

TEXTE

75/2025

Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz

von:

Carolin Kaufmann-Boll, Michael Kastler, Frank Müller, Maike Kern (ahu GmbH, Aachen)

Andreas Toschki, Johanna Oellers (gaiac Forschungsinstitut für Ökosystemanalyse und -bewertung e.V., Aachen)

Markus Steffens (Forschungsinstitut für Biologischen Landbau FiBL, Departement für Bodenwissenschaften, Frick, Schweiz)

Martin Wiesmeier (Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenkunde / Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL, Freising)

Konstanze Schönthaler, Mareike Wolf
(Bosch & Partner GmbH, München)

Carla Schönfelder (team ewen GbR, Darmstadt)

Christian Ristok, Kristin Paschke (Deutsches Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Leipzig; Universität Leipzig, Leipzig)

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 75/2025

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 74 201 0
FB001584

Abschlussbericht

Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz

von

Carolin Kaufmann-Boll, Michael Kastler, Frank Müller,
Maike Kern (ahu GmbH, Aachen)

Andreas Toschki, Johanna Oellers
(gaiac Forschungsinstitut für Ökosystemanalyse
und -bewertung e.V., Aachen)

Markus Steffens (Forschungsinstitut für Biologischen
Landbau FiBL, Departement für Bodenwissenschaften,
Frick, Schweiz)

Martin Wiesmeier (Technische Universität München,
Lehrstuhl für Bodenkunde / Bayerische Landesanstalt
für Landwirtschaft LfL, Freising)

Konstanze Schönthaler, Mareike Wolf
(Bosch & Partner GmbH, München)

Carla Schönfelder (team ewen GbR, Darmstadt)

Christian Ristok, Kristin Paschke (Deutsches Zentrum für
Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-
Leipzig, Leipzig; Universität Leipzig, Leipzig)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

ahu GmbH , Kirberichshofer Weg 6, 52066 Aachen

gaiaC Forschungsinstitut für Ökosystemanalyse und -bewertung e.V., Kackertstraße 10,
52072 Aachen

Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (FiBL), Dep. für Bodenwissenschaften,
Ackerstraße 113, 5070 Frick, Schweiz

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökologie und
Biologischen Landbau, Lange Point 6, 85354 Freising

Technische Universität München, Lehrstuhl für Bodenkunde, Emil-Ramann-Straße 2,
85354 Freising

Bosch & Partner GmbH, Pettenkoferstraße 24, 80336 München

team ewen GbR, Hügelstraße 19, 64283 Darmstadt

Deutsches Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig,
Puschstr. 4, 04103 Leipzig

Abschlussdatum:

September 2024

Redaktion:

Fachgebiet II 2.7 Bodenmonitoring und Bodenzustand
Jeannette Mathews, Marc Marx

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Kurzbeschreibung: Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz

Die Nachfrage nach aussagekräftigen Indikatoren wächst. Sie sind Grundlage, um das Ausmaß der Bodendegradation zu bewerten und die Umsetzung politischer Konzepte und Strategien zu Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel zu prüfen und weiter vorantreiben zu können. Ziel des Projekts war es, die Bundesregierung bei der Weiterentwicklung der nationalen und EU-weiten Berichterstattung für das Medium Boden zu unterstützen. Die Projektergebnisse tragen dazu bei, das Spektrum an Bodenindikatoren auf nationaler und auf EU-Ebene zu dokumentieren und eine Auswahl thematisch fehlender Indikatoren zu ergänzen. Für die Themen „organische Bodensubstanz“ und „Bodenbiologie“ sind Indikatorvorschläge ausgestaltet und praxistauglich einsetzbar gemacht worden. Sie knüpfen an die bereits etablierten national sowie international abgestimmten Indikatoren an und ergänzen diese. Des Weiteren wurde die Konzepterarbeitung für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums unterstützt, das zukünftig mit Berichten über den Bodenzustand und seine Veränderungen zum Bodenschutz beitragen kann.

Abstract: Further development of soil indicators for national and EU-wide reporting on climate change adaptation and mitigation

The demand for meaningful indicators is growing. They are the basis for assessing the extent of soil degradation and for reviewing and advancing the implementation of political concepts and strategies for climate protection and adaptation to climate change. The aim of the project was to support the German government in the further development of national and EU-wide reporting for the soil medium. The project results contribute to documenting the range of soil indicators at national and EU level and to supplementing a selection of thematically missing indicators. Indicator proposals for the topics 'soil organic matter' and 'soil biology' have been developed and made suitable for practical use. They tie in with the already established nationally and internationally harmonised indicators and supplement them. Furthermore, the concept development for the establishment of a National Soil Monitoring Centre was supported, which can contribute to soil protection in the future with reports on the soil condition and its changes.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	16
Summary	20
Danksagung	24
1 Einführung.....	25
2 Ziel und Aufgaben des Projekts.....	26
3 Vorgehensweise	29
4 Begriffsbestimmungen	35
5 Datengrundlagen für Indikatoren.....	38
6 Prüfung von Indikatorideen und Entwicklung von Indikatoren zur organischen Bodensubstanz	40
6.1 Geprüfte Indikatorideen	40
6.2 Grundsätzliche Herausforderungen für die Indikatorentwicklung.....	41
6.3 Indikator „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“	43
6.3.1 Herleitung und Begründung	44
6.3.2 Methodische Herangehensweise	46
6.3.3 Datenquelle.....	50
6.3.4 Darstellung des Indikators	50
6.3.5 Einschränkungen.....	52
6.3.6 Umsetzung und Verstetigung	54
6.4 Weitere Indikatorideen.....	57
6.4.1 Eignung des SOC:Ton-Verhältnisses	57
6.4.2 Eignung des SOC:SOC _{exp} -Verhältnisses.....	61
6.4.3 Diskussion	63
6.5 Empfehlungen für das weitere Vorgehen.....	64
7 Prüfung von Indikatorideen und Entwicklung von Indikatoren zur Bodenbiodiversität.....	66
7.1 Geprüfte Indikatorideen	66
7.2 Grundsätzliche Herausforderungen bei der Indikatorentwicklung	67
7.3 Indikator „Regenwurmfauna“.....	72
7.3.1 Herleitung und Begründung	72
7.3.2 Methodische Herangehensweise	74
7.3.3 Datenquelle.....	78

7.3.4	A: Darstellung absoluter Veränderungen	79
7.3.4.1	Teilindikator Regenwurmfauna – mittlere Abundanz	79
7.3.4.2	Teilindikator Regenwurmfauna – mittlere Artenzahl.....	84
7.3.5	B: Forschungsansatz – Vergleich der BDF-spezifischen zeitlichen Veränderung von Abundanz und Biomasse der Regenwürmer	85
7.3.6	Einschränkungen.....	88
7.3.7	Umsetzung und Verstetigung	89
7.4	Weitere Indikatorideen.....	90
7.4.1	Fallstudie Springschwanzfauna (Baden-Württemberg).....	90
7.4.2	Eignung der Bodenatmung als Indikator	95
7.5	Empfehlungen für das weitere Vorgehen.....	96
8	Fazit	99
9	Quellenverzeichnis	105
A	Ergebnisdokumentation zur Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“	115
A.1	Einführung.....	115
A.2	Programm	116
A.3	Vortragsblock I. Anforderungen und Rahmenbedingungen.....	117
A.4	Vortragsblock II. Erfahrungen aus der Entwicklung von Indikatoren und deren Überführung in die Praxis	119
A.5	Vortragsblock III. Möglichkeiten für das Schließen von Lücken bei der Indikatorentwicklung und das Untersetzen vorhandener Indikatoren mit weiteren Daten.....	120
A.6	Vortragssession 1: Ansätze für Indikatoren zur Biodiversität auf nationaler Ebene	121
A.7	Vortragssession 2: Ansätze für Indikatoren zum Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene	124
A.8	Workshop 1: Überlegungen für einen Versiegelungsindikator	126
A.9	Workshop 2: Überlegungen zur Berichterstattung über Schadstoffgehalte in Böden anhand von Indikatoren.....	127
A.10	Resümee und Ausblick	129
B	Konzeptentwurf für den Aufbau des Nationalen Bodenmonitoringzentrums beim UBA und des damit verbundenen Netzwerks (Stand: 3. Mai 2023)	132
B.1	Hintergrund.....	132
B.2	Begriffsbestimmungen.....	136
B.3	Ziele und Aufgaben	137
B.4	Organisationsstrukturen	138
B.4.1	Nationales Bodenmonitoringzentrum	140
B.4.2	Bodenmonitoring-Netzwerk	141

B.4.3	Interministerielle Steuerungsgruppe.....	142
B.4.4	Fachgremium	142
B.4.5	Arbeitsgruppen	144
B.5	Produkte und Dienstleistungen	144
B.5.1	Beantwortung von Fragestellungen und Berichterstattung	145
B.5.1.1	Fortführbarer Fragenkatalog des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks	145
B.5.1.2	Bearbeitung von neuen Fragestellungen.....	152
B.5.1.3	Instrumente zur Datenverwaltung und zur Unterstützung der Facharbeit.....	155
B.5.1.4	Informationsangebote und Berichte	156
B.5.2	Weiterentwicklung des Bodenmonitorings	156
B.5.2.1	Methodische Standardisierung für die Datenvergleichbarkeit	157
B.5.2.2	Weiterentwicklung von bodenbezogenen Indikatoren.....	158
B.5.2.3	Wissenslücken ausweisen, Handlungsmöglichkeiten aufzeigen, Forschung.....	158
B.5.3	Regelung der Zusammenarbeit und Vernetzung.....	159
B.5.4	Politikberatung.....	160
B.6	Aufbau und Betrieb.....	160
B.7	Anlage A: Aktivitäten und Programme zum Bodenmonitoring und zur Erhebung des Bodenzustands (alphabetische Reihenfolge) Stand: März 2023	161
B.8	Anlage B: Für den Fragenkatalog des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks berücksichtigte Quellen	165
B.9	Anlage C: Informationen zu etablierten Fragen und Bearbeitungskonzepte für neue Fragestellungen des Bodenmonitoring-Netzwerks	167
B.9.1	Bodenwasserhaushalt.....	167
B.9.2	Bodenwärmehaushalt.....	169
B.9.3	Bodenstoffhaushalt - Kohlenstoff	169
B.9.4	Bodenstoffhaushalt – Nährstoffe, Versauerung und Schadstoffe, Eutrophierung.....	171
B.9.5	Bodenstruktur	171
B.9.6	Bodenbiodiversität.....	172
B.9.7	Landnutzung	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Standorttypische C_{org} -Wertebereiche auf Basis der BZE-Daten aus Drexler et al. (2020).....	49
Abbildung 2:	Darstellung des Indikators „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ für den Standorttyp Acker, Texturklasse „mittel I“, ohne Einordnung nach C:N-Verhältnis, Jahresniederschlag ≤ 850 mm.....	51
Abbildung 3:	Trendbeschreibung gemäß Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.....	51
Abbildung 4:	Darstellung einer Indikatoridee basierend auf dem SOC:Ton-Verhältnis für sechs Standorttypen.....	60
Abbildung 5:	Darstellung einer Indikatoridee basierend auf SOC:SOC _{exp} für sechs Standorttypen	62
Abbildung 6:	Auswahlmatrix zur Identifizierung geeigneter Tiergruppen für Langzeituntersuchungen	70
Abbildung 7:	Ableitung von Schwellenwerten von Referenzzuständen: A, B und C entsprechen verschiedenen Erhaltungszuständen in Bezug auf den Systemstress bzw. eine schädliche Bodenveränderung.....	72
Abbildung 8:	Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Bayern.....	75
Abbildung 9:	Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Sachsen-Anhalt	75
Abbildung 10:	Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Schleswig-Holstein.....	76
Abbildung 11:	Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Brandenburg.....	77
Abbildung 12:	Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren für die betrachteten Bundesländer.....	77
Abbildung 13:	Indikator Regenwurmfauna: Mittlere Individuenzahl/m ² *BDF der Jahre 1992-2022, für adulte und juvenile Regenwürmer sowie deren Summe (Gesamt) aller beprobten BDF der Länder Bayern (LfL, Datenerhebungen 2010-2019), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein für die Landnutzungstypen Acker und Grünland	80
Abbildung 14:	Teilindikator “Regenwurmfauna Lebensformen”	81
Abbildung 15:	Teilindikator “Regenwurmfauna Bundesländer”	83
Abbildung 16:	Indikator Regenwurmfauna: Darstellung der mittleren Artenzahl/BDF der Jahre 1992-2022 sowie der Gesamtartenzahl/Jahr aller BDF-Standorte aus Bayern (LfL, nach 2010), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.....	84
Abbildung 17:	Indikator Regenwurmfauna Trends: Darstellung der gewichteten Gesamteffektstärke und landnutzungsspezifischen Effektstärke für die Gesamtabundanz (schwarz und hellrot) sowie die Gesamtbiomasse (grau und dunkelrot) über alle BDF-Standorte aus Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.....	86

Abbildung 18:	Indikator Regenwurmfauna Trends: Darstellung der gewichteten Gesamteffektstärke und bodentexturspezifische Effektstärke für Gesamtabundanz sowie Gesamtbiomasse über alle BDF-Standorte aus Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein	86
Abbildung 19:	Individuen- und Artenzahl (Gesamt) der Collembolen.....	93
Abbildung 20:	Individuen- und Artenzahl der wärmezeigenden Collembolen-Arten	94
Abbildung 21:	Individuen- und Artenzahl der kühlezeigenden Collembolen-Arten.....	94
Abbildung 22:	Klassifizierung verschiedener Organismengruppen anhand ihrer Größe und deren schematische Darstellung im Bodennahrungsnetz.....	96
Abbildung 23:	Organisationsstrukturen und Rollen	139
Abbildung 24:	Zusammensetzung der interministeriellen Steuerungsgruppe und des Fachgremiums.....	139
Abbildung 25:	Prozessablauf für die Bearbeitung von neuen Fragestellungen des Bodenmonitoring-Netzwerks	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Anzahl und Messzeiträume der für die Fallstudie ausgewerteten Datensätze.....	47
Tabelle 2:	Zusammenstellung der Stratifizierungsfaktoren für die Ermittlung standorttypischer Humusgehalte mit Unterkategorien bzw. Klassen aus Drexler et al. (2020).....	48
Tabelle 3:	Besatz der Humusgehalts-Standorttypen mit Messstellen des Datensatzes für das Fallbeispiel; fett formatiert: Standorttypen, für die der Indikator berechnet wurde	52
Tabelle 4:	Bodentexturspezifische Effektstärken und p-Wert für die Trends der Gesamtregenwurmabundanz und -biomasse basierend auf linearen Regressionen und Metaregressionsmodellen über alle BDF-Standorte auf Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein	87

Tabelle 5:	Bundes- und EU-weit bedeutsame Themen und aktuelle Aussagefähigkeit des Bundes (Quelle: Stocktaking über vorhandene Daten 06/2022 im Beitrag zur 36. BOVA-Sitzung am 24./25.01.2023 von Marx, K; Mathews, J.; Glante, F., ergänzt)135
Tabelle 6:	Rollen und Verantwortlichkeiten (1. Entwurf)145
Tabelle 7:	Fortführbarer Fragenkatalog des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks (1. Entwurf).....148

