the European Union. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/biodiversity_atlas/ <https://doi.org/10.2788/94222>
- Joly, F.-X., Coq, S., Coulis, M., David, J.-F., Hättenschwiler, S., Mueller, C. W., Prater, I. & Subke, J.-A. (2020). Detritivore conversion of litter into faeces accelerates organic matter turnover. *Communications Biology*, 3(1), 660. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01392-4>
- Jones, A., Fernandez, U. O., Scarpa, S. & Eiselt, B. (2021). LUCAS Soil 2022. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2760/74624>
- Jongmans, A., Pulleman, M. M., Balabane, M., van Oort, F. & Marinissen, J. (2003). Soil structure and characteristics of organic matter in two orchards differing in earthworm activity. *Applied Soil Ecology*, 24(3), 219–232. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(03)00072-6)
- Kaneda, S. & Kaneko, N. (2008). Collembolans feeding on soil affect carbon and nitrogen mineralization by their influence on microbial and nematode activities. *Biology and Fertility of Soils*, 44(3), 435–442. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0222-x>



Karaban, K., Karaban, E. & Uvarov, A. (2012). Determination of life form spectra in soil Collembola communities : a comparison of two methods. *Polish Journal of Ecology*, Vol. 60(nr 1), 201–206.

Kardol, P., Cregger, M. A., Company, C. E. & Classen, A. T. (2010). Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects. *Ecology*, 91(3), 767–781.
<https://doi.org/10.1890/09-0135.1>

Karg, W. (1967). Synökologische Untersuchungen von Bodenmilben aus forstwirtschaftlich und landwirtschaftlich genutzten Böden. *Pedobiologia*(7), 198-214.

Kaufmann-Boll, C., Kern, M., Kastler, M., Niederschmidt, S., Kappler, W., Müller, F., Oellers, J., Toschki, A., Steffens, M., Wiesmeier, M. & Mathews, J. (2022). *Abschlussbericht Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für Bodenbiologie und organische Bodensubstanz: Teil A: Abschlussbericht zum bodenfachlichen Teil und Teil B: Konzept für den Start des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds*. Umweltbundesamt.

Kaufmann-Boll, C., Kern, M., Kastler, M., Niederschmidt, S., Kappler, W., Müller, F., Oellers, J., Toschki, A., Steffens, M., Wiesmeier, M. & Mathews, J. (2025). Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz. Umweltbundesamt. <https://www.uba.de/n117489de>

Kaufmann-Boll, C., Kern, M. & Niederschmidt, S. (2020). *Bodendaten in Deutschland: Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden* (3. Auflage). *Texte: 52/2020*. Umweltbundesamt.

Kaufmann-Boll, Carolin: Kern, Maïke, Kastler, M., Niederschmidt, S., Kappler, W., Müller, F., Oellers, J., Toschki, A., Steffens, M., Wiesmeier, M. & Mathews Jeannette. (2020). *Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds*. Umweltbundesamt.

Khydyrov, P. (2024). Soil gamasina mites (Acari: Gamasina) as components of biocenoses under arid conditions. *E3S Web of Conferences*, 474, 3004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447403004>

Koehler, H. (1999). *Raubmilben (Gamasina: Acari, Parasitiformes) in Küstendünen der südlichen Nordsee* (Faun.-ökol. Mitt. Nr. 26).

Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt. (2022). *Bodenbiodiversität unverzichtbar für den Klimaschutz und die Bereitstellung natürlicher Ressourcen. Empfehlungen der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU) für ein bundesweites bodenbiologisches Monitoring*. Umweltbundesamt.

Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (2008). *Biologische Verfahren zur Erfassung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Bioindikation) - Passives Biomonitoring mit Regenwürmern als Akkumulationsindikatoren: VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1a: Maximale Immissions-Werte, VDI 4230 Blatt 2*. Verein Deutscher Ingenieure.

Köninger, J., Labouyrie, M., Ballabio, C., Dulya, O., Mikryukov, V., Romero, F., Franco, A., Bahram, M., Panagos, P., Jones, A., Tedersoo, L., Orgiazzi, A., Briones, M. J. I. & van der Heijden, M. G. A. (2026). Pesticide residues alter taxonomic and functional biodiversity in soils. *Nature*(650), 367–373.
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09991-z>

Korthals, G. W., van Ende, A. de, van Megen, H., Lexmond, T. M., Kammenga, J. E. & Bongers, T. (1996). Short-term effects of cadmium, copper, nickel and zinc on soil nematodes from different feeding and life-

- history strategy groups. *Applied Soil Ecology*, 4(2), 107–117. [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00113-8](https://doi.org/10.1016/0929-1393(96)00113-8)
- Koschorreck, J., Conrad, A., Körner, A., Rütther, M., Schröter-Kermani, C., Mohaupt, V., Kolossa-Gehring, M., Ruedel, H. & Fliedner, A. (2013). *Die Umweltprobenbank*. Umweltbundesamt.
- Laine, M. B., Taipale, S. J. & Tirola, M. (2025). Comparison of methods for assessing fungi-to-bacteria ratio of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 61(5), 941–954. <https://doi.org/10.1007/s00374-025-01911-7>
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J [Jacques], Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E. & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6(1), 6707. <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>
- Langer, U., Kuhn, K., Weniger, T. & Neubert, E. (2012). *17 Jahre Regenwurmerfassung auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Sachsen-Anhalt.: Endbericht 2012*.
- Larink, O. (1997). Springtails and Mites: Important Knots in the Food Web of Soils. *Fauna in Soil Ecosystems*, 225–265. <https://doi.org/10.1201/9781482273571-8>
- Lavelle, P. & Spain, A. V. (2001). *Soil Ecology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/0-306-48162-6>
- Le Bayon, R.-C., Bullinger-Weber, G., Schomburg, A. C., Turberg, P., Schlaepfer, R. & Guenat, C. (2017). Earthworms as ecosystem engineers : a review. *Earthworms. Types, roles and research*, 129–177. <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/7b4e44a8-f23d-44cd-bf50-741b1f06c0b2>
- Lebrun, P. & van Straalen, N. M. (1995). Oribatid mites: prospects for their use in ecotoxicology. *Experimental & Applied Acarology*, 19(7), 361–379. <https://doi.org/10.1007/BF00145154>
- Leese, F., Woppowa, L., Bálint, M., Höß, S., Krehenwinkel, H., Lötters, S., Meissner, K., Nowak, C., Rausch, P., Rduch, V., Rulik, B., Weigand, A., Zimmermann, J., Koschorreck, J. & Züghart, W. (2023). *DNA-basierte Biodiversitätsanalysen im Natur- und Umweltschutz: Welche Optionen haben wir für eine Standardisierung? Eine Handlungsempfehlung aus Forschung und Praxis. BfN-Schriften: Bd. 666*. Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr666>
- Lehmitz, R., Römbke, J., Graefe, U., Beylich, A. & Krück, S. (2016). Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer (Lumbricidae et Criodrilidae) Deutschlands. 1. Fassung, Stand Januar 2013. In Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), *Schriftenreihe "Naturschutz und Biologische Vielfalt": 70(4). Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 4: Wirbellose Tiere (Teil 2) (Bd. 70)*. Bundesamt für Naturschutz. https://www.rote-liste-zentrum.de/wp-content/uploads/Download_RoteListe_Regenwuermer_2016_20210317-1605.zip
- Leibniz Research Network Biodiversity. (2024). *10 Must Knows from Biodiversity Science 2024*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10837769>
- Linden, D. R., Hendrix, P. F., Coleman, D. C. & van Vliet, P. C. J. Faunal Indicators of Soil Quality. In *Defining Soil Quality 1994* (S. 91–106). <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c6>

- Liu, L., Li, S., Wilson, G. W., Cobb, A. B., Zhou, C., Li, J [Jinsheng], Li, J [Jiahuan], Guo, L. & Huang, D. (2021). Nematode communities indicate anthropogenic alterations to soil dynamics across diverse grasslands. *Ecological Indicators*, 132, 108338. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108338>
- Ludwig, H., Stuhldreher, G., Streitberger, M., Pütz, S., Fartmann, T., Ackermann, W. & Züghart, W. (2025). *Bundesweites Insektenmonitoring (IM): Methodenhandbuch (Stand 2025)* (BfN-Schriften Nr. 749). <https://doi.org/10.19217/SKR749>
- Manu, M., Băncilă, R. I., Bîrsan, C. C., Mountford, O. & Onete, M. (2021). Soil mite communities (Acari: Mesostigmata) as indicators of urban ecosystems in Bucharest, Romania. *Scientific Reports*, 11(1), 3794. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83417-4>
- Manu, M., Iordache, V., Băncilă, R. I., Bodescu, F. & Onete, M. (2016). The influence of environmental variables on soil mite communities (Acari: Mesostigmata) from overgrazed grassland ecosystems – Romania. *Italian Journal of Zoology*, 83(1), 89–97. <https://doi.org/10.1080/11250003.2015.1091897>
- MonVia. (2024). *MonViA Indikatorenbericht 2024: Bundesweites Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften*. <https://www.agrarmonitoring-monvia.de/monvia-das-bundesweite-monitoring-der-biologischen-vielfalt-in-agrarlandschaften/monitoring-der-biologischen-vielfalt>
- Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität (Hrsg.) (2024). *Tagungsbericht, Fachtagung: Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring am 05.06. bis 06.06.2023*. https://www.monitoringzentrum.de/sites/default/files/2024-03/Ergebnisbericht_FT_Boden_05.06.-06.06.2023_web.pdf
- Neher, D. A. (2001). Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology*, 33(4), 161–168. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2620512/>
- Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität (Hrsg.). (2022, 26. September). *Eckpunktepapier zur Weiterentwicklung des bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitorings durch das Fachgremium „Monitoring der Bodenbiodiversität und -funktionen“*. https://www.monitoringzentrum.de/sites/default/files/2023-04/NMZB_Eckpunktepapier_Bodenmonitoring_2023.pdf
- Norton, R. A. & Behan-Pelletier, V. M. (2009). Oribatida. In G. W. Krantz & D. E. Walter (Hrsg.), *A Manual of Acarology* (3. Aufl., S. 421–564). Texas Tech University Press.
- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A. & Fernández-Ugalde, O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 140–153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Pelosi, C. & Römbke, J. (2016). Are Enchytraeidae (Oligochaeta, Annelida) good indicators of agricultural management practices? *Soil Biology and Biochemistry*, 100, 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.06.030>
- Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L. & Cluzeau, D. (2011). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia*, 54, S77-S87. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.09.015>

