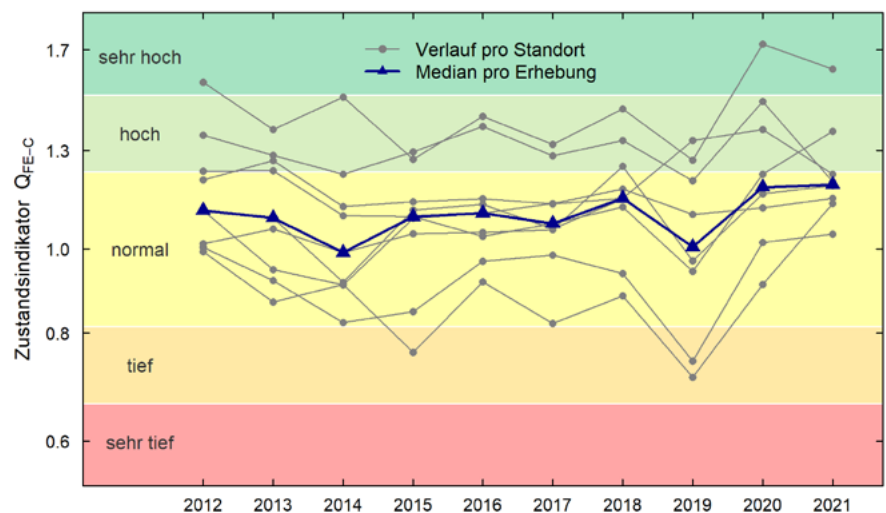


Arbeitshilfe zur Erhebung und Beurteilung bodenbiologischer Parameter



Impressum

Herausgeber	Cercle Sol: Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie / Biologie du Sol – Application, mit der Unterstützung durch Agroscope
AutorInnen	<i>Anna-Sofia Hug</i> , Bodenqualität und Bodennutzung, Agroscope Reckenholz <i>Claudia Maurer</i> , Fachstelle Boden Kanton Bern <i>Florian Gschwend</i> , Molekulare Ökologie, Agroscope Reckenholz <i>Franco Widmer</i> , Molekulare Ökologie, Agroscope Reckenholz <i>Gaby von Rohr</i> , Amt für Umwelt, Abteilung Boden Kanton Solothurn <i>Beat Frey</i> , Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf <i>Janine Moll-Mielewczik</i> , Bodenqualität und Bodennutzung, Agroscope Reckenholz
Zitiervorschlag	VBBio/BSA (Hrsg.) 2025: Arbeitshilfe zur Erhebung und Beurteilung bodenbiologischer Parameter.
Übersetzung	Die französische Version dieses Berichtes wurde mit deepl übersetzt.
Titelbilder	Von o.l. im Uhrzeigersinn: Feldarbeiten Regenwurmerhebung (Fachstelle Boden Kanton Bern, 2024), Entnahme der Mischproben für mikro- und molekularbiologische Untersuchungen (Agroscope, 2024), Zustandsindikator Q_{FE-C} von neun NABO-Ackerstandorten (Agroscope, 2023), Laborarbeiten Molekularbiologie Bodenproben im Extraktionspuffer (Agroscope, 2013).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Hintergrund	8
1.2 Ziel der Arbeitshilfe	8
1.3 Gesetzlicher Hintergrund	9
1.4 Einsatzmöglichkeiten bodenbiologischer Parameter	10
1.5 Erhebung bodenbiologischer Parameter in der Schweiz	11
2 Parameterübersicht	12
2.1 Parameterauswahl	12
2.2 Mikrobiologische Parameter	12
2.2.1 Mikrobielle Biomasse (Methoden FE-C, ATP, DNS-Menge, SIR)	12
2.2.2 Basalatmung	13
2.2.3 C-Mineralisierung	13
2.2.4 Metabolischer Quotient qCO_2	13
2.2.5 Verhältnis mikrobielle Biomasse-Kohlenstoff zu organischem Kohlenstoff C_{mik}/C_{org}	14
2.2.6 Diversität der Bakterien und Pilze im Boden	14
2.3 Faunistische Parameter	15
2.3.1 Datenlage Bodenfauna	15
2.3.2 Regenwurmgemeinschaften	15
3 Instrumente zur Beurteilung	16
3.1 Definition von Vergleichs- und Referenzwerten	16
3.2 Vergleichswerte Mikrobiologie	16
3.3 Vergleichswerte Makrofauna	19
3.3.1 Datenlage	19
3.3.2 Regenwurmgemeinschaften	19
3.3.3 Vergleichswerte Biomasse und Abundanz	19
3.4 Referenzwertgleichungen	20
– Referenzwertgleichungen für Acker 0–20 cm (VBB/BSA, 2009; Oberholzer et al., 1999)	21
– Referenzwertgleichungen für Dauergrünland 0–20 cm (Hug und Moll-Mielewicz, 2024)	21
– Referenzwertgleichungen für Dauergrünland 0–10 cm (VBB/BSA, 2009; Oberholzer et al., 1999)	21
3.4.1 Zustandsindikator Q	22
4 Handlungsbedarf	24
4.1 Standardisierung von Methoden und Datenablage	24
4.2 Beurteilungsgrundlagen	24
4.3 Erarbeitung von Indikatoren	25
4.4 Untersuchung weiterer Bodenorganismen	25
4.5 Erstellen von Roten Listen und Erfassung von invasiven Arten	25
4.6 Flächendeckende Erfassung des bodenbiologischen Zustandes	26
4.7 Gesetzgebung und Vollzug	26

5	Schlusswort	27
	Dank	27
	Abbildungsverzeichnis	27
	Tabellenverzeichnis	28
	Literaturverzeichnis	29
	Anhang	36
	Vergleichswerttabellen: Daten unterteilt nach Messnetzen	36
	Boxplots der Vergleichswerte, unterteilt nach Messnetzen	43

Abkürzungsverzeichnis

BAFU Bundesamt für Umwelt
BA Basalatmung ($\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ TS h}^{-1}$)
BDM Biodiversitätsmonitoring Schweiz
BLW Bundesamt für Landwirtschaft
BM FE-C mikrobielle Biomasse (Kohlenstoff), bestimmt mit der Fumigation-Extraktions-Methode ($\text{mg kg}^{-1} \text{ TS}$)
BM FE-N mikrobielle Biomasse (Stickstoff), bestimmt mit der Fumigation-Extraktions-Methode ($\text{mg kg}^{-1} \text{ TS}$)
BM SIR mikrobielle Biomasse (Kohlenstoff), bestimmt mit der Methode substratinduzierte Respiration ($\text{mg kg}^{-1} \text{ TS}$)
C_{org} Organischer Kohlenstoff (%)
DNS Desoxyribonukleinsäure
FRIBO Bodenbeobachtung Kanton Freiburg
KABO Kantonale Bodenbeobachtung
NABO Nationale Bodenbeobachtung
NABObio Bodenbiologisches Monitoring der Nationalen Bodenbeobachtung
KOBO Kompetenzzentrum Boden
OS organische Substanz (beinhaltet alle organischen Formen des Bodenkohlenstoffs; $\text{C}_{\text{org}} \cdot 1.725$)
OTU Operational Taxonomic Unit, Annäherung an Arten
Q mikrobiologischer Zustandsindikator
qC_{mik}/C_{org} Verhältnis mikrobiell gebundener Kohlenstoff zum organischen Kohlenstoff ($\text{mg C}_{\text{mik}} \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{org}}$)
qCO₂ metabolischer Quotient, Verhältnis der Basalatmung zur mikrobiellen Biomasse ($\text{mg CO}_2\text{-C g}^{-1} \text{ C}_{\text{mik}}$)
TS Trockensubstanz Feinerde
VBBo Verordnung über Belastungen des Bodens
VBBio/BioSA Vollzug Bodenbiologie/ Biologie du Sol – Application (Arbeitsgruppe)

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Bodenlebewesen spielen eine unverzichtbare Rolle für die Bodenfruchtbarkeit und das ökologische Gleichgewicht. Sie sind zentral für den Nährstoffkreislauf in Ökosystemen und damit für die gesamte Nahrungskette. Weiter sind sie mitverantwortlich für eine Bodenstruktur, die das Wachstum von Pflanzen begünstigt und Regenwasser speichert oder versickern lässt.

Informationen über den Zustand und die Entwicklung dieser Organismen sind daher von Bedeutung. Die Interpretation von erhobenen bodenbiologischen Daten und die Kommunikation an umweltpolitische Entscheidungsträger, Bewirtschaftende und Laien sind sowohl für die Wissenschaft, als auch für den Vollzug, ein wichtiger und notwendiger Schritt. Erste Grundlagen bietet die 2009 erarbeitete «Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter» der Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie (VBBio-BioSA) (VBB/BSA; 2009). Seither hat sich die Datengrundlage zur Herleitung von Vergleichs- und Referenzwerten stark vergrössert und das Wissen über die Eignung der Methoden in der Langzeitbeobachtung erweitert (Hug et al., 2021, Maurer et al., 2020; Hug und Moll-Mielewicz, 2024; FRIBO, 2024). Zudem haben sich durch den Einsatz molekularbiologischer Methoden auch für das Monitoring neue Möglichkeiten eröffnet (Gschwend et al., 2018, 2021a, 2021b; Donhauser et al., 2023 und Cuartero et al., 2024). Daher hat die Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie / Biologie du Sol – Application (VBBio-BioSA) beschlossen, die Arbeitshilfe auf den neuesten Stand zu bringen.

In den letzten 15 Jahren hat sich die Wahrnehmung in Bezug auf die im Boden lebenden Organismen geändert. Sowohl in der Bodenstrategie Schweiz (BAFU 2020) als auch in der Bedürfnisabklärung für ein zukünftiges Monitoring Boden (Gubler et al., 2020) ist die Erhaltung der Bodenbiodiversität als zentrales Element wichtiger Bodenfunktionen erkannt worden. Das Kompetenzzentrum Boden KOBO prüft im Rahmen der geplanten Kartierungsarbeiten, neben chemischen und physikalischen, auch die Erhebung von bodenbiologischen Parametern. Für den Vollzug und die Wirkungskontrolle umweltpolitischer Massnahmen sind standorttypische Referenz- und Vergleichswerte eine Voraussetzung. So wird auch im Rahmen der geplanten Revision der Verordnung über die Belastungen des Bodens (VBBo, 1998) die Aufnahme von bodenbiologischen Referenzwerten diskutiert.

1.2 Ziel der Arbeitshilfe

Die Arbeitshilfe richtet sich in erster Linie an Personen der Verwaltung, Forschung und Beratung, die bodenbiologische Parameter erheben und beurteilen wollen. Die Arbeitshilfe soll ein aktuelles Nachschlagewerk sein: Es werden in der Schweiz etablierte und standardisierte Messmethoden dargestellt und vorhandene Beurteilungsgrundlagen (Vergleichs- und Referenzwerte) präsentiert.

Im Anschluss werden die notwendigen Schritte aufgezeigt, um robuste und standardisierte Methoden zur Erfassung und Beurteilung von Bodenorganismen weiterzuentwickeln. Dies auch im Hinblick auf die molekularbiologischen Methoden, die unter anderem Aussagen über die Diversität des Bodenlebens ermöglichen.

1.3 Gesetzlicher Hintergrund

Im Folgenden werden die rechtlichen Grundlagen und strategischen Ziele aufgelistet, die die Bodenbiologie betreffen und beim Erstellen von Projektanträgen, oder bei der Begründung der Notwendigkeit von bodenbiologischen Untersuchungen, relevant sind.

Umweltschutzgesetz (USG, SR 814.01, 1983, Stand 1. Januar 2024):

Art. 33

¹ «Zur langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit werden Massnahmen gegen chemische und biologische Bodenbelastungen [...] geregelt».

Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12, 1998, Stand 12. April 2016):

Art. 1

«Zur langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit regelt diese Verordnung:
a. die Beobachtung, Überwachung und Beurteilung der chemischen, biologischen und physikalischen Belastung von Böden; [...]»

Art. 2

¹ «Boden gilt als fruchtbar, wenn:

a.³ die biologische aktive Lebensgemeinschaft, die Bodenstruktur, der Bodenaufbau und die Mächtigkeit für seinen Standort typisch sind und er eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist; [...]»;

³ «Biologische Bodenbelastungen sind Belastungen des Bodens, insbesondere durch gentechnisch veränderte, pathogene oder gebietsfremde Organismen. [...]»

Art. 3

¹ «Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) betreibt in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) ein nationales Referenznetz zur Beobachtung der Belastungen des Bodens (NABO).

² Das BAFU informiert die Kantone über die Ergebnisse der Beobachtung und veröffentlicht sie.»

Art. 4

¹ «Steht fest oder ist zu erwarten, dass in bestimmten Gebieten Belastungen des Bodens die Bodenfruchtbarkeit gefährden, so sorgen die Kantone dort für eine Überwachung der Bodenbelastung.

² Das BAFU sorgt in Zusammenarbeit mit dem BLW für die Beschaffung der fachlichen Grundlagen, die für die Überwachung der Bodenbelastung nötig sind, und berät die Kantone.»

Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA, SR 814.600, 2015, Stand 1. Januar 2024):

Art. 1

«Diese Verordnung soll: a. Menschen, Tiere, Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften sowie die Gewässer, den Boden und die Luft vor schädlichen Einwirkungen schützen, die durch Abfälle erzeugt werden; [...]»

Bodenstrategie Schweiz (2020):

In der 2020 erarbeiteten Bodenstrategie Schweiz formulieren die Bundesämter für Umwelt, Raumentwicklung und Landwirtschaft im Bereich «Landwirtschaft» das folgende Ziel (ZL8): «Kein dauerhafter Verlust von Bodenbiodiversität und -aktivität aufgrund landwirtschaftlicher Nutzung.»

Zur Erreichung von ZL8 wurden folgende strategischen Stossrichtungen (SL) formuliert (p.37):

SL19: *«Verbesserung der verfügbaren Informationen zur Bodenbiodiversität und -aktivität von landwirtschaftlich genutzten Böden. Erarbeitung von Ziel- und Referenzwerten für die Biodiversität im Boden.»*

SL20: *«Förderung landwirtschaftlicher Anbaumethoden, die eine standorttypische, biologisch aktive Lebensgemeinschaft gewährleisten»*

SL21: *«Berücksichtigung der Bodenbiodiversität und -aktivität bei der Planung und Ausscheidung von ökologischen Vernetzungsstrukturen.»*

SL22: *«Konsequente Umsetzung der möglichen Massnahmen zur Minimierung von Stoffausträgen wie Ammoniak aus der Landwirtschaft.»*

Strategie Biodiversität Schweiz (2012):

Strategische Ziele:

Ziel 1: *«Die Nutzung von natürlichen Ressourcen und Eingriffe in diese erfolgen bis 2020 nachhaltig, sodass die Erhaltung der Ökosysteme und ihrer Leistungen sowie der Arten und der genetischen Vielfalt sichergestellt ist.»* (p.6)

Ziel 7: *«Wissen über Biodiversität ist in der Gesellschaft bis 2020 ausreichend vorhanden und schafft die Basis dafür, dass Biodiversität von allen als eine zentrale Lebensgrundlage verstanden und bei relevanten Entscheidungen berücksichtigt werden kann.»* (p.9)

Ziel 10: *«Die Überwachung der Veränderungen von Ökosystemen, Arten und der genetischen Vielfalt ist bis 2020 sichergestellt.»* (p.9)

1.4 Einsatzmöglichkeiten bodenbiologischer Parameter

Bodenorganismen können den Zustand und Veränderungen ihrer Umwelt anzeigen. Summen-, Aktivitäts- und/oder Artzusammensetzungsparameter liefern Informationen zur kombinierten Wirkung von chemischen und physikalischen Bodenverhältnissen auf die Bodenorganismen. Festgestellte Veränderungen der bodenbiologischen Parameter können möglicherweise langfristig zu Beeinträchtigungen von Bodenfunktionen und damit zu Produktionseinbussen führen – worauf Massnahmen ergriffen werden sollten. Bodenbiologische Parameter lassen sich unter anderem in folgenden Gebieten einsetzen:

Erfassung, Beurteilung und Überwachung von belasteten und unbelasteten Böden, beispielsweise zur Abklärung von Standorten oder zur Bodendauerbeobachtung

Belastungen chemischer und physikalischer Art haben Auswirkungen auf die Bodenlebewesen und damit auf die Bodenfruchtbarkeit (Fließbach et al., 2007; Frey et al., 2006, 2009, 2022a; Hartmann et al., 2015; Frossard et al., 2018; Walder et al., 2022). Beeinträchtigungen, wie beispielsweise verminderte Abbauleistungen oder Strukturprobleme, können frühzeitig erkannt, dokumentiert und überwacht werden.