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
ANK	Aktionsprogramm „Natürlicher Klimaschutz“
APA	Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie
ARE	Amt für Raumentwicklung Schweiz
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BAFU	Bundesamt für Umwelt Schweiz
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BDF	Boden-Dauerbeobachtungsflächen
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGBI	Bundesgesetzblatt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft Schweiz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMG	Bundesministerium für Gesundheit
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BonaRes	Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie (Förderprogramm)
BORA	Ständiger Ausschuss Recht der LABO
BOVA	Ständiger Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der LABO

Abkürzung	Erläuterung
BÜK	Bodenübersichtskarte
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
BZE	Bodenzustandserhebung
CHIME	Copernicus Hyperspectral Imaging Mission
C_{org}	organischer Kohlenstoff
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DBG	Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFV	Dauerfeldversuch
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DNS	Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie
DPSIR	Driving forces, Pressures, States, Impacts and Responses (Modell zur Darstellung von Umweltbelastungen und Umweltschutzmaßnahmen)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEA	Europäische Umweltagentur
EJP SOIL	European Joint Research Programme
ERIC	European Research Infrastructure Consortium
ESDAC	European Soil Data Center
EU	Europäische Union
EU-KOM	Europäische Kommission
EUSO	Soil Observatory der EU
FAIR	Auffindbarkeit (Findable), Zugänglichkeit (Accessible), Interoperabilität (Interoperable), Wiederverwendbarkeit (Reusable) (Ansprüche, die an Forschungsdaten gestellt werden)
FG	Fachgebiet
FSC	Forest Stewardship Council®
FuE	Forschung und Entwicklung
FZj	Forschungszentrum Jülich
GIS	Geographisches Informationssystem
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GLOSOLAN	Global Soil Laboratory Network
HU Berlin	Humboldt-Universität Berlin

Abkürzung	Erläuterung
ICOS-D	Integriertes Kohlenstoff-Beobachtungssystem Deutschland
ICOS-D	Integrated Carbon Observation System Deutschland
ICP	International Cooperative Programme
ICP Forests	International Co-Operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests
iDiv	Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung
iDiv	Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung Halle-Jena-Leipzig
InKA	Interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie
JKI	Julius-Kühn-Institut
JRC	Joint Research Center, Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission
KAnG	Klimaanpassungsgesetz
KBU	Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt
KI	Künstliche Intelligenz
KOBO	Kompetenzzentrum Boden in der Schweiz
KomPass	Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung im UBA
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KWRA	Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LANA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Naturschutz Landschaftspflege und Erholung
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LfL BY	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfU BY	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LiKi	Länderinitiative Kernindikatoren
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
LUCAS	EU-Projekt Land Use/Cover Area Frame Survey
LUCAS Soil	Land Use and Cover Area Frame Survey
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
mHM	mesoskaliges hydrologisches Modell des UFZ
MoMoK	Bundesweites Moorbodenmonitoring (Verbundprojekt)
MonVia	Bundesweites Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften (Verbundprojekt)
MOSES	Modular Observation Solutions for Earth Systems
NBS	Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt
NFDI	Nationale Forschungsdaten-Infrastruktur

Abkürzung	Erläuterung
nFK	nutzbare Feldkapazität
NI	Niedersachsen
NMZB	Nationales Monitoring-Zentrum zur Biodiversität im BfN
NRW	Nordrhein-Westfalen
PCR	Polymerase-Kettenreaktion
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes
PSM	Pflanzenschutzmittel
PWP	Permanenter Welkepunkt
RADKLIM	Radarklimatologie
RP	Rheinland-Pfalz
SDG	Sustainable Development Goals (Nachhaltigkeitsziele)
SH	Schleswig-Holstein
SML	Soil Monitoring Law
SOC	Soil organic carbon (Bodenkohlenstoff)
StatBA	Statistisches Bundesamt
TERENO	Terrestrial Environmental Observatories
THG	Treibhausgase
TI	Thünen Institut
TI-AK	Thünen Institut für Agrarklimaschutz
TI-WO	Thünen Institut für Waldökosysteme
TLLR	Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und ländlichen Raum
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UMK	Umweltminister-Konferenz
umwelt.info	Nationales Zentrum für Umwelt- und Naturschutzinformationen im UBA
UNCCD	Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Desertifikation
VwV	Verwaltungsvereinbarung
Zalf	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung
ZAMF	Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig

Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojekts bestand in der Unterstützung der Bundesregierung bei der Weiterentwicklung der nationalen und EU-weiten Berichterstattung zu Fragen der Klimaanpassung und des Klimaschutzes mit Indikatoren aus bundesweiten harmonisierten qualitätsgesicherten Bodeninformationen. Die Prüfung von etablierten und national sowie international abgestimmten Indikatoren(-sets), die Berichtspflichten unterliegen, wie beispielsweise für die Treibhausgas-Emissionsberichterstattung Deutschlands im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, war nicht Gegenstand des Projekts. Vielmehr sollten, über die bereits zur praktischen Anwendung kommenden Indikatoren hinaus, Vorschläge für weitere Indikatoren entwickelt und diese nach Möglichkeit verstetigt und praktikabel einsetzbar konzipiert werden. Des Weiteren wurde die Konzepterarbeitung für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums unterstützt, das mit Berichten über den Bodenzustand und seine Veränderungen zum Bodenschutz beitragen kann.

Um den bekannten Herausforderungen der Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren in Deutschland – wie den Schwierigkeiten bei der Erzeugung vergleichbarer bodenbezogener Messdaten – zu begegnen, wurde der Diskussion von Ideen mit Akteur*innen aus Bundes- und Länderbehörden sowie Forschungsinstitutionen besondere Bedeutung beigemessen und mit einem Fachgespräch und einer Fachtagung Rechnung getragen. Das Vorhaben knüpfte an den aktuellen wissenschaftlichen Stand und die einschlägigen Aktivitäten und Forschungsergebnisse an und berücksichtigte die in Deutschland verfügbaren bodenbezogenen Mess- und Erhebungsaktivitäten.

Das Projekt lieferte in den einzelnen Teilaufgaben folgende Ergebnisse:

Analyse und Aufarbeitung des Sachstands zu bodenbezogenen Indikatoren

Der im Projekt erarbeitete Sachstand zu Indikatoren in der bodenbezogenen Berichterstattung Deutschlands und der EU wurde im Jahr 2023 als UBA-Text (Wolf et al. 2024) veröffentlicht. Der Bericht enthält unter anderem Steckbriefe zu bestehenden Indikatoren mit Hinweisen auf die Datenquellen und die Form der Darstellung. Es zeigte sich, dass Bodenthemen wie Wasser- und Stoffhaushalt, Bodenstruktur, Biodiversität sowie Landnutzung von den recherchierten Indikatoren und Indikatorideen unterschiedlich umfangreich und bisher nur unvollständig abgebildet werden, wobei die vorhandenen bodenbezogenen Indikatoren meist auf einen bestimmten Landnutzungs- oder Ökosystemtyp fokussiert sind. Besonders viele Indikatoren und Indikatorideen beschreiben Sachverhalte der Themenfelder Landnutzung, Stoff- und Wasserhaushalt, während bisher sehr wenige Indikatoren für die Bodenstruktur (Erosion, Verdichtung) und die Bodenbiodiversität vorhanden oder angedacht sind. Lücken in Indikatorensystemen sind dabei häufig durch fehlende Daten und Zeitreihen begründet. Für eine Berichterstattung zur Umsetzung bodenbezogener Ziele, die in vielen sektorpolitischen Strategien, beispielsweise zu biologischer Vielfalt, Nachhaltigkeit, Anpassung an den Klimawandel, Raumentwicklung, Ackerbau und Wald formuliert sind, wird ein breites Set an Indikatoren gebraucht; nicht aus allen Strategien ließ sich jedoch ein konkreter Informationsbedarf ableiten. Eine umfassende Beschreibung und Bewertung des Bodenzustands und seiner Veränderungen sowie zur „Bodengesundheit“ erscheinen nur mit Hilfe von Indikatoren-Sets möglich, das heißt mit einer Kombination aus mehreren Einzel-Indikatoren.

Aktuell laufen zahlreiche Aktivitäten zur Entwicklung neuer Indikatoren und neuer Monitoringssysteme. Mit dem Bezug auf Themen des Bodenschutzes und politischer Ziele bildet die Zusammenstellung von Wolf et al. (2024) eine Grundlage, um die bodenbezogene Berichterstattung in Deutschland künftig weiterzuentwickeln und zu verbessern. Es wurde deutlich, dass Informationsbedarf sowohl für themenübergreifende Ziele wie „Erhalt der Funktionsfähigkeit von Böden“

als auch für Ziele im Zusammenhang mit dem Bodenwasserhaushalt, mit Schadstoffen, Nährstoffen und Humus, mit Bodenerosion und Schadverdichtung sowie mit Bodenbiodiversität und Landnutzung besteht. Empfehlungen für die weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeit werden in Wolf et al. (2024) formuliert und in Kapitel 8 zusammenfassend dargestellt.

Identifizierung und Verstetigung von für die Beurteilung der organischen Bodensubstanz und der Bodenbiodiversität geeigneten Indikatoren im Kontext zu klimabezogenen Fragestellungen

Im FuE-Projekt des UBA „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Bodensubstanz“ (Kaufmann-Boll et al. 2022) sind neue Indikatoren vorgeschlagen worden. Aufbauend auf diesen Vorarbeiten und Messdaten von Institutionen der Bundesländer und des Bundes wurden die Vorschläge geprüft und weiterentwickelt, um sie für die zukünftige Anwendung auf nationaler Ebene vorzubereiten. Leitend für die Ausarbeitung der Indikatoren war das Ziel, generelle Entwicklungen auf nationaler Ebene erkennen zu können. Vorgegeben war, dass die Indikatoren zeitnah umgesetzt, also bundesweit berechnet werden können. Damit verbunden sind Anforderungen an die Datenverfügbarkeit, eine bundesweite Abdeckung mit repräsentativen Messstandorten, eine ausreichende Anzahl und ein geeigneter zeitlicher Abstand von Messkampagnen. Die Vorschläge wurden in einem Fachgespräch im Oktober 2023 mit Expert*innen diskutiert, im Anschluss weiter ausgearbeitet und im Rahmen der nationalen Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“ im April 2024 vorgestellt.

Mit dem Indikatorvorschlag „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ werden die Humusgehalte von Messstandorten auf Acker- und Grünlandböden mit den Referenzspannweiten des standorttypischen Humusgehalts verglichen. Dazu werden die Humusgehalte in Oberböden mithilfe des organischen Kohlenstoffs quantifiziert. Als Indikator dient die Entwicklung des prozentualen Anteils von Messstandorten ober-, inner- und unterhalb der Referenzspannweiten des standorttypischen Humusgehalts. Die Fallstudie bezieht 252 Messstellen in Bayern, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen ein, deren Messreihen teilweise bis 1985 zurückreichen. Als Referenzzustand wird die bundesweite BZE Landwirtschaft (2011–2018) zugrunde gelegt. Die Messintervalle variieren zwischen 1 und 5 Jahren. Eine Vergleichbarkeit der Erhebungsmethoden ist prinzipiell gegeben. Der Indikator lässt Veränderungen erkennen, bewertet diese jedoch nicht im Sinne einer funktionell ausreichenden Humusversorgung; auf weitere Einschränkungen wird hingewiesen. Ein Darstellungsvorschlag als Säulengrafik liegt vor, ebenso wie die Ergebnisse von Trendanalysen für sechs Standorttypen mit ausreichender Anzahl von Messstellen. Für die Umsetzung des Indikators für eine bundesweite dauerhafte Berichterstattung zur Entwicklung der Humusgehalte in Oberböden lässt sich auf den bestehenden Messprogrammen der Bundesländer und des Bundes aufbauen. Insbesondere die Humusmonitoring- und die Boden-Dauerbeobachtungsprogramme der Länder in Verbindung mit der Ersterhebung der BZE Landwirtschaft stehen heute schon für die Darstellung und Auswertung von Zeitreihen des Indikators „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ für landwirtschaftliche Böden zur Verfügung. Eine Verstetigung erfordert die kontinuierliche Fortführung dieser Messprogramme.

Der vorgeschlagene Indikator „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ steht in einem engen Zusammenhang mit einem vom Thünen-Institut für Agrarklimaschutz auf der Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“ im April 2024 vorgestellten Indikatorvorschlag „Kontextspezifischer C_{org} -Trend“. Beide Vorschläge nutzen Humusgehalte als Deskriptor und sie beziehen sich auf Daten der Bodenzustandserhebung (BZE) Landwirtschaft entweder als Referenzzustand oder zur Ableitung eines standortspezifischen Humuserwartungswerts (C_{exp}). Das Konzept des „kontextspezifischen C_{org} -Trends“ ist auf Standorte anwendbar. Für die Darstellung des Indikatorvorschlags „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ wurde ein Prinzip zur Aggregation von Messstellen vorge-

schlagen und dieses im Rahmen einer Fallstudie für drei Bundesländer mit Daten aus Humusmonitoring und Boden-Dauerbeobachtung getestet. Das SOC:Ton-Verhältnis als Indikator zum Bodenkohlenstoff ist für sandige und humusreiche tonige Standorte nicht aussagekräftig und für diese in Deutschland verbreiteten Böden nicht geeignet.

Der Indikator „Regenwurmfauna“ betrachtet die Entwicklung der mittleren Abundanz (Individuenzahl) sowie der Artenzahl unterschiedlicher Lebensformtypen der Regenwurmfauna auf Acker- und Grünlandböden. Die Fallstudie bezieht über 200 Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Bayern, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Brandenburg ein, deren Messreihen teilweise bis 1985 zurückreichen. Die Messintervalle variieren zwischen 3 und 7 Jahren. Methodische Unterschiede bestehen hinsichtlich der Regenwurmaustreibung und der Flächengröße. Neben einem Vergleich der absoluten mittleren Abundanzen (Individuenzahlen) und Artenzahlen wird ein Forschungsansatz mit einem Vergleich der BDF-spezifischen zeitlichen Veränderung von Abundanz und Biomasse vorgestellt. Einschränkungen bestehen hinsichtlich der Repräsentativität der BDF, der methodischen Unterschiede in der Datenerhebung und der Aussagekraft für die Gesamt-Biodiversität. Datengrundlagen für weitere relevante Landnutzungstypen wie Wälder und andere Lebensräume wie Auen fehlen bislang. Ein Darstellungsvorschlag als Säulengrafik und das Ergebnis von Trendanalysen liegen vor. Der Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ ist ein erster bedeutsamer Schritt, um das Thema Bodenbiodiversität in die nationale Berichterstattung einbringen zu können. Anforderungen an Datenlieferungen und Qualitätssicherung werden benannt. Das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK)-Projekt „Stärkung der Bodenbiodiversität als unverzichtbaren Beitrag für den Natürlichen Klimaschutz“ ist dabei ein wichtiges Instrument, in dem erstmals Methodenstandards vereinheitlicht werden und eine Basiserhebung für verschiedene Nutzungsarten durchgeführt wird. In diesem Vorhaben wurde keine Entwicklung eines Indikators auf der Basis der Bodenatmung vorgenommen, da diese als nicht geeignet bewertet wurde.