- Pfiffner, L. (2022). *Regenwürmer - Baumeister fruchtbarer Böden*. (FiBL-Merkblatt).
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7022532>
- Pflug, A. & Wolters, V. (2002). Collembola communities along a European transect. *European Journal of Soil Biology*, 38(3-4), 301–304. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(02\)01163-9](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(02)01163-9)
- Phillips, H. R. P., Cameron, E. K., Eisenhauer, N., Burton, V. J., Ferlian, O., Jin, Y., Kanabar, S., Malladi, S., Murphy, R. E., Peter, A., Petrocelli, I., Ristok, C., Tyndall, K., van der Putten, W. & Beaumelle, L. (2024). Global changes and their environmental stressors have a significant impact on soil biodiversity-A meta-analysis. *iScience*, 27(9), 110540. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110540>
- Postma-Blaauw, M. B., Goede, R. G. de, Bloem, J., Faber, J. H. & Brussaard, L. (2012). Agricultural intensification and de-intensification differentially affect taxonomic diversity of predatory mites, earthworms, enchytraeids, nematodes and bacteria. *Applied Soil Ecology*, 57, 39–49.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.02.011>
- Potapov, A. M., Sun, X., Barnes, A. D., Briones, M. J. I., Brown, G. G., Cameron, E. K., Chang, C.-H., Cortet, J., Eisenhauer, N., Franco, A. L., Fujii, S., Geisen, S., Gongalsky, K. B., Guerra, C., Haimi, J., Handa, I. T., Janion-Scheepers, C., Karaban, K., Lindo, Z., . . . Schmidt, O. (2022). Global monitoring of soil animal communities using a common methodology. *SOIL ORGANISMS*, 94(1), 55–68.
<https://doi.org/10.25674/so94iss1id178>
- Prendergast-Miller, M., Cole, L., Standen, V., Rees, R., Parker, J., Leith, I. & Sheppard, L. (2008). Are enchytraeid worms (Oligochaeta) sensitive indicators of ammonia-N impacts on an ombrotrophic bog? *European Journal of Soil Biology*, 44(1), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.08.039>
- Pulleman, M. M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G. & Rutgers, M. (2012). Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 529–538.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
- Ramírez, P. B., Fuentes-Alburquenque, S., Díez, B., Vargas, I. & Bonilla, C. A. (2020). Soil microbial community responses to labile organic carbon fractions in relation to soil type and land use along a climate gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 141(14), 107692.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107692>
- Rillig, M. C., Ryo, M., Lehmann, A., Aguilar-Trigueros, C. A., Buchert, S., Wulf, A., Iwasaki, A., Roy, J [Julien] & Yang, G. (2019). The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity. *Science (New York, N.Y.)*, 366(6467), 886–890. <https://doi.org/10.1126/science.aay2832>
- Römbke, J. & Jänsch, S., Höfer, H., Horak, F., Roß-Nickoll, M., Russell, D., Burkhardt, U., & Toschki, A. (2013). State of knowledge of enchytraeid communities in German soils as a basis for biological soil quality assessment. *Soil Organisms*(85(2), 123–146.
- Ruf, A. (1998). A maturity index for predatory soil mites (Mesostigmata: Gamasina) as an indicator of environmental impacts of pollution on forest soils. *Applied Soil Ecology*, 9(1-3), 447–452.
[https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00103-6)
- Ruf, A. (2020). Die Raubmilbenfauna als Indikator für Bodenqualität - was zeigen Milben an, das Regenwürmer nicht können? *Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz*, 72, 121–133.

- Rusek, J. (1998). Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 7(9), 1207–1219. <https://doi.org/10.1023/A:1008887817883>
- Russell, D. J. (2004). *Feststellung und Modellierung der kurzfristigen Jahresdynamik und kleinräumigen Variabilität von endogäischen Insekten auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Baden-Württemberg. Erhöhung der Aussagekraft des Monitoringprogramms in Rheinauen. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS*. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/82221>
- Russell, D. J., Tebbe, C. C., Ashwood, F., Scheunemann, N. & Hohberg, K. (2024). Beeindruckende Vielfalt des Bodenlebens. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.19217/NuL2024-09-01> (13784 KB).
- Rutgers, M., Mulder, C. & Anton J. Schouten. (2008). *Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality* (Bd. 60760400). <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607604009.pdf>
- Sánchez-Moreno, S. & Ferris, H. (2018). Nematode ecology and soil health. In R. A. Sikora, D. Coyne, J. Hallmann & P. Timper (Hrsg.), *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture* (S. 62–86). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781786391247.0062>
- Schaefer, I., Krashevskaya, V., Diaz, C., Essfeld, F. & Beule, L. *Identifizierung potenzieller Förderschwerpunkte zu genetischen Sequenzier- und Analysemethoden für das behördliche Monitoring der Bodenbiodiversität. Gutachten für das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB)*. Bundesamt für Naturschutz. <https://zenodo.org/records/19352224> <https://doi.org/10.5281/zenodo.19352224>
- Scherzinger, F., Schädler, M., Reitz, T., Yin, R., Auge, H., Merbach, I., Roscher, C., Harpole, W. S., Blagodatskaya, E., Siebert, J., Ciobanu, M., Marder, F., Eisenhauer, N. & Quaas, M. (2024). Sustainable land management enhances ecological and economic multifunctionality under ambient and future climate. *Nature Communications*, 15(1), 4930. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48830-z>
- Schlöter, M., Nannipieri, P., Sørensen, S. J. & van Elsas, J. D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>
- Schmidl, J., Bussler, H. & Hofmann, G. & Esser, J. (2021). *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 5: Wirbellose Tiere (Teil 3): Rote Liste und Gesamtartenliste der Kurzflüglerartigen, Stutzkäferartigen, landbewohnenden Kolbenwasserkäfer und Ufer-Kugelmücken (Coleoptera: Polyphaga: Staphylinioidea, Histeroidea, Hydrophiloidea partim; Myxophaga: Sphaeriidae) Deutschlands*. 31-95. Landwirtschaftsverlag.
- Schrader, S. & Seibel, C. (2001). Impact of cultivation management in an agroecosystem on hot spot effects of earthworm middens. *European Journal of Soil Biology*, 37(4), 309–313. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01102-5](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01102-5)
- Schröer, L., Bach, A., Oellers, J., Nabel, M., Kirse, A., Stratemann, L., Toschki, A. & Roß-Nickoll, M. (2024). Hürden und Chancen der Integration DNA-basierter Methoden für ein Bodenbiodiversitätsmonitoring in Agrarlebensräumen. *Natur und Landschaft*, 99(9/10). <https://doi.org/10.19217/NuL2024-09-06> (3638 KB).
- Seeber, J. (2024). *Monitoring of Soil Biodiversity Challenges and lessons learnt from the first year of the Biodiversa+ pilot "Soil biodiversity in protected, near-natural forests"*. https://www.biodiversa.eu/wp-content/uploads/2025/04/Biodiversa_D2.23-Soil-pilot-year2-report-1.pdf