Erfolgskontrolle der Rekultivierung und Sanierung von Böden

Nach Rekultivierungen oder Sanierungen von Böden müssen sich standorttypische bodenbiologische Eigenschaften wieder neu etablieren. Mit Hilfe bodenbiologischer Parameter und dem Einsatz von zu erwartenden standorttypischen Referenzwerten ist eine Erfolgskontrolle möglich (ökonsult, 1994).

Umfassende biologische Zustandsbeurteilung in Bodenprofilen

Vor allem im Zusammenhang mit der Regeneration von Böden nach mechanischen Belastungen im Untergrund oder der Speicherung von Kohlenstoff im Unterboden sind profilumfassende bodenbiologische Informationen aufschlussreich (Frey et al., 2021; Frey et al., 2022b).

Überprüfung von Auswirkungen spezifischer Organismen

Mit bodenbiologischen Parametern können mögliche Auswirkungen spezifischer Organismen untersucht werden. Beispielsweise mögliche Effekte von ausgebrachten pflanzenfördernden Organismen (Oberholzer et al. 2024), Biocontrol-organismen (Mayerhofer et al. 2017), oder (ungewollt eingebrachten) ortsfremden Organismen (Roy et al., 2022; Stefanowicz et al., 2016) auf das Mikro-, Meso- oder Makrobiom.

Landwirtschaftliche Beratung

Mit bodenbiologischen Parametern kann eine Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit vorgenommen und mit der landwirtschaftlichen Praxis in Zusammenhang gebracht werden. Z.B. das Förderprogramm Boden des Kanton Bern, Teil KABO¹.

Öffentlichkeitsarbeit

Das Wissen, dass Boden belebt ist und die Kenntnis der Vielfalt, Funktionen und Aktivitäten der Bodenlebewesen helfen, die Wertschätzung des Bodens und den Respekt im Umgang mit Boden zu fördern. Damit wird ein emotionaler Bezug zum Boden und Verständnis für die Notwendigkeit des Bodenschutzes geschaffen. So zum Beispiel die Projekte «Sounding Soil»² oder «Beweisstück Unterhose»³.

1.5 Erhebung bodenbiologischer Parameter in der Schweiz

Die beschriebenen mikrobiellen Summen- und Aktivitätsparameter sowie die faunistischen Untersuchungen der Regenwurmgemeinschaften werden alle seit längerem in der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO, Hug et al., 2018, Gross et al., 2024) und in den kantonalen Messnetzen (KABO AG, BE, FR, GR) erhoben resp. durchgeführt (Mösch & Hunziker 2015, FRIBO 2024, Bräm 2011, Maurer et al., 2020). Anhand von Vergleichs- und standorttypischen Referenzwerten werden die am Untersuchungsstandort gemessenen Werte eingeordnet und beurteilt (Maurer et al., 2020, Hug et al., 2021). In der NABO wird zusätzlich seit einigen Jahren mit molekularbiologischen Methoden die Diversität der Bodenbakterien und -pilze erhoben (Gschwend et al., 2018, 2021a und 2021b, Fernández-Bravo et al., 2021). Dabei werden neben der DNS-Menge auch die bakteriellen und pilzlichen Gemeinschaften analysiert. Diese wurden bisher einmalig auch im Rahmen des Biodiversitätsmonitoring BDM bestimmt (Mayerhofer et al., 2021). Ebenfalls mit molekularbiologischen Methoden wurden einmalig Regenwürmer und Enchytraeidae an ausgewählten NABO-Standorten erfasst (Cuartero et al., 2025). Auf Standorten des LWF (langfristige Waldökosystem Forschung) werden mit molekularbiologischen Methoden die Nematoden (Donhauser et al., 2023; Cuartero et al., 2024) bestimmt. Eine umfangreiche Zusammenstellung von weiteren bodenbiologischen Studien in der Schweiz wurde von der VBBio/BSA im Jahr 2022 durchgeführt und ist als Literaturdatenbank zugänglich (VBBio/BSA, 2022). Auf eine detaillierte Beschreibung zur Situation im Ausland wird an dieser Stelle verzichtet und ebenfalls auf die Literatur verwiesen (Stone et al., 2015 und 2016; Fierer, N., 2017; Dequiedt et al., 2020; Bhardi et al., 2022; Jones, et al., 2022; Orgiazzi et al., 2022; Labouyrie et al. 2023).

1

<https://www.weu.be/ch/de/start/themen/umwelt/boden/bodeninformationen.html>



2

www.soundingsoil.ch



3

www.beweisstueck-unterhose.ch



2 Parameterübersicht

2.1 Parameterauswahl

Im Folgenden werden die Parameter aufgelistet, die in der Schweiz von der NABO und den KABOs erhoben werden und die auch international Verwendung finden. Sie wurden auf die Eignung für den Einsatz in der Dauerbeobachtung geprüft und zeichnen sich u.a. durch eine zuverlässige Wiederholbarkeit der Messungen aus (Oberholzer et al., 2006; Hug et al., 2018). Alle Analysen der hier genannten bodenbiologischen Parameter erfolgen gemäss den Schweizerischen Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope⁴, oder gemäss der zitierten Literatur. Dort finden sich auch die detaillierten Beschreibungen der Methoden sowie weitere Literaturhinweise.

4

<https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-resourcen/monitoring-analytik/referenzmethoden/standortcharakterisierung.html>



2.2 Mikrobiologische Parameter

2.2.1 Mikrobielle Biomasse (Methoden FE-C, ATP, DNS-Menge, SIR)

Die mikrobielle Biomasse ist die Gesamtheit aller Bodenmikroorganismen, das heisst insbesondere die Gesamtheit der Bakterien und Pilze aber auch Algen und Protozoen. Es ist ein Summenparameter, der als biologisch aktive Masse ein Mass für das biotische Kompartiment im Boden darstellt, jedoch keinen Rückschluss auf einzelne Arten zulässt. Es bestehen verschiedene Methoden, um die mikrobielle Biomasse zu erheben.

Chloroform-Fumigations-Extraktionsmethode (FE-C-Methode):

Equilibrierter, feldfeuchter Boden wird mit Chloroform während 24 Stunden begast. Dabei werden die Mikroorganismen abgetötet, die im Boden vorhandenen organischen Substanzen jedoch kaum verändert. Aus der anschliessend extrahierbaren Menge an organischer Substanz kann im Vergleich zu einer nicht mit Chloroform behandelten Probe der Gehalt an mikrobiellem Biomasse-Kohlenstoff (FE-C) bzw. mikrobiellem Biomasse-Stickstoff (FE-N) berechnet werden (Schweizerische Referenzmethode *B-BM-FE* der Forschungsanstalten Agroscope, 1998).

Anwendung CH: Seit 2017 wird die mikrobielle Biomasse in der NABO und den KABO AG, BE, GR ausschliesslich mit der FE-C-Methode bestimmt.

Adenosintriphosphat-Methode (ATP-Methode):

Adenosintriphosphat (ATP) wird, unterstützt durch einen mechanischen Aufschluss, aus frischem Boden extrahiert. Nach Abfiltrieren des Bodens wird das Filtrat neutralisiert und die Biolumineszenz in einem Aliquot gemessen. Bei der enzymatischen Reaktion wird ATP aus dem Bodenfiltrat vollständig als Energiequelle verbraucht. Die dabei freigesetzten Lichtimpulse sind der ATP-Menge direkt proportional. Die Umrechnung von Lichtimpulsen in ng ATP erfolgt mit Hilfe von Kalibrierkurven (Schweizerische Referenzmethode *B-BM-ATP* der Forschungsanstalten Agroscope, 1998).

Anwendung CH: KABO FR (FRIBO)

DNS-Menge (DNS-Methode):

Zur Bestimmung der DNS-Menge (Desoxyribonukleinsäure; Träger der Erbinformation) wird die gesamte DNS aus einer homogenisierten Mischprobe von jeweils 0.5 g Boden extrahiert. Aus dieser extrahierten DNS kann in einem weiteren Schritt die mikrobielle Biomasse gemessen werden. Damit die längerfristige Vergleichbarkeit

gewährleistet ist, wird bei der DNS-Extraktion auf ein kommerzielles Kit verzichtet und ein Protokoll angewendet, dessen Chemikalienzusammensetzungen bekannt sind. Die beschriebene Methode wurde bei der zuständigen Arbeitsgruppe von Agroscope eingereicht und wird bei Annahme ebenfalls als Schweizerische Referenzmethode der Forschungsanstalten Agroscope⁴ publiziert.

Anwendung CH: Die DNS-Menge wird im Rahmen von Monitorings in der NABO und den KABO AG, BE und GR erhoben (Gschwend et al., 2021a und b). Zudem wurde sie einmalig im Messnetz des BDM bestimmt (Mayerhofer et al., 2021).

Substratinduzierte Respiration (SIR-Methode):

Bodenproben werden mit Glucose versetzt und so lange bebrütet, bis eine maximale initiale Atmung erreicht ist. Diese ist proportional zur mikrobiellen Biomasse. Aus der Erhöhung der CO₂-Konzentration und dem Gasfluss wird die stündliche CO₂-Produktion berechnet und mit dem Umrechnungsfaktor von Anderson und Domsch (1978) die mikrobielle Biomasse (C_{mic}) hergeleitet (Schweizerische Referenzmethode B-BM-HM der Forschungsanstalten Agroscope, 1998).

Anwendung CH: NABO und KABO von 2004 bis 2016 (Hug et al., 2021). Seit 2017 wird die Biomasse SIR von der NABO und den KABO AG, BE und GR nicht mehr bestimmt.

2.2.2 Basalatmung

Die Basalatmung beschreibt einen biologischen Prozess, der durch den Abbau von organischer Substanz in Gegenwart von Sauerstoff zur Freisetzung von CO₂ führt und ein Mass für die Aktivität der Bodenlebewesen ist. Zur Bestimmung der Basalatmung wird der Boden in einem geschlossenen System inkubiert. Das von der 24. bis zur 96. Stunde der Inkubation abgegebene CO₂ wird in einer Natronlauge-Lösung absorbiert. Das dabei entstandene Natriumcarbonat wird mit Bariumchlorid gefällt und die unverbrauchte Natronlauge durch Titration mit Salzsäure bestimmt (Schweizerische Referenzmethode B-BA-IS der Forschungsanstalten Agroscope, 1998).

Anwendung CH: NABO und KABO AG, BE und GR

2.2.3 C-Mineralisierung

Die Kohlenstoffmineralisierung (C_{min}) ist eine Schätzung der von den Mikroorganismen mineralisierten Menge organischer Substanz. Der gemessene Wert entspricht der Summe des freigesetzten CO₂ während 15 Tagen Inkubationszeit. Dieser Wert wird in Kohlenstoffäquivalente umgerechnet und als organische Substanz ($\mu\text{g OS g}^{-1}\text{ TS des Bodens 15 Tage}^{-1}$) ausgedrückt (Maire, 1984).

Anwendung CH: KABO FR (FRIBO)

2.2.4 Metabolischer Quotient $q\text{CO}_2$

Der metabolische Quotient $q\text{CO}_2$ entspricht dem Verhältnis zwischen der Basalatmung und der mikrobiellen Biomasse (Basalatmung dividiert durch mikrobielle Biomasse). Er ist ein indirektes Mass für die Energieeffizienz einer Mikroorganismengemeinschaft und zeigt, wie gut diese die organische Substanz umsetzen kann. Seit 2017 wird in der NABO und den KABOs der metabolische Quotient mit der mikrobiellen Biomasse FE-C gebildet, weil SIR nicht mehr gemessen wird. Dies im Unterschied zur Arbeitshilfe von 2009 (VBB/BSA, 2009), wo der Quotient $q\text{CO}_2$ mit der mikrobiellen Biomasse SIR berechnet wurde. Um methodische bedingte Verände-

rungen innerhalb einer Zeitreihe auszuschliessen, sollten nur Quotienten miteinander verglichen werden, die mit denselben Inputgrössen berechnet wurden.

Anwendung CH: Die Basalatmung, gemessen mit der Methode B-BA-IS, und die mikrobielle Biomasse, bestimmt mit der FE-C-Methode, wird von der NABO und von den KABO AG, BE und GR erhoben. Der metabolische Quotient kann dementsprechend damit berechnet werden.

2.2.5 Verhältnis mikrobielle Biomasse-Kohlenstoff zu organischem Kohlenstoff $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$

Das Verhältnis von C_{mik} zu C_{org} (mikrobielle Biomasse dividiert durch den C_{org} -Gehalt des Bodens) gibt Aufschluss über die relative Menge an mikrobiellem Kohlenstoff im Vergleich zum gesamten organischen Kohlenstoff. Seit 2017 wird in der NABO und den KABOs die mikrobielle Biomasse SIR nicht mehr gemessen und das Verhältnis anhand der mikrobiellen Biomasse FE-C gebildet [$\text{mg } C_{\text{mik}} \text{ g}^{-1} C_{\text{org}}$] ($\text{FE-C}/C_{\text{org}}$). Um methodische bedingte Veränderungen innerhalb einer Zeitreihe auszuschliessen, sollten auch hier nur $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnisse miteinander verglichen werden, die mit denselben Inputgrössen berechnet wurden.

Anwendung CH: Die mikrobielle Biomasse, bestimmt mit der FE-C-Methode, und der C_{org} -Gehalt wird von der NABO und von den KABO AG, BE und GR erhoben. Das Verhältnis C_{mik} zu C_{org} kann dementsprechend damit berechnet werden.

2.2.6 Diversität der Bakterien und Pilze im Boden

Obwohl es für die Diversitätsanalysen des Mikrobioms noch keine Referenzmethoden gibt und diese deshalb noch nicht im Vollzug eingesetzt werden können, wird die Methode zur Bestimmung der Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften an dieser Stelle trotzdem beschrieben. Dies vor allem deshalb, weil das Potential für die Umweltbeobachtung, die Umweltpolitik oder die landwirtschaftliche Beratung immens ist. Die Methode wird in der Nationalen Bodenbeobachtung seit 2012 routinemässig angewendet (Gschwend et al., 2021a und b), womit erste Erfahrungen vorliegen. In Kapitel 4 wird vertieft auf Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie eingegangen.

Die Diversität von Mikroorganismen und anderen im Boden lebenden Organismen lässt sich basierend auf der DNS durch das sogenannte Metabarcoding bestimmen. Dabei wird die gesamte DNS aus einer Probe extrahiert und davon spezifische Abschnitte isoliert und sequenziert. Da insbesondere bei Mikroorganismen die meisten Arten weiterhin unbeschrieben sind (Hawksworth und Lücking, 2017), werden die Sequenzen nach ihrer Ähnlichkeit gruppiert. Diese Gruppen sehr ähnlicher Sequenzen werden als OTUs bezeichnet (technische taxonomische Einheiten; engl. operational taxonomic units). Der taxonomische Reichtum bezeichnet die Anzahl unterschiedlicher Sequenztypen, die in einer Probe bestimmt wurden und wird analog zum Artenreichtum verwendet. Anhand der Sequenzen können OTUs taxonomisch klassifiziert werden, wobei die Qualität der Klassifikation stark von der benutzten Referenzdatenbank und der Bekanntheit des untersuchten Habitats abhängig ist.