Fachtagung zu bodenbezogenen Indikatoren

Die im April 2024 in Dessau durchgeführte zweitägige Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“ bot ein Forum für die Diskussion und den Informationsaustausch über vorliegende Ideen und Konzepte zur Indikatorentwicklung auf nationaler Ebene. Der Einladung des UBA folgten über 100 Akteure aus Institutionen, die in Deutschland mit der Berichterstattung zum Thema Boden, mit der Erhebung und Bewertung von bodenbezogenen Messdaten, dem Bodenmonitoring und der Entwicklung von Bodenindikatoren befasst sind. Dazu gehörten Vertreter*innen auf ministerieller Ebene sowie der nachgeordneten Fachbehörden aus den Bundesländern, Forschungseinrichtungen, Universitäten, Gutachterbüros sowie aus Gremien und Verbänden. Die Vortragenden und Teilnehmenden haben die im Vorhaben entwickelten Vorschläge für die beiden o. g. Indikatoren und die methodischen konzeptionellen Ansätze für deren Weiterentwicklung begrüßt. Deutlich wurde aber auch, dass an den Konzepten weitergearbeitet und die Fachdiskussion fortgesetzt werden muss. Die Tagung spannte den Bogen von aktuellen Entwicklungen zu Bodenindikatoren auf Bundesebene bis hin zur Frage, welchen Beitrag Fernerkundung und Künstliche Intelligenz (KI) für die Entwicklung von Bodenindikatoren leisten können. Ein Ergebnisbericht des UBA und die Vorträge sind auf der UBA-Webseite einsehbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/fachtagung-bodenindikatoren>.

Weiterentwicklung des Konzepts für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums

Aufbauend auf der vom UBA erarbeiteten Vorlage wurde der Konzeptentwurf im Projektverlauf fortgeschrieben und weiterentwickelt. Er enthält konkretisierte Aussagen zu den Zielen der Arbeit des Zentrums und zu den für die Umsetzung des Zentrums erforderlichen Arbeitsschritten sowie Aussagen zu Verantwortlichkeiten und Organisationsstrukturen mit Blick auf Ergebnisse

aus parallel laufenden ersten Gesprächen des UBA mit potenziellen Netzwerkpartnern des Zentrums. Darüber hinaus wurden erste Vorschläge für fachliche Fragestellungen formuliert, die durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum mit seinen Akteuren bundesweit beantwortet werden könnten. Weiterhin erarbeitete Vorschläge für Ablaufprozesse, die eine klar strukturierte bundesweite Berichterstattung zu bodenbezogenen Fragestellungen ermöglichen sollen, bauten darauf auf (Wer arbeitet mit wem zu welchem Thema, mit welchen Methoden in welcher Form zusammen und wie sehen die Verantwortlichkeiten bei der Datenbereitstellung aus? Welche Daten werden von wem in die laufende Berichterstattung eingebracht und welche Daten werden am Ende berichtet?).

Fazit und Schlussfolgerungen

Indikatoren sind wichtig, um den Bodenzustand und seine Veränderungen mit Blick auf die Bodengesundheit im zeitlichen Kontext beschreiben und bewerten zu können. Meilensteine auf dem Weg zu gesunden Böden können so abgebildet, passende Maßnahmen zur Zielerreichung (weiter-)entwickelt und der Erfolg von Bodenschutzmaßnahmen kontrolliert werden. Beim Bund und in den Ländern besteht ein vielfältiger Bedarf an Bodenindikatoren, der sich aus der Umsetzung und Ausgestaltung von Gesetzen, Strategien und internationalen Übereinkommen ergibt. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sind Zusammenstellungen und Vorschläge für Bodenindikatoren sowie Konzepte für die gemeinsame Arbeit auf Bundes- und Länderebene entwickelt worden. Für die Erweiterung der vorliegenden Fallstudien für Indikatoren auf das gesamte Bundesgebiet sowie für deren langfristige Verstetigung sind umfassende Aktivitäten auf nationaler Ebene und bei den Daten erhebenden Stellen erforderlich. Empfehlungen für das weitere Vorgehen werden in Kapitel 8 ausgeführt.

Summary

The aim of the research project was to support the German government in the further development of national and EU-wide reporting on climate adaptation and climate protection issues using indicators from nationally harmonised, quality-assured soil information. The examination of established and nationally and internationally harmonised indicators (sets) that are subject to reporting obligations, such as for Germany's greenhouse gas emissions reporting under the United Nations Framework Convention on Climate Change, was not the subject of the project. Rather, in addition to the indicators already in practical use, proposals for further indicators have been developed and, if possible, these were to be made permanent and designed for practical use. Furthermore, the concept development for the establishment of a national soil monitoring centre was supported, which can contribute to soil protection with reports on the soil condition and its changes.

In order to meet the known challenges of the further development of soil-related indicators in Germany - such as the difficulties in generating comparable soil-related measurement data - particular importance was attached to discussing ideas with stakeholders from federal and state authorities and research institutions, and this was taken into account with an expert discussion and a symposium. The project was based on the current state of scientific knowledge and the relevant activities and research results and took into account the soil-related measurement and survey activities available in Germany.

The project delivered the following results:

Analysing and reviewing the status of soil-related indicators

The state of play on indicators in soil-related reporting in Germany and the EU developed in the project was published in 2023 as a UBA text (Wolf et al. 2024). The report contains, among other things, characteristics of existing indicators with references to the data sources and the form of presentation. It was found that soil topics such as water and matter balance, soil structure, biodiversity and land use are covered to varying degrees by the indicators and indicator ideas researched and have so far only been incompletely mapped, with the existing soil-related indicators mostly focussing on a specific type of land use or ecosystem. A particularly large number of indicators and indicator ideas describe issues in the fields of land use, water and matter balance, while very few indicators for soil structure (erosion, compaction) and soil biodiversity exist or are contemplated. Gaps in indicator systems are often due to a lack of data and time series. A broad set of indicators is needed for reporting on the implementation of soil-related objectives formulated in many sectoral policy strategies, for example on biodiversity, sustainability, adaptation to climate change, spatial development, arable farming and forests. However, it was not possible to derive a specific need for information from all strategies. A comprehensive description and evaluation of soil condition and its changes as well as 'soil health' only appear possible with the help of indicator sets, i.e. with a combination of several individual indicators.

Numerous activities are currently underway to develop new indicators and new monitoring systems. With reference to soil protection issues and political goals, the compilation by Wolf et al. (2024) forms a basis for further developing and improving soil-related reporting in Germany in the future. It became clear that there is a need for information both for cross-thematic objectives such as 'maintaining the functionality of soils' and for objectives related to soil water balance, pollutants, nutrients and humus, soil erosion and compaction, as well as soil biodiversity and land use. Recommendations for further development and research work are formulated in Wolf et al. (2024) and summarised in Chapter 8.

Identification and consolidation of indicators suitable for the assessment of soil organic matter and soil biodiversity in the context of climate-related issues

New indicators were proposed in the UBA project ‘Conceptual design and implementation of a soil monitoring network to determine effects of climate change’ (Kaufmann-Boll et al. 2022). Based on this preliminary work and measurement data from institutions of the federal states and the federal government, the proposals were reviewed and further developed in order to prepare them for future application at national level. The guiding principle for the development of the indicators was the aim of being able to recognise general developments at national level. It was specified that the indicators should be implemented promptly, i.e. that they could be calculated nationwide. This is associated with requirements for data availability, nationwide coverage with representative measurement sites, a sufficient number of measurement campaigns and a suitable interval between them. The proposals were discussed at an expert meeting in October 2023, then further elaborated and presented at the national symposium ‘Soil indicators in the context of climate adaptation and soil protection’ in April 2024.

The proposed indicator ‘Compliance with site-typical humus content’ compares the humus content of measurement sites on arable and grassland soils with the reference ranges of the site-typical humus content. For this purpose, the humus content in topsoil is quantified using organic carbon. The development of the percentage share of measurement sites above, within and below the reference ranges of the site-typical humus content serves as an indicator. The case study includes 252 monitoring sites in Bavaria, North Rhine-Westphalia and Lower Saxony, some of which date back to 1985. The nationwide agricultural soil survey (BZE Landwirtschaft, 2011-2018) is used as the reference state. The measurement intervals vary between 1 and 5 years. In principle, the monitoring and survey methods are comparable. The indicator allows changes to be recognised, but does not evaluate them in terms of a functionally sufficient humus supply; further limitations are pointed out. A presentation proposal as a bar chart is available, as are the results of trend analyses for six site types with a sufficient number of measuring points. The implementation of the indicator for nationwide permanent reporting on the development of humus content in topsoil can be based on the existing measurement programmes of the federal states and the federal government. In particular, the humus monitoring and long-term soil monitoring programmes of the federal states in conjunction with the initial survey of the BZE Landwirtschaft are already available for the presentation and evaluation of time series of the indicator ‘compliance with site-typical humus content’ for agricultural soils. The continuation of these measurement programmes is necessary to ensure continuity.

The proposed indicator ‘Compliance with site-specific humus contents’ is closely related to an indicator proposal ‘Context-specific trend of organic carbon’ presented by the Thünen Institute of Climate-Smart Agriculture at the symposium ‘Soil indicators in the context of climate adaptation and soil protection’ in April 2024. Both proposals use humus content as a descriptor and they refer to data from the agricultural soil survey (BZE) either as a reference condition or to derive a site-specific humus expectation value (C_{exp}). The concept of the ‘context-specific trend of organic carbon’ is applicable to sites. A principle for the aggregation of measuring points was proposed for the presentation of the proposed indicator ‘agreement with site-specific humus contents’ and this was tested in a case study for three federal states with data from humus monitoring and long-term soil observation. The SOC:clay ratio as an indicator of soil carbon is not meaningful for sandy and humus-rich clayey sites and is not suitable for these soils, which are widespread in Germany.

The indicator ‘earthworm fauna’ analyses the development of the mean abundance (number of individuals) and the number of species of different life form types of earthworm fauna on arable and grassland soils. The case study includes more than 200 soil monitoring plots (BDF) in Bavaria, Saxony-Anhalt, Schleswig-Holstein and Brandenburg, some of which date back to 1985.

The measurement intervals vary between 3 and 7 years. There are methodological differences with regard to earthworm extraction and plot size. In addition to a comparison of the absolute mean abundance (number of individuals) and species numbers, a research approach is presented with a comparison of the BDF-specific temporal change in abundance and biomass. Limitations exist with regard to the representativeness of the BDF, the methodological differences in data collection and the significance for overall biodiversity. Data bases for other relevant land use types such as forests and other habitats such as floodplains are still lacking. A presentation proposal as a bar chart and the result of trend analyses are available. The proposed indicator 'earthworm fauna' is an important first step towards incorporating the topic of soil biodiversity into national reporting. Requirements for data delivery and quality assurance are specified. The Natural Climate Protection Action Programme (ANK) project 'Strengthening soil biodiversity as an indispensable contribution to natural climate protection' is an important instrument in this context, in which methodological standards are being harmonised for the first time and a baseline survey is being carried out for various types of use. In this project, no indicator was developed on the basis of soil respiration, as this was not considered suitable.

Symposium on soil-related indicators

The two-day symposium 'Soil indicators in the context of climate adaptation and soil protection' held in Dessau in April 2024 provided a forum for the discussion and exchange of information on existing ideas and concepts for indicator development at national level. More than 100 stakeholders from institutions involved in soil reporting, the collection and evaluation of soil-related measurement data, soil monitoring and the development of soil indicators in Germany accepted the UBA's invitation. These included representatives at ministerial level as well as subordinate authorities from the federal states, research institutions, universities, expert offices, committees and associations. The speakers and participants welcomed the proposals developed in the project for the two indicators mentioned above and the methodological conceptual approaches for their further development. However, it also became clear that further work needs to be done on the concepts and that the expert discussion needs to be continued. The conference ranged from current developments on soil indicators at federal level to the question of what contribution remote sensing and artificial intelligence (AI) can make to the development of soil indicators. A report on the results of the UBA and the presentations can be viewed on the UBA website: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/fachtagung-bodenindikatoren>.

Further development of the concept for the establishment of a National Soil Monitoring Centre

Based on the template prepared by the UBA, the draft concept was updated and further developed during the course of the project. It contains more specific statements on the objectives of the Centre's work and on the work steps required to implement the Centre, as well as statements on responsibilities and organisational structures with a view to the results of the UBA's initial discussions with potential network partners of the Centre, which were conducted in parallel. In addition, initial proposals were formulated for technical questions that could be answered by the National Soil Monitoring Centre and its stakeholders throughout Germany. Proposals were also drawn up for processes to enable clearly structured nationwide reporting on soil-related issues (Who works with whom on which topic, with which methods and in which form, and what are the responsibilities for data provision? Which data will be included in on-going reporting and by whom, and which data will be reported at the end?).

Conclusions

Indicators are important in order to be able to describe and evaluate the soil condition and its changes with regard to soil health in a temporal context. Milestones on the way to healthy soils can thus be mapped, suitable measures for achieving objectives can be (further) developed and

the success of soil protection measures can be monitored. There is a diverse need for soil indicators at federal and state level, resulting from the implementation and organisation of laws, strategies and international agreements. This research project has developed compilations and proposals for soil indicators as well as concepts for joint work at federal and state level. In order to extend the present case studies for indicators to the entire federal territory and for their long-term consolidation, comprehensive activities are required at national level and at the data-collecting agencies. Recommendations for further action are set out in Chapter 8.

Danksagung

Für die Bereitstellung von Messdaten und die Erläuterungen und Hinweise zu deren Interpretation danken wir den mitwirkenden Personen aus folgenden Institutionen:

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Fachbereich Bodenschutz und Altlasten,

Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein (LfU), 62 Boden,

Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU), W 15 Altlasten, Bodenschutz, Gewässergüte,

Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), L3.2 –Landwirtschaft, Bodenmonitoring,

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), Fachgebiet 23 Bodenschutz/Altlasten,

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Arbeitsbereich Bodenmonitoring und Arbeitsgruppe IAB 1d Bodentiere sowie Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau.

Für den Austausch von Ideen und konstruktive Diskussionsanstöße für die Entwicklung von Indikatoren zur organischen Bodensubstanz danken wir Herrn Dr. Christopher Poeplau und Prof. Dr. Axel Don, Thünen Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig.

Für die Unterstützung in Fragen der praktischen/methodischen Umsetzung von Regenwurmbeobachtungen sowie Fragen der Interpretierbarkeit von resultierenden Daten gilt unser Dank Roswitha Walter, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) sowie Anneke Beylich, IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH, Hamburg.

Für freundliche und konstruktive Gespräche sowie textliche Vorschläge im Hinblick auf langfristige Perspektiven für ein Monitoring der Bodenbiodiversität danken wir Prof. Dr. Christoph Tebbe, Thünen Institut für Biodiversität.