- Seeber, J., Blasbichler, H., Brunbjerg, A. K., Cabon, M., Gerber, R., Lambrechts, S., Özdoğan, D., Sagun, C. & Prestes, A. (2025). *Monitoring of soil biodiversity: Challenges and lessons learnt from the second year of the Biodiversa+ pilot "Soil biodiversity in protected, near-natural forests"*.
<https://pure.au.dk/portal/da/publications/monitoring-of-soil-biodiversity-challenges-and-lessons-learnt-fro/> <https://doi.org/10.5281/zenodo.15261960>
- Seifert, B. (2011). Rote Liste und Gesamtartenliste der Ameisen (Hymenoptera: Formicidae) Deutschlands. In Binot-Hafke et al. (Red.): *Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands, Band 3: Wirbellose Tiere (Teil 1)*.
- Smith, L. C., Orgiazzi, A., Eisenhauer, N., Cesarz, S., Lochner, A., Jones, A., Bastida, F., Patoine, G., Reitz, T., Buscot, F., Rillig, M. C., Heintz-Buschart, A., Lehmann, A. & Guerra, C. A. (2021). Large-scale drivers of relationships between soil microbial properties and organic carbon across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 30(10), 2070–2083. <https://doi.org/10.1111/geb.13371>
- Springett, J. A., Brittain, J. E. & Springett, B. P. (1970). Vertical Movement of Enchytraeidae (Oligochaeta) in Moorland Soils. *Oikos*, 21(1), 16. <https://doi.org/10.2307/3543833>
- Thakur, M. P., Reich, P. B., Hobbie, S. E., Stefanski, A., Rich, R., Rice, K. E., Eddy, W. C. & Eisenhauer, N. (2018). Reduced feeding activity of soil detritivores under warmer and drier conditions. *Nature Climate Change*, 8(1), 75–78. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0032-6>
- Toschki, A., Burkhardt, U., Haase, H., Höfer, H. & Russell, D. (2021). *Die Edaphobase-Länderstudien Synökologische Untersuchungen von Bodenorganismen in einem Biotop- und Standortgradienten in Deutschland 2014–2018*. https://elib.tiho-hannover.de/receive/tiho_mods_00006143
- Toschki, A., Oellers, J., Rumohr, Q., Roß-Nickoll, M., Daniels, B., Schäffer, A. & Sybertz, A. (2021). *Integriertes Monitoring in der Agrarlandschaft - Erfassung der ökologischen Auswirkungen des chemischen Pflanzenschutzes*. FKZ: 3717 64 412 0.
- Tsiafouli, M. A., Thébault, E., Sgardelis, S. P., Rüter, P. C. de, van der Putten, W. H., Birkhofer, K., Hemerik, L., Vries, F. T. de, Bardgett, R. D., Brady, M. V., Bjornlund, L., Jørgensen, H. B., Christensen, S., Hertefeldt, T. d', Hotes, S., Gera Hol, W. H., Frouz, J., Liiri, M., Mortimer, S. R., . . . Hedlund, K. (2015). Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21(2), 973–985. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>
- Umweltbundesamt. (2024). *Leistungsbeschreibung (Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz): Vorbereitung und Durchführung einer bundesweiten Basiserhebung Bodenbiodiversität zur Ableitung lebensraumtypischer Referenzwerte für einen guten ökologischen Bodenzustand; Untersuchung des Wirkungsgefüges, Etablierung eines bundesweiten Messnetzes*. Kurztitel: *Basiserhebung Bodenbiodiversität*. FZK: 3724NK6010.
- van der Putten, W. H., Mudgal, A., Turbé, A., Toni, A. de, Lavelle, P., Benito, P. & Ruiz, N. (2010). Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. <https://research.wur.nl/en/publications/soil-biodiversity-functions-threats-and-tools-for-policy-makers/>
- van Eekeren, N., Boer, H. de, Hanegraaf, M., Bokhorst, J., Nierop, D., Bloem, J., Schouten, T., Goede, R. de & Brussaard, L. (2010). Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1491–1504. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.05.016>

- van Vliet, P. C. J., Radcliffe, D., Hendrix, P. F. & Coleman, D. C. (1998). Hydraulic conductivity and pore-size distribution in small microcosms with and without enchytraeids (Oligochaeta). *Applied Soil Ecology*, 9(1-3), 277–282. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(97\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(97)00053-X)
- van Vliet, P. C. J., West, L. T., Hendrix, P. F. & Coleman, D. C. (1993). The influence of Enchytraeidae (Oligochaeta) on the soil porosity of small microcosms. *Geoderma*, 56(1-4), 287–299. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90118-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90118-5)
- Vogel, H.-J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Ließ, M., Weller, U., Wiesmeier, M. & Wollschläger, U. (2019). Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Frontiers in Environmental Science*, 7, Artikel 164. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- Walter, R. & Burmeister, J. (2022). *35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern - Band 5: Regenwürmer*. <https://lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/35-jahre-bdf-landwirtschaft-regenwuermmer-lfl-schriftenreihe.pdf>
- Wang, C. & Kuzyakov, Y. (2024). Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources. *The ISME journal*, 18(1). <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae073>
- Wellbrock, N., Makowski, V., Bielefeldt, J., Dühnelt, P., Grüneberg, E., Bienert, O., Blum, U., Drescher-Larres, K., Eickenscheidt, N., Evers, J., Falk, W., Greve, M., Hartmann, P., Henry, J., Jacob, F., Martin, J., Milbert, G., Riek, W., Rückamp, D., . . . Süß Rüdiger. (2022). *Arbeitsanleitung für die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III)* (Thünen Working Paper Nr. 195). Thünen-Institut für Waldökosysteme.
- Wilhelm, R. C., Amsili, J. P., Kurtz, K. S. M., van Es, H. M. & Buckley, D. H. (2023). Ecological insights into soil health according to the genomic traits and environment-wide associations of bacteria in agricultural soils. *ISME communications*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s43705-022-00209-1>
- Wirth, C., Bruelheide, H., Farwig, N., Marx, J. & Settele, J. (Hrsg.). (2024). *Faktencheck Artenvielfalt: Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland*. oekom Verlag. <https://doi.org/10.14512/9783987263361>
- Yeates, G. W. (1994). Modification and qualification of the nematode maturity index. *Pedobiologia*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Modification-and-qualification-of-the-nematode-Yeates/9630f9ba9f233bb2b377cd99a815b7ee711c4c93>
- Zeiss, R. (2024). Ist Bodenschutz gleichzeitig Naturschutz? Welche Rolle können Schutzgebiete spielen? Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.19217/NuL2024-09-09>
- Zhang, G., Sui, X., Li, Y., Jia, M., Wang, Z., Han, G. & Wang, L [Lichun] (2020). The response of soil nematode fauna to climate drying and warming in *Stipa breviflora* desert steppe in Inner Mongolia, China. *Journal of Soils and Sediments*, 20(4), 2166–2180. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02555-5>
- Zizka, V. M. A., Koschorreck, J., Khan, C. C. & Astrin, J. J. (2022). Long-term archival of environmental samples empowers biodiversity monitoring and ecological research. *Environmental sciences Europe*, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00618-y>

Anhang 1: Erfassung von Bodenbiodiversität auf Länderebene (Stand 01/2024)

Das Arbeitsdokument des Fachgremiums „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ am Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität wurde in Rücksprache mit den Fachbehörden der Länder erstellt und bietet einen Überblick der bodenbiologischen Erfassungen auf Länderebene. Das gesamte Dokument mit textlichen Ausführungen steht hier zum Download bereit: https://www.monitoringzentrum.de/sites/default/files/2024-03/Enduebersicht_Bund-Laender-Erfassungen_Bodenbiodiversitaet.pdf

Tab. 11 Tabellarische Übersicht zu laufenden und eingestellten Programmen der Erfassung von Bodenbiodiversität auf Länderebene.

Land	Ar- chaeen	Bakte- rien	Pilze	Protisten	Nema- toden	Collem- bolen	Enchy- träen	Regen- würmer	Lauf- käfer	Milben	Milli- pedes	Ass- eln	Spin- nen
BW	○	○	○	○		✗●	①	●	●○①	●①	①	①	○①
BY						①		●					
SH		①	①				●	●					
ST								●	✗				
TH							✗	✗●✗	●	①			
NI							●	●					
NW							✗	✗					
BB								●					
HH							●	●					
MV								①					
BBZE- Wald	○	○	○	○		○	○	○		○			

● laufende Erhebungen, ○ geplante Erhebungen, ✗ eingestellte wiederholte Erhebungen, ① einmalige Erhebung

BW – Baden-Württemberg, **BY** – Bayern (Angaben aktualisiert in 06/2026), **SH** – Schleswig-Holstein, **ST** – Sachsen-Anhalt, **TH** – Thüringen, **NI** – Niedersachsen, **NW** – Nordrhein-Westfalen, **BB** – Brandenburg, **HH** – Hamburg, **MV** – Mecklenburg-Vorpommern, **BBZE-Wald** – Biologische Bodenzustandserhebung im Wald (bundesweit)



Tab. 12 Tabellarische Übersicht zu laufenden und eingestellten Programmen der Erfassung von Bodenfunktionen auf Länderebene.

Land	Bodenatmung	Mikrobielle Biomasse	Enzym-aktivitäten	Nährstoff-kreisläufe	Streu-abbau	Biomasse Arthropoden	Biomasse Regen-würmer
BW	✗	✗	○	○	①	○	●
BY		✗					●
SH	●	●	●				●
ST	●	●	✗○				●
TH	✗○	✗○	✗				✗
NI	✗	✗					●
NW	✗	✗	✗				✗
BB	✗	✗					●
HH	●						●
MV	①	①					①
NWFVA	●	●		●	①		
RP				●			
SN	✗	✗	✗	✗●			
BBZE-Wald							○

● laufende Erhebungen, ○ geplante Erhebungen, ✗ eingestellte wiederholte Erhebungen, ① einmalige Erhebung

BW – Baden-Württemberg, **BY** – Bayern, **SH** – Schleswig-Holstein, **ST** – Sachsen-Anhalt, **TH** – Thüringen, **NI** – Niedersachsen, **NW** - Nordrhein-Westfalen, **BB** – Brandenburg, **HH** – Hamburg, **MV** - Mecklenburg-Vorpommern, **NWFVA** - Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (BDF Waldstandorte in den Bundesländern Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein), **RP** - Rheinland-Pfalz, **SN** – Sachsen, **BBZE-Wald** – Biologische Bodenzustandserhebung im Wald (bundesweit)

Anhang 2: Das Rechercheprojekt „Erfassung von Bodenorganismen und deren Funktionen in einem bundesweiten Bodenbiodiversitätsmonitoring: Kenntnisstand und Praxistauglichkeit“

Ziel des Vorhabens war es, eine aktuelle Informationsgrundlage zur Aussagekraft und den praktischen Erfordernissen zur Erfassung von Bodenorganismengruppen und deren Funktionen zusammenzutragen. Des Weiteren sollten bestehende Lücken im Kenntnisstand oder Limitierungen in der Erfassung und Analyse aufgedeckt und somit Forschungs- und Handlungsbedarfe aufgezeigt werden. Die im Rahmen dieses Projekts erzielten Ergebnisse stellen ein Screening der zum Bearbeitungszeitraum verfügbaren Informationen dar. Die Verwendung von Metabarcoding als Bestimmungsmethode im Vergleich oder in Kombination zu den etablierten morphologisch basierten Bestimmungsansätzen wurde bewertet. Mithilfe dieser Informationsgrundlage hat das Fachgremium „Monitoring der Bodenbiodiversität und ihrer Funktionen“ am Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität die Auswahl der Bodenorganismen(-gruppen) und Bodenbiodiversitätsfunktionen getroffen, die aufgrund des guten Kenntnisstands einen hohen Informationswert haben und deren Erhebung hinsichtlich des zeitlichen und finanziellen Aufwands, der Verfügbarkeit von Fachleuten und dem Vorhandensein methodischer Standards praktikabel sind.