Anwendung CH: In NABObio werden mit molekularbiologischen Analysen (Metabarcoding) die Bakterien- und Pilzdiversität seit 2012 bis 2024 jährlich und ab 2025 in regelmässigen Zeitabständen bestimmt (Gschwend et al., 2021a und b; Hug et al., 2018). Eine bisher einmalige Bestimmung der Bakterien- und Pilzdiversität wurde ebenfalls im BDM vorgenommen (Mayerhofer et al., 2021).

2.3 Faunistische Parameter

2.3.1 Datenlage Bodenfauna

Vergleichswerte in der Schweiz gibt es zurzeit für die Tiergruppe der Regenwürmer. Für Europa (z.B. F, D, NL) liegen Arbeiten für weitere Parameter der Meso- und Makrofauna vor (Rutgers et al., 2009, Römbke et al., 2018, Cluzeau et al., 2012; Stone et al., 2015, 2016). Erste Grundlagen für Organismen der Mesofauna liegen in der Schweiz ebenfalls vor (Gschwend et al. 2022).

2.3.2 Regenwurmgemeinschaften

Auf einer vorgegebenen Fläche wird während einer definierten Zeit eine Formalin- oder Senfpulverlösung versickert. Die damit ausgetriebenen Regenwürmer (*Lumbricidae*) werden gesammelt und konserviert (Schweizerische Referenzmethode *B-RW-E*). Anschliessend wird die Handauslese vorgenommen (Schweizerische Referenzmethode *B-RW-H*). Die Extraktion durch Formalin- oder Senfpulverlösung und die Handauslese-Methode sollten kombiniert werden, um eine realitätsnahe Ermittlung des gesamten Regenwurmbestandes zu gewährleisten (Dunger & Fiedler, 1997).

Zur Charakterisierung der Regenwurmgemeinschaften eignen sich die Artenzahl und -verbreitung (Diversität und Verbreitungskarten), sowie die Biomassen und Abundanzen der vier ökomorphologischen Regenwurmgruppen (Cuendet et al., 1997, Schweizerische Referenzmethode *BM-RW-B*):

Epigäische Regenwürmer, Streubewohner: Diese Arten leben in der Streu- und Mulchschicht oder im Kompost und bauen grosse Mengen organischen Materials ab.

Endogäische Regenwürmer, Mineralbodenbewohner: Diese Arten leben im Oberboden bis ca. 40 cm Tiefe und legen horizontale, meist nicht stabile Gänge an.

Anözische Regenwürmer (mit den zwei Untergruppen *Lumbricus* und *Nicodrilus* neu: *Aporrectodea*): Diese Arten graben senkrechte, über 1 m tiefe, dauerhafte Wohnröhren in den Boden, die sie mit Kot austapezieren. Anözische *Lumbricus* können bei feuchten Bedingungen auch im Sommer aktiv sein, ihre Röhren bleiben offen. Anözische *Nicodrilus/Aporrectodea* ziehen sich im Sommer in die Tiefe zurück, verschliessen ihre Wohnröhren und sind dann inaktiv.

Anwendung CH: regelmässig im KABO BE, einmalig auf 91 Standorten im Schweizer Mittelland (Cuendet et al., 1997)

3 Instrumente zur Beurteilung

3.1 Definition von Vergleichs- und Referenzwerten

Die Beurteilung von Messwerten ist für den Vollzug, für umweltpolitische Entscheidungstragende, für die Forschung oder landwirtschaftliche Beratung essenziell. Dabei soll geklärt werden, ob das Messniveau in einem für den Standort zu erwartenden Bereich liegt, oder wie der Messwert im Vergleich zu anderen Messwerten eingeordnet werden kann. Mit dieser Arbeitshilfe stehen zwei Arten von Beurteilungsinstrumenten zur Verfügung, die sich im Präzisionsgrad der Aussagemöglichkeiten unterscheiden (vgl. 3.2 und 3.4):

- **Vergleichswerte** beschreiben Durchschnitt und Streubreite von Messwerten eines Parameters ohne Berücksichtigung standortspezifischer Bodeneigenschaften. Sie ermöglichen eine allgemeine Beurteilung von konkreten Messergebnissen. Tiefe und hohe Werte sowie Ausreisser können erkannt werden. Vergleichswerte werden vor allem dann eingesetzt, wenn die Datengrundlage des Parameters (noch) nicht ausreichend ist, um damit Regressionsgleichungen zur Herleitung von Referenzwerten berechnen zu können.
- **Referenzwerte** ermöglichen eine differenzierte, standortspezifische Beurteilung von konkreten Messwerten eines Parameters, indem die Bodeneigenschaften als Grundlage zur Berechnung des zu erwartenden Referenzwertes für den fraglichen Standort dienen.

Sowohl die Vergleichs- als auch die Referenzwerte werden von der NABO und den KABOs für die Beurteilung der erhobenen bodenbiologischen Daten eingesetzt (Mösch und Hunziker 2015, Maurer et al., 2020, Hug et al., 2021).

Wie schon in der Arbeitshilfe von 2009 beschrieben, müssen die Datengrundlagen zur Festlegung der Vergleichs- und Referenzwerte und somit zur Beurteilung von Messwerten periodisch ergänzt werden (VBB/BSA, 2009). Dies ist für die vorliegende Arbeitshilfe 2024 erfolgt. Die aktuell vorliegenden Vergleichs- und Referenzwerte sind im Folgenden zusammengestellt.

3.2 Vergleichswerte Mikrobiologie

Die Aktualisierung der mikrobiologischen und faunistischen Vergleichswerte wurde 2024 durchgeführt (Hug, 2024). Es konnten Vergleichswerttabellen mit Daten von 238 Standorten für die Basalatmung, von 311 Standorten für die mikrobielle Biomasse FE-C, von 269 Standorten für mikrobielle Biomasse FE-N, von 268 Standorten für das Verhältnis $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ und von 311 Standorten für den metabolischen Quotienten $q\text{CO}_2$ erstellt werden, dies mit Daten aus einem Zeitraum von 2005–2023. Die Daten stammen von Standorten der NABO und den KABOs.

Die Vergleichswerte sind nach Nutzung (Acker, Dauergrünland, Wald) und Probenahmetiefe (0–10 cm, 0–20 cm) unterteilt (Tabelle 1 und Tabelle 2). Im Anhang sind die Vergleichswerte zusätzlich nach Messnetz (NABO, KABO AG, KABO BE, KABO GR, MIP⁵, OBA⁶), wo vorhanden, nach Nutzungsklassen (Gemüsebau, Obst-/Rebbau) und nach Probenahmetiefe unterteilt (Tabelle 10 – Tabelle 12). Weiter sind die Daten der Vergleichswerttabellen im Anhang als Boxplots dargestellt (Abbildung 2 – Abbildung 9). Details zur Herleitung der nachfolgenden Vergleichswerte sind der Publikation von Hug (2024) zu entnehmen.

⁵ Projekt «Mykorrhiza-Infektionspotential» (Jansa et al., 2014)

⁶ KABO BE, Oberacker (1 Standort, 6 Parzellen)

Nutzung	Probe- nahmetiefe	n	Median	Minimum	Maximum	Untertes Quartil	Oberes Quartil
Mikrobielle Biomasse FE-C [mg kg⁻¹ TS]							
Acker	0–10 cm	28	616	209	1609	404	824
	0–20 cm	96	620	203	3191	441	855
Dauergrünland	0–10 cm	76	1666	459	4409	848	2505
	0–20 cm	84	1604	398	4520	1056	2047
Wald	0–20 cm	27	1130	469	4658	740	1712
Mikrobielle Biomasse FE-N [mg kg⁻¹ TS]							
Acker	0–10 cm	28	79	27	228	55	105
	0–20 cm	84	93	28	381	70	135
Dauergrünland	0–10 cm	69	211	62	679	125	329
	0–20 cm	61	207	56	500	137	266
Wald	0–20 cm	27	144	68	333	109	187
Basalatmung [mg CO₂-C kg⁻¹ TS h⁻¹]							
Acker	0–10 cm	47	0.7	0.2	2.2	0.4	1.0
	0–20 cm	96	0.7	0.3	2.5	0.5	0.9
Dauergrünland	0–10 cm	84	1.5	0.4	5.0	1.0	1.9
	0–20 cm	84	1.3	0.6	2.8	1.0	1.8
Wald	0–20 cm	27	1.7	0.6	4.5	1.0	2.7
Verhältnis C_{mik}/C_{org} [mg C_{mik} g⁻¹ C_{org}] (FE-C/C_{org})							
Acker	0–10 cm	28	32.2	10.6	56.1	26.4	38.8
	0–20 cm	85	33.6	4.9	52.3	26.4	38.6
Dauergrünland	0–10 cm	56	44.0	13.2	70.3	36.0	50.4
	0–20 cm	74	41.7	23.5	74.3	37.5	50.9
Wald	0–20 cm	25	25.5	12.3	69.2	19.5	32.6
Metabolischer Quotient qCO₂ [mg CO₂-C g⁻¹ C_{mik}] (BA/FE-C)							
Acker	0–10 cm	28	1.0	0.5	1.7	0.8	1.1
	0–20 cm	96	1.1	0.6	2.6	0.9	1.4
Dauergrünland	0–10 cm	76	0.9	0.5	2.2	0.7	1.1
	0–20 cm	84	0.9	0.5	2.2	0.7	1.1
Wald	0–20 cm	27	1.5	0.7	3.5	1.2	1.8

Tabelle 1

Vergleichswerte mikrobielle Biomasse FE-C [mg kg⁻¹ TS], mikrobielle Biomasse FE-N [mg kg⁻¹ TS], Basalatmung [mg CO₂-C kg⁻¹ TS h⁻¹], Verhältnis C_{mik}/C_{org} [mg C_{mik} g⁻¹ C_{org}] (FE-C/C_{org}) und metabolischer Quotient qCO₂ [mg CO₂-C g⁻¹ C_{mik}] (BA/FE-C), unterteilt nach Nutzung.

Nutzung	Probe- nahmetiefe	n	Median	Minimum	Maximum	Unteres Quartil	Oberes Quartil
ATP [ng g⁻¹ TS]							
Zeitraum 1990–2001 / 2012–2021							
Acker	0–20 cm	470	832.10	102.00	5712.40	571.84	1292.51
Dauergrünland	0–20 cm	252	2227.15	408.10	9345.60	1419.15	3134.74
Alpweide	0–20 cm	229	3127.10	677.05	14641.05	2184.02	4497.00
C_{min} [µg OS g⁻¹ TS 15 d⁻¹]							
Zeitraum 1990–2021							
Acker	0–20 cm	672	598.40	79.00	2333.00	449.17	823.75
Dauergrünland	0–20 cm	362	1614.58	338.80	3968.40	1283.47	2102.12
Alpweide	0–20 cm	323	2691.98	955.13	11208.74	2135.52	3436.82

Tabelle 2

Vergleichswerte mikrobielle Biomasse ATP und Kohlenstoffmineralisierung C_{min} der Kantonalen Bodenbeobachtung des Kantons Freiburg (FRIBO).

Bodeneigenschaften wie der organische Kohlenstoffgehalt, pH-Wert oder Tongehalt beeinflussen die Menge und Aktivität des Bodenlebens massgebend. Um die mikrobiellen Vergleichswerte der Tabelle 1 und Tabelle 2 besser einordnen zu können, werden die dazugehörenden Bodeneigenschaften in der Tabelle 3 und Tabelle 4 gezeigt.

Tabelle 3

Vergleichswerte C_{org} (%), FAL-Method), pH-Wert (pH $CaCl_2$) und Tongehalt (%), unterteilt nach Nutzung, ohne FRIBO.

Nutzung	Probe-nahmetiefe	n	Median	Minimum	Maximum	Untertes Quartil	Oberes Quartil
C_{org} [%]							
Acker	0–10 cm	28	1.84	1.08	4.92	1.55	2.27
	0–20 cm	85	1.99	0.82	29.77	1.51	2.55
Dauergrünland	0–10 cm	56	3.21	1.16	9.50	2.31	4.59
	0–20 cm	74	3.73	1.39	10.14	2.53	4.71
Wald	0–20 cm	25	4.24	2.04	14.26	2.99	6.30
pH [$CaCl_2$]							
Acker	0–10 cm	28	5.8	4.9	7.3	5.4	6.2
	0–20 cm	72	6.2	4.9	7.5	5.6	6.8
Dauergrünland	0–10 cm	73	5.6	4.0	7.5	5.0	6.7
	0–20 cm	68	5.6	3.9	7.3	5.2	6.2
Wald	0–20 cm	22	4.4	3.4	7.2	3.9	5.1
Ton [%]							
Acker	0–10 cm	28	18	9	56	16	23
	0–20 cm	84	19	6	59	15	25
Dauergrünland	0–10 cm	73	21	11	42	17	27
	0–20 cm	68	21	11	51	18	27
Wald	0–20 cm	24	23	12	48	18	28

Tabelle 4

Bodeneigenschaften C_{org} (bestimmt mit der FAL-Methode (FAL, FAW, RAC; 1998)), pH-Wert (pH H_2O) und Tongehalt, gemessen mit Sedimentationsprinzip (%), des FRIBO.

Nutzung	Probe-nahmetiefe	n	Median	Minimum	Maximum	Unteres Quartil	Oberes Quartil
C_{org} [%]							
Zeitraum 1987–2001							
Acker	0–20 cm	706	1.33	0.58	37.04	1.16	1.80
Dauergrünland	0–20 cm	386	3.01	1.51	7.54	2.51	3.59
Alpweide	0–20 cm	329	4.17	1.86	45.97	3.54	5.45
pH [H_2O]							
Zeitraum 1987–2001							
Acker	0–20 cm	706	6.4	4.9	8.0	6.1	7.1
Dauergrünland	0–20 cm	386	6.1	4.9	7.7	5.8	6.5
Alpweide	0–20 cm	329	5.8	4.3	7.5	5.3	6.4
Ton [%]							
Zeitraum 1987–2001							
Acker	0–20 cm	706	16	0	60	13	18
Dauergrünland	0–20 cm	386	23	12	75	18	28
Alpweide	0–20 cm	329	35	0	65	24	41

3.3 Vergleichswerte Makrofauna

3.3.1 Datenlage

In der Schweiz bestehen lediglich für die Bodentiergruppe der Regenwürmer Vergleichswerte (Cuendet et al., 1997). Diese beschränken sich auf Biomassewerte und Individuenzahlen für die langjährige Nutzung als Dauergrünland mit Humusgehalten von 2–15% und in Gebieten mit <1200 mm Niederschlag.

3.3.2 Regenwurmgemeinschaften

Die regionaltypische Artenzusammensetzung der Regenwurmgemeinschaften kann mit Hilfe der Verbreitungskarten von Cuendet et al. (1997) beurteilt werden. Zudem ist für jede einzelne Art eine detaillierte Beschreibung mit ihrem Vorkommen vorhanden (Cuendet et al., 1997).

3.3.3 Vergleichswerte Biomasse und Abundanz

Die Gesamtbiomasse und -abundanz der Regenwurmgemeinschaften eines Standortes sowie die Biomassen und Abundanzen der vier unterschiedenen ökomorphologischen Gruppen können mit folgenden Vergleichswerten interpretiert werden:

Regenwurmbiomasse [g/m ²]	Median	Minimum	Maximum	Unteres Quartil	Oberes Quartil
Gesamtbiomasse	301	131	515	256	400
epigäische Gruppe	4	0	20	1	9
endogäische Gruppe	61	9	170	38	91
anözische Gruppe	228	73	495	174	309
- nur anözische Lumbricus	102	0*	220	63	147
- nur anözische Nicodrilus/Aporrectodea	121	0*	365	76	196
Anteile der ökomorphologischen Gruppen an der Regenwurmbiomasse [%]					
epigäische Gruppe	1	0	13	1	3
endogäische Gruppe	21	2	50	14	30
anözische Gruppe	75	48	98	67	85
- nur anözische Lumbricus	33	0*	86	21	44
- nur anözische Nicodrilus/Aporrectodea	39	0*	91	28	60

Tabelle 5

Vergleichswerte der Regenwurmbiomassen (g m⁻² und %-Anteile) für Dauergrünlandböden im Schweizerischen Mittelland (Cuendet et al., 1997).