Unser Dank richtet sich auch an alle Akteur*innen aus Behörden und Forschungsinstitutionen, die mit ihrer Teilnahme und konstruktiven Beiträgen die Diskussion im Fachgespräch am 25. Oktober 2023 in Berlin und auf der Fachtagung “Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz” am 17./18. April 2024 in Dessau bereichert haben.

1 Einführung

Der Boden als zentrale Schnittstelle landschaftlicher Ökosysteme erfüllt wichtige Funktionen für Mensch und Umwelt. Klimaänderungen wirken sich auf den Wasserhaushalt, den Stofftransport, auf Bodenorganismen und damit auch auf den Stoffumsatz im Boden aus. Als Folge können natürliche Bodenfunktionen beeinträchtigt werden. Darüber hinaus kann es durch bestimmte Landnutzungen und infolge von Landnutzungsänderungen zur Freisetzung klimarelevanter Gase aus dem Boden kommen, die dann zum Klimawandel beitragen.

Momentan werden sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene Strategien zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung entwickelt. So soll beispielsweise das von der Europäischen Union (EU) Ende 2019 vorgestellte Konzept zum European Green Deal zentraler Bestandteil der Klimapolitik der EU werden. In diesem Zusammenhang wächst die Nachfrage nach aussagekräftigen Indikatoren, um auf deren Grundlage das Ausmaß der Bodendegradation bewerten und die Umsetzung politischer Konzepte und Strategien prüfen und weiter vorantreiben zu können. „Ein integriertes Bodenindikatorensystem ist erforderlich, das als Schirm für die weitere Überwachung und Berichterstattung dienen kann.“ (Europäische Kommission 2021). Seit Juli 2023 liegt der Entwurf für ein Europäisches Bodenüberwachungsgesetz vor (European Commission 2023), das den Rahmen für ein Monitoring zur Bodengesundheit beschreibt und zu erhebende Parameter und auszuarbeitende Indikatoren („soil descriptors“) vorschlägt. Der Rat der Europäischen Union hat die allgemeine Ausrichtung der Bodenüberwachungsrichtlinie im Juni 2024 festgelegt. Ein geänderter Richtlinienvorschlag liegt vom 10.04.2024 vor (Europäisches Parlament 2024).

Auch der Bundesrat verdeutlicht in seinem Papier „Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie – Weiterentwicklung 2021“ (Bundesrat 2021), dass für die Umsetzung bodenbezogener Ziele der Nachhaltigkeitsstrategie geeignete Indikatoren entwickelt werden müssen, welche die Beschreibung der Veränderung der Bodennutzung und des Bodenzustands unterstützen. Er bittet die Bundesregierung darum, die Bemühungen zur Ergänzung von Indikatoren für den Bereich Bodenschutz zu intensivieren.

In Bund und Ländern gibt es bereits viele Aktivitäten zur Anwendung bereits etablierter sowie zur Erarbeitung neuer bodenbezogener Indikatoren. Ein Beispiel für eine etablierte Berichterstattung ist das mit der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) zusammenhängende Berichtswesen. Darin bestehen aktuell für das Handlungsfeld Boden noch große Defizite in der Flächenabdeckung der bestehenden Datenquellen für Gesamtdeutschland. Darüber hinaus mangelt es an bundesweit verfügbaren Daten in zuverlässigen Zeitreihen für bestehende Bodenindikatoren.

Um die Überlegungen zur Entwicklung weiterer neuer Indikatoren fachlich zu unterstützen, besser zu strukturieren und inhaltlich zu bereichern, wurde das Forschungsvorhaben „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“ (FKZ: 3722 74 201 0) initiiert. Die Projektergebnisse sollen dazu beitragen, das Spektrum an bodenbezogenen Indikatoren zu Fragen der Klimaanpassung und des Klimaschutzes auf nationaler und auf EU-Ebene zu dokumentieren und eine Auswahl thematisch fehlender Indikatoren zu ergänzen.

2 Ziel und Aufgaben des Projekts

Das Ziel des Forschungsprojekts bestand in der Unterstützung der Bundesregierung bei der Weiterentwicklung der nationalen und EU-weiten Berichterstattung zu Fragen der Klimaanpassung und des Klimaschutzes mit Indikatoren aus bundesweiten harmonisierten qualitätsgesicherten Bodeninformationen. Die Prüfung von etablierten und national sowie international abgestimmten Indikatoren(-sets), die Berichtspflichten unterliegen wie beispielsweise für die Treibhausgas-Emissionsberichterstattung Deutschlands im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, war dabei nicht Gegenstand des Projekts. Vielmehr sollten, über die bereits zur praktischen Anwendung kommenden Indikatoren hinaus, Vorschläge für weitere Indikatoren entwickelt und nach Möglichkeit verstetigt und praktikabel einsetzbar konzipiert werden. Maßgeblich dafür waren die vorliegenden Arbeitsergebnisse aus dem FuE-Projekt „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Bodensubstanz“ (FKZ: 3719 71 204 0). Des Weiteren wurde die Konzepterarbeitung für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums unterstützt, das zukünftig mit Berichten über den Bodenzustand zum Bodenschutz beitragen kann.

Die im Projekt umzusetzenden Aufgaben werden im Folgenden kurz beschrieben:

1) Analyse und Aufarbeitung des Sachstands zu bodenbezogenen Indikatoren

Die Aufgabe bestand darin, zu klären und zusammenzustellen, mit welchen Indikatoren regelmäßig zum Bodenzustand und seinen Veränderungen in Deutschland und der EU berichtet wird. Hierzu waren

- ▶ alle in Deutschland für bundesweite Fragestellungen etablierten bodenbezogenen Indikatoren in Form von Steckbriefen zu beschreiben und übersichtlich zusammenzustellen;
- ▶ die vor uns liegenden Datenanforderungen (EU-weit und national), die Bodenbezug haben, zu beschreiben, also die Frage zu beantworten, welche Indikatoren und Daten für welche Berichterstattung benötigt werden (hierfür war eine Analyse vorliegender Strategiepapiere, Berichte und Konzepte erforderlich);
- ▶ die vorhandenen Fehlstellen durch die Beantwortung folgender Fragestellungen auszuweisen:
 - a) Welche Indikatoren und welche damit zusammenhängenden nationalen und EU-weiten Berichtspflichten können wir auf nationaler Ebene in diesem Zusammenhang bereits bedienen und welche nicht?
 - b) Wo bestehen Datenlücken?
 - c) Wo gibt es auf nationaler Ebene bereits mögliche fachliche und datentechnische Ansatzpunkte und Aktivitäten, um diese Lücken langfristig schließen zu können?

2) Identifizierung und Verstetigung von für die Beurteilung der Bodenbiodiversität und der organischen Bodensubstanz geeigneten Indikatoren im Kontext zu klimabezogenen Fragestellungen

Im Ergebnis der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und UBA beauftragten und finanzierten Forschungsaktivitäten (Kaufmann-Boll et al. 2022) lagen folgende fünf Ideen für neue bodenbezogene Indikatoren vor:

- ▶ Qualität der organischen Substanz in Böden,
- ▶ Veränderungen des Humusvorrats in Forst-, Acker und Grünlandböden sowie Mooren,
- ▶ Artenzusammensetzung von Tiergruppen,

- ▶ Regenwurmfauna Biomasse und
- ▶ bodenbiologische Aktivität.

Diese Ideen wurden auf der Basis von Überlegungen zu geeigneten Messgrößen für die Beschreibung von Veränderungen des Bodenzustands im Klimawandel und den damit verbundenen Qualitätsanforderungen an Messungen und vor dem Hintergrund der bereits etablierten Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und einer umfassenden Untersuchung der in Deutschland vorhandenen Messaktivitäten in Bezug auf die dort vorhandenen Messtandorte und Erhebungskonzepte abgeleitet. Die Vorschläge waren eingehend auf ihre Eignung und praktikable Umsetzbarkeit zur Ergänzung bereits vorliegender Indikatoren und der bereits etablierten bodenbezogenen Berichterstattung zu prüfen. Für ausgewählte, als geeignet befundene Indikatorideen waren Vorschläge für die Berichterstattung und eine Prozessdefinition zu erarbeiten, damit diese langfristig in der indikatorbasierten Berichterstattung etabliert werden können. Ergebnisse des vorhergehenden Fachgesprächs waren dabei zu berücksichtigen. Für die Auswahl geeigneter Indikatorideen war maßgeblich, dass

- ▶ Daten zur Generierung des Indikators zur Verfügung stehen,
- ▶ die Daten auch in Zukunft für einen absehbaren Zeitraum verfügbar sein müssen,
- ▶ die Daten sich mit einem vertretbaren Aufwand und vertretbaren Kosten beschaffen lassen,
- ▶ die Daten perspektivisch eine bundesweite Auswertung ermöglichen,
- ▶ ein inhaltlicher Zusammenhang zu der Thematik Klimawandel besteht und
- ▶ die jeweiligen Daten- und Informationslieferanten die „Ownership“ über ihre Daten behalten.

Die Dokumentation sollte in Anlehnung an die Formulare, die für die Indikatoren zum Monitoringbericht der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) verwendet werden, erfolgen. Ziel war, dass die entwickelten Indikatoren auch Beiträge zum Monitoring der DAS im Handlungsfeld Boden liefern können.

3) Fachtagung zu bodenbezogenen Indikatoren

Für eine nationale Fachtagung zu bodenbezogenen Indikatoren war ein Konzept zu erarbeiten und umzusetzen. Dazu gehörten die Unterstützung des UBA bei der Formulierung von Fragestellungen, der Programmgestaltung und Organisation sowie die Moderation und Auswertung der Veranstaltung.

4) Weiterentwicklung des Konzepts für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums

Grundlage war ein im UBA ausgearbeitetes erstes Konzept für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums vom 20.07.2022. Dies enthielt Benennungen von Zielen, Aufgaben und Werkzeugen des Nationalen Bodenmonitoringzentrums, zu erforderlichen Organisations- und IT-technischen Infrastrukturen und zu fachlichen Anforderungsprofilen sowie einen Überblick über die Vielzahl der laufenden Aktivitäten zum Bodenmonitoring und zur Erhebung des Bodenzustands in Deutschland. Das Konzept sollte im Projekt in Zusammenarbeit und in Abstimmung mit dem UBA weiter ausgebaut und fortgeschrieben werden. Zu konkretisieren waren die Ziele der Arbeit und das Vorgehen, die Arbeitsschritte zur Umsetzung des Zentrums und Aussagen zu Verantwortlichkeiten und Organisationsstrukturen mit Blick auf Ergebnisse aus parallel laufenden ersten Gesprächen des UBA mit potenziellen Netzwerkpartnern des Zentrums. Darüber hinaus waren Vorschläge für fachliche Fragestellungen zu formulieren, die durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum mit seinen Akteuren bundesweit beantwortet werden sollen. Darauf

aufbauend waren Vorschläge für Ablaufprozesse zu entwickeln, die eine klar strukturierte bundesweite Berichterstattung zu bodenbezogenen Fragestellungen ermöglichen (Wer arbeitet mit wem zu welchem Thema, mit welchen Methoden in welcher Form zusammen und wie sehen die Verantwortlichkeiten bei der Datenbereitstellung aus? Welche Daten werden von wem in die laufende Berichterstattung eingebracht und welche Daten werden am Ende berichtet?). Ebenso bestand das UBA-Interesse daran, vorhandene fachliche Fehlstellen bei der bodenbezogenen Berichterstattung auszuweisen (Welche Themen können momentan auf Grund welcher Probleme nicht bedient werden? Wo besteht fachlich, rechtlich und organisatorisch noch Regelungsbedarf?).

3 Vorgehensweise

Die Herausforderungen der Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren in Deutschland sind bekannt: Ein unterschiedlicher Wissensstand bei verschiedenen Fragestellungen, die Notwendigkeit der ressortübergreifenden Abstimmung von Konzepten, die Schwierigkeiten bei der Erzeugung vergleichbarer bodenbezogener Messdaten, der Aufwand und die technischen Anforderungen an den Datenaustausch sowie die Defizite in der räumlichen Abdeckung von standortbezogenen Beobachtungsdaten für Böden. Vor diesem Hintergrund wurde das Projekt mit einem Team bearbeitet, dessen Mitglieder die notwendige Kompetenz und Erfahrung zur Entwicklung von Indikatoren und zu deren Berichterstattung sowie für Konflikt-, Kooperations- und Prozessmanagement mitbringen, über Kenntnisse zur Qualität, Eignung und Verfügbarkeit bodenbezogener Monitoring- und Erhebungsdaten in Deutschland verfügen und das notwendige bodenkundliche Fachwissen – hier zur organischen Bodensubstanz und Bodenbiodiversität – einbringen konnten.

Der Diskussion von im Projekt entwickelten Ideen mit Akteur*innen aus Bundes- und Länderbehörden sowie Forschungsinstitutionen wurde besondere Bedeutung beigemessen und mit einem Fachgespräch und einer Tagung Rechnung getragen.

Das Projekt knüpft an den aktuellen wissenschaftlichen Stand an, indem die in Kapitel 9 zusammengestellte Fachliteratur sowie folgende Aktivitäten und Forschungsergebnisse berücksichtigt wurden:

- ▶ in der Entwicklung befindliche Indikatoren für die DAS-Berichterstattung und Aktivitäten im Rahmen der Fortschreibung des Aktionsplans Anpassung zur Definition messbarer Ziele für die in der DAS definierten Handlungsfelder,
- ▶ Aktivitäten und Empfehlungen zur Indikatorentwicklung im Rahmen der Europäischen Bodenstrategie und des Entwurfs des Bodenüberwachungsgesetzes,
- ▶ Mission „Caring for Soil is caring for life“, Umsetzung konkreter Ziele für den Boden bis 2030, 8 Indikatoren zur Überwachung der Bodengesundheit (European Commission 2020),
- ▶ Aktivitäten des UBA zur Entwicklung eines Sets an Indikatoren zur Bodenqualität,
- ▶ FuE-Projekt des UBA „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Bodensubstanz (Kaufmann-Boll et al. 2022),
- ▶ Aktivitäten von BMUV und UBA zur Weiterentwicklung des Bodenschutzrechts (BMUV, 2022; Bodle et al. 2023),
- ▶ FuE-Projekt des UBA „Bewertung der biologischen Vielfalt mittels DNA-Extraktion aus Bodenproben von BDF“ (Jänsch et al. 2023),
- ▶ FuE-Projekt des UBA „Erarbeitung von Referenzwerten für Bodenorganismen für die Böden in Deutschland“ (Salako et al. 2023),
- ▶ Umfrageergebnisse zur Bodenbiologie auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen von 2021/2022,
- ▶ Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Aufbau und der Etablierung des im Jahr 2021 in Leipzig eröffneten Nationalen Monitoringzentrums zur Bodenbiodiversität,

- ▶ Arbeiten im BonaRes-Datenzentrum (BonaRes – Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie).

Des Weiteren wurden bodenbezogene Mess- und Erhebungsdaten recherchiert, zusammengestellt und aufbereitet (siehe Punkt 2 und Kapitel 5).

Die Bearbeitung der Aufgaben im Projekt gliederte sich in vier Arbeitspakete. Das Vorgehen im Einzelnen wird nachfolgend zusammengefasst.