Konkludierende Bewertung



Abb. 13 Überblick zum Aufbau (stark vereinfacht) des Rechercheprojekts „Erfassung von Bodenorganismen und deren Funktionen in einem bundesweiten Biodiversitätsmonitoring: Kenntnisstand und Praxistauglichkeit“ (Diáz und Simon 2023).

Anhang 3: Bioindikatorischer Wert der für die bundesweite Ersterfassung ausgewählten Bodenorganismengruppen

Regenwürmer

Laut Faktencheck Artenvielfalt (Eisenhauer et al. 2024) ist der Kenntnisstand zur Gruppe der Lumbricidae unter den Bodenorganismen am höchsten. Regenwürmer sind gemäß ihrem Lebensraum und der Nahrungswahl drei funktionellen Hauptgruppen (epigäisch, anözisch, endogäisch) zugeordnet (Campiche 2021; Pérès et al. 2011). Diese Gruppen erfüllen verschiedene Bodenfunktionen und reagieren unterschiedlich sensitiv auf Störungen oder chemische Verunreinigen (Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, 2008; Rutgers et al. 2008; Pérès et al. 2011). Abundanz oder Biomasse von Regenwürmern sind häufig genutzte Indikatoren und auch die Diversität der funktionellen Gruppen kann als Proxy für die Habitatqualität und Bodenfunktionen fungieren (Kapitel 8.5). Ein wichtiger Vorteil von Regenwürmern als Indikatoren ist, dass die taxonomische Identifizierung relativ einfach ist. Regenwürmer können mit bloßem Auge beobachtet werden und sind allgemein bekannt und eignen sich daher für die Kommunikation mit Stakeholdern (Pulleman et al. 2012). Regenwürmer werden daher sowohl vom EU-Projekt Environmental Assessment of Soil for Monitoring (ENVASSO) (Bispo et al. 2007; Bispo et al. 2009) als auch im F+E Vorhaben „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“ (Kaufmann-Boll et al. 2025) als Vertreter für ein Bodenmonitoring empfohlen.

Regenwürmer (*Lumbricidae*) prägen als Ökosystemingenieure maßgeblich die Bodenstruktur (Eisenhauer 2010; Le Bayon et al. 2017). Die von Regenwürmern gebildeten Ton-Humus-Komplexe stabilisieren Bodenaggregate und verbessern dadurch die Wasserhaltefähigkeit des Bodens. Zusammen mit den Grabtätigkeiten, die ein Lockern, Durchmischen und Durchlüften des Bodenkörpers bewirken (Bioturbation), beeinflusst der Regenwurm so maßgeblich den Gas-, Wasser- und Nährstoffhaushalt (Al-Maliki et al. 2021; Jongmans et al. 2003).

Als Primärzersetzer tragen Regenwürmer neben der Einarbeitung von Pflanzenresten in den Boden auch maßgeblich zu deren Zersetzung bei und erhöhen damit den Gehalt an organischer Substanz im Boden (Joly et al. 2020; Lehmitz et al. 2016). Standortabhängig weisen Regenwürmer mitunter sehr hohe Biomassen auf (Langer et al. 2012; Lehmitz et al. 2016), sodass ihnen für die Bodenfruchtbarkeit und als Nahrungsquelle für andere Organismenquellen eine wichtige Bedeutung zukommt (Kaufmann-Boll et al. 2025; Lehmitz et al. 2016).

Aufgrund ihrer Sensitivität gegenüber Bodenschadstoffen wie Schwermetallen und organischen Schadstoffen werden Regenwürmer als Bioindikatoren in kontaminierten Böden berücksichtigt (Pérès et al. 2011). Sie reagieren darüber hinaus auf forst- und landwirtschaftliche Praktiken, wie Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Einsatz von Pestiziden und Zufuhr organischer Stoffe (Jongmans et al. 2003; Pérès et al. 2011). Ebenso sind sie sensibel gegenüber verschiedenen klimatischen Faktoren, wie Temperatur und Feuchteverhältnissen (Kaufmann-Boll et al. 2025). Insgesamt werden Regenwürmer in ökotoxikologischen Studien und Monitoringprogrammen ausgesprochen häufig als Bioindikatoren verwendet (Campiche 2021).

Enchyträen

Enchyträen (*Enchytraeidae*) sind in verschiedenen Böden und Landnutzungsformen weit verbreitet. Ihre Vielfalt und Häufigkeit hängt hauptsächlich von den Bodenparametern pH-Wert, Bodenfeuchtigkeit und organischer Substanz ab (Pelosi und Römbke 2016; Prendergast-Miller et al. 2008; Römbke et al. 2013; Springett et al. 1970;) sowie von biologischen Wechselwirkungen, zum Beispiel der bevorzugten Besiedlung von Regenwurmhumus, ab (Pelosi und Römbke 2016; Schrader und Seibel 2001). Enchyträen sind an der Zersetzung von organischer Substanz beteiligt. Ihre Kotballen sind Hotspots für mikrobielle Aktivität und damit für Mineralisierungsprozesse (Förster et al. 1995, van der Putten et al. 2010).

Aufgrund ihrer Grabtätigkeit und hohen Fraßrate sind Enchyträen an der Entwicklung der Bodenstruktur maßgeblich beteiligt, auch auf landwirtschaftlichen Böden trotz der dort häufig geringen Populationsdichte (Pelosi und Römbke 2016). Sie beeinflussen die Bodenporosität, indem sie das Porenvolumen erhöhen (Pelosi und Römbke 2016; Van Vliet et al. 1993). Dies führt zu einer Verringerung der Bodenverdichtung und einer Verbesserung der hydraulischen Leitfähigkeit (Linden et al. 1994; Pelosi und Römbke 2016; Van Vliet et al. 1998).

Da Enchyträen chemische Elemente des Bodens sowohl passiv durch ihre Haut als auch aktiv durch die Nahrung aufnehmen, gehören sie zu den am besten geeigneten Gruppen für die Untersuchung der tatsächlichen Auswirkungen von Schwermetallen auf die Bodenbiota (Conti und Mulder 2022). Aufgrund ihrer ökologischen Bedeutung empfehlen Römbke et al. (2013) die Verwendung von Enchyträen für die bodenbiologische Standortklassifizierung und -bewertung. Die Anzahl der Enchyträen wird in neueren Studien zum Beispiel zur Bewertung der Auswirkungen der Bewirtschaftung auf die Bodenqualität in Grünlandsystemen als Bioindikator verwendet (Griffiths et al. 2010; Postma-Blaauw et al. 2012; van Eekeren et al. 2010).

Springschwänze

Collembolen besetzen verschiedene ökologische Nischen im Boden und werden dabei in drei Lebensformen eingeteilt: epedaphisch (auf der Bodenoberfläche lebend), hemiedaphisch (an der Grenzschicht zwischen Streu und Boden) und euedaphisch (im Porenraum zwischen Boden- oder Sandpartikeln) (Hopkin 1997, Larink 1997). Geographische Faktoren (Klima, Boden, Vegetation) beeinflussen Artenzusammensetzung, Abundanz und Funktionsstruktur der Collembolengemeinschaft (Pflug und Wolters 2002).

Sie ernähren sich überwiegend von organischem Detritus oder weiden Bakterien-, Algen- und Pilzrasen ab und nehmen damit Einfluss auf die Zersetzung organischer Bodensubstanz, die Nährstoffdynamik, die Bodenstrukturbildung sowie die Regulierung von Mikrobenpopulationen (Chassain et al. 2023; Hanisch et al. 2022; Kaneda und Kaneko 2008; Lavelle und Spain 2001; Rusek 1998; Toschki; Burkhardt et al. 2021).

Springschwänze (*Collembola*) gelten als gute Bioindikatoren für die Bodenbiodiversität und spielen eine wichtige Rolle bei der Erfüllung essenzieller Bodenfunktionen (Chassain et al. 2023). Für die bioindikatorische Bewertung von Böden sind insbesondere die selteneren stenöken Arten mit hoher Anfälligkeit gegenüber Umweltveränderungen und enger Bindung an das Bodenmilieu von großer Bedeutung.