* aus zoogeografischen Gründen können Gruppen fehlen.

Regenwurmabundanz [Ind./m ²]	Median	Minimum	Maximum	Unteres Quartil	Oberes Quartil
Gesamtabundanz	465	214	842	372	561
epigäische Gruppe	22	0	104	8	48
endogäische Gruppe	228	36	540	147	310
anözische Gruppe	186	44	422	134	264
- nur anözische Lumbricus	66	0*	155	42	89
- nur anözische Nicodrilus/Aporrectodea	121	0*	350	77	199
Anteile der ökomorphologischen Gruppen an der Regenwurmabundanz [%]					
epigäische Gruppe	5	0	37	2	10
endogäische Gruppe	53	9	80	37	62
anözische Gruppe	37	17	91	31	56
- nur anözische Lumbricus	13	0*	39	9	20
- nur anözische Nicodrilus/Aporrectodea	24	0*	73	17	40

Tabelle 6

Vergleichswerte der Regenwurmabundanzen (Individuen/m² und %-Anteile) für Dauergrünlandböden im Schweizerischen Mittelland (aus Cuendet et al., 1997, berechnet aus 86 der 88 Standorte, C. Maurer, unpubl. 2024)

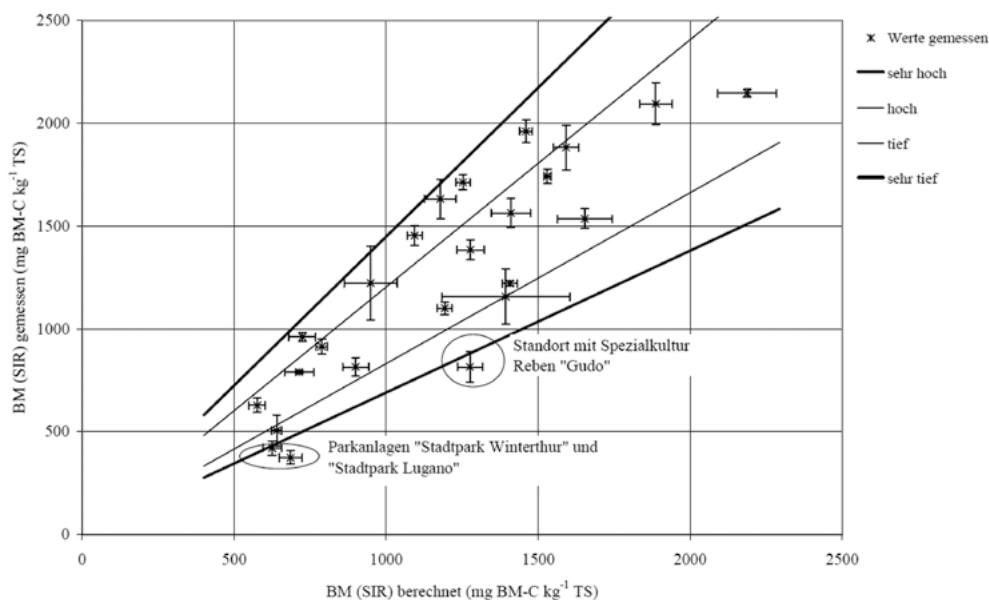
* aus zoogeografischen Gründen können Gruppen fehlen.

3.4 Referenzwertgleichungen

Anhand von standortspezifischen Bodeneigenschaften, die den Messwert beeinflussen, können Regressionsgleichungen hergeleitet und damit zu erwartende, standorttypische mikrobielle Messwerte berechnet werden, welche im Folgenden als Referenzwerte bezeichnet werden (Gleichung 1 bis Gleichung 11). Diese erlauben eine Beurteilung der gemessenen Werte. Die Beurteilung erfolgt anhand der Vertrauensbereiche der Regressionsgleichungen (Abbildung 1): Messwerte, die innerhalb des 67%-Vertrauensbereiches liegen, werden als «normal», Werte darüber und darunter werden als «hoch» bzw. «tief», Werte ober- und unterhalb des 95%-Vertrauensbereichs werden als «sehr hoch» bzw. «sehr tief» klassiert (Oberholzer et al., 1999, Oberholzer und Scheid, 2007). In Tabelle 7 sind die Grenzen für die Beurteilungsklassen, die anhand der Vertrauensbereiche hergeleitet werden für die mikrobiellen Biomassen FE-C und SIR und für die Basalatmung dargestellt.

Abbildung 1

Berechnete und gemessene mikrobielle Biomasse SIR in Böden von NABO-Standorten (n=35) (aus Oberholzer und Scheid, 2007). Darstellung des Mittelwerts pro Standort und Standardabweichung. Beurteilung: Messwerte, die innerhalb des 67%-Vertrauensbereiches liegen, werden als «normal», Werte darüber und darunter werden als «hoch» bzw. «tief», Werte ober- und unterhalb des 95%-Vertrauensbereichs werden als «sehr hoch» bzw. «sehr tief» beurteilt.



Für Ackerböden existieren Referenzwertgleichungen für die mikrobiellen Biomassen FE-C, SIR, ATP, die Basalatmung und die Kohlenstoffmineralisierung. Für Dauergrünland gibt es Referenzwertgleichungen für die Beprobungstiefe 0–20 cm für die Biomasse FE-C und die Basalatmung (Hug und Moll-Mielewczik, 2024) und für die Beprobungstiefe 0–10 cm für die Biomassen SIR, ATP und die Kohlenstoffmineralisierung (VBB/BSA 2009).

Referenzwertgleichungen für Acker 0–20 cm (VBB/BSA, 2009; Oberholzer et al., 1999)

$$\text{Mikrobielle Biomasse FE-C [mg } C_{\text{mik}} \text{ kg}^{-1} \text{ TS]} \\ \ln(\text{FE-C}) = 4.70 + 0.963 \ln(C_{\text{org}}) + 0.0637 \text{ pH} + 0.21 \ln(\text{Ton}) + 0.0008 \text{ Sand} \quad (1)$$

$$\text{Mikrobielle Biomasse SIR [mg } C_{\text{mik}} \text{ kg}^{-1} \text{ TS]} \\ \ln(\text{SIR}) = 3.58 + 0.823 \ln(C_{\text{org}}) + 0.154 \text{ pH} + 0.311 \ln(\text{Ton}) + 0.005 \text{ Sand} \quad (2)$$

$$\text{Basalatmung, pro Stunde [mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ TS h}^{-1}] \\ \ln(\text{BA}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{\text{org}}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Ton}) - 0.0009 \text{ Sand} - \ln(88) \quad (3)$$

$$\text{Basalatmung, pro Tag [mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ TS 24 h}^{-1}] \\ \ln(\text{BA}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{\text{org}}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Ton}) - 0.0009 \text{ Sand} \quad (4)$$

$$\text{Mikrobielle Biomasse ATP [ng g}^{-1} \text{ TS]} \\ \ln(\text{ATP}) = 1.5571 + 1.0826 \ln(\text{Ton}) \quad (5)$$

$$\text{Kohlenstoffmineralisierung [\mu g OS g}^{-1} \text{ 15 d}^{-1}] \\ \ln(C_{\text{min}}) = 2.4953 + 0.7601 \ln(\text{Humus}) \quad (6)$$

Geltungsbereich für mikrobielle Biomasse FE-C und SIR, Basalatmung: Tongehalt 10%–40%, pH (CaCl₂) 4.3–7.5 und C_{org}-Gehalt 1%–4%.

Geltungsbereich für mikrobielle Biomasse ATP und Kohlenstoffmineralisierung: Tongehalt 8%–60% und Humusgehalt von 1%–20%.

Referenzwertgleichungen für Dauergrünland 0–20 cm (Hug und Moll-Mielewicz, 2024)

$$\text{Mikrobielle Biomasse FE-C [mg } C_{\text{mik}} \text{ kg}^{-1} \text{ TS]} \\ \ln(\text{FE-C}) = 1.7448 + 1.0460 \ln(C_{\text{org}}) + 0.0188 \text{ pH} + 0.6574 \ln(\text{Ton}) + 0.5879 \ln(\text{Sand}) \quad (7)$$

$$\text{Basalatmung, pro Tag [mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ TS 24 h}^{-1}] \\ \ln(\text{BA}) = 1.7480 + 0.9176 \ln(C_{\text{org}}) + 0.1172 \text{ pH} + 0.0329 \ln(\text{Ton}) + 0.2989 \ln(\text{Sand}) \quad (8)$$

Geltungsbereich: Tongehalt 8%–44%, pH (CaCl₂) 4.0–7.2, und C_{org}-Gehalt 1.3%–8.9 %.

Referenzwertgleichungen für Dauergrünland 0–10 cm (VBB/BSA, 2009; Oberholzer et al., 1999)

$$\text{Mikrobielle Biomasse SIR [mg } C_{\text{mik}} \text{ kg}^{-1} \text{ TS]} \\ \ln(\text{SIR}) = 3.606 + 0.916 \ln(C_{\text{org}}) + 0.2848 \text{ pH} + 0.17 \ln(\text{Ton}) \quad (9)$$

$$\text{Mikrobielle Biomasse ATP [ng g}^{-1} \text{ TS]} \\ \ln(\text{ATP}) = 2.1854 + 0.7697 \ln(\text{Ton}) \quad (10)$$

$$\text{Kohlenstoffmineralisierung [\mu g OS g}^{-1} \text{ 15 d}^{-1}] \\ \ln(C_{\text{min}}) = 2.6741 + 0.7476 \ln(\text{Humus}) \quad (11)$$

Geltungsbereich für mikrobielle Biomasse SIR: Tongehalt 10%–40%, pH (CaCl₂) 4.3–7.5 und C_{org}-Gehalt 1%–4%.

Geltungsbereich für mikrobielle Biomasse ATP und Kohlenstoffmineralisierung: Tongehalt von 8%–60% und einem Humusgehalt von 1%–20%

C_{org} entspricht dem organischen Kohlenstoffgehalt in % des Gewichts der Feinerde, bestimmt gemäss FAL Methode (FAL, FAW, RAC; 1998). Ton und Sand entsprechen den jeweiligen Körnungsanteilen in % (Ton + Schluff + Sand + Humus = 100%) und ln dem natürlichen Logarithmus. Die Körnung wurde, je nach Datenherkunft, mit

7

Bestimmung der Körnung
in der Feinerde

8

Bestimmung der Körnung
im mineralischen Anteil
der Feinerde

9

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/fachinformationen/massnahmen-fuer-den-bodenschutz/internationales-jahr-boden/arbeitsgruppe-vollzug-bodenbiologie--vbb-.html>



den Agroscope Referenzmethoden KOF⁷ oder KOM⁸ gemessen. Falls der C_{org} mit Trockenveraschung gemessen wird, besteht ein Umrechnungsfaktor von Gubler et al. (2018) von 1.18 für Schweizer Böden. Der Humus wird mit einem Faktor von $1.725 \cdot C_{org}$ berechnet. Der pH-Wert wird in der $CaCl_2$ -Lösung gemessen (gemäss Referenzmethoden Agroscope).

Für die Berechnungen der Referenzwerte sind auf der Webseite der Fachgruppe VBBio⁹ Excel-Tabellen als Download verfügbar.

3.4.1 Zustandsindikator Q

Die mikrobiellen Messwerte können auch direkt mit den standortspezifischen Referenzwerten verglichen werden, indem die Messwerte durch die entsprechenden Referenzwerte dividiert werden (Gleichung 12). Dieser Quotient, als Zustandsindikator Q bezeichnet, ist somit ein Indikator für den aktuellen Zustand des Standortes, der sich auf die jeweilige Messgrösse bezieht. Mit einem Index wird präzisiert, für welche Messgrösse Q berechnet wurde (Q_{FE-C} , Q_{BA} bzw. Q_{SIR}) (Hug et al., 2021).

$$Q = \frac{\text{Messwert}}{\text{standortspezifischer Referenzwert}} \quad (12)$$

Für $Q > 1$ liegt der Messwert über dem standortspezifischen Referenzwert, für $Q < 1$ darunter.

Mit dem berechneten Zustandsindikator Q kann die von Oberholzer et al. (1999) definierte Beurteilungsklasse ermittelt werden. Die Grenzen der Vertrauensbereiche für Q bzw. der Beurteilungsstufen berechnen sich folgendermassen, wobei se der geschätzte Standardfehler der Regression ist und als Mass für die Genauigkeit der Regression gilt (se_{est} englisch: standard error of estimate) und e die eulersche Zahl ($e \approx 2.72$):

Grenze «sehr tief» zu «tief»	=	untere Grenze VB95	=	e^{-2se}
Grenze «tief» zu «normal»	=	untere Grenze VB67	=	e^{-se}
Grenze «normal» zu «hoch»	=	obere Grenze VB67	=	e^{se}
Grenze «hoch» zu «sehr hoch»	=	obere Grenze VB95	=	e^{2se}

Anhand dieser Berechnungen wurde mit dem jeweiligen Standardfehler der Regression die Bereiche der qualitativen Klassen von «sehr tief» bis «sehr hoch» für die mikrobiellen Biomassen FE-C und SIR und die Basalatmung hergeleitet (Tabelle 7).

Im Vergleich zu den qualitativen Klassen wie «sehr hoch» oder «tief» ist Q eine kontinuierliche numerische Grösse und ermöglicht grafische Darstellungen und statistische Auswertungen.

Tabelle 7: Grenzen der Beurteilungsklassen für die mikrobiellen Biomassen FE-C und SIR und für die Basalatmung

	Mikrobielle Biomasse FE-C		Biomasse SIR		Basalatmung BA	
	Acker 0–20cm	Dauergrünland 0–20 cm	Acker 0–20cm	Dauergrünland 0–10 cm	Acker 0–20cm	Dauergrünland 0–20 cm
se _{est}	0.2054	0.2101	0.1836	0.2114	0.201	0.2689
sehr tief	< 0.66	< 0.66	< 0.69	< 0.66	< 0.67	< 0.58
tief	0.66 bis 0.80	0.66 bis 0.80	0.69 bis 0.82	0.66 bis 0.80	0.67 bis 0.81	0.58 bis 0.75
normal	0.81 bis 1.23	0.81 bis 1.23	0.83 bis 1.20	0.81 bis 1.24	0.82 bis 1.22	0.76 bis 1.31
hoch	1.24 bis 1.51	1.24 bis 1.52	1.21 bis 1.44	1.25 bis 1.53	1.23 bis 1.49	1.32 bis 1.71
sehr hoch	> 1.51	> 1.52	> 1.44	> 1.53	> 1.49	> 1.71

4 Handlungsbedarf

4.1 Standardisierung von Methoden und Datenablage

Eine einheitliche Verwendung von standardisierten Methoden erlaubt den Vergleich und eine zuverlässigere Beurteilung von Daten unterschiedlicher Herkunft und entspricht einer effizienten Nutzung der noch immer raren bodenbiologischen Daten. Für die Interpretation der Resultate ist auch eine einheitliche Dokumentation der Probenahme, Aufbereitung, Lagerung und Messung anzustreben. Die Koordinationsarbeit zwischen den verschiedenen bestehenden Bodenbeobachtungsprogrammen ist zu intensivieren und die Bemühungen zur Vereinheitlichung und Standardisierung der Methoden, vor allem im Bereich der Molekularbiologie, müssen aufrechterhalten und weitergetrieben werden. Auch eine gemeinsame Datenablage für alle bodenbiologischen Daten im nationale Bodeninformationssystem NABODAT ist anzustreben.