1) Analyse und Aufarbeitung des Sachstands zu bodenbezogenen Indikatoren

Die in Bund, Ländern und EU etablierten bodenbezogenen Indikatoren wurden von der Bosch & Partner GmbH (Mareike Wolf, Konstanze Schönthaler, Can Ölmez) zusammengetragen und mithilfe von Steckbriefen im Detail beschrieben. Zudem wurde recherchiert, inwieweit Arbeiten zur Neu- und Weiterentwicklung von Bodenindikatoren für bestehende Monitoringsysteme initiiert worden sind. Dabei stützte sich die Recherche auf zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung vorliegende Veröffentlichungen und spiegelt den Stand von April 2023 wider. Im Anschluss wurden Ausführungen aus dem im Juli 2023 von der Europäischen Kommission veröffentlichten Entwurf des Bodenüberwachungsgesetzes ergänzt. Die Methodik der Analyse, deren Ergebnisse und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen sind in einem separaten Forschungsbericht zusammengestellt. Dieser wurde im Oktober 2023 an das UBA übergeben und im Februar 2024 publiziert (Wolf et al. 2024).

2) Identifizierung und Verstetigung von für die Beurteilung der organischen Bodensubstanz und der Bodenbiodiversität geeigneten Indikatoren im Kontext zu klimabezogenen Fragestellungen

Im FuE-Projekt des UBA „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Bodensubstanz (Kaufmann-Boll et al. 2022) sind neue Indikatoren vorgeschlagen worden. Zu beantworten war die Frage, inwieweit sich diese Indikatoren zeitnah und praktikabel für Fragen der Wirkungen des Klimawandels und der Anpassung nutzen lassen und wie diese ggf. weiterentwickelt bzw. modifiziert werden müssen. Vorgegeben war, dass die Indikatoren zeitnah umgesetzt, also bundesweit berechnet werden können. Damit verbunden sind Anforderungen an die Datenverfügbarkeit, eine bundesweite Abdeckung mit repräsentativen Messstandorten, eine ausreichende Anzahl und ein geeigneter zeitlicher Abstand von Messkampagnen. Dementsprechend kam die Prüfung der für die Umsetzung der Indikatoren in Frage kommenden Standorte und Messdaten auf Repräsentativität hinzu.

Die *Vorprüfung der Vorschläge für neue bodenbezogene Indikatoren auf praktikable Umsetzbarkeit* erfolgte vor dem Hintergrund der bereits in Bund, Ländern und EU etablierten Indikatoren und Indikatorideen (siehe Punkt 1, Wolf et al. 2024) und der fachlichen Bedeutung des jeweiligen Indikators. Grundlegend für die Ausarbeitung waren das Fachwissen des Teams und ein fachlicher Austausch mit Expert*innen aus EU-, Bundes- und Länderbehörden sowie Forschungsinstitutionen.

In einem eintägigen *Fachgespräch am 25.10.2023* in Berlin fand eine Diskussion über Indikatorideen mit rund 30 Expert*innen für die Themenbereiche „Organische Bodensubstanz“ und „Bodenbiodiversität“ statt. Neben den Autoren des vorliegenden Berichts haben Personen der folgenden Institutionen teilgenommen:

- ▶ ECT Oekotoxikologie
- ▶ European Environment Agency
- ▶ IFAB GmbH

- ▶ JKI
- ▶ LANUV NRW
- ▶ LBEG Niedersachsen
- ▶ LUBW Baden-Württemberg
- ▶ Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität
- ▶ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
- ▶ Senckenberg Museum für Naturkunde
- ▶ Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz
- ▶ Thünen-Institut, Institut für Biodiversität
- ▶ Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme
- ▶ UBA FG II 2.7
- ▶ UFZ

Die vom Projektteam erarbeiteten Ideen wurden den Teilnehmenden vorab in einem Konzeptpapier dargelegt und im Nachgang unter Berücksichtigung der eingegangenen Hinweise überarbeitet und angepasst.

Nach der Diskussion im Fachgespräch erfolgte für ausgewählte, als geeignet befundene Indikatorideen („Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ und „Regenwurmfauna“) eine Präzisierung der Methodik für die Berechnung, d. h. die Eingangsgrößen und die anzuwendenden Aggregationsverfahren wurden benannt.

Um diese Indikatorideen auf Umsetzbarkeit und die Berechnungsmethode auf Anwendbarkeit zu prüfen, wurden *behördliche Monitoring- und Erhebungsdaten mit statistischen Methoden* (R Core Team 2023; Lorenz & Kevork 2022) *ausgewertet*, die für das DAS-Monitoring entwickelt wurden.

Zur Auswahl geeigneter Messstandorte und Daten diente zunächst eine themenübergreifende Projektdatenbank (MS Access) aus dem Vorgängerprojekt (UBATEXTE 67/2022). In dieser Standort-Datenbank stehen für die Untersuchungsstandorte der wesentlichen Mess- und Erhebungsprogramme in Deutschland Stammdaten und Angaben über die jeweils fortlaufend erfassten Messgrößen mit Stand 2020 zur Verfügung. Im Anschluss wurden als potenziell geeignet befundene Messdaten bei den erhebenden Stellen angefragt.

Bei der Vorbereitung der Datenanfragen stellte sich heraus, dass beim Deutschen Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig seit 2022 ein Datenbestand von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) zusammengetragen, harmonisiert und ausgewertet wird, der für die Indikatorentwicklung sowohl für Bodenbiodiversität als auch für organische Bodensubstanz geeignet ist. Da eine wiederholte Anfrage derselben Messdaten bei den Länderinstitutionen zu Doppelarbeit bei der Datenbereitstellung, -aufbereitung und -auswertung geführt hätte, wurden Kooperationsvereinbarungen mit dem iDiv und den Daten liefernden Stellen für die Datennutzung abgeschlossen. Die verwendeten Messdaten sind in Teilen durch das Projektteam bei ahu GmbH und gaiac e.V. sowie in Teilen beim iDiv Halle-Jena-Leipzig (Dr. Christian Ristok, Kristin Paschke) beschafft, zusammengeführt und aufbereitet worden. Für Boden-Dauerbeobachtungsdaten ist eine angepasste MS Access-Datenbank auf Grundlage der Bo-Info

Datenbank (vgl. Römbke et al. 2012) mit einheitlichen Methoden- und Artenschlüssellisten eingesetzt worden.

Sofern es zu Einschränkungen aufgrund der Datenverfügbarkeit auf Bundesebene oder aufgrund der Datenqualität kam, war alternativ zur bundesweiten Betrachtung eine Darstellung sogenannter *Fallstudien* für ein Bundesland oder einer Gruppe von Bundesländern zu prüfen. Mit solchen Fallstudien-Indikatoren wird im DAS-Monitoring gearbeitet. Die Präsentation von Fallstudien setzt jedoch voraus, dass eine klare zeitliche und absehbare Perspektive für eine bundesweite Verfügbarkeit von Daten als Grundlage für die Generierung eines regelmäßig fort-schreibbaren, bundesweiten Indikators gegeben ist (UBA 2023).

Für die aufgrund ihrer Eignung ausgewählten Indikatorideen wurde schließlich ein möglicher *Prozess für die bundesweite Generierung und Verstetigung der Berechnung beschrieben*. Zur Prozessdefinition gehören insbesondere die Bedingungen für die Datenerhebung, Qualitätssicherung und die Zuständigkeiten. Bei der konkreteren Ausgestaltung der ausgewählten Indikatorideen waren konkret folgende Punkte zu beachten:

- ▶ Festlegung der relevanten Messgrößen beispielsweise unter Berücksichtigung der Zielgrößen und Begleitparameter für Themen in UBATEXTE 67/2022,
- ▶ Häufigkeiten der Messungen (Intervalle) und damit die Aktualisierbarkeit des Indikators,
- ▶ Definition erforderlicher Standards für die Vergleichbarkeit der Daten (Messgrößen, Untersuchungsmethoden, Datenaustauschformate, Zeitpunkt bzw. Zeitraum der Erfassung usw.),
- ▶ Einflüsse von Landnutzungsänderungen und Bewirtschaftungsänderungen,
- ▶ Festlegung der Anforderungen zur Qualitätssicherung,
- ▶ klar definierte Zuständigkeiten für die Datenlieferungen (Verantwortlichkeiten und Einzelaufgaben),
- ▶ auftretende Kosten (soweit möglich) und
- ▶ fachliche Schnittstellen zwischen den Indikatoren der Bodenbiodiversität und der organischen Substanz.

Darüber hinaus spielen *Ziel-, Richt- und Schwellenwerte* für die Bewertung von Indikatoren eine wichtige Rolle, insbesondere für die Forderung von Anpassungs-, Minderungs-, Wiederherstellungsmaßnahmen. Wenn diese fehlen, kann kein definiertes Wertespektrum vorgegeben werden und eine Bewertung von unkritischen bzw. problematischen Entwicklungen ist nicht möglich. Das Vorliegen von Ziel-, Richt- und Schwellenwerten wurde jedoch nicht für die Auswahl geeigneter Indikatorideen und deren Ausgestaltung vorausgesetzt.

Für die *Dokumentation der Indikatoren* wurden die Formulare aus dem DAS-Monitoring zugrunde gelegt. In den Indikator-Factsheets werden demnach alle relevanten Hintergrundinformationen zu den Indikatoren festgehalten (unter anderem eindeutige Betitelung des Indikators, Begründung der Auswahl des Indikators im thematischen Kontext, Berechnungsvorschrift, Angabe der zu verwendenden Datenquellen, Hinweise zu künftigen Möglichkeiten der Weiterentwicklung, Angaben zu den institutionellen und personellen Mitwirkungen und Verantwortlichkeiten für den jeweiligen Indikator). Die Daten-Factsheets enthalten alle Datensätze, die zur Berechnung des Indikators erforderlich sind, alle relevanten Hintergrundinformationen zu diesen Datensätzen sowie die Indikator-Grafik. Die Berechnung des Indikators wird in den Excel-basierten Factsheets mit den notwendigen Rechenschritten vollzogen. Die Daten-Factsheets wurden dem UBA in digitaler Form übergeben. Die für die Indikator-Factsheets erforderlichen Inhalte werden

im vorgelegten Bericht abgehandelt. Damit liegen im Ergebnis Indikatorentwürfe vor, die für die Berichterstattung auf nationaler Ebene – unter Berücksichtigung von Hinweisen zu Einschränkungen – weiterentwickelt werden können. Die Entwürfe wurden im Rahmen der Fachtagung zu bodenbezogenen Indikatoren (siehe Punkt 3) vorgestellt.

Fragestellungen zum Thema Bodenbiologie und Bodenbiodiversität wurden von gaiac e.V. (Dr. Andreas Toschki und Johanna Oellers) bearbeitet, Fragen zur organischen Bodensubstanz von der ahu GmbH (Dr. Michael Kastler), dem FiBL (Dr. Markus Steffens), beraten hat hier außerdem die LfL Bayern (Dr. Martin Wiesmeier). Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler, Mareike Wolf) und ahu GmbH (Carolin Kaufmann-Boll) haben bei der Indikatorentwicklung und der Prozessdefinition beratend mitgewirkt und die Dokumentation der Indikatoren unterstützt. Das Fachgespräch zur Diskussion von Indikatorideen wurde von der team ewen GbR (Carla Schönfelder) mitorganisiert und moderiert.

3) Fachtagung zu bodenbezogenen Indikatoren

Die Konzeption und Vorbereitung der Fachtagung, die am 17. und 18.04.2024 im UBA in Dessau stattgefunden hat, wurde in Zusammenarbeit mit dem UBA-Fachgebiet Bodenzustand und Bodenmonitoring auf der Basis einer Liste der folgenden Fragestellungen erarbeitet:

- ▶ Wo steht Deutschland mit bodenbezogenen Indikatoren?
- ▶ Zu welchen bodenbezogenen Indikatoren kann auf nationaler Ebene schon berichtet werden?
- ▶ Wo liegen Fehlstellen vor und wo bestehen Synergien zwischen den Strategien und Aktivitäten zur Indikatorentwicklung?
- ▶ Wie fügen sich die neu entwickelten Indikatoren aus dem Projekt in die indikatorbasierte Berichterstattung zum Boden ein bzw. können diese unterstützen?
- ▶ Welche Rolle spielen das Nationale Bodenmonitoringzentrum sowie andere vergleichbare Stellen und Akteur*innen bei den oben genannten Fragestellungen?

Die Fragestellungen der Tagung wurden auf Themen ausgerichtet, für die Indikator-Entwürfe aus dem aktuellen Forschungsprojekt vorliegen oder für die grundsätzlich Bedarf für eine Fachdiskussion aufgrund von laufenden Aktivitäten auf umweltpolitischer Ebene besteht. So haben – neben Biodiversität und Bodenkohlenstoff – auch die Themenfelder Schadstoffgehalte und Versiegelung Eingang in das Programm gefunden. In die Tagung waren Formate einzubinden, die einerseits Freiraum für Diskussionen bieten, aber auch konkret weiter nutzbare Ergebnisse erwarten lassen. Eine inhaltliche Aufarbeitung der Diskussionsergebnisse erfolgte in einem Kurzbericht, der diesem Bericht in Anhang A beigelegt ist.

Die Aufgaben im Zusammenhang mit der Durchführung der nationalen Tagung zu bodenbezogenen Indikatoren hat Carla Schönfelder mit ihrem Team übernommen (team ewen GbR). Carolin Kaufmann-Boll (ahu GmbH) hat bei der inhaltlichen Ausgestaltung mitgewirkt. Ergebnisse des Projekts sind von Mitgliedern des Projektteams in Vorträgen präsentiert worden. Ein Ergebnisbericht des UBA und die Vorträge sind auf der UBA-Webseite einsehbar:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/fachtagung-bodenindikatoren>.

4) Weiterentwicklung des Konzepts für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums

Folgende Unterlagen und Dokumente flossen in die Weiterentwicklung des vom UBA FG II 2.7 erarbeiteten ersten Konzepts für den Aufbau des Zentrums ein:

- ▶ Forschungsergebnisse aus UBATEXTE 67/2022 (Kaufmann-Boll et al. 2022),

- ▶ das Konzept für das nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität (Deutscher Bundestag (2021) sowie
- ▶ Unterlagen und Dokumente, die mit der DAS-Berichterstattung im Zusammenhang stehen, insbesondere das Organisationshandbuch (Schönthaler & von Andrian-Werburg 2015).