Hornmilben

Die artenreichen Hornmilben (*Oribatida*) kommen in fast allen Lebensräumen vor und stellen dabei den größten Anteil der Mikroarthropoden dar (Gergócs und Hufnagel 2009). Sie ernähren sich hauptsächlich von lebenden oder abgestorbenen Pflanzenteilen, Pilzen oder toten Gliederfüßern, manche Arten jagen opportunistisch Nematoden (Behan-Pelletier 1999; Norton und Behan-Pelletier 2009). Damit tragen sie auf vielfältige Weise zur Struktur des Nahrungsnetzes bei (Lebrun und van Straalen 1995) und sind aktiv am Zersetzungsprozess organischen Materials beteiligt (Feketeová et al. 2021). Sie reagieren extrem empfindlich auf viele Arten von Bodenstörungen, wie Schwermetall- oder chemische Belastungen (Gergócs und Hufnagel 2009; Gulvik 2007). Eine langsame Entwicklung, geringe Fruchtbarkeit und ein langes Larvenstadium der Oribatidenmilben können Hinweise auf langfristig bestehende Störungen im Boden sein. Die geringe Ausbreitungsfähigkeit (Lebrun und van Straalen 1995) ist von großer Bedeutung für das Indikatorenpotenzial der Hornmilben, da sie kaum aus Bereichen fliehen können, die von Stressfaktoren betroffen sind (Gergócs und Hufnagel 2009).

Raubmilben

Raubmilben (*Gamasina*) eignen sich als Bodenindikatoren aufgrund ihrer funktionellen Rolle als Räuber, ihres hohen Artenreichtums, der Robustheit gegenüber Probenahme- und Extraktionsmethoden und ihrer guten Identifizierbarkeit (Koehler 1999). In zahlreichen Ökosystemen wie zum Beispiel Wald, landwirtschaftliche Flächen und auch städtischen Gebieten besetzen sie unterschiedliche Nischen im Boden und der Streu. Gamasina verändern nicht direkt die Bodenstruktur oder Pflanzenproduktivität. Als Raubtiere beeinflussen sie jedoch das Populationswachstum anderer Organismen und wirken sich so indirekt auf die Bodenqualität und Leistung des Ökosystems aus (Culliney 2013; Koehler 1999; Manu et al. 2021). Zum Beispiel ist die Präsenz von Raubmilben in Agrarsystemen von großer Bedeutung für die nachhaltige Schädlingsbekämpfung, da sie durch ihre räuberische Aktivität zur Regulierung von Populationsdichten potenzieller Schädlinge, zum Beispiel phytopathogene Nematoden, beitragen (Khydyrov 2024). Die meisten Raubmilben-Arten haben spezielle ökologische Anforderungen, wie hohe Bodenfeuchte, mittlere Bodentemperatur und niedrige pH-Werte und besitzen eine ausgeprägte Empfindlichkeit gegenüber Umwelt- und anthropogenen Störungen (Manu et al. 2016, Manu et al. 2021). Gamasina-Gemeinschaften zeigen in häufig und wiederholt gestörten Agrarsystemen Verarmungen hinsichtlich Abundanz und Artenzahl (Karg 1967; Koehler 1999).

Fadenwürmer

Fadenwürmer (*Nematoda*) sind ubiquitär in einer Vielzahl von Lebensräumen verbreitet (Du Preez et al. 2022). Da sie verschiedene trophische Ebenen besetzen, nehmen Nematoden eine Schlüsselrolle im Bodennahrungsnetz ein. Als aquatische Organismen ist ihre biologische Aktivität an wassergefüllte Porenräume gebunden. Nematoden reagieren sensibel auf Störungen, wie den Rückgang des Bodenwassergehalts (zum Beispiel durch Klimawandel bedingt) (Kardol et al. 2010; Zhang et al. 2020).

Sie gelten aufgrund ihrer trophischen und funktionellen Vielfalt, ihrer geringen Motilität und der Empfindlichkeit gegenüber Umweltbedingungen als hervorragende Indikatoren für die Bewertung der Gesundheit und Funktionsfähigkeit von Böden (Coffey und Otfinowski 2019;

Griffiths et al. 2001, Liu et al. 2021, Neher 2001; Sánchez-Moreno und Ferris 2018). Nematodenbasierte Indizes gehören seit Jahrzehnten zu den am häufigsten verwendeten Bewertungsinstrumenten der Bodenökologen (Du Preez et al. 2022). Nematoden werden bereits in Monitoring- und Forschungsprogrammen, zum Beispiel ENVASSO, Dutch Soil Monitoring Network und LUCAS Soil, als Indikatoren zur Bodenzustandsbewertung verwendet (Campiche 2021). Es ist bekannt, dass Nematodengemeinschaften von verschiedenen Umweltfaktoren beeinflusst werden, wie Bodentextur, Temperatur sowie organischem Kohlenstoff- und Nährstoffgehalt (Bongers 1990; Du Preez et al. 2018, Du Preez et al. 2022; Gorgan et al. 2020). Daher können Nematodenarten, die an einem Standort häufig vorkommen, an einem anderen fehlen, was einen direkten Vergleich erschwert (Du Preez et al. 2022). Funktionelle Indizes (Kapitel 8.5, Tab. 5) basieren nicht auf der Artenvielfalt, sondern auf der Klassifizierung der Nematodengemeinschaft. Dies ermöglicht Vergleiche über Bodenlandschaften hinweg.

Mikroorganismen (Bodenmikrobiom)

Böden gelten aufgrund ihres häufig großen und komplexen Mikrobioms als Hotspots mikrobieller Diversität (Schloter et al. 2018). Die breite ökologische und funktionelle mikrobielle Diversität liefert reichhaltige Informationen über Bodenbedingungen (Wilhelm et al. 2023). Unter den vielen Facetten der Bodenqualität können Mikroben die Nährstoffverfügbarkeit, Aggregatstabilität, Kohlenstoffbindung, Schadstoffabbau, Pflanzenkrankheitshäufigkeit und Pflanzenwachstumsförderung regulieren (Fierer 2017; Fierer et al. 2021; Finn et al. 2023). Sie treiben nicht nur viele wichtige Bodenprozesse an, sondern reagieren auch auf biotische und abiotische Bodenbedingungen wie P-Verfügbarkeit, Boden-pH und labilen organischen Kohlenstoff (Delgado-Baquerizo et al. 2018; Fierer et al. 2021; Hermans et al. 2017; Ramírez et al. 2020). Durch die Analyse mikrobieller Gemeinschaften kann frühzeitig auf Störungen im Ökosystem hingewiesen und so gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenqualität ergriffen werden. Obwohl das Potenzial mikrobieller Indikatoren enorm ist und mikrobienbasierte Metriken, zum Beispiel mikrobielle Biomasse, Pilze-Bakterien-Verhältnisse, Abundanz und Zusammensetzung von Nitrifikanten, bereits weltweit routinemäßig eingesetzt werden, gibt es auch Herausforderungen: Die hohe Diversität und Komplexität mikrobieller Gemeinschaften sowie die fehlende Kenntnis über die Funktion vieler Mikroorganismen erschweren die Interpretation von Daten und die Entwicklung allgemeingültiger Indikatoren (Fierer et al. 2021). Lebensraumübergreifende mikrobielle Analysen gut charakterisierter Böden können helfen zu identifizieren, welche Gemeinschaftsattribute konsistent relevante Indikatoren für die Bodenqualität über Raum und Zeit liefern (Fierer et al. 2021). Die Entwicklung molekularer Methoden ermöglicht es, die Vielfalt und Funktionen mikrobieller Gemeinschaften besser zu verstehen und darauf aufbauend deren Ökosystemleistungen für agrar-relevante Prozesse zu schützen und zu nutzen. Machine learning Algorithmen können bei der Auswertung komplexer Datensätze aus DNA-basierten Mikrobiomanalysen helfen, um Muster zu erkennen und Indikatoren zu identifizieren (mündliche Kommunikation Christoph Tebbe).

Anhang 4: Erfassungsmethoden

Beprobungsstrategie im Wald*: 2 Szenarien

*Problematik auch für Grünland-Standorte relevant

OPTION 1:

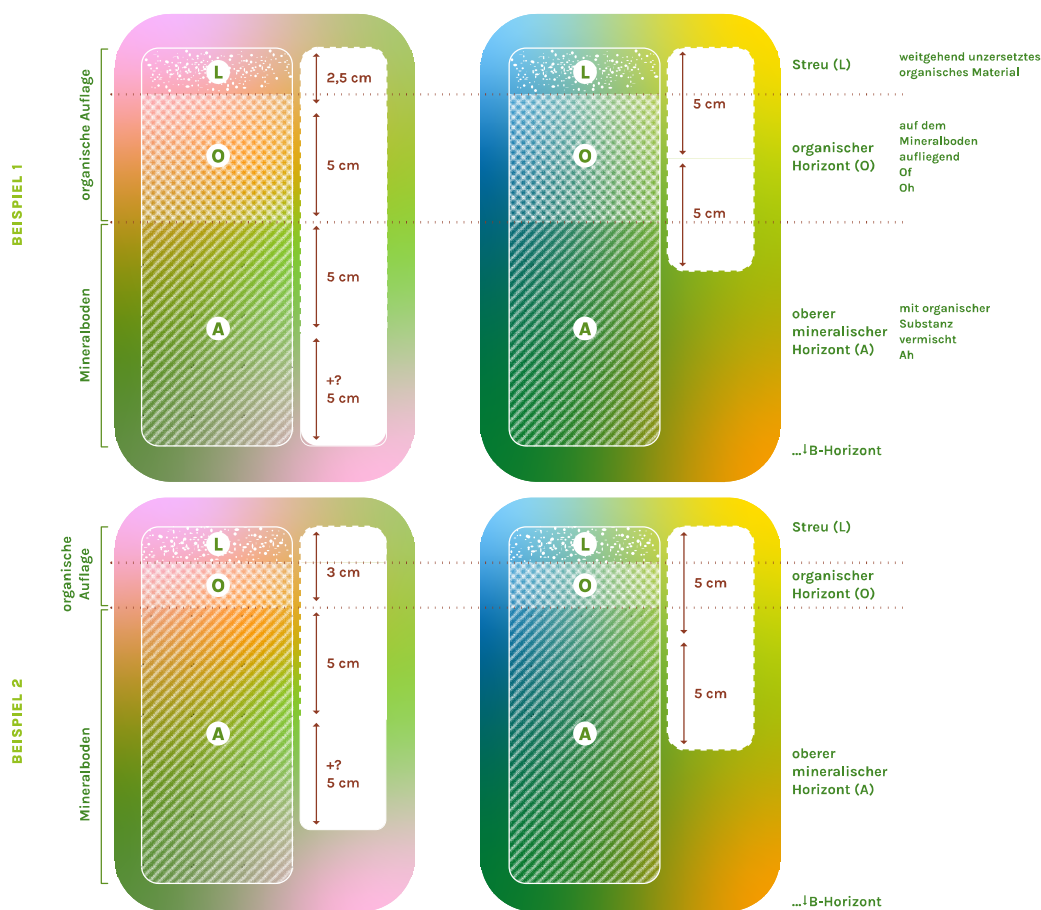
Horizontbezogen beproben

Trennung organischer Auflage von Mineralboden;
MUSS: 0–5/(5–10) cm Mineralboden

OPTION 2:

Tiefenbezogen beproben

IMMER: 10 cm mächtige Kerne



Welche Art der Beprobung (horizont- oder tiefenbezogen) für die Ersterfassung gewählt werden sollte, hängt von der noch zu entwickelnden Auswertestrategie und den für die Beprobung verfügbaren Ressourcen (vor allem personell) ab. Generell sind beide Varianten denkbar, wobei jede Vor- und Nachteile hat (siehe folgende Seite), die es entsprechend abzuwägen gilt. Das Vorgehen sollte für alle (mit Bodenbohrer) zu erfassenden Bodenorganismengruppen einheitlich sein, um eine organismengruppenübergreifende Charakterisierung der Bodenlebensgemeinschaften gewährleisten zu können.

LEGENDE



Probenahme
Bodenbohrer
(ungestörte
bodenbiologische Proben)



vertikale Subproben
eines Einstichs
(maximale
Mächtigkeit
von 5 cm ist
eine technische
Notwendigkeit für
die Extraktion)

Abb. 14 Beschreibung horizont- und tiefenstufenbezogener Beprobung im Wald und Grünland.



Beprobungsstrategie im Wald*: 2 Szenarien

*Problematik auch für Grünland-Standorte relevant

OPTION 1:

Horizontbezogen beproben

Trennung organischer Auflage von Mineralboden;
MUSS: 0–5/(5–10) cm Mineralboden

- + Bodenlebensgemeinschaften in der organischen Auflage und im darunterliegenden Mineralboden unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und Funktion deutlich
→ Informationen zu den spezifischen Anpassungen von Organismen an die verschiedenen Horizonte, detaillierteres Verständnis (/Auswertbarkeit) ökologischer Prozesse wie Zersetzung, Nährstoffkreisläufe usw. und den Beitrag der Bodenlebensgemeinschaften dazu
- + ermöglicht Vergleich der Bodenlebensgemeinschaften in verschiedenen Lebensräumen(/-typen) auf Horizontebezug (organisch–mineralisch)
- + genauere Zuordnung (+ damit auch Auswertbarkeit) zu physikochemischen Bodenparametern aus Bodenmonitoringprogrammen mit getrennter Analyse von organischer Auflage und Mineralboden
- + entspricht Vorschlag zum Vorgehen im Modul Bodenbiodiversität im NaBioWald-Konzept***



VORTEILE

OPTION 2:

Tiefenbezogen beproben

IMMER: 10 cm mächtige Kerne

- + Praktikabilität: Einfach durchzuführen, erfordert weniger Aufwand (Zeit, Kosten, Probenmengen) und weniger bodenkundliche Expertise
- + Probenanzahl für Extraktion gut kalkulierbar
- + Probenahme erfolgt in standardisierten Tiefenintervallen
→ Tiefenbezogene Vergleiche über verschiedene Standorte möglich
- + geläufigeres Vorgehen bei bereits existierenden Erfassungs-/Monitoringaktivitäten
- + entspricht eher Vorgehen gemäß SoilBON-Protokoll (dort Grenzfläche, ab der 10 cm gezählt werden unter L: „underlying substrate“ inklusive O fund Oh) *
→ internationale Anschlussfähigkeit

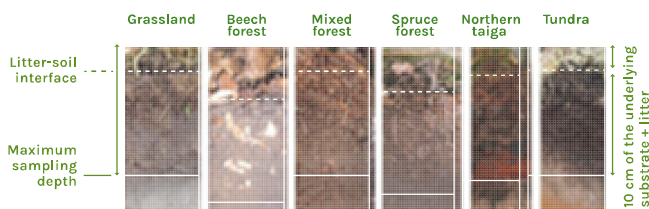
- Abgrenzung organischer Auflage von Mineralboden in der Praxis nicht trivial → Schulung der Probenehmerinnen je nach Erfahrung gegebenenfalls notwendig, Subjektivität bei Horizontabgrenzung unvermeidbar
- Je nach Mächtigkeit der Horizonte kann die Anzahl der Subproben je Einstich variieren → Anzahl der Proben für die Extraktion schwer kalkulierbar
- Höherer Zeitaufwand (durch Schulung und benötigte Horizontidentifikation)
- Horizontbezogene bodenbiologische Beprobungen weniger geläufig bei den bereits laufenden Erfassungs-/Monitoringaktivitäten



NACHTEILE

- Die Organismen aus verschiedenen Horizonten (organisch/mineralisch) in einer Subprobe vermischt
→ Interpretation der Ergebnisse erschwert (Repräsentativität einer Einzelprobe eingeschränkt)**
- Im Extremfall bei sehr mächtigen organischen Auflagen wird der Mineralboden nicht beprobt
- Begleitdaten aus Bodenmonitoringprogrammen: für die Ermittlung physikchemischer Bodenparameter werden organische Auflage und Mineralboden in der Regel auch getrennt beprobt und analysiert
→ für eine tiefenbezogene Umrechnung müssten „unechte Mittelwerte“ gebildet werden

* <https://soilbonfoodweb.org/protocols-and-manuals/>



** Vorschlag hierzu: gute Dokumentation der Horizonte inklusive Tiefenangabe + gute Fotodokumentation hilfreich für Interpretation (genereller Hinweis für jede Beprobungsvariante), Fotodokumentation des Bodenkerns selbst + Draufsicht auf Probenahmestelle

*** <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldoekosysteme/arbeitsbereiche-neu/oekologie-walddynamik/projekte-initiativen/nationales-biodiversitaetsmonitoring-im-wald>

Abb. 15 Vor- und Nachteile horizont- beziehungsweise tiefenstufenbezogener Beprobung

Tab. 13 Regenwürmer: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.

	Acker	Grünland	Wald
Geräte/ Materialien/ Methode zur Probenahme	<u>Methodenkombination</u>: Austreibung und Handauslese; Reihenfolge der Methoden ist dabei variabel, ist aber auf derselben Fläche und nicht nebeneinander durchzuführen. Benötigt wird ein Rahmen für die Abgrenzung der Stichprobenfläche für Handauslese und Austreibung. Dieser ist leicht einzudrücken. Je nach Austreibungsmethode werden Chemikalien oder Elektrofanggerät, Pinzette, Spaten, Gießkannen und Wasserkarister benötigt. <u>Lebend- oder Totbestimmung</u>: beide Vorgehensweisen sind entsprechend der verfügbaren Expertise und logistischen Anforderungen möglich: • Ergebnisse in Bezug auf Artenvielfalt und Abundanz gleich, Abweichungen bei Biomasse möglich: Durch die Konservierung der Tiere in Alkohol verringert sich das Gewicht: „Alkoholgewicht“ ≠ „Frischgewicht“. In der DIN-Norm wird die Anwendung eines Korrekturfaktors empfohlen, um den Masseverlust durch die Konservierungsflüssigkeit und den Darminhalt der Würmer zu korrigieren • Totbestimmung logistisch leichter handelbar, benötigt werden 100-300 ml verschließbare Gefäße mit Ethanol 95% zur Konservierung, Tiere nach Bestimmung wässern für Ermittlung der Biomasse • Lebendbestimmung: Tiere auf feuchtem Tuch und gekühlt aufbewahren, dann innerhalb von 1-2 Tagen Lebendbestimmung durchführen (Abkoten hat Auswirkungen auf Biomasse) Wartezeiten für chemische Extraktion etwa 30 min (+ 15 min falls weiterhin Tiere an die Oberfläche kommen), Menge des Extraktionsmittel an Standortgegebenheiten anpassen: Anwendung nur solange Extraktionsmittel versickert	←	←
Durchmes- ser/Maße Einzelprobe	Austreibung 0,25 m ² (0,5 beziehungsweise ½ m ² werden zum Teil auch beprobt), Handauslese ⅓-1/16m ²	←	←
Beprobungs- tiefe	Handauslese: 20-30 cm (in der Regel pflugsohlentief)	Handauslese: 20-30 cm	←
Notwendig- keit, vertikale Subproben zu gewinnen	nein	←	←



Behandlung der Probenahme- stelle vor Proben- entnahme	Findet die Austreibung vor der Handauslese statt, ist Mähen mit Schere oder Rechen erforderlich.	←	Laub und Streu nach Tieren durchsuchen, danach diese Auflage entfernen, Totholz nach Totholzbewohnern absuchen auch außerhalb ¼ m² zum Beispiel in einem Transekt oder festgelegten Umfang um Probenahme- stelle
Replikate pro Standort	6-8 je nach Stichprobenflächen	←	←
Hinweise zum Transport, zur Aufbewahrung bis zur Bestimmung	Einhaltung der Arbeitssicherheit ist zu berücksichtigen: festmontierte beziehungsweise mit Spanngurten zu sichernde und verschließbare Chemikalienkisten für die Konservierungsflüssigkeit Alkohol, dichte Behälter, Verwahrung dunkel und kühl; Achtung! mengenmäßige Obergrenze für Chemikalienaufbewahrung/-transport beachten, Aufbewahrung in sicheren Chemikalienschränken	←	←
Methodenkompatibilität	Achtung: Invasive Beprobung mit Zerstörung der Probenahme- stelle, gegebenenfalls durchzuführen am Rand der Kernzone vom Monitoringflächen (vor allem bei Vegetationskartierungen)	/	(Handauslese Makrofauna, zum Beispiel Myriapoden, für Basiserhebung nicht vorgesehen)

← Informationen aus voriger Spalte zutreffend



Tab. 14 Enchyträen: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.