4.2 Beurteilungsgrundlagen

Die bestehenden Beurteilungsgrundlagen für die Mikrobiologie und die faunistischen Parameter sind auf gewisse Regionen, Höhenlagen, Körnungen, Humusgehalte und vor allem Nutzungen limitiert. Um bodenbiologische Daten über das Schweizer Mittelland hinaus interpretieren zu können, sollten weitere Standorte in Lagen über 800 m.ü.M., in organischen Böden, Wäldern, Rebbergen, Obstanlagen und weiteren unterrepräsentierten Ökosystemen beprobt und Referenzwerte erarbeitet werden. Abschätzungen zur Anzahl Datenpunkte, die notwendig sind, um einen möglichst repräsentativen Messbereich abzubilden ergaben, dass zur Herleitung von schweizweit gültigen Referenzwerten für die mikrobielle Biomasse auf Ackerflächen Daten von ca. 70 und auf Dauergrünland von ca. 30 Standorten benötigt werden. Zur Herleitung der Basalatmung wiederum, die grundsätzlich einen grösseren Schwankungsbereich aufweist, werden Daten von ca. 90 Standorten für Acker- und von ca. 50 Standorten für Dauergrünland benötigt (Hug & Moll-Mielewicz, 2024). Solche Abschätzungen zur notwendigen Anzahl von Datenpunkten sollten auch für weitere Parameter, wie etwa für die Herleitung von Referenzwerten der Regenwurmgemeinschaften oder allfälligen weiteren Organismengruppen, gemacht werden. Zudem sollten weitere erklärende Variablen wie das Klima in die Herleitung von Referenzwertgleichungen miteinbezogen werden.

Viel Forschungsbedarf besteht hinsichtlich den Beurteilungsgrundlagen von Bakterien- und Pilzgemeinschaften. Im Rahmen von NABObio haben sich diese als sehr standorttypisch und über die Jahre stabil gezeigt (Gschwend et al., 2021a und b). Gäbe es Veränderungen, könnten diese zum heutigen Zeitpunkt jedoch noch nicht qualitativ beurteilt oder Stressoren zugeordnet werden.

Für die Regenwurmgemeinschaften sind die aus den 1990-er Jahren stammenden Vergleichswerte nach über 30 Jahren zu verifizieren, allfällige Klimaeinflüsse abzuklären und Grundlagen für Referenzwerte zu erarbeiten. Zudem fehlen Vergleichswerte für Ackerflächen, Wald und weitere Nutzungen.

Die vorliegenden Beurteilungsgrundlagen erlauben eine erste Einordnung der erhobenen Messwerte und bestehen vor allem aus einem statistisch-vergleichenden Ansatz. Es fehlt jedoch noch viel Grundlagenwissen in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Messgrössen und funktionaler Bedeutung.

4.3 Erarbeitung von Indikatoren

Das BAFU führt eine Liste von vorhandenen Umweltindikatoren, die den Zustand und die Entwicklung derselben zeigt¹⁰. Bis heute sind in dieser Liste keine bodenbiologischen Indikatoren enthalten. Gewisse Vorschläge wie der Zustandsindikator Q oder die visuelle Darstellung der Beurteilungsklassen anhand der Referenzwertgleichungen bestehen zwar (Hug et al., 2018), die Datenmenge, um damit gesamtschweizerische Aussagen machen zu können, ist jedoch noch zu gering.

Aussagen über Zustand und Entwicklung von bestimmten Organismenarten oder funktionellen Gruppen können anhand molekularbiologischer Methoden gemacht werden. Auch hier können diese noch nicht für bestimmte Bodenfunktionen bewertet werden. Wissenschaftliche Feldstudien konnten gewisse bakterielle und pilzliche Zeigerarten in Verbindung mit verdichteten oder wassergesättigten Verhältnissen im Boden in Verbindung bringen (Frey et al., 2011; Hartmann et al., 2014; Gschwend et al., 2020) oder Zusammenhänge von nutzungsbedingten Einflüssen auf die Zusammensetzung der Organismengemeinschaften im Rahmen des DOK-Versuchs aufzeigen (Hartmann et al., 2015). Um den Einfluss von ausgewählten Stressoren auf Zeigerarten genau abschätzen zu können, braucht es experimentelle Ansätze. Für den Vollzug können folgende Stressoren relevant sein: pH-Änderungen, Bodenverdichtung, Bodenbearbeitung, Höhenlage, geogene Belastungen, Pflanzenschutzmittel, PFAS, Hg-Belastung, spezifische Organismen, Gewächshäuser, Bodenaufwertungen, Rekultivierungen und Klimawandel. Um Aussagen über die Gefährdung ausgewählter Bodenfunktionen machen zu können, müssen auch funktionelle Organismengruppen experimentell untersucht werden. Im Bereich von Nährstoffkreisläufen beispielsweise wären dies Analysen der Nährstoffverfügbarkeit und -dynamik, einschliesslich der Umwandlung organischer Substanzen in pflanzenverfügbare Nährstoffe.

10

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/zustand/indikatoren.html>



4.4 Untersuchung weiterer Bodenorganismen

Bestimmungen zusätzlicher Bodenorganismengruppen wie Protisten, Nematoden, Springschwänze oder Milben werden bisher im Vollzug des schweizerischen Bodenschutzes nicht angewendet. Hierfür liefern molekularbiologische Ansätze neue und vielversprechende Möglichkeiten. Im Vergleich zur morphologischen Bestimmung von Organismen ist die für die Analytik notwendige Probenmenge geringer und die Probenahme weniger invasiv. Zudem sind für die genaue morphologische Bestimmung von Mikro-, Meso- und Makrofauna hochspezialisierte Fachkräfte notwendig. Eine Studie zeigte, dass molekularbiologische Ansätze zur Bestimmung von Regenwurmgemeinschaften genauer sein können als die morphologische (Lilija et al., 2023). In der Schweiz konnten erste, ermutigende Erfahrungen in der Erfassung von verschiedenen Organismen am selben Standort mit dem Projekt BioDivSol gesammelt werden (Fernández-Bravo et al., 2021, Gschwend et al. 2022). Die angewendeten Methoden müssen nun weiter getestet und die Datenbasis erweitert werden. Zudem sollen die Möglichkeiten der Kombination von morphologischen und molekularbiologischen Methoden weiter abgeklärt werden.

4.5 Erstellen von Roten Listen und Erfassung von invasiven Arten

In der Schweiz gibt es zahlreiche Rote Listen für gut einen Fünftel der einheimischen Tier-, Pflanzen-, Pilz- und Flechtenarten (Klaus et al., 2021). Solche Informationen über Verbreitung und Gefährdung existieren für die im Boden lebenden einheimischen Arten bisher nicht. Einen ersten Einblick dazu wurde von der Gruppe VBBio

im Auftrag des BAFU erarbeitet (Frey & Maurer, 2022). Eine Rote Liste von spezifischen Bodentieren wie den Regenwürmern existieren erst in wenigen Ländern wie z.B. Deutschland (Lehmitz et al., 2016). Bedrohte, aber auch invasive Arten wie Plattwürmer können gezielt mit Hilfe molekularbiologischer Ansätze gesucht werden. Hierfür müssen die Sequenzdatenbanken ausgebaut werden (Gschwend et al., 2018).

4.6 Flächendeckende Erfassung des bodenbiologischen Zustandes

Mit einer grösseren Anzahl Standorten verschiedenster pedologischer und agronomischer Ausprägung könnten systembedingte Streuungen von bodenbiologischen Parametern besser erfasst, das Ursache-Wirkung Verständnis verbessert und die Erstellung von aussagekräftigen Kartengrundlagen ermöglicht werden. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Bund und Kantonen (NABO, KABO, BDM, LWF, LFI und weiteren), die Koordination von Aktivitäten oder die geplante landesweite Kartierung des KOBO sind vielversprechende Möglichkeiten, die flächendeckende Erfassung von Bodenorganismen voranzutreiben.

4.7 Gesetzgebung und Vollzug

Standorttypische Referenzwerte sind die Voraussetzung für die Wirkungskontrolle umweltpolitischer Massnahmen und für einen effizienten Vollzug. Einerseits sind etliche Referenzwerte noch zu erarbeiten (siehe oben), andererseits sind die bestehenden Referenzwerte rechtlich nicht bindend. Dies soll sich innerhalb der geplanten Revision der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 1998) ändern, indem neben chemischen und physikalischen Vollzugswerten auch rechtlich bindende bodenbiologische Werte zur Beurteilung des Bodenzustandes festgelegt werden sollen. Auch in diesem Zusammenhang ist der Weiterentwicklung und Erarbeitung von standorttypischen Referenzwerten von bodenbiologischen Parametern eine hohe Priorität beizumessen.

5 Schlusswort

Diese Arbeitshilfe ermöglicht ein standardisiertes und wissenschaftlich fundiertes Erfassen und Beurteilen von bodenbiologischen Parametern. Wie schon in der Arbeitshilfe von 2009 erwähnt, muss die Standardisierung von Methoden ausgebaut und die Datengrundlagen zur Beurteilung von Messwerten laufend ergänzt werden (VBB/BSA, 2009). Somit versteht sich auch diese Ausgabe der Arbeitshilfe als Momentaufnahme der vorhandenen Methoden und Datengrundlagen. Sie kann und soll auch als Nachschlagewerk für zukünftige Projekte verwendet werden. Projekte, die die beschriebenen Handlungsfelder bearbeiten und für ein umfassenderes Verständnis des verborgenen Kosmos des Bodenökosystems so wichtig sind. Es braucht noch viel Grundlagenforschung – in Zusammenarbeit mit den Vollzugsbehörden – um eine Standardisierung, Referenzwert- und Indikatorerarbeitung sowie eine dichte, schweizweit einheitliche und kontinuierliche Analytik und Datenerhebung zu erreichen. Die entsprechenden finanziellen und personellen Ressourcen bei Bund und Kantonen, in der Forschung und im Vollzug sind auszubauen.

Dank

Diese Arbeitshilfe ist ein Projekt der Arbeitsgruppe VBBio-BioSA. Ein grosses Dankeschön gebührt Agroscope für die fachliche und finanzielle Unterstützung dieser Arbeit. Zudem danken wir den Mitarbeitenden der kantonalen Bodenschutzfachstellen für das Zurverfügungstellen der Daten: Maurus Fischer (Kt. GR), Dominik Müller (Kt. AG), Adrian von Niederhäusern und Sarah Busmann (Kt. FR). Vielen Dank auch an Juliane Hirte (Bodenqualität und Bodennutzung, Agroscope Reckenholz) für die Auswertung und die grafische Darstellung der Vergleichswerte und an Wolfgang Sturny (Bern) für die Bearbeitung der französischen Version.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Berechnete und gemessene mikrobielle Biomasse SIR in Böden von NABO-Standorten (n=35) (aus Oberholzer und Scheid, 2007). Darstellung des Mittelwerts pro Standort und Standardabweichung. Beurteilung: Messwerte, die innerhalb des 67%-Vertrauensbereiches liegen, werden als «normal», Werte darüber und darunter werden als «hoch» bzw. «tief», Werte ober- und unterhalb des 95%-Vertrauensbereichs werden als «sehr hoch» bzw. «sehr tief».	20
Abbildung 2: Organischer Kohlenstoffgehalt (%) (FAL-Methode), die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	43
Abbildung 3: pH-Wert (CaCl ₂), die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	43
Abbildung 4: Tongehalt (%), die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	44
Abbildung 5: Vergleichswerte Basalatmung [mg CO ₂ -C kg ⁻¹ Boden TS h ⁻¹]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	44

Abbildung 6: Vergleichswerte mikrobielle Biomasse BM CFE [mg kg ⁻¹ Boden TS]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	45
Abbildung 7: Vergleichswerte mikrobielle Biomasse BM FE-N [mg kg ⁻¹ Boden TS]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	45
Abbildung 8: Vergleichswerte metabolischer Quotienten qCO ₂ [mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mik}]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	46
Abbildung 9: Vergleichswerte Verhältnis C _{mik} /C _{org} [mg C _{mik} g ⁻¹ C _{org}]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleichswerte mikrobielle Biomasse FE-C [mg kg ⁻¹ TS], mikrobielle Biomasse FE-N [mg kg ⁻¹ TS], Basalatmung [mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹], Verhältnis C _{mik} /C _{org} [mg C _{mik} g ⁻¹ C _{org}] (FE-C/C _{org}) und metabolischer Quotient qCO ₂ [mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mik}] (BA/FE-C), unterteilt nach Nutzung.	17
Tabelle 2: Vergleichswerte mikrobielle Biomasse ATP und Kohlenstoffmineralisierung C _{min} der Kantonalen Bodenbeobachtung des Kantons Freiburg (FRIBO).	17
Tabelle 3: Vergleichswerte C _{org} (%; FAL-Methode), pH-Wert (pH CaCl ₂) und Tongehalt (%), unterteilt nach Nutzung, ohne FRIBO.	18
Tabelle 4: Bodeneigenschaften C _{org} (bestimmt mit der FAL-Methode (FAL, FAW, RAC; 1998)), pH-Wert (pH H ₂ O) und Tongehalt, gemessen mit Sedimentationsprinzip (%) des FRIBO.	18
Tabelle 5: Vergleichswerte der Regenwurmbiomassen (g m ⁻² und %-Anteile) für Dauergrünlandböden im Schweizerischen Mittelland (Cuendet et al., 1997).	19
Tabelle 6: Vergleichswerte der Regenwurmbiobundanz (Individuen/m ² und %-Anteile) für Dauergrünlandböden im Schweizerischen Mittelland (aus Cuendet et al., 1997, berechnet aus 86 der 88 Standorte, C. Maurer, unpubl. 2024)	19
Tabelle 7: Grenzen der Beurteilungsklassen für die mikrobiellen Biomassen FE-C und SIR und für die Basalatmung	23
Tabelle 8: Vergleichswerte zur mikrobiellen Biomasse FE-C [mg kg ⁻¹ TS] (n=311)	36
Tabelle 9: Vergleichswerte zur mikrobiellen Biomasse FE-N [mg kg ⁻¹ TS] (n=269)	37
Tabelle 10: Vergleichswerte zur Basalatmung [mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹] (n=338)	38
Tabelle 11: Vergleichswerte zum metabolischen Quotienten qCO ₂ [mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mik}] (BA/FE-C) (n=311)	39
Tabelle 12: Vergleichswerte zum Verhältnis C _{mik} /C _{org} [mg C _{mik} g ⁻¹ C _{org}] (FE-C/C _{org}) (n=268)	40
Tabelle 13: Organischer Kohlenstoffgehalt (%)(C _{org} , FAL-Methode) (n=268), pH-Wert (pH CaCl ₂) (n=263), und Tongehalt (%) (n=277), unterteilt nach Messnetz	41

Literaturverzeichnis

Aktionsplan des Bundesrates. 2017. Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.). Bern.

Anderson J.P.E. & Domsch K.H.; 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10, 215-221.

BAFU und BLW 2008: Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221 S.

BAFU (2012): Strategie Biodiversität Schweiz. In Erfüllung der Massnahme 69 (Ziel 13, Art. 14, Abschnitt 5) der Legislaturplanung 2007–2011: Ausarbeitung einer Strategie zur Erhaltung und Förderung der Biodiversität. Die «Strategie Biodiversität Schweiz vom 25. April 2012 des Bundesrates» wurde am 24. Juli 2012 im Bundesblatt publiziert.

BAFU Bundesamt für Umwelt (2020): Bodenstrategie Schweiz für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Umwelt-Info, Bern, 2020, p 69.

Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B.C., Munda, S., Dari, B., 2022. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Front Microbiol.* 2022 Aug 17;13:938481.

Bräm, E., 2011. Bodenbiologische Untersuchungen im Kanton Graubünden. VBB/BSA Bulletin Nr. 12, April 2011, p.14-17.

Bunemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z.G., Creamer, R., de Deyn, G.B., de Goede, R.G.M., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T.W.M., Mäder, P., Pulleman, M.M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018: Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120 (2018) 105–125.

Cluzeau, D., Guernion, M., Chaussod, R., Martin-Laurent, F., Villenave, C., Cortet, J., Ruiz-Camacho, N., Pernin, C., Mateille, T., Philippot, L., Bellido, A., Rougé, L., Arrouays, D., Bispo, A., Pérès, G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology* 49, 63–72.