Nach der Klärung und Präzisierung der zu bearbeitenden Inhalte wurden Gespräche mit UBA FG II 2.7 geführt, welche die Konkretisierung und weitere Ausarbeitung der Ziele und Aufgaben des Nationalen Bodenmonitoringzentrums zum Gegenstand hatten. Im Ergebnis erfolgte in Abstimmung mit UBA der inhaltliche Ausbau und die Fortschreibung des Ausgangsdokuments. Im Fokus lagen die erforderlichen Organisationsstrukturen, fachliche Anforderungsprofile sowie die konkreten Arbeitsschritte zur Umsetzung des Zentrums. Erarbeitet wurden textliche Ausführungen und grafische Skizzen für die Organisationsstrukturen (innerhalb des Zentrums, Gremien), Rollen und Verantwortlichkeiten, Aufgaben und Produkte. Der Entwurf für einen Fragenkatalog (UBA-Idee einer fortführbaren Losenblattsammlung) wurde konzipiert. Der Katalog beschreibt und dokumentiert bedeutsame bodenfachliche Fragen, die zukünftig vom Zentrum in Zusammenarbeit mit einem Bodenmonitoring-Netzwerk beantwortet werden könnten. Die Fragen des Katalogs leiten sich aus den Aufgaben des Bundes für den Klima- und Bodenschutz und die Anpassung an den Klimawandel ab. Weiterhin spielen bestehende und künftig zu erwartende Berichtsanforderungen auf nationaler und europäischer Ebene eine Rolle. Bereits etablierte Zuständigkeiten für Berichterstattungen und Themen sollten dabei in den Händen der jeweiligen Institutionen verbleiben. In Anlehnung an den Fragenkatalog wurden darüber hinaus erste Vorschläge für die in einer bundesweiten Berichterstattung notwendigen Prozesse in Strukturdiagrammen beschrieben. Die Ausweisung der verantwortlichen Stellen bzw. Institutionen darzustellen war ein Bestandteil der Arbeiten. Aus UBA-Sicht standen dabei folgende Fragen im Mittelpunkt: Wer arbeitet mit wem zu welchem Thema, mit welchen Methoden in welcher Form zusammen und wie sehen die Verantwortlichkeiten bei der Datenbereitstellung aus? Welche Daten werden von wem eingebracht?). In Verbindung mit der Prozessbeschreibung für die Bearbeitung von Fragestellungen sollte der Fragenkatalog deutlich machen, wie das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Bodenmonitoring-Netzwerk agieren könnte. Dahinter verbirgt sich der UBA-Gedanke, den Dienstleistungscharakter des Zentrums und die Notwendigkeit der Vernetzung und Zusammenarbeit der Akteure hervorzuheben. Der Katalog vermittelt zudem einen Überblick, zu welchen bodenbezogenen Fragen auf Bundesebene gegenwärtig Aussagen möglich sind und für welche Aussagen künftig Antworten angestrebt werden.

Das weiterentwickelte Konzept zum „Aufbau des Nationalen Bodenmonitoringzentrums beim UBA und des damit verbundenen Netzwerks“ wurde am 03.05.2023 zur behördeninternen Weiterbearbeitung und nachfolgenden Ressortabstimmung an das UBA übergeben und ist diesem Bericht als Anhang B beigelegt. In die Abstimmungen zum Zentrum mit Akteur*innen anderer Institutionen und Ressorts waren die Forschungsnehmenden nicht involviert.

Die Bearbeitung erfolgte durch die ahu GmbH (Carolin Kaufmann-Boll, Maike Kern, Frank Müller) mit Unterstützung und Beratung durch die Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler, Mareike Wolf) auf der Basis des vorliegenden ersten Konzepts vom 20.07.2022 vom UBA (Jeanette Mathews, Dr. Marc Marx und Dr. Frank Glante). Themenspezifische Inhalte im Zusammenhang mit organischer Bodensubstanz sind von Dr. Michael Kastler (ahu GmbH), zur Bodenbiologie und Bodenbiodiversität von Dr. Andreas Toschki und Johanna Oellers (gaiac e.V.) geprüft worden. Die bearbeiteten Inhalte und Ergänzungen sind im engen Austausch mit den genannten Hauptautoren des Konzepts aus dem UBA FG II 2.7 entwickelt und abgestimmt worden.

4 Begriffsbestimmungen

Bodenmonitoring

Bodenmonitoring ist die regelmäßige und langfristige Überwachung von Böden zur Erfassung von Veränderungen des Bodenzustands beziehungsweise der Bodengesundheit. Bodenmonitoring nutzt In-situ-Erhebungen physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften des Bodens wie Nährstoffgehalt, Bodenfeuchte, Bodenstruktur und Bodenorganismen. In der Regel werden diese Erhebungen durch Fachbehörden und wissenschaftliche Einrichtungen durchgeführt, sie können durch bürgerwissenschaftliches Engagement ergänzt werden. Neben In-situ-Erhebungen sind auch Auswertungen von Fernerkundungsdaten und Modellierungen möglich. Unter Bodenmonitoring wird hier neben der Erfassung von Daten durch Bodenuntersuchungen auch die Erfassung und Darstellung von Gefährdungen der Bodenfunktionen verstanden, wie Schadstoffeinträge oder Versiegelung. Zum Bodenmonitoring gehört, dass die erhobenen Daten aufbereitet, dargestellt und veröffentlicht werden. Das nationale Bodenmonitoring versucht dabei, deutschlandweite oder regionale Aussagen zu treffen, die die Daten vieler Messstandorte aggregieren. In Abgrenzung zu Projektionen von Datenreihen in die Zukunft betrachtet das Bodenmonitoring den Zustand in der Vergangenheit und Gegenwart. Ziel des Bodenmonitorings ist es, langfristige Trends und Veränderungen zu erkennen, sodass frühzeitig negative Auswirkungen auf die Umwelt oder auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzung des Bodens durch das Ergreifen von Maßnahmen verhindert werden können (Frühwarninstrument). Vor diesem Hintergrund ist es ein wichtiges Instrument für die Politikberatung und essenziell für die Ableitung von Handlungserfordernissen. Bodenmonitoring wird von Behörden, Umweltorganisationen, Bewirtschafter*innen und anderen Akteur*innen genutzt, um Entscheidungen in Bezug auf Bodennutzung, Umweltschutz, Land- und Forstwirtschaft zu treffen.

Bodenindikatoren

Das Bodenmonitoring arbeitet mit Bodenindikatoren als Instrument der Aggregation von Daten und der Kommunikation von Sachverhalten. Bodenbezogene Indikatoren beschreiben den Zustand und die Entwicklung der Umwelt in Bezug auf das Medium Boden anhand ausgewählter Kenngrößen. Sie stellen komplexe Sachverhalte verständlich dar und zeigen Entwicklungen über möglichst lange Zeiträume auf. Als Indikatoren kommen Messparameter, abgeleitete Größen und Parameterbündel in Frage, die auf quantitativen oder qualitativen Informationen beruhen. Grundlage sind, wo möglich, gemessene, belastbare (geprüfte und valide) Daten. Modellierungen sollen nur eingesetzt werden, wenn Messungen fehlen. Bodenindikatoren sollen die Bewertung der dargestellten Entwicklung ermöglichen, das heißt ausreichend sensitiv und interpretierbar sein, für eine definierte Fläche repräsentativ sein und sich gut vermitteln lassen. Die Darstellung und Bewertung von Indikatoren kann mit Bezug auf festgelegte Referenz-, Ziel- oder Schwellenwerte, auf ein Wertespektrum, auf einen natürlichen Optimalzustand – sofern bekannt oder modellierbar – oder anhand einer relativen Veränderung vorgenommen werden. Aus Bodenindikatoren lassen sich bestenfalls Handlungsoptionen ableiten. Grundlage für die Bewertung bodenbezogener Indikatoren können Umwelt- und Nachhaltigkeitsziele sein, die in politischen Strategien, Gesetzen oder Richtlinien formuliert sind. Materielle Maßstäbe wie Vorsorgewerte für die Besorgnis schädlicher Bodenveränderungen, können bei der Bewertung von Indikatoren eingesetzt werden.

Bodendescriptoren

Bodendescriptoren werden von der Europäischen Kommission im Vorschlag für das Bodenüberwachungsgesetz von 2023 als „Parameter, die ein physikalisches, chemisches oder biologisches Merkmal der Bodengesundheit beschreiben“ definiert (Council of the European Union 2023a, 2023b). Bodendescriptoren sollen zur Beschreibung der Bodendegradation festgelegt

werden und den Überwachungsrahmen auf EU-Ebene definieren. Sie können gemessen oder geschätzt werden. Für einige Bodendescriptoren sind im Richtlinien-Vorschlag Kriterien für einen gesunden Bodenzustand formuliert.

Bodengesundheit

Bodengesundheit ist die anhaltende Fähigkeit des Bodens, als lebenswichtiges Ökosystem zu funktionieren, welches Pflanzen, Tiere und Menschen ernährt und eine Verbindung zwischen der Agrar- und Bodenwissenschaft, der Politik, den Bedürfnissen der Interessengruppen und einem nachhaltigen Management der Versorgungskette herstellt (Lehmann et al. 2020). Im Entwurf des Bodenüberwachungsgesetzes vom 05.07.2023 wird die Bodengesundheit als der physikalische, chemische und biologische Zustand des Bodens definiert, der seine Fähigkeit bestimmt, als vitales lebendes System zu funktionieren und Ökosystemleistungen zu erbringen (Council of the European Union 2023b).

Bodenfunktionen

Bodenfunktionen sind integrale Eigenschaften des Bodens, die aus einer Vielzahl komplexer Interaktionen zwischen physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen herrühren (Vogel et al. 2018). Sie sind essenziell für das Funktionieren der terrestrischen Ökosysteme insbesondere hinsichtlich des Klimas, der Wasserverfügbarkeit und -qualität, der Nährstoffkreisläufe sowie als Lebensraum und für die Biodiversität (Blum 2005; Doran & Parkin 1994; Larson & Pierce 1994; in: Vogel et al. 2018). Im deutschen Bodenschutzrecht erfüllt Boden gem. § 2 Abs. 2, Nr. 1 des BBodSchG natürliche Funktionen als 1. Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen, 2. Bestandteil des Naturhaushalts, v. a. mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen und 3. Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers.

Ökosystemleistungen

Die Bodenfunktionen weisen auf grundlegende und vielfältige Eigenschaften des Bodens hin und zeigen, dass der Boden einen wichtigen Beitrag zu den Ökosystemleistungen erbringt. Diese stellen die ökonomische Bedeutung des Bodens im Sinne seiner Leistungen für die menschliche Gesundheit und das Wohlergehen der Menschen in den Vordergrund. Die Ökosystemleistungen umfassen 1. Versorgungsleistungen, die unmittelbar zur Versorgung der Menschen beitragen (z. B. durch landwirtschaftliche Produkte, Holz, Wasser), 2. Regulierungsleistungen (z. B. indem ein Waldökosystem organischen Kohlenstoff speichert und damit zum Klimaschutz beiträgt), 3. Kulturelle Leistungen (z. B. Naturerbe) und 4. Basisleistungen (z. B. biologische Aktivität im Boden) (KBU 2019).

Organische Bodensubstanz (Humus)

Organische Bodensubstanz beinhaltet die Gesamtheit der abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe auf und im Boden einschließlich deren organische Umwandlungsprodukte. Ihre mengenmäßige Bestimmung basiert auf der Messung des Gehalts an organischem Kohlenstoff (C_{org}) bzw. Soil Organic Carbon (SOC) als Bestandteil des Humus. Humusgehalt = $C_{org} \times 1,72$ (Ad-hoc AG Boden 2005).

Bodenbiodiversität

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

Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität, Fachgremium Boden-Biodiversitätsmonitoring).

Bodenbiologie

Bodenbiologie bezeichnet die Lehre von der Morphologie, Systematik, Physiologie, Verbreitung und Lebensweise der Bodenorganismen sowie deren Wechselwirkungen untereinander und mit ihrer Umgebung.

Bodenmikrobiom

Als Bodenmikrobiom werden die bodenbewohnenden Bakterien, Archaeen, Pilze und Protisten zusammengefasst.

Biototyp

Ein Biototyp ist ein abstrahierter Typus aus der Gesamtheit gleichartiger oder ähnlicher Biotope. Er dient vor allem der Beschreibung der kleinsten ökologischen Landschaftseinheiten, die sich wiederum auf übergeordneten Ebenen zusammenfassen lassen. Das Biotop beschreibt dabei den Lebensraum der Lebensgemeinschaft (Biozönose).

Lebensraumtyp

Ein Lebensraumtyp, auch FFH-Lebensraumtyp, ist ein abstrahierter Typus aus der Gesamtheit gleichartiger und ähnlicher natürlicher Lebensräume und dient als besonders hoher Schutzstatus der Beschreibung der Landschaft im Rahmen der Vorgaben FFH-Richtlinie (Natura-2000-Gebiete).

Landnutzungstyp

Unter Landnutzungstyp wird hier die Art der Flächennutzung verstanden, dazu gehören beispielsweise Ackerbau, Grünland, Grünland-Wechselwirtschaft, Sonderkultur und Forst.

5 Datengrundlagen für Indikatoren

Im Projekt wurden Mess- und Erhebungsdaten recherchiert, zusammengestellt, aufbereitet und ausgewertet, um in einem Vorgängerprojekt (UBATEXTE 67/2022) erarbeitete Indikatorenideen auf ihre Umsetzbarkeit zu prüfen und Berechnungsmethoden an gemessenen Daten zu erproben. Dabei sollten Daten zum Einsatz kommen, die nach dem Kenntnisstand des Vorgängerprojekts aus fachlicher Sicht für die Entwicklung von Indikatoren geeignet und im Projektzeitraum verfügbar sind.

Für eine indikatorbasierte Berichterstattung werden zukünftig Daten benötigt, die von den Daten erhebenden Stellen ausgewählt, qualitätsgesichert und aufbereitet worden sind (siehe Kapitel 6 und 7).

Organische Bodensubstanz

Für das Themenfeld organische Bodensubstanz wurden Daten aus der Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen sowie aus den Humusmonitoringprogrammen in Bayern und Nordrhein-Westfalen ausgewählt. Diese lagen rechtzeitig während der Projektlaufzeit vor, um sie in die statistischen Auswertungen zur Indikatorentwicklung einbeziehen zu können. Die Zusammenführung und Harmonisierung von in weiteren Ländern verfügbaren Boden-Dauerbeobachtungsdaten konnte erst im letzten Viertel der Projektlaufzeit abgeschlossen werden, so dass keine Auswertung mehr möglich war. Jedoch ließ sich aus dem Datenbestand ableiten, welche Daten künftig in die Indikatorberechnung einfließen können. Da bisher in Bund und Ländern nicht in ausreichendem Maße einheitliche Datenstrukturen oder Schnittstellen für den Datenaustausch eingesetzt werden, ist die Zusammenführung und Harmonisierung von Datenbeständen verschiedener erhebender Stellen mit hohem Aufwand verbunden und lässt sich in einem Forschungsprojekt mit begrenzter Laufzeit nicht vollständig systematisieren.

Daten weiterer Monitoring- und Erhebungsprogramme, in denen in Deutschland Messgrößen im Zusammenhang mit organischer Bodensubstanz erhoben werden, wie die Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft, das ICP Forests Level II-Programm, Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche, die Umweltprobenbank, ICOS-D, das ICP Integrated Monitoring, LUCAS Soil, die Medienübergreifende Umweltbeobachtung Baden-Württemberg und Biodiversitäts-Exploratorien sind nicht in die Auswertungen einbezogen worden, weil diese zum Teil noch nicht über Zeitreihen mit mindestens vier Messzeitpunkten (Bodenzustandserhebungen, LUCAS Soil) oder nicht über eine ausreichend flächenrepräsentative Standort-Verteilung verfügen (weniger als 20 Standorte bzw. Observatorien in Deutschland bei Dauerfeldversuchen, Umweltprobenbank, ICP Integrated Monitoring, ICOS-D, Biodiversitäts-Observatorien, Medienübergreifender Umweltbeobachtung Baden-Württemberg). Zudem wurde, nicht zuletzt aufgrund der Datenlage, ein Schwerpunkt auf die Landnutzungstypen Acker und Grünland gesetzt. Wald-Monitoringstandorte fanden also keine Berücksichtigung.