	Acker	Grünland	Wald
Geräte/ Materialien/ Methode zur Probenahme	Vertikal unterteilte Proben im Hauptaktivitätsbereich der Enchyträen, anschließend Nassextraktion der Proben im Labor (in Anlehnung an DIN EN ISO 23611-3). Halbseitig aufklappbarer Bodenbohrer, der bei Bedarf mit dem Hammer eingeschlagen werden kann; Verwendung eines Bohrers mit Stechzylindern ist möglich, aber nicht nötig und durch die Festlegung auf das Maß der Subproben unflexibel; stoßabsorbierender Kunststoffhammer; Messer zur Zerteilung des Bohrkerns in vertikale Subproben; Lineal/Zollstock. Zum Probentransport: Plastikbeutel (zum Beispiel Gefrierbeutel 1L) oder Probendosen / Probengläser (circa 200 ml); stapelbare Kisten zum Transport der Proben; gegebenenfalls Kühlbox.	←	←
Durchmesser/ Maße Einzelprobe	Durchmesser: 3 - 6 cm, Höhe vertikale Subproben: 2,5 – 6 cm (Durchmesse und Höhe der vertikalen Subproben bedingen sich: bei kleinerem Durchmesser höhere Subproben). Volumen der Subproben ist auf Kapazität der Extraktionsgefäße abzustimmen; wegen der größeren Probenahmetiefe im Acker hier eventuell andere Abmessung der Subproben / Bodenbohrer mit geringerem Durchmesser	←	←
Notwendig- keit, vertikale Subproben zu gewinnen	Ja, das Volumen der Gesamtprobe ist für die Extraktionsgefäße zu groß. Probe wird im aufgeklappten Bohrer mit Hilfe von Messer und Zollstock im Gelände in Subproben zerteilt. Auch im Hinblick auf Auswertung sinnvoll, da nur so ein Gradient der Aktivität darstellbar wird und gegebenenfalls Tiefenpräferenzen einzelner Arten erkennbar werden.	←	←
Behandlung der Probe- nahmestelle vor Proben- entnahme	Oberflächlich erkennbaren Dünger (Mineraldüngerkörner / Güllekrusten) bei der Probenahme aussparen. Dokumentieren, wo in der Kultur beprobt wird (in Pflanzreihen / zwischen Pflanzreihen/ teils-teils)	→	Streumaterial / Auflagehorizonte in jedem Fall komplett miterfassen, nicht vorher entfernen Unterkante des Bodenbohrers für Grünland / Wald sollte recht scharfkantig sein, um die Streuhorizonte zu durchschneiden
Replikate pro Standort	Circa 10 Replikate bei einer Stichprobenfläche von 1000 m ²	←	←
Hinweise zum Transport, zur Aufbe- wahrung bis zur Bestimmung	Je nach Witterung im Gelände: Kühlbox und/oder Plane oder ähnliches zur Beschattung der Proben; Proben nicht in der Sonne / im aufgeheizten Fahrzeug stehen lassen. Lagerung der Proben bis zur Extraktion bei 4-8 °C für maximal einen Monat.	←	←

← Informationen aus voriger Spalte zutreffend



Tab. 15 Mikroarthropoden (Springschwänze und Milben): Empfehlungen zur Erfassungsmethode.

	Acker	Grünland	Wald
Geräte/ Materialien/ Methode zur Probenahme	ungestörte Bodenproben, Entnahme mit Bodenbohrer (nichtrostender Stahl) mit Schneidkante am Unterteil und Handgriff am Oberteil, anschließend Hitzeextraktion (Extraktionsverfahren mit Temperaturgefälle)	←	←
Durchmesser/ Maße Einzelprobe	Durchmesser 5 cm ausreichend	←	←
Notwendig- keit, vertikale Subproben zu gewinnen	Ja, Zerteilung in Subproben erforderlich: Jeweils 5 cm Mächtigkeit, (upside up in den Extraktor)	←	← üblich: Streuschicht von Mineralboden trennen, getrennte Analyse der Gemeinschaften
Behandlung der Probe- nahmestelle vor Proben- entnahme	Abgestorbenes Pflanzenmaterial liegen lassen	←	← höchstens Äste wegnehmen oder ausweichen
Replikate pro Standort	10 Kerne, räumlicher Bezug Vegetation und Bodenfauna muss hergestellt werden (5m x 5m kartierte Vegetationseinheit) Russell (2004): Ergebnisse einer Studie zu benötigter Anzahl, Verteilung, Abstand von Replikaten um einen repräsentativen Ausschnitt der Bodenbiozöten zu erfassen: Für die Charakterisierung der für die Bioindikation wichtigsten Bodentiergruppen sind mindestens 10 Stichproben notwendig (um alle Hauptarten, Charakterarten und mindestens 80% der Begleitarten zu erfassen)	10 Kerne (auf 5 x 5 m Vegetations- einheit bezogen)	10 Kerne (auf 20 x 20 m Vegetationseinheit bezogen)
Hinweise zum Transport, zur Aufbe- wahrung bis zur Bestimmung	Transport und Klimatisierung (Kühlboxen mit Kühllakkus) in Kunststoffröhrchen, dicht verschlossen mittels Verschlusskappen Achtung! Bodenmaterial nicht komprimieren, Kerne müssen intakt bleiben. Abstand zwischen Probenahme und Extraktion sollte nicht mehr als einige Tage dauern (optimal: innerhalb von 3 Tagen, möglich bis zu 7 Tage von Probenahme bis Extraktion)	←	←
Methoden- kompatibili- tät	Bodenphysik: zum Beispiel Bodenfeuchte, Lagerungsdichte, Korngröße Bodenchemie: Vorsicht! Im Zuge der Austreibung der Mikroarthropoden aus den Kernen mittels Hitzeextraktion nimmt das Bodenmaterial unter anderem Temperaturen über 60° an --> Eignung für zum Beispiel Corg-Analysen ist damit fragwürdig	←	←

← Informationen aus voriger Spalte zutreffend



Tab. 16 Nematoden: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.

	Acker	Grünland	Wald
Geräte/ Materialien/ Methode zur Probenahme	Bodenbohrer aus rostfreiem Stahl (wie für Mikroarthropoden) Boden ausstechen und Proben- oder Horizont-genau (Messer, Lineal, Edding) umfüllen in Plastiktüten mit Klips Im Labor Nematoden mit Baermann-Verfahren* austreiben (=Nass-Extraktion mit Trichter, Schlauch und -klemme, Sieb, Milchfilter), Bodenprobe dazu wiegen, leicht mischen, nur circa 1 cm Boden auf Milchfilter legen, wiegen, hochrechnen, Rest für physikalisch-chemische Bodenanalysen oder ähnliches verwendbar Austreibung über 3 Tage absolut erschütterungsfrei durchführen, sonst gerät Boden in den Proben, Extraktionsende: Klemme kurz voll öffnen und circa 10 ml Wasser mit den Nematoden über der Klemme entnehmen. Nicht alles Wasser entnehmen, um organisches Material in die Proben zu vermeiden. *Die DIN 23611-4 empfiehlt die Oostenbrink-Elutriation als effizienteste Austreibungsmethode, lässt aber mehrere Extraktionsverfahren zu, darunter auch das Baerman-Verfahren. Da die Oostenbrink-Elutriation zum einen sehr kostenintensiv ist, der zeitliche Extraktionsaufwand höher ist und die Methode verhältnismäßig selten angewendet wird, wird für die Basiserhebung die Nematodenaustreibung mittels Baermann-Verfahren empfohlen.	←	←
Durchmes- ser/Maße Einzelprobe	3,5 bis 5cm	←	←
Notwendig- keit, vertikale Subproben zu gewinnen	bereits im Feld mit einem Messer vertikal in 5 cm Abschnitte unterteilen und in getrennte Plastikbeutel überführen	←	←
Behandlung der Probe- nahmestelle vor Proben- entnahme	Oberirdische Pflanzenteile (grob) über dem Boden abschneiden (Schere) und entfernen, Wurzeln verbleiben in Boden/-probe; Wurzeln, die unten aus der Probe ragen, abschneiden, große Steine entfernen.	←	Lose Streuauflage und größere Moospolster vor Entnahme der Bodenprobe entfernen, sie können separat extrahiert werden, müssen aber nicht, sie enthalten ein komplett anderes Arteninventar.