Cuartero, J., Frey, B., Eder, R., & Brunner, I., 2024. More than a decade of irrigation alters soil nematode communities in a drought-prone Scots pine forest. *Applied Soil Ecology*, 203, 105621.

Cuartero, J., Briones, M.J.I., Rast, B.M., Stierli, B., Maurer-Troxler, C., Hug, A.-S., Widmer, F., Schlaghamersky, J., Frey, B., 2025. Earthworm and enchytraeid indicator taxa of different land-use types identified using soil DNA metabarcoding. *Applied Soil Ecology*, 206, 105891.

Cuendet, G., Stähli, R. & Suter, E. 1997: Die Regenwurmfauna von Dauergrünland des Schweizer Mittellandes. Schriftenreihe Umwelt, Nr. 291, Buwal, Bern, 91 S.

Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin T., Lemanceau P., Maron P.A. et Ranjard L. – 2020 – Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français, *Etude et Gestion des Sols*, 27, 51-71.

Donhauser, J., Briones, M. J., Mikola, J., Jones, D. L., Eder, R., Filser, J., Frey, B., 2023. Extracting DNA from soil or directly from isolated nematodes indicate dissimilar community structure for Europe-wide forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 185, 109154.

Dunger, W. & Fiedler, H.J. (Hrsg.) 1997: *Methoden der Bodenbiologie*, 2. neubearbeitete Auflage. Verlag Gustav Fischer Jena Stuttgart Lübeck Ulm.

FAL, FAW, RAC; 1998. Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung.

Fernández-Bravo, M.; Gschwend, F.; Mayerhofer, J.; Hug, A.; Widmer, F.; Enkerli, J., 2021. Land-Use Type Drives Soil Population Structures of the Entomopathogenic Fungal Genus *Metarhizium*. *Microorganisms* 2021, 9, 1380.

FRIBO, 2024. Resultate der Bodenbeobachtung im Kanton Freiburg -FRIBO-Bericht, 2024. Etat de Fribourg, Staat Freiburg, Groupe de coordination pour la protection des sols, Koordinationsgruppe für den Bodenschutz, p.167.

Fierer, N., 2017. Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590.

Frey, B., Stemmer, M., Widmer, F., Luster, J., & Sperisen, C., 2006. Microbial activity and community structure of a soil after heavy metal contamination in a model forest ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1745-1756.

Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P., 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 45(4), 312-320.

Frey, B., Niklaus, P. A., Kremer, J., Lüscher, P., & Zimmermann, S., 2011. Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(17), 6060-6068.

Frey, B., Walthert, L., Perez-Mon, C., Stierli, B., Köchli, R., Dharmarajah, A., & Brunner, I., 2021. Deep soil layers of drought-exposed forests harbor poorly known bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*, 12, 674160.

Frey, B., & Maurer C., 2022. Informationen zum Boden anhand der Gebundenheit der Rote-Liste Arten BAFU. *VBBio Bulletin BioSA* Nr. 20, 2022.

Frey, B., Rast, B. M., Qi, W., Stierli, B., & Brunner, I., 2022a. Long-term mercury contamination does not affect the microbial gene potential for C and N cycling in soils but enhances detoxification gene abundance. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1034138.

Frey, B., Varliero, G., Qi, W., Stierli, B., Walthert, L., & Brunner, I., 2022b. Shotgun metagenomics of deep forest soil layers show evidence of altered microbial genetic potential for biogeochemical cycling. *Frontiers in Microbiology*, 13, 828977.

Frossard, A., Donhauser, J., Mestrot, A., Gygax, S., Bååth, E., & Frey, B., 2018. Long- and short-term effects of mercury pollution on the soil microbiome. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 191-199.

Gross, T., Hug, A.S., Moll-Mielewczik, Müller, M., Suter, D., Wächter, D., Wollmann, I., Zimmermann, R., Meuli, R.G., 2024. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2019. Zustand und zeitliche Entwicklung von Schad- und Fremdstoffen, organischem Kohlenstoff und der Mikrobiologie im Boden. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Landwirtschaft BLW Bern, 2024.

Gubler, A., Wächter, D., Schwab, P., 2018. Homogenisierung von Bodenkohlenstoff-Daten: Harmonisierung der Resultate aus Nassoxydation (FAL-Methode) und Trockenveraschung. *Agroscope Science*, 62, 1-9.

Gschwend, F., Hug, A.-S., Gubler, A., Meuli, R.G., Hartmann, M., Frey, B., Widmer, F., 2018. Mikrobielle Diversität in Böden von 30 NABO-Referenzmessstandorten. Schlussbericht des MiDiBo NABObio Projekts.

Gschwend, F., Aregger, K., Gramlich, A., Walter, T., Widmer, F., 2020. Periodic waterlogging consistently shapes agricultural soil microbiomes by promoting specific taxa, *Applied Soil Ecology*, Vol.155, 103623.

Gschwend, F., Hartmann, M., Hug, A., Enkerli, J., Gubler, A., Frey, B., Meuli, R.G., Widmer, F., 2021a. Long-term stability of soil bacterial and fungal community structures revealed in their abundant and rare fractions. *Molecular Ecology* 30, 4305–4320.

Gschwend, F., Hartmann, M., Mayerhofer, J., Hug, A.-S., Enkerli, J., Gubler, A., Meuli, R.G., Frey, B., Widmer, F., 2021b. Site and land-use associations of soil bacteria and fungi define core and indicative taxa. *FEMS microbiology ecology* 97, fiab165.

Gschwend, F., Fernández-Bravo, M., Degruene, F., Donhauser, J., Moll-Mielewczik, J., Frey, B. et al. (2022) Final report of the pilot study "MiDiBo-2" (Mikroskopische Diversität im Boden 2). 1-71.

Hartmann, M., Niklaus, P. A., Zimmermann, S., Schmutz, S., Kremer, J., Abarenkov, K., Frey, B., 2014. Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *ISME Journal*, 8(1), 226-244.

Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P. Widmer, F., 2015. Distinct soil microbial diversity under longterm organic and conventional farming. *ISME Journal* 9, 1177–1194.

Hawksworth, D., Lücking, R., 2017. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species, p 79-95. In Heitman, J., Howlett, B., Crous, P., Stukenbrock, E., James, T., Gow, N. (ed), *The Fungal Kingdom*. ASM Press, Washington, DC.

Hebert, P.D., Cywinska, A., Ball, S.L., deWaard, J.R., 2003. Biological identifications through DNA bar-codes. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 270, 313-321.

Heinze, S., Raupp, J., Joergensen, R.G., 2010. Effects of fertilizer and spatial heterogeneity in soil pH on microbial biomass indices in a long-term field trial of organic agriculture. *Plant Soil* 328: 203-215.

Hug, A.S., Gubler, A., Gschwend, F., Widmer, F., Oberholzer, H.-R., Frey, B., Meuli, R.G., 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science* 63. Zürich-Reckenholz.

Hug, A.-S., Moll-Mielewicz J., Gubler A., 2021. Monitoring Bodenbiologie – Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *Agroscope Science*, 110, 1-35.

Hug, A.-S., 2024. Vergleichswerte von bodenmikrobiologischen Parametern. *Agroscope*, Zürich-Reckenholz. Ein Projekt der VBBio.

Hug, A.-S. & Moll-Mielewicz J., 2024. Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung an Graslandstandorten. *Agroscope Science*, 188, 1-31.

Jansa, J., Erb, A., Oberholzer, H.-R., Smilauer, P., Egli, S., 2014. Soil and geography are more important determinants of indigenous arbuscular mycorrhizal communities than management practices in Swiss agricultural soils. *Molecular Ecology*, 23, 2118-2135.

Klaus, G., Cordillot, F., Künzle, I., 2021. Zustand der Artenvielfalt in der Schweiz. Synthese rote Listen, Stand 2020. BAFU, Bern, Info Species, Neuchâtel. Umwelt-Zustand.

Labouyrie, M., Ballabio, C., Romero, F. et al. Patterns in soil microbial diversity across Europe. *Nat Commun* 14, 3311 (2023).

Lehmitz, R., Römbke, J., Graefe, U., Beylich, A., Krück, S., 2016. Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer Deutschlands. Hg. Senckenberg, Museum für Naturkunde, Görlitz.

Li, X., Zhang, L., Liu, Y., and Sun, C., 2012. Impact of Different Fertilization Regimes on Soil Organic Carbon and Microbial Biomass in an Intensively Cultivated Soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 159; 72-78.

Liu, C., Wu, J., Zhang, Y., & Liu, Y., 2014. Relationships between soil microbial biomass and soil properties in a temperate forest." *Applied Soil Ecology*, 74, 21-29.

Lilja, M.A., Buivydaitė, Ž., Zervas, A., Krogh, P.H., Hansen, B.W., Winding, A., Sapkota, R., 2023. Comparing earthworm biodiversity estimated by DNA metabarcoding and morphology-based approaches. *Appl Soil Ecol*, 185, 104798.

Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.

Maire N., 1984. Extraction de l'adénosine triphosphate dans les sols ; une nouvelle méthode de calcul des pertes en ATP. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 19, p. 491-500.

Maurer, C., Müller, D., Lanfranchi, M., Weisskopf, P., Oberholzer, H.R., Walder, F., 2020. Mikrobiologische Parameter in der Kantonalen Bodenbeobachtung – eine Synthese. *Agrarforschung Schweiz* 11: 147-153.

Mayerhofer, J., Eckard, S., Hartmann, M., Grabenweger, G., Widmer, F., Leuchtmann, A., Enkerli, J., 2017. Assessing effects of the entomopathogenic fungus *Metarhizium brunneum* on soil microbial communities in *Agriotes* spp. biological pest control. *FEMS microbiology ecology*, 93(10), fix117.

Mayerhofer, J., Wächter, D., Calanca, P., Kohli, L., Roth, T., Meuli, R. G., Widmer, F., 2021. Environmental and Anthropogenic Factors Shape Major Bacterial Community Types Across the Complex Mountain Landscape of Switzerland. *Frontiers in Microbiology*, 12, (11 March), 2021, 1-17.

Mösch, D. und Hunziker, M., 2015. 10 Jahre Bodenmikrobiologie-Monitoring. Abteilung Umwelt, Umwelt Aargau, Sondernummer 45, November 2015.

Nannipieri, P., Ascher, J., & Ceccherini, M. T., 2003. Soil microbial biomass: A key factor in soil fertility. In *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry* (pp. 247-272). CRC Press.

Nunes, M. R., Karlen, D. L., Veum, K. S., Moorman, T. B., Cambardella, C. A., 2020. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: a US meta-analysis. *Geoderma* 369, 114335. 10.1016/j.geoderma.2020.114335

Oberholzer, H.-R., Rek, J., Weisskopf, P., Walther, U., 1999. Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agrobiological Research* 52 (2), 113–125.

Oberholzer, H.-R., Scheid, S., 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt-Wissen Nr. 0723. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

Oberholzer, H.-R., Scheid, S., Schwab, P., Bonvicini, A., Müller, S., Brunner, H., 2006. Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften. Pilotprojekt LAZBO. Teil 3, Bodenmikrobiologische Untersuchungen.

Oberholzer, S., Herrmann, C., Bodenhausen, N., Krause, H. M., Mestrot, A., Speranza, C. I., Jarosch, K. A., 2024. No effect on biological or chemical soil properties when amended with effective microorganisms for improved cover crop decomposition. *Applied Soil Ecology*, 197, 105358.

ökonsult, 1994. Untersuchung zum Regenerationspotential von Regenwurmpopulationen in unterschiedlich alten Rekultivierungsflächen. Erfolgskontrolle der Rekultivierung Mattstetten BE. Ökonsult 1994 zuhanden Bodenschutzfachstelle Kanton Bern.

- Orgiazzi, A., Panagos, P., Fernández-Ugalde, O., Wojda, P., Labouyrie, M., Ballabio, C., Franco, A., Pistocchi, A., Montanarella, L., Jones, A., 2022. LUCAS Soil Biodiversity and LUCAS Soil Pesticides, new tools for research and policy development. *Eur J Soil Sci*, 73, e13299.
- Reganold, J.P., Palmer, A.S., Lockhart, J.C., and Macgregor, A.N., 2001. Comparison of Soil Microbial Biomass and Activity Under Organic and Conventional Farming Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 3, 1026-1033.
- Römbke, J., Dorow, W.H.O., Jänsch, S., 2018. Distribution and diversity of earthworms (Lumbricidae) in Hesse (Central Germany): current knowledge. *Soil Organ.* 90, 171–185.
- Roy, V., Ventura, M., Fourcade, Y., Justine, J. L., Gigon, A., & Dupont, L., 2022. Gut content metabarcoding and citizen science reveal the earthworm prey of the exotic terrestrial flatworm, *Obama nungara*. *European Journal of Soil Biology*, 113, 103449.
- Rutgers, M., Schouten, A.J., Bloem, J., Van Eekeren, N., De Goede, R.G.M., Jagersop Akkerhuis, G.A.J.M., Van der Wal, A., Mulder, C., Brussaard, L. and Breure, A.M., 2009. Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *European Journal of Soil Science*, 60: 820-832.
- Sparling, G. P., 1992. Ratio of Microbial Biomass Carbon to Organic Carbon in Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(1), 1-10.
- Stefanowicz, A.M., Stanek, M., Nobis, M. et al., 2016. Species-specific effects of plant invasions on activity, biomass, and composition of soil microbial communities. *Biol Fertil Soils* 52, 841–852 (2016).
- Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B.G., Orgiazzi, A., Creamer, R.R., 2015. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring Applied. *Soil Ecology*.
- Stone, D., Blomkvist, P., Hendriksen, N.B., Bonkowski, M., Jørgensen, H.B., Carvalho, F., Dunbar, M.B., Gardi, C., Geisen, S., Griffiths, R., Hug, A.S., Jensen, J., Laudon, H., Mendes, S., Morais, P.V., Orgiazzi, A., Plassart, P., Römbke, J., Rutgers, M., Schmelz, R.M., Sousa, J.P., Steenbergen, E., Suhadolc, M., Winding, A., Zupan, M., Lemanceau, P., Creamer, R.E., 2016. A method of establishing a transect for biodiversity and ecosystem function monitoring across Europe. *Applied Soil Ecology, Soil biodiversity and ecosystem functions across Europe: a transect covering variations in biogeographical zones. Land Use Soil Properties* 97, 3–11.
- VBB/BSA 2009. Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie VBB/BSA, Frick.
- VBBö, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö) vom 1. Juli 1998, Stand 12.04.2016, SR 814.12.
- VBBio/BSA 2022: Fliessbach, A. Sammlung bodenbiologischer Studien mit einem Standort-Bezug in der Schweiz. Abschlussbericht. Forschungsinstitut für biologischen Landbau., FiBL. Ein Projekt der VBBio, 2022.

Walder, F., Schmid, M.W., Riedo, J., Valzano-Held, A.Y., Banerjee, S., Büchi, L., Bucheli, T.D., van der Heijden, M.G.A., 2022. Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry* 174 (2022) 108830.

Anhang

Vergleichswerttabellen: Daten unterteilt nach Messnetzen

In der Tabelle 10 bis Tabelle 13 sind die Vergleichswerte und Bodeneigenschaften zusätzlich zur Nutzung nach Messnetz (KABO AG, KABO BE, KABO GR, MIP¹¹, NABO, OBA¹²), wo vorhanden, nach Nutzungsklassen (Gemüsebau, Obst-/Rebbau) und nach Probenahmetiefe unterteilt. Diese Unterteilung berücksichtigt bodenbildende Faktoren wie die Region (Meereshöhe, Geologie, Geomorphologie etc.) bzw. das Klima (Niederschlag, Temperatur) und den z.T. unterschiedlichen Fokus bei der Auswahl von Standorten von verschiedenen Bodenbeobachtungsprogrammen. Dies kann einen genaueren Vergleich von Messwerten ermöglichen.