Bodenbiodiversität

Für das Themenfeld Bodenbiodiversität wurden Daten für Bodentiere aus der Boden-Dauerbeobachtung der Länder sowie aus der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung Baden-Württemberg berücksichtigt. Die mit hohem Aufwand verbundene Zusammenführung und Harmonisierung von Daten aus der Boden-Dauerbeobachtung wurde für Regenwürmer letztlich auf die vier Bundesländer Bayern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein beschränkt, da nur hier vergleichbare Zeitreihen zur Verfügung standen. Mit Hilfe des Gesamt-Datenbestands für BDF, der zum Projektabschluss beim iDiv vorlag, ließ sich auch in diesem Fall identifizieren, welche Daten künftig in die Indikatorberechnung einfließen können.

Daten weiterer bundesweit betriebener Programme, die bodenbiologische Messgrößen erheben, wurden nicht berücksichtigt, weil diese noch nicht über Zeitreihen mit mindestens vier Wiederholungen verfügen (Bodenzustandserhebung im Wald, LUCAS Soil). Da der Schwerpunkt auf Bodentiere gelegt wurde und es sich bei den Biodiversitäts-Exploratorien um drei beispielhaft in Deutschland angelegte großskalige Langzeituntersuchungsgebiete mit Untersuchungen zur Bodenmikrobiologie handelt, wurden diese nicht berücksichtigt.

6 Prüfung von Indikatorideen und Entwicklung von Indikatoren zur organischen Bodensubstanz

Die in diesem Kapitel dargestellten Überlegungen zur Abbildung der organischen Substanz im Boden sind als fachliche Ergänzung zu den Arbeiten des Thünen-Instituts über Fragen der aktuellen Kohlenstoffspeicherung und zu Änderungen des Vorrats des organischen Bodenkohlenstoffes (SOC) in Waldböden und auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zu sehen. Im Rahmen der Bodenzustandserhebung (BZE) Wald¹ und der BZE Landwirtschaft² werden alle für die Beobachtung des SOC-Vorrats erforderlichen Zielparameter und Begleitgrößen in Zeitintervallen von ca. 10-15 Jahren systematisch erfasst und dokumentiert. Die Ergebnisse bringt das für diese Erhebungen zuständige Thünen-Institut gemeinsam mit Daten aus anderen Messprogrammen in die Treibhausgas-Berichterstattung für den LULUCF-Sektor (Land Use, Land-Use Change and Forestry) ein.

6.1 Geprüfte Indikatorideen

Im F+E-Projekt „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Substanz“ (Kaufmann-Boll et al. 2022) sind folgende Indikatoren für die konkrete Weiterentwicklung im Hinblick auf ein bundesweites Monitoring vorgeschlagen worden:

- ▶ Qualität der organischen Substanz in Böden und
- ▶ Veränderungen des Humusvorrats in Forst-, Acker und Grünlandböden sowie Mooren.

Die Recherchen im aktuellen F+E-Projekt zu bereits bestehenden Indikatoren und aktuellen Indikatorentwicklungen zum Qualitätsziel „Kohlenstoffbindung im Boden/Erhalt der organischen Bodensubstanz (standortgerechter Humusgehalt)“ kamen zu dem Ergebnis, dass für die bundesweite Berichterstattung zwei Indikatoren existieren, die den Humusgehalt bzw. den Humusvorrat darstellen (Wolf et al. 2024). Davon bildet ein Indikator den Humusgehalt im Oberboden ackerbaulich bzw. als Grünland genutzter Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern ab. Der zweite Indikator basiert auf dem absoluten Humusvorrat im mineralischen Oberboden von Wald- bzw. Forstböden. Beide Indikatoren wurden für das DAS-Monitoring entwickelt und zuletzt auch im Monitoringbericht 2023 veröffentlicht (UBA 2023).

Aufgrund der begrenzten räumlichen Repräsentativität wird der oben erstgenannte Humus-Indikator für die landwirtschaftlichen Nutzflächen im DAS-Monitoring als Fallstudie geführt. Der Humus-Indikator für Wald- bzw. Forstflächen greift auf die Ergebnisse prozessbasierter Modellierungen zurück, die wiederum auf den bundesweit verfügbaren Daten der BZE (Wald) für die Treibhausgasberichterstattung des Bundes gründen. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen ist aufgrund der grundsätzlich unterschiedlichen Bodeneigenschaften zumindest aktuell nicht möglich.

Zu Acker- und Grünlandböden existieren für Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen weitere Humus-Indikatoren aus Landesberichten (LfU 2017; LANUV 2023; SMUL 2015). Ebenfalls auf Landesebene wird für Forstböden im Rahmen des Monitorings zum Klimawandel im Land Sachsen-Anhalt (MULE 2020) berichtet und dabei die prozentuale Verteilung der Humusformen sowie der Kohlenstoffvorrat in der Humusaufgabe und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe darge-

¹ BZE I: 1987-1993, BZE II: 2006-2008, BZE III: 2022-2025

² BZE I: 2011-2018, BZE II: 2023-2027

stellt. Die sachsen-anhaltischen Indikatoren basieren auf Vergleichen der BZE II mit der BZE I (Wald).

Darüber hinaus gibt es zeitlich und/oder räumlich sehr grob aufgelöste Daten und darauf basierende Indikatoren auf EU-Ebene (z. B. für Stickstoff im Oberboden, Phosphorkonzentration, und Trends der SOC-Gehalte in Böden basierend auf Daten des LUCAS Soil Programms, European Commission 2013). Unterschiedlich detaillierte Indikatorkonzepte liegen insbesondere auf internationaler Ebene vor. Zu natürlichen kohlenstoffreichen Ökosystemen wie Mooren wird mit diesen Indikatoren nicht berichtet. Weitere Arbeiten sind also notwendig.

Der Entwurf des Europäischen Boden-Monitoring-Gesetzes sieht zum Thema organische Bodensubstanz den Bodendeskriptor Soil Organic Carbon (SOC) concentration (g per kg) vor. Als Grenzwert für „gesunde“ mineralische Böden gilt ein SOC:Ton-Verhältnis von $> 1/13$.

Ausgehend von diesen bereits etablierten Bodenindikatoren und Indikatorideen werden im Folgenden zunächst grundsätzliche Überlegungen für die weitere Indikatorentwicklung angestellt. Nach Diskussion von ersten Ideen für die Weiterentwicklung von Indikatoren in einem Fachgespräch mit ausgewählten Vertreter*innen der Länder und Fachexpert*innen am 25. Oktober 2023 (siehe Kapitel 3) erfolgte die Ausarbeitung des Indikator-Vorschlags „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“. Ergänzend werden das SOC:Ton-Verhältnis sowie der erwartete SOC-Gehalt (SOC_{exp}) hinsichtlich ihrer Eignung als Indikator erörtert.

6.2 Grundsätzliche Herausforderungen für die Indikatorentwicklung

Multifaktorielle Wirkungen auf die Veränderung der organischen Bodensubstanz

Im europäischen Raum existieren zahlreiche Studien zu beobachteten SOC-Veränderungen und möglichen Ursachen, die jedoch kein einheitliches Bild zeigten. In den meisten Arbeiten wurden sowohl abnehmende, unveränderte als auch ansteigende SOC-Gehalte bzw. SOC-Vorräte festgestellt (Sleutel et al. 2003, 2007; Bellamy et al. 2005; Lettens et al. 2005; Goidts & Van Wesemael 2007; Saby et al. 2008; Meersmans et al. 2009, 2011; Reijneveld et al. 2009; Capriel 2013; Heikkinen et al. 2013; Taghizadeh-Toosi et al. 2014; Puissant et al. 2017; Gubler et al. 2019). Ein Einfluss des Klimawandels auf die Entwicklung von SOC-Gehalten konnte bislang nicht eindeutig belegt werden, ein solcher wird aber von den meisten Autor*innen als mögliche Ursache auch nicht ausgeschlossen (Kaufmann-Boll et al. 2022).

Diese unterschiedlichen Diagnosen zur Entwicklung sind Ausdruck multifaktorieller Einflüsse auf die Umsetzung der organischen Bodensubstanz, die in ihrer Bedeutung für die beobachtete Variabilität allerdings in Abhängigkeit vom jeweiligen Betrachtungsmaßstab stehen. So liegt die Genauigkeit von Messungen oft im Bereich natürlicher Schwankungen. Neben der kleinräumigen Variabilität bei Messungen besteht eine starke Beeinflussung durch die Landnutzung und die Bewirtschaftung. Als Hauptursachen für beobachtete SOC-Verluste wurden in den meisten Studien Veränderungen von Landnutzung und Bewirtschaftung sowie die initialen SOC-Vorräte/Gehalte aufgeführt. Vor allem die kurzfristigen Veränderungen (im Zeitraum von 3 bis 5 Jahren), beispielsweise infolge einer Veränderung der Fruchtfolge oder von Bewirtschaftungsumstellungen, spiegeln sich teilweise in hohen Fluktuationen der Messwerte wider.

Mögliche beobachtete Veränderungen eines solchermaßen multifaktoriell beeinflussten Indikatorwerts lassen sich nur schwer ursächlich interpretieren. So sind auch Auswirkungen des Klimawandels, wie eine regional veränderte Niederschlagsverteilung, nicht eindeutig von Einflüssen einer auch infolge des Klimawandels veränderten Bewirtschaftungspraxis abgrenzbar. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass sich Effekte ausgleichen und in der Summe keine Veränderung des Indikators zu beobachten ist.

Ein auf dem SOC-Gehalt oder SOC-Vorrat basierender Indikator für die organische Bodensubstanz land- oder forstwirtschaftlich genutzter Böden integriert diese verschiedenen Treiber, Auswirkungen und Reaktionen. Er muss zudem sensitiv gegenüber erwarteten Veränderungen sein, diese also in einem begrenzten zeitlichen Rahmen deutlich genug abbilden können, um auch Handlungserfordernisse rechtzeitig zu signalisieren.

Neben den oben genannten unterschiedlichen Anforderungen und Betrachtungsmaßstäben müssen Indikatoren zur organischen Bodensubstanz auf einer technischen Ebene die aktuellen und zukünftigen internationalen Standards zur Erfassung der Speicher- und Senkenleistung von Böden berücksichtigen bzw. sollten idealerweise dazu beitragen, diese zu definieren.

Verfügbare Messdaten

Der statistisch gesicherte Nachweis von Veränderungen der SOC-Gehalte bzw. -Vorräte stellt konkrete Anforderungen an die gemessenen Parameter, die Repräsentativität, die Probenahmehäufigkeit, die Beprobungstiefe, den Beprobungszeitpunkt und die Probenaufbereitung. Umfangreiche Untersuchungen hierzu wurden basierend auf den Metainformationen zu den für die Bodenfläche Deutschlands verfügbaren Messprogrammen im Rahmen des Vorläuferprojekts vorgenommen. In diesem Zusammenhang erfolgte auch eine Bewertung der Programme auf ihre Eignung als Bestandteil eines Messnetzverbundes zur Ermittlung von Datengrundlagen für eine indikatorbasierte bundesweite Berichterstattung (Kaufmann-Boll et al. 2022).

Diesen Recherchen zufolge werden derzeit im Rahmen fast aller für das Themenfeld Organische Bodensubstanz untersuchten Messnetze SOC-Vorräte bestimmt. Dies gilt jedoch eingeschränkt für die BDF-Programme der Bundesländer, denn es nennen lediglich fünf Länder explizit den SOC-Vorrat als Zielparameter. Diese machen etwa ein Fünftel aller für das Verbundthema „Organische Bodensubstanz“ gemeldeten BDF-Standorte aus (Kaufmann-Boll et al. 2022).

Mit dem Ziel, einen Weg zu einem bundesweit anwendbaren Indikator für die organische Bodensubstanz aufzuzeigen, wurde im Rahmen dieses Projekts eine Fallstudie unter Verwendung von Daten zu den SOC-Gehalten erarbeitet, die bei Bereitstellung entsprechender Daten perspektivisch zu einer bundesweiten Darstellung weiterentwickelt werden kann.

Räumliche und zeitliche Repräsentativität

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die zeitliche und die räumliche Repräsentativität von Bodenmessdaten im Hinblick auf die Anforderungen eines bundesweiten Indikators nicht immer gleichzeitig gegeben sind: So erfordert die Darstellung von Veränderungen des SOC-Gehalts Zeitreihen mit mindestens vier Messzeitpunkten³. Für die statistische Absicherung von Trends sind (gemäß den Vorgaben zur Trendanalyse im DAS-Monitoring) mindestens sieben Datenpunkte notwendig. Bundesweite Messprogramme wie die Bodenzustandserhebungen oder LUCAS Soil mit weniger Messzeitpunkten sind daher allein nicht geeignet (siehe Abschnitt 6.5). Um eine möglichst große räumliche Abdeckung und ausreichende Wiederholungsmessungen zu erreichen, müssen Daten aus verschiedenen Messprogrammen zusammengeführt werden. Hierfür sind aufgrund engerer Messintervalle vor allem die Daten aus den Programmen der Bodendauerbeobachtung oder des Humusmonitorings der Bundesländer geeignet. Deren Messungen setzen allerdings zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein. Beispielsweise wurde im Freistaat Bayern mit dem Humusmonitoring auf 111 Standorten im Jahr 1985 begonnen und bis 2016 sieben

³ Gesetzter Wert basierend auf der Auswertung von Metadaten von Messprogrammen. Danach liegen Messintervalle oft bei fünf und mehr Jahren, was eine Mindestlaufzeit der Messprogramme von 20 Jahren oder mehr erfordert, um erstmals sinnvoll zeitliche Entwicklungen visualisieren zu können. Die Festlegung erfolgte im Hinblick auf die Erfüllung dieser Anforderung und denen einer möglichst bundesweiten Repräsentativität vor dem Hintergrund des Zeitpunkts der Etablierung vieler Messprogramme (vgl. Kaufmann-Boll et al. 2022).

Mal meist im Abstand von zwei bis fünf Jahren gemessen. Das Land Nordrhein-Westfalen startete sein Humusmonitoring im Jahr 2009 und führt seitdem jährliche Messungen durch. Es ist offensichtlich, dass eine bundesweite Indikatordarstellung erst ab einem Zeitpunkt möglich ist, an dem diese auf flächendeckenden und kontinuierlichen Messungen beruht.