Replikate pro Standort	10 (8 absolutes Minimum) Empfehlung ist abweichend zu DIN 23611-4: Vorgehen darin: 25 Einzelproben (mit Durchmesser 2,3 cm) pro 100 m ² werden zu einer Mischprobe vereint. Aus der gesiebten Mischproben wird eine repräsentative Unterprobe entnommen, um die Extraktion der Nematoden durchzuführen. Da in der Basiserhebung mehrere Organismengruppen erfasst werden, sollte jedoch simultan vorgegangen werden, um organismengruppenübergreifend Gemeinschaften erfassen zu können. In homogenen landwirtschaftlich genutzten Habitaten wären 5 Proben gegebenenfalls ausreichend, für die Vergleichbarkeit sollte in allen Lebensräumen gleich vorgegangen werden.	←	←
Hinweise zum Transport, zur Aufbewahrung bis zur Bestimmung	nach Probenahme rasch extrahieren, ideal schon am nächsten Tag, Boden zuvor maximal 3 Tage lagern, gekühlt bei 4-8°C, sonst Vermehrung! Nach Extraktion Nematoden töten durch plötzliche Hitze 60°C (dazu wird kochendes Wasser in das Röhrchen im Verhältnis 1:1 gegeben und kurz geschwenkt), abstehen und abkühlen lassen, einengen auf wenige ml und mit 2 Tropfen TAF (Triethanolamin-Formalin Gemisch) bei 4°C im Kühlschrank aufbewahren, TAF verhindert Bakterienwachstum und verstärkt die cuticulären Strukturen für die Bestimmung	←	←
Methodenkompatibilität	Überschüssiges Probenmaterial steht für chemisch-physikalische Analysen zur Verfügung; Da keine ungestörten Proben entnommen werden müssen, besteht die Möglichkeit überschüssiges, nicht für die Nematodenextraktion verwendetes Probenmaterial ebenfalls für die Analyse des Bodenmikrobioms zu nutzen	←	←

← Informationen aus voriger Spalte zutreffend



Tab. 17 Bodenmikrobiom: Empfehlungen zur Erfassungsmethode.

	Acker	Grünland	Wald
Geräte/ Materialien/ Methode zur Probenahme	Probenentnahme Stechzylinder, üblich ist eine Reinigung mit wässriger Ethanol-Lösung zwischen den Entnahmen, Allerdings: Ethanol zerstört nur Zellen, aber keine DNA, optimal zur Reinigung wäre Flambieren (wenig praktikabel im Feld), Vorschlag daher als ersten Schritt im Feld: Benetzen des Bodenbohrers mit Mikrobiom des Plots durch einmaliges Einschlagen an einer beliebigen Stelle des Plots Im Feld beim Verpacken/Aliquotieren der Probe Latexhandschuhe tragen	←	←
Durchmes- ser/Maße Einzelprobe	50 bis 200 g sind ausreichend, räumliche Wiederholungen aus circa 4 bis 5 Bereichen der zu beprobenden Ackerfläche	←	←
Notwendig- keit, vertikale Subproben zu gewinnen	nein	←	←
Behandlung der Probe- nahmestelle vor Proben- entnahme	Vor Probenahme die obersten 1 bis 2 cm des Bodens entfernen, um ein „Langzeit“-Signal des Bodenmikrobioms zu erfassen statt Signatur kurzfristiger Ereignisse (Beispiel Beeinflussung von Pflanzenmaterial: Inokulation von Mikroorganismen, die primär mit den oberirdischen Pflanzenteilen assoziiert und nicht bodenbürtig sind).	←	Organische Auflage separat zum Mineralboden zu beproben, wäre möglich. Es sollte bei der Basiserhebung möglichst für alle Organismengruppen gleich vorgegangen werden.
Replikate pro Standort	4 bis 5 Replikate, aus einem Areal von 2.500 qm oder mehr, die Replikate können für die Analyse des Bodenmikrobioms vereinigt werden	←	←
Hinweise zum Transport, zur Aufbe- wahrung bis zur Bestimmung	In Plastikbeutel mit Wattestopfen, sodass Luftzugang erhalten bleibt. Temperatur sollte nicht höher sein als auf dem Feld, am besten in einer Kühlbox sammeln. Nicht über der Außentemperatur, ideal gekühlt oder sofort eingefroren. Transportzeit minimieren, ideal vom Feld zum Labor innerhalb von Stunden	←	←
Methoden- kompatibili- tät	Die DNA-Extrakte könnten auch genutzt werden, um eDNA von Pflanzenresten oder Tieren zu untersuchen, Methoden hierzu sind aber noch nicht ausgearbeitet	←	←
Probleme	Einfluss der Vorbehandlung der Bodenproben (insbesondere Sieben), DNA-Extraktionsmethode, sowie PCR-Bedingungen (Polymerase-Kettenreaktion) auf die Ergebnisse erschwert die direkte Vergleichbarkeit von Proben; technische Herangehensweise (DNA-Extraktionskits, Primer) an internationalen Initiativen wie Soil BON orientieren zur Sicherung der internationalen Kompatibilität	←	←

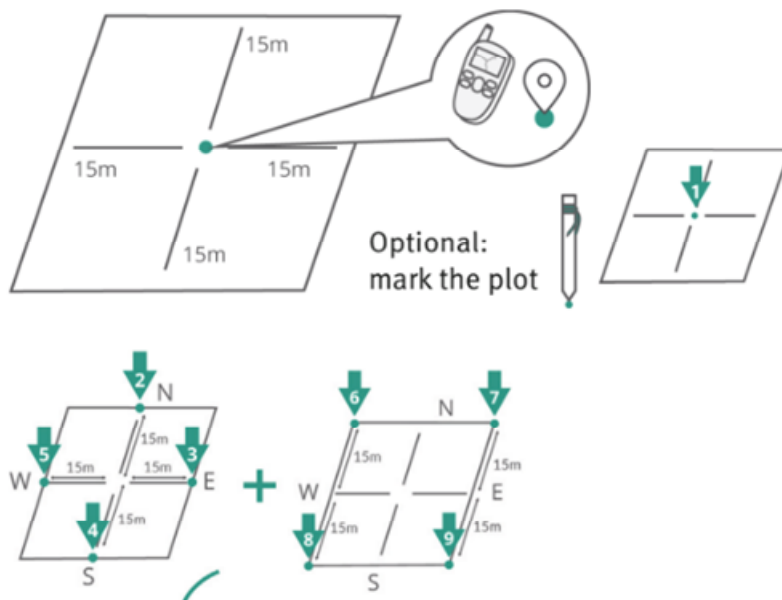


Abb. 16 Probenahmedesign gemäß Soil BON-Protokoll (<https://soilbonfoodweb.org/protocols-and-manuals/>).

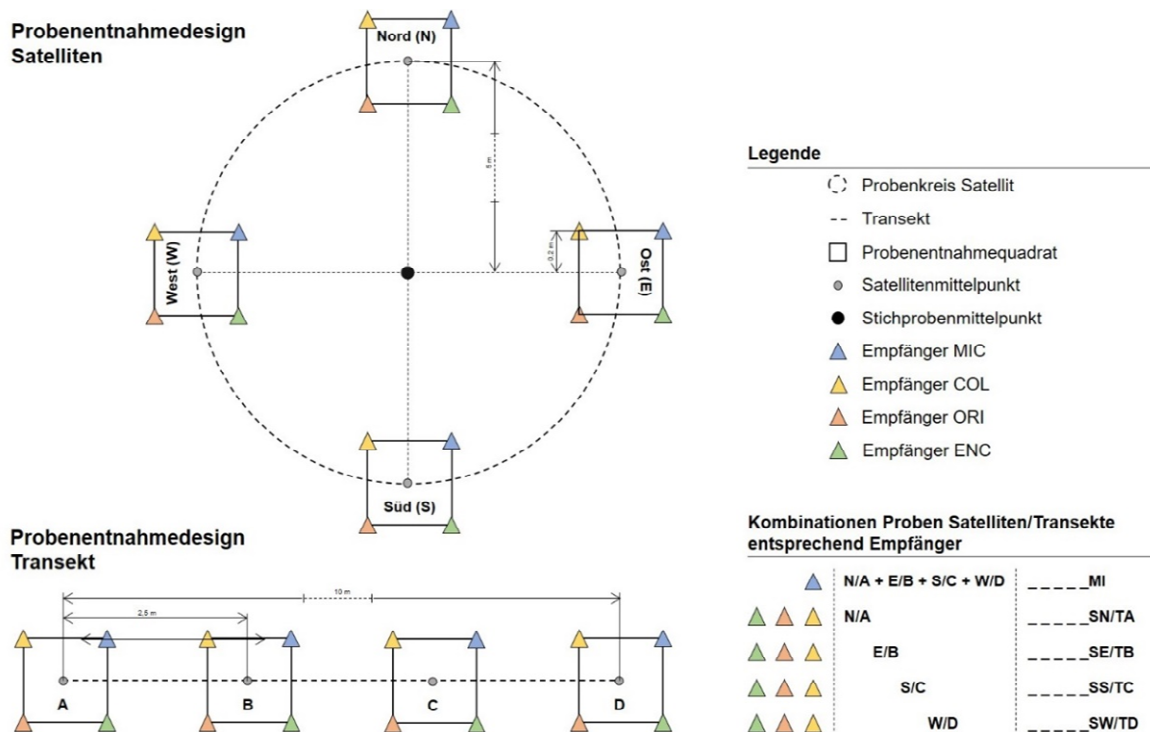


Abb. 17 Probenahmedesign der Biologischen Bodenzustandserhebung im Wald (BBZE).