11

Projekt «Mykorrhiza-
Infektionspotential»

12

KABO BE, Dauerbeobach-
tungsflächen Oberacker

Tabelle 8: Vergleichswerte zur mikrobiellen Biomasse FE-C [mg kg⁻¹ TS] (n=311)

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unters Quartil	Oberes Quartil
Mikrobielle Biomasse FE-C [mg kg⁻¹ TS]									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	15	711	351	3191	448	954
		Gemüsebau	0–20 cm	2	545	378	712	462	629
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	834	834	834	834	834
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	811	634	995	723	903
		Acker	0–20 cm	18	809	525	1894	738	1049
	KABO GR	Acker	0–20 cm	5	715	230	2298	664	1431
	MIP	Acker	0–20 cm	10	497	230	1349	334	804
	NABO	Acker	0–10 cm	15	632	286	1609	506	835
		Acker	0–20 cm	30	588	255	1209	459	757
		Gemüsebau	0–10 cm	1	209	209	209	209	209
		Gemüsebau	0–20 cm	4	350	203	1461	305	635
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	831	683	980	757	906
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	527	276	922	394	717
	OBA	Acker	0–10 cm	6	399	338	532	363	489
		Acker	0–20 cm	6	401	364	502	389	435
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	12	1105	459	3817	636	1772
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	832	525	1894	738	1049
		Dauergrünland	0–20 cm	18	829	523	1827	706	1046
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	34	2124	652	4409	1704	2875
		Dauergrünland	0–20 cm	1	2389	2389	2389	2389	2389
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	2095	700	4520	1694	2822
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	2384	765	3302	1637	3028
		Dauergrünland	0–20 cm	43	1649	398	3391	1296	1983
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	27	1130	469	4658	740	1712

Tabelle 9: Vergleichswerte zur mikrobiellen Biomasse FE-N [mg kg^{-1} TS] (n=269)

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unters Quartil	Oberes Quartil
Mikrobielle Biomasse FE-N [mg kg^{-1} TS]									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	15	119	59	359	75	153
		Gemüsebau	0–20 cm	2	81	59	103	70	92
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	131	131	131	131	131
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	125	110	127	117	126
		Acker	0–20 cm	18	130	81	242	106	143
	KABO GR	Acker	0–20 cm	3	114	35	381	75	247
	NABO	Acker	0–10 cm	15	82	31	228	62	103
		Acker	0–20 cm	30	83	37	225	69	103
		Gemüsebau	0–10 cm	1	27	27	27	27	27
		Gemüsebau	0–20 cm	4	58	28	282	48	116
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	88	79	97	83	93
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	70	42	135	58	117
	OBA	Acker	0–10 cm	6	55	47	69	50	63
		Acker	0–20 cm	6	60	51	84	56	68
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	12	167	62	542	88	262
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	133	81	242	106	143
		Dauergrünland	0–20 cm	18	126	76	227	95	139
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	27	318	93	679	230	399
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	289	93	384	186	318
		Dauergrünland	0–20 cm	43	243	56	500	191	277
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	27	144	68	333	109	187

Tabelle 10: Vergleichswerte zur Basalatmung [$\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ TS h}^{-1}$] (n=338)

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unters Quartil	Oberes Quartil
Basalatmung [$\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ TS h}^{-1}$]									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	15	0.5	0.3	2.5	0.4	0.9
		Gemüsebau	0–20 cm	2	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		Acker	0–20 cm	18	0.9	0.6	1.6	0.8	0.9
	KABO GR	Acker	0–20 cm	5	0.9	0.6	2.0	0.6	1.1
	MIP	Acker	0–20 cm	10	0.7	0.3	1.4	0.5	1.1
	NABO	Acker	0–10 cm	29	0.6	0.2	1.5	0.4	0.8
		Acker	0–20 cm	30	0.7	0.3	1.5	0.5	0.9
		Gemüsebau	0–10 cm	3	0.7	0.2	0.7	0.4	0.7
		Gemüsebau	0–20 cm	4	0.6	0.3	1.9	0.5	1.0
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	5	0.9	0.9	2.2	0.9	1.3
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	0.9	0.7	2.2	0.8	1.1
	OBA	Acker	0–10 cm	6	0.5	0.4	0.6	0.4	0.5
		Acker	0–20 cm	6	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	12	1.3	0.6	2.8	1.0	1.9
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	0.9	0.6	1.6	0.8	1.0
		Dauergrünland	0–20 cm	18	0.9	0.6	1.6	0.8	1.0
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	34	1.9	0.8	5.0	1.5	2.2
		Dauergrünland	0–20 cm	1	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	1.6	0.7	2.8	1.3	2.0
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	20	1.6	0.4	2.3	1.1	1.7
		Dauergrünland	0–20 cm	43	1.3	0.6	2.6	1.1	1.8
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	27	1.7	0.6	4.5	1.0	2.7

Tabelle 11: Vergleichswerte zum metabolischen Quotienten qCO_2 [$mg\ CO_2-C\ g^{-1}\ C_{mik}$] (BA/FE-C) (n=311)

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unters Quartil	Oberes Quartil
Metabolischer Quotient qCO_2 [$mg\ CO_2-C\ g^{-1}\ C_{mik}$] (BA/FE-C)									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	15	0.9	0.6	1.5	0.8	1.1
		Gemüsebau	0–20 cm	2	1.5	1.2	1.8	1.3	1.7
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	1.1	1.1	1.6	1.1	1.3
		Acker	0–20 cm	18	1.1	0.7	1.5	0.9	1.1
	KABO GR	Acker	0–20 cm	5	0.9	0.7	2.6	0.9	1.3
	MIP	Acker	0–20 cm	10	1.3	1.0	1.6	1.1	1.5
	NABO	Acker	0–10 cm	15	0.8	0.5	1.2	0.7	1.0
		Acker	0–20 cm	30	1.2	0.7	2.4	1.0	1.4
		Gemüsebau	0–10 cm	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
		Gemüsebau	0–20 cm	4	1.5	1.3	2.0	1.4	1.7
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	1.1	0.9	1.4	1.0	1.2
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	2.4	1.3	2.5	1.6	2.5
	OBA	Acker	0–10 cm	6	1.1	0.9	1.5	1.0	1.3
		Acker	0–20 cm	6	1.0	0.9	1.3	1.0	1.1
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	12	1.1	0.7	2.2	1.0	1.6
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	1.1	0.7	1.5	0.9	1.1
		Dauergrünland	0–20 cm	18	1.1	0.7	1.6	1.0	1.1
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	34	0.9	0.5	1.6	0.7	1.1
		Dauergrünland	0–20 cm	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	0.7	0.5	1.2	0.7	0.8
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6
		Dauergrünland	0–20 cm	43	0.9	0.5	2.2	0.7	1.0
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	27	1.5	0.7	3.5	1.2	1.8

Tabelle 12: Vergleichswerte zum Verhältnis C_{mik}/C_{org} [$mg\ C_{mik}\ g^{-1}\ C_{org}$] (FE-C/ C_{org}) (n=268)

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unters Quartil	Oberes Quartil
Verhältnis C_{mik}/C_{org} [$mg\ C_{mik}\ g^{-1}\ C_{org}$] (FE-C/$C_{org}$)									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	6	35.3	19.3	40.4	27.9	38.2
		Gemüsebau	0–20 cm	2	18.9	14.8	23.0	16.9	21.0
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	40.8	32.7	42.8	36.8	41.8
		Acker	0–20 cm	18	39.6	25.1	48.1	36.7	40.6
	KABO GR	Acker	0–20 cm	4	35.0	24.1	52.3	30.0	41.5
	MIP	Acker	0–20 cm	10	26.1	22.0	42.3	22.8	31.2
	NABO	Acker	0–10 cm	15	37.0	25.1	56.1	30.8	39.0
		Acker	0–20 cm	29	34.1	24.1	46.8	30.1	37.9
		Gemüsebau	0–10 cm	1	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
		Gemüsebau	0–20 cm	4	11.6	4.9	30.9	9.1	17.2
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	28.7	13.9	43.5	21.3	36.1
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	28.3	10.7	39.4	25.7	36.6
	OBA	Acker	0–10 cm	6	27.6	23.9	31.9	25.1	30.4
		Acker	0–20 cm	6	26.2	21.2	29.0	25.4	28.3
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	10	35.5	13.2	59.4	28.5	47.3
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	39.8	25.1	48.1	36.7	41.7
		Dauergrünland	0–20 cm	18	38.1	23.5	46.9	36.7	40.6
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	16	45.4	25.9	60.5	41.7	51.3
		Dauergrünland	0–20 cm	1	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	54.0	33.0	74.3	46.0	58.8
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	50.9	33.7	70.3	48.3	59.1
		Dauergrünland	0–20 cm	33	40.1	24.7	58.1	32.3	45.6
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	25	25.5	12.3	69.2	19.5	32.6

Tabelle 13: Organischer Kohlenstoffgehalt (%) (C_{org} , FAL-Methode) (n=268), pH-Wert (pH $CaCl_2$) (n=263), und Tongehalt (%) (n=277), unterteilt nach Messnetz

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unteres Quartil	Oberes Quartil
C_{org} [%]									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	6	2.36	1.28	3.09	2.22	2.49
		Gemüsebau	0–20 cm	2	2.82	2.55	3.09	2.68	2.96
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	2.32	1.62	2.54	1.97	2.43
		Acker	0–20 cm	18	2.11	1.40	7.63	1.84	2.60
	KABO GR	Acker	0–20 cm	4	3.68	1.76	4.47	2.66	4.41
	MIP	Acker	0–20 cm	10	2.12	0.82	4.22	1.17	3.12
	NABO	Acker	0–10 cm	15	1.94	1.08	3.38	1.54	2.17
		Acker	0–20 cm	29	1.72	0.94	3.61	1.42	2.09
		Gemüsebau	0–10 cm	1	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98
		Gemüsebau	0–20 cm	4	2.31	1.17	29.77	1.75	9.45
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	3.59	2.25	4.92	2.92	4.26
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	1.99	1.11	3.44	1.76	2.26
	OBA	Acker	0–10 cm	6	1.55	1.36	1.67	1.41	1.61
		Acker	0–20 cm	6	1.62	1.36	1.82	1.47	1.71
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	10	2.92	1.16	3.85	2.41	3.59
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	2.09	1.40	7.63	1.84	2.60
		Dauergrünland	0–20 cm	18	2.12	1.39	7.82	1.90	2.64
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	16	4.58	2.23	9.50	3.32	5.33
		Dauergrünland	0–20 cm	1	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	4.25	1.67	7.89	3.57	4.95
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	4.44	1.82	6.16	3.79	5.15
		Dauergrünland	0–20 cm	33	4.03	1.45	10.14	3.31	4.82
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	25	4.24	2.04	14.26	2.99	6.30

Nutzung	Messnetz	Nutzungsklasse	Probe- nahmetiefe	n	Med.	Min.	Max.	Unteres Quartil	Oberes Quartil
pH [CaCl₂]									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	6	6.7	5.6	7.3	6.5	7.2
		Gemüsebau	0–20 cm	2	6.9	6.5	7.3	6.7	7.1
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	6.0	5.1	6.5	5.5	6.2
		Acker	0–20 cm	18	5.6	5.0	6.4	5.2	6.0
	KABO GR	Acker	0–20 cm	5	7.1	6.8	7.4	7.1	7.1
	MIP	Acker	0–20 cm	10	6.6	4.9	6.9	5.6	6.8
	NABO	Acker	0–10 cm	15	5.8	4.9	7.3	5.1	6.6
		Acker	0–20 cm	21	6.2	4.9	7.5	5.7	7.0
		Gemüsebau	0–10 cm	1	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
		Gemüsebau	0–20 cm	2	6.3	5.7	6.9	6.0	6.6
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	5.6	5.2	6.1	5.4	5.8
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	2	6.4	5.9	7.0	6.2	6.7
	OBA	Acker	0–10 cm	6	5.8	5.6	6.2	5.7	5.8
		Acker	0–20 cm	6	6.1	5.9	6.3	6.0	6.2
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	10	7.1	5.5	7.5	6.4	7.3
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	5.6	5.0	6.4	5.2	6.0
		Dauergrünland	0–20 cm	18	5.5	5.0	6.4	5.2	6.1
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	33	5.6	4.0	7.3	4.6	6.9
		Dauergrünland	0–20 cm	1	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	6.2	4.3	6.8	5.5	6.6
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	5.4	4.4	6.4	4.8	5.8
		Dauergrünland	0–20 cm	27	5.4	3.9	6.3	4.9	5.7
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	22	4.4	3.4	7.2	3.9	5.1
Ton [%]									
Acker	KABO AG	Acker	0–20 cm	6	32	13	40	19	33
		Gemüsebau	0–20 cm	2	26	13	40	20	33
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	1	29	29	29	29	29
	KABO BE	Acker	0–10 cm	3	17	15	19	16	18
		Acker	0–20 cm	18	18	14	36	16	19
	KABO GR	Acker	0–20 cm	5	22	8	29	19	23
	MIP	Acker	0–20 cm	10	20	11	29	18	22
	NABO	Acker	0–10 cm	15	20	10	56	17	26
		Acker	0–20 cm	27	21	6	59	18	28
		Gemüsebau	0–10 cm	1	13	13	13	13	13
		Gemüsebau	0–20 cm	4	19	10	37	12	29
		Obst-/Rebbau	0–10 cm	2	15	9	21	12	18
		Obst-/Rebbau	0–20 cm	6	16	7	29	14	25
	OBA	Acker	0–10 cm	6	17	14	19	16	18
		Acker	0–20 cm	6	15	14	18	14	16
Dauergrünland	KABO AG	Dauergrünland	0–10 cm	10	31	12	42	22	34
	KABO BE	Dauergrünland	0–10 cm	18	18	14	36	16	19
		Dauergrünland	0–20 cm	18	18	14	37	16	19
	KABO GR	Dauergrünland	0–10 cm	33	22	11	36	16	26
		Dauergrünland	0–20 cm	1	27	27	27	27	27
	MIP	Dauergrünland	0–20 cm	22	25	17	33	20	29
	NABO	Dauergrünland	0–10 cm	12	25	12	37	21	28
		Dauergrünland	0–20 cm	27	24	11	51	19	31
Wald	NABO	Wald	0–20 cm	24	23	12	48	18	28

Boxplots der Vergleichswerte, unterteilt nach Messnetzen

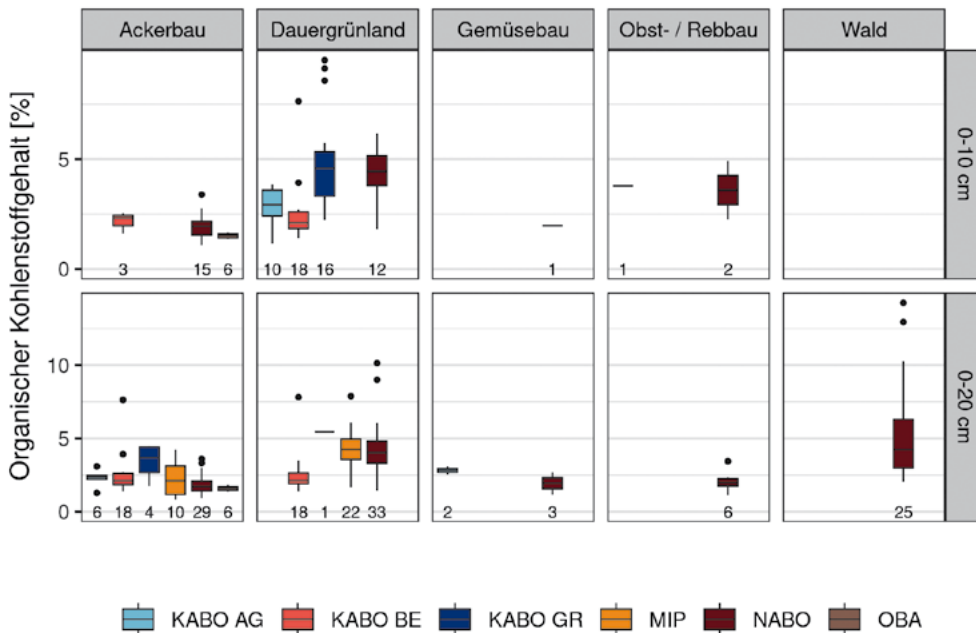


Abbildung 2
Organischer Kohlenstoff-
gehalt (%) (FAL-Methode),
die Zahlen unter dem Boxplot
sind die Anzahl Standorte (n);
mit Median, unterem und
oberem Quartil.