Repräsentativität weiterer Parameter

Ein weiterer Aspekt, der bei der Erarbeitung eines bundesweiten Indikators zu berücksichtigen ist, ist die ungleiche Flächenrepräsentativität hinsichtlich der *Landnutzungen*. Bei Anwendung von Daten aus den BDF-Programmen der Bundesländer wird deutlich, dass diese an die jeweiligen naturräumlichen Gegebenheiten angepasste Schwerpunkte setzen. Beispielsweise werden im walddreichen Rheinland-Pfalz (42 % der Landesfläche sind Wald) ausschließlich Forststandorte untersucht, während in Sachsen mit 55 % Landesfläche unter landwirtschaftlicher Nutzung keine Forst-BDF angelegt sind. Daher können beide Länder zum jetzigen Zeitpunkt keine Daten von land- bzw. forstwirtschaftlichen Nutzflächen zu einem bundesweiten Indikator beitragen. Würden Kombinationen aus Landnutzungstypen und Boden- bzw. Standortverhältnissen allein in diesen Ländern auftreten, wären diese nicht in einem bundesweiten Indikator abgebildet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in einer Zusammenführung der BDF-Daten aller Bundesländer viele der in Deutschland verbreiteten Landnutzungstypen und Naturräume repräsentiert sind.

Für die Erfassung und Bewertung des Gehalts an organischem Kohlenstoff ist es von zentraler Bedeutung, aus welcher *Tiefe* die Bodenproben stammen. Der größte Teil der organischen Substanz befindet sich in den obersten Zentimetern des Profils und ihr Gehalt nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Je nach Bodenentwicklung, Nutzung und Bewirtschaftung gibt es unterschiedliche vertikale Verteilungsmuster. Diese Verteilungen können sowohl durch zumeist langsame natürliche Prozesse als auch durch menschliche Aktivitäten verändert werden. So können auf Ackerstandorten Mächtigkeiten des Bearbeitungs-Horizontes (Ap) von über 30 cm auftreten.

Häufig wird für die Bestimmung des Gehalts an organischem Kohlenstoff im Oberboden eine Beprobung von 0-30 cm Tiefe auf Acker und 0-10 cm auf Grünland durchgeführt. Fixe Beprobungstiefen können jedoch aufgrund der kleinräumigen Variabilität der Oberbodenmächtigkeit Nachteile haben, da es beispielsweise zu Verdünnungseffekten kommen kann, wenn Bodenmaterial von unterhalb des humushaltigen Oberbodens in die Probe eingeht. Eine tiefenstufenbezogene Beprobung muss daher auch die Horizontgrenzen des Oberbodens berücksichtigen. Für die in der nachfolgenden Fallstudie durchgeführten Auswertungen wurde auf die bereits von der Daten liefernden Stelle vorgenommene Zuordnung der Proben zur Kategorie „Oberboden“ zurückgegriffen (Humusmonitoring Bayern) oder es wurden nur Daten von Oberbodenhorizonten übergeben (BDF Niedersachsen). Aus den Daten des Humusmonitorings NRW wurden alle Datensätze von Horizonten/Proben mit der oberen Tiefe 0 cm und einem einschlägigen Horizontsymbol für mineralische Oberböden in die Auswertungen einbezogen. Die Umrechnung auf feste Tiefen von 0-30 cm für Acker und Grünland-Wechselwirtschaft sowie 0-10 cm für Dauergrünland erfolgte nicht. Vielmehr wurde in den Fällen, in denen der Oberboden mehr als einen Horizont umfasst, gewichtete Mittelwerte gebildet.

6.3 Indikator „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“

Der Indikator „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ wird für die zukünftige Anwendung auf nationaler Ebene vorgeschlagen. Der Indikator vergleicht die Humusgehalte von Messstandorten auf Acker- und Grünlandböden mit den Referenzspannweiten des standorttypischen Humusgehalts. Dazu werden die Humusgehalte in Oberböden mithilfe des organischen Kohlenstoffs quantifiziert. Als Indikator dient die Entwicklung des prozentualen Anteils von Messstandorten ober-, inner- und unterhalb der Referenzspannweiten des standorttypischen

Humusgehalts. Im Folgenden sind die für die praktische Umsetzung des Indikators erforderlichen Angaben zusammengestellt. Die aktuell mögliche Umsetzung des Indikators „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ auf Bundesebene wird anhand einer Fallstudie mit Daten für landwirtschaftlich genutzte Böden aus den Bundesländern Bayern, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen dargestellt. Ein Weg für eine langfristige Etablierung und Verstärkung des Indikators wird in Abschnitt 6.3.6 aufgezeigt.

Bei der Entwicklung eines Indikators für das Monitoring der organischen Bodensubstanz lässt sich auf einer Vielzahl von Arbeiten zur Ableitung standorttypischer Humusgehalte aufbauen (u. a. Körschens & Schulz 1999; Düwel et al. 2007; Wessolek et al. 2008; Marx et al. 2016; Drexler et al. 2020; Sümmerer & Wiesmeier 2023). Grundsätzlich handelt es sich bei standorttypischen Humusgehalten um einen Ist-Zustand der Humusgehalte von Böden unter Berücksichtigung unterschiedlicher natürlicher und bewirtschaftungsbedingter Standortfaktoren (Sümmerer & Wiesmeier 2023). Der standorttypische Humusgehalt entzieht sich der unmittelbaren Bewertung im Sinne einer Ableitung „optimaler Werte“ oder von „Zielwerten“, da er stets das Ergebnis variabler Einflüsse ist, die bereits historisch oder aktuell wirksam waren bzw. sind (Marx & Gaul 2021). Zudem wären die optimalen Humusgehalte auch zielabhängig festzulegen und Bewertungen müssten in Abhängigkeit vom jeweiligen Ziel erfolgen. Der hier entwickelte Indikator nutzt das Konzept der standorttypischen Humusgehalte, um die Humusgehalte in den Oberböden anhand der Gehalte von organischem Kohlenstoff zu bestimmten Messzeitpunkten in standorttypische Humuswertebereiche einzuordnen. Diese werden für einen fixen Zeitpunkt auf der Grundlage einer repräsentativen Datenmenge abgeleitet und bilden die Referenz für die weiteren Betrachtungen. In der Zeitreihe lässt sich die Entwicklung der Anteile von Messstandorten innerhalb oder außerhalb der Referenzwertebereiche darstellen. Diese Anteile sind die eigentlichen Indikatorwerte. Bewertet wird anschließend die beobachtete Veränderung der Anteile über die Zeit.

6.3.1 Herleitung und Begründung

Bodenbezogene Indikatoren beschreiben und bewerten den Zustand und die Entwicklung der Umwelt in Bezug auf das Medium Boden. Der organische Bodenkohlenstoff (SOC) ist dafür eine geeignete Kenngröße, da er in engem Zusammenhang mit den meisten Bodeneigenschaften wie der Wasseraufnahme und dem Wasserspeichervermögen, der Nährstoffverfügbarkeit oder auch der Fähigkeit des Bodens zur biologischen C-Sequestrierung steht.

Umgekehrt wird der SOC von vielen Faktoren beeinflusst. Hier sind zunächst – neben den abiotischen Bodeneigenschaften, wie der Textur – die Landnutzung und die Bewirtschaftung zu nennen. Von großer Bedeutung sind aber auch das Klima und das Bodenleben. Die Einflussfaktoren wirken in komplexen und teilweise noch nicht vollständig verstandenen Zusammenhängen (Stockmann et al. 2013). Ein bundesweites Monitoring der organischen Bodensubstanz für die Evaluierung von politischen und praktischen bodenbezogenen Maßnahmen zum Klimaschutz, der Klimaanpassung und dem Erhalt und der Förderung der Biodiversität muss daher durch weitere Forschungsaktivitäten begleitet werden. Der damit verbundene wissenschaftliche Erkenntnisgewinn bildet perspektivisch die Grundlage für die (Weiter-)Entwicklung und Auswahl geeigneter Handlungsoptionen.

Kohlenstoffkreislauf und Klimaschutz

Die organische Bodensubstanz spielt eine zentrale Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Etwa 80 % des daran beteiligten terrestrischen Kohlenstoffs liegt im Boden vor, nur 20 % in der Vegetation (Lal 2007b).

Die Mineralisierung von im Boden verfügbarem organischem Kohlenstoff erfolgt überwiegend durch mikrobielle Oxidationsprozesse. Nichtmineralisierter Kohlenstoff wird langfristig in der organischen Bodensubstanz festgelegt. Unter konstanten Umweltbedingungen stellt sich dabei

ein Gleichgewicht zwischen Abbau und Anreicherung organischen Kohlenstoffs ein, das mit der Ausbildung eines charakteristischen Humusgehalts einhergeht (Blume et al. 2010; Flessa et al. 2019; Lehmann et al. 2020). Je höher der Humusvorrat eines Bodens ist, desto mehr Kohlenstoff wurde der Atmosphäre zu einem früheren Zeitpunkt entzogen. Das heißt, die Entwicklung des Humusgehalts eines Bodens hat direkte Auswirkungen auf die Minderung des Klimawandels.

Die Persistenz des SOC ist schließlich das Ergebnis eines komplexen Zusammenwirkens von molekularer Vielfalt der organischen Substanz, der räumlichen Heterogenität im Boden und der zeitlichen Variabilität der Verfügbarkeit von organischer Substanz (Lehmann et al. 2020). Textur des Bodens, Grundwassereinfluss sowie Klima und Witterungsverlauf sind dabei als Randbedingungen von großer Bedeutung (Wiesmeier et al. 2019).

Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen bestimmen hauptsächlich die vielfältigen Bewirtschaftungsfaktoren, ob Auf- oder Abbauprozesse überwiegen und Böden Senken oder Quellen für organischen Kohlenstoff sind und welche standorttypischen Humusgehalte sich einstellen. Auf lokaler Ebene (Betriebsebene) lassen sich typische Bewirtschaftungsformen (z. B. mit/ohne/reduzierte/r Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Viehbesatz, Integration von Wirtschaftsdüngern) mit dem Humusstatus der Böden in Zusammenhang bringen (z. B. Lal 2007a; Capriel 2010; Zikeli & Gruber 2017).

Für die landes- oder bundesweite Betrachtungsebene hat sich eine Differenzierung nach Landnutzungstyp (z. B. Ackerbau, Grünland, Grünland-Wechselwirtschaft, Sonderkultur) als praktikabel und hinreichend genau erwiesen, um nutzungsbedingte Unterschiede zwischen standorttypischen Humusgehalten zu erklären.

Anpassung an die Folgen des Klimawandels

Ein enger Zusammenhang besteht zwischen organischer Bodensubstanz und der Bodenfunktionalität (Drexler et al. 2022; Wiesmeier et al. 2019; Bünemann et al. 2018). Vor dem Hintergrund der Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist dabei die Wasserhaltekapazität der Böden vor allem auf Landwirtschaftsflächen mit ackerbaulicher Nutzung von Bedeutung. Humusreiche Böden können in der Regel mehr Wasser aufnehmen und speichern als humusärmere mit ansonsten gleichen Eigenschaften. Insbesondere Sandböden profitieren dabei im Vergleich zu tonigen Böden hinsichtlich ihres Speicherraums für pflanzenverfügbares Wasser deutlich von einer Zunahme des SOC (Murphy 2015). Relevant ist auch eine durch entsprechende Humusgehalte bedingte höhere Aggregatstabilität. Sie steht im Zusammenhang mit einer Bodenstruktur, die dem Pflanzenwachstum, dem Infiltrationsvermögen und der Verringerung der Erosionsempfindlichkeit dienlich ist (Murphy 2015). Die Mineralisierung abgestorbener Pflanzenreste ist eine wesentliche Nährstoffquelle für Pflanzen. Humus ist deshalb von großer Bedeutung für die Nährstoffverfügbarkeit und damit für diesen Aspekt der Bodenfruchtbarkeit. Standortgerechte Humusgehalte tragen unter den Bedingungen des Klimawandels deshalb insgesamt zur Ertragsicherheit bei (Murphy 2015; Vogel et al. 2019; Wiesmeier et al. 2019).

Schutz der Biodiversität

Der Beitrag der Bodenlebewesen zu den wichtigsten Bodenprozessen wie dem Um- und Abbau von organischer Substanz, der Dynamik der Nährstoffkreisläufe sowie der Bildung von Humus und Bodenstruktur ist von entscheidender Bedeutung. Das Bodenmikrobiom steuert wichtige Funktionen in Agrarökosystemen und bestimmt die Bodenfruchtbarkeit sowie die Produktivität der Pflanzen (vgl. Kapitel 7). Es ist eng mit der Entstehung der Bodenstruktur verbunden, z. B. mit der Ausbildung von Aggregaten und dem Porenverbund (Porenkontinuität) und wirkt damit regulierend auf den Transport von Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen durch das Bodenporensystem (Hartmann & Six 2022). Der biogeochemische Kreislauf der organischen Substanz ist abhängig von lebenden und toten Bodenmikroorganismen, ihren funktionellen Merkmalen und

ihren Wechselwirkungen mit der Bodenmatrix und anderen Organismen. Abgestorbene mikrobielle Biomasse sammelt sich im Lauf der Zeit im Boden an und bildet einen der größten Pools an organischer Substanz auf unserem Planeten (Sokol et al. 2022). Aber auch die Bodenmeso- und -makrofauna (z. B. Regenwürmer, Laufkäfer, Collembolen, Nematoden) haben einen wesentlichen Anteil an den Um- und Abbauprozessen der organischen Substanz im Boden (Petersen & Luxton 1982). Durch sie wird das abgestorbene organische Material zerkleinert und umgesetzt und somit für weitere Mineralisierungs- und Humifizierungsprozesse der Mikroorganismen aufbereitet. Damit nehmen sie entscheidenden Einfluss auf die Stoffströme (z. B. Nährstoffkreislauf, CO₂-Fixierung) im Boden und folgend auch auf die Bodenfruchtbarkeit (De Vries et al. 2016). Hier ist insbesondere die Gruppe der Regenwürmer zu nennen, die als „ecological engineers“ von großer Bedeutung für die Bildung der Bodenstruktur sind und eine bedeutende Rolle bei der Festlegung von SOC durch Einbau in Ton-Humus Assoziationen besitzen (Angst et al. 2017). Als weiteres Beispiel sind Collembolen als Streuzersetzer wichtig; sie wirken aber auch aufgrund ihrer Ernährungsweise (Bakterien, Pilze, Algen) direkt oder indirekt auf die mikrobielle Aktivität und damit die Mineralisierung von Kohlenstoff und Stickstoff (Kaneda & Kaneko 2008). Dementsprechend stehen der in Kapitel 7 vorgeschlagene Indikator für die Regenwurmfauna und die dort beschriebenen Indikatorideen in einem engen Zusammenhang mit Fragestellungen zur organischen Bodensubstanz.

Die Zusammenhänge zwischen Biodiversität und Biomasse im Boden und daraus resultierenden Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf und die Bodengesundheit sind komplex und in großen Teilen noch unverstanden. Auf der globalen Skala konnten Bastida et al. (2021) zeigen, dass der SOC-Gehalt des Bodens mit der mikrobiellen Vielfalt und dem Verhältnis zwischen mikrobieller Vielfalt und Biomasse in den Böden der verschiedenen Biome verbunden ist. Das Verhältnis zwischen mikrobieller Vielfalt und Biomasse im Boden erreicht in trockenen Umgebungen mit niedrigem C-Gehalt sein Höchstmaß und ist in kalten