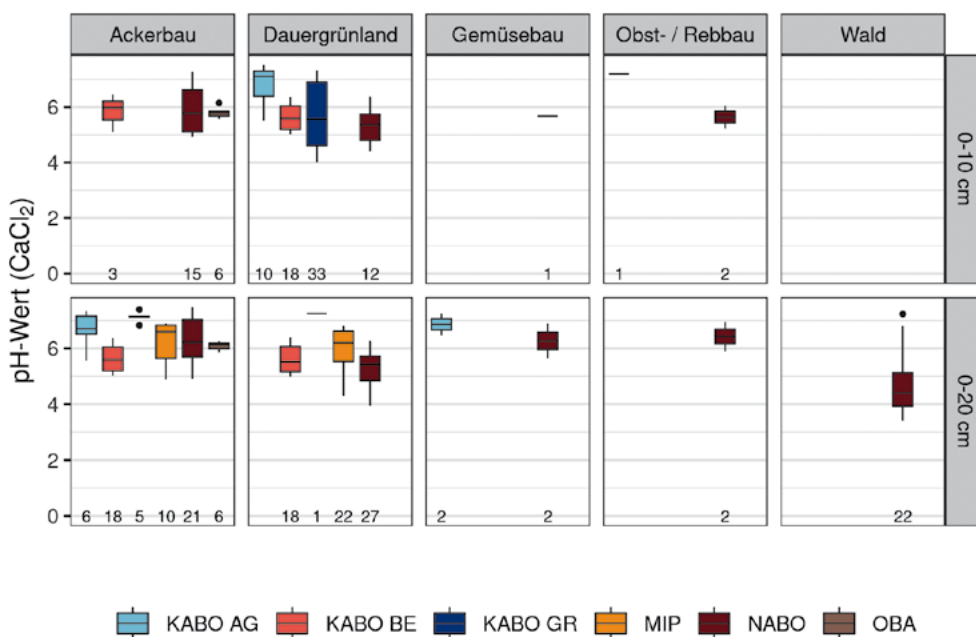
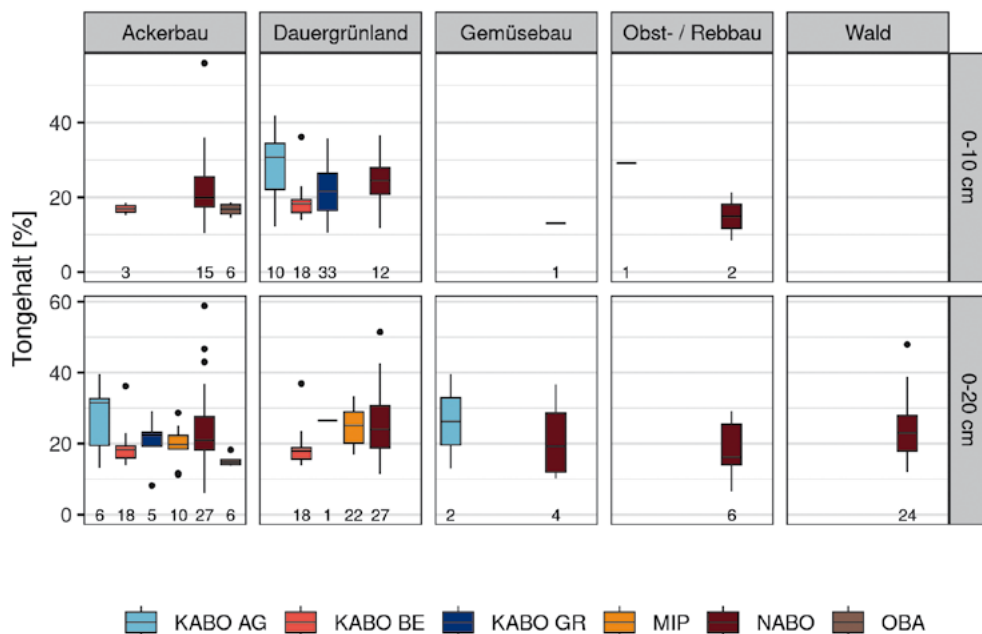


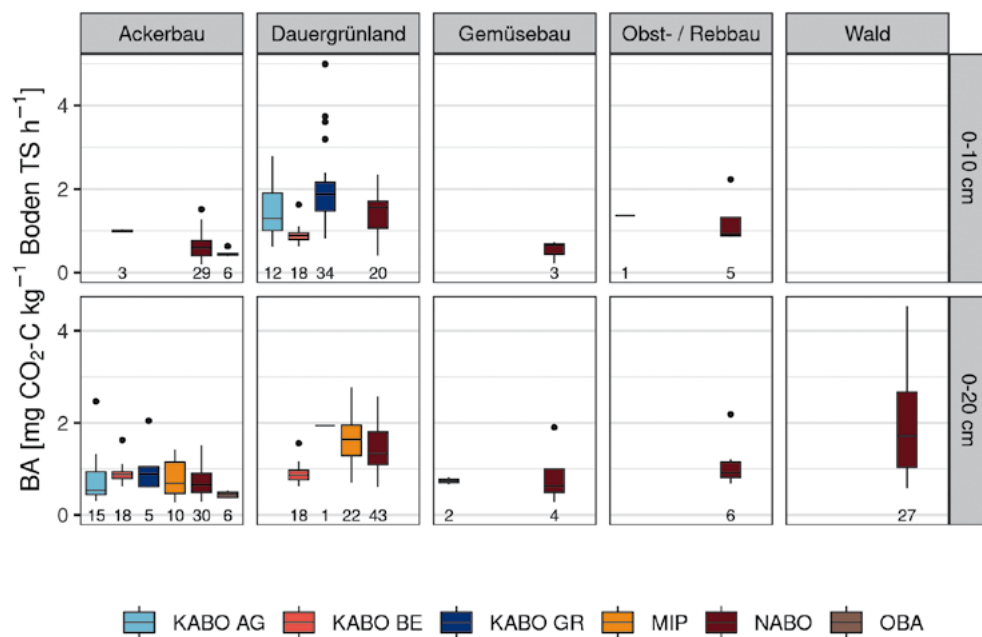
Abbildung 3
pH-Wert (CaCl₂), die Zahlen
unter dem Boxplot sind die
Anzahl Standorte (n); mit
Median, unterem und oberem
Quartil.

Abbildung 4

Tongehalt (%), die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.

**Abbildung 5**

Vergleichswerte Basalatmung [mg CO₂-C kg⁻¹ Boden TS h⁻¹]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.



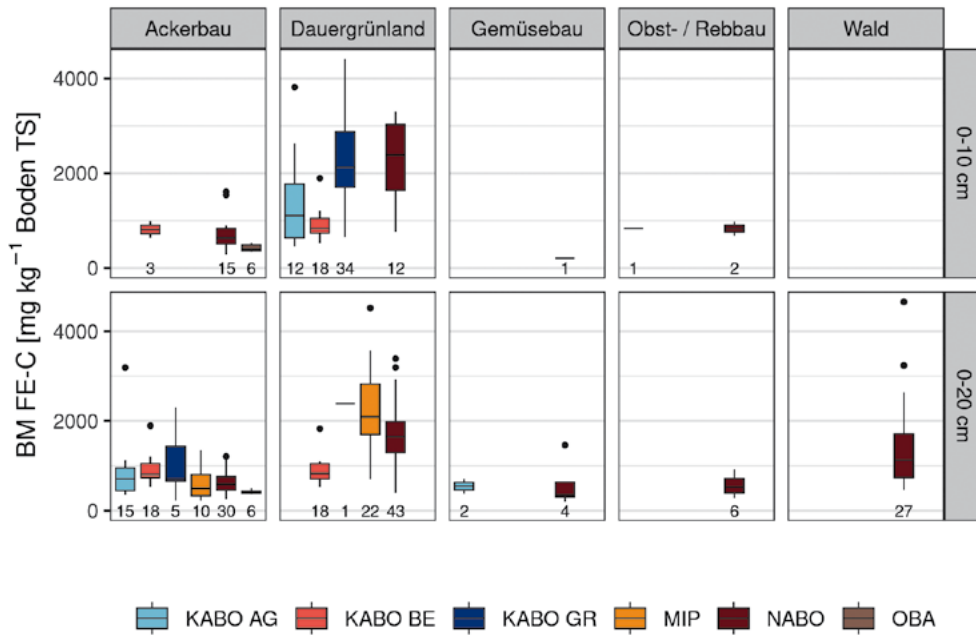


Abbildung 6
Vergleichswerte mikrobielle Biomasse BM FE-C [mg kg^{-1} Boden TS]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.

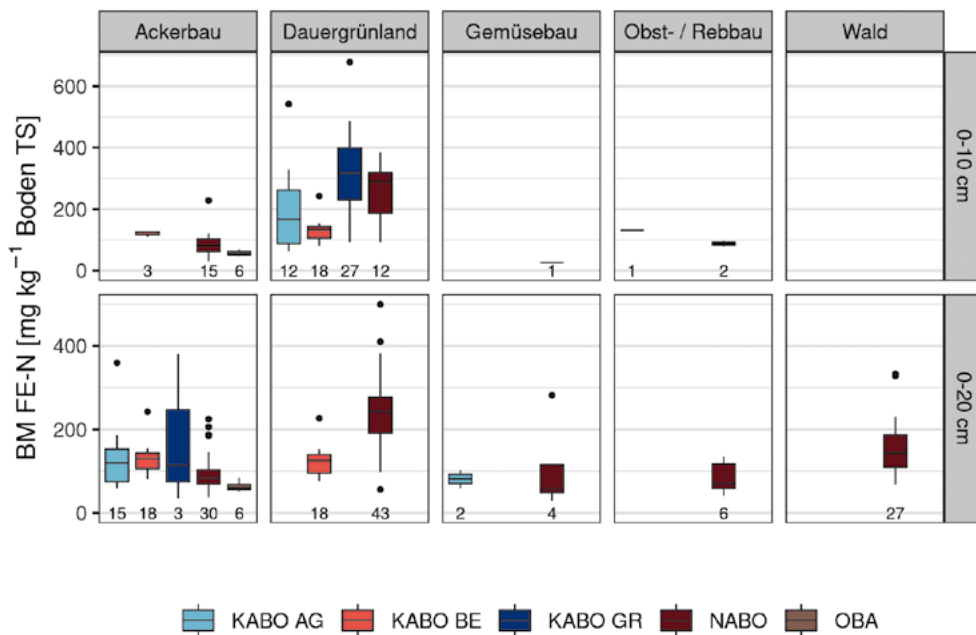
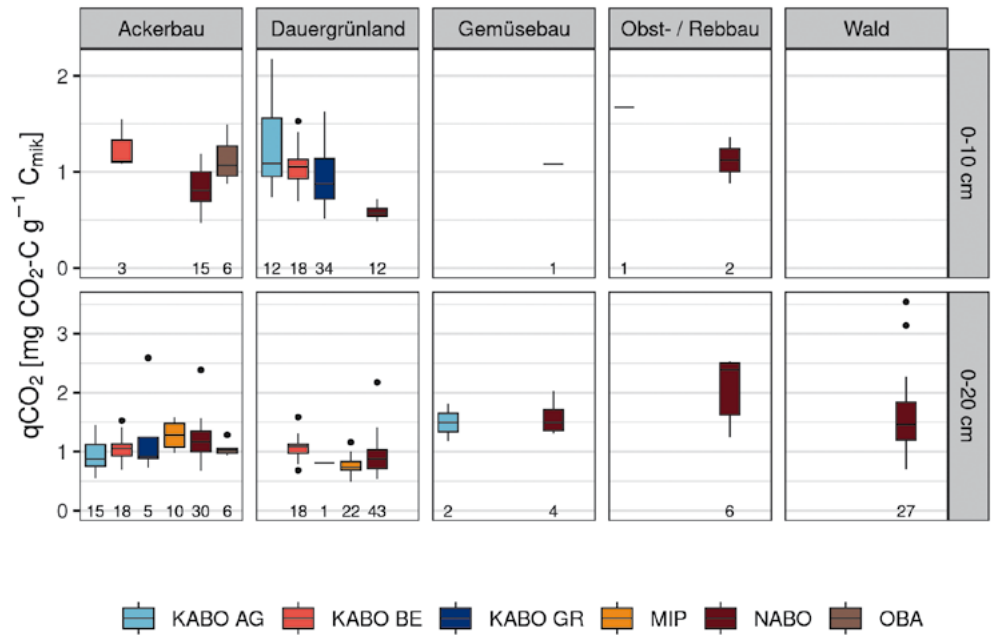


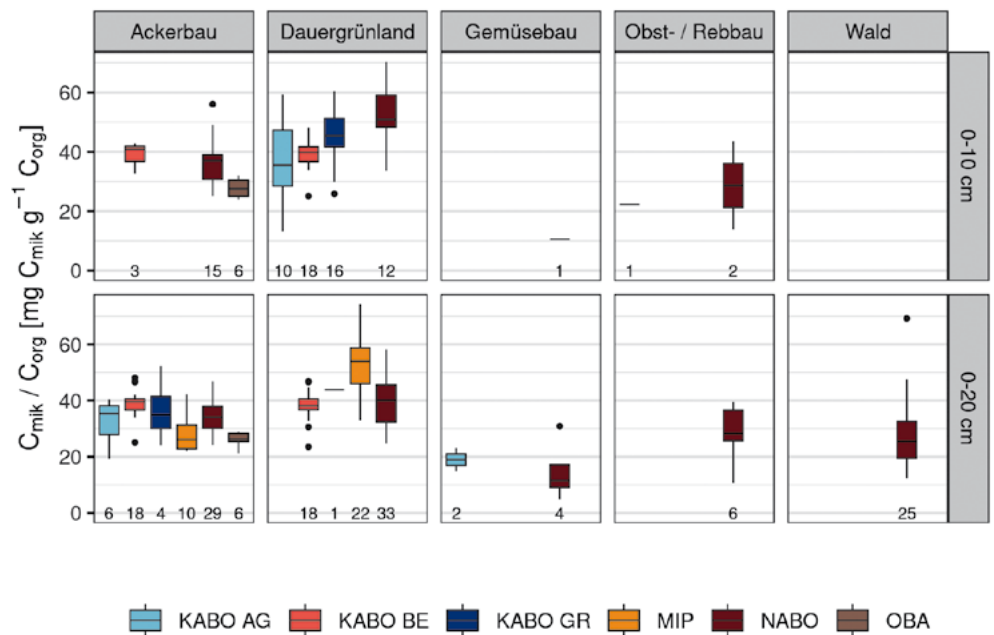
Abbildung 7
Vergleichswerte mikrobielle Biomasse BM FE-N [mg kg^{-1} Boden TS]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.

Abbildung 8

Vergleichswerte metabolischer Quotienten qCO_2 [$mg\ CO_2-C\ g^{-1}\ C_{mik}$]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.

**Abbildung 9**

Vergleichswerte Verhältnis C_{mik}/C_{org} [$mg\ C_{mik}\ g^{-1}\ C_{org}$]. Die Zahlen unter dem Boxplot sind die Anzahl Standorte (n); mit Median, unterem und oberem Quartil.



Bezugsquellen

Webseite der Fachgruppe VBBio-BioSA

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/fachinformationen/massnahmen-fuer-den-bodenschutz/internationales-jahr-boden/arbeitsgruppe-vollzug-bodenbiologie--vbb-.html>



Cercle Sol \ Dokumente

<https://www.kvu.ch/de/arbeitsgruppen?id=192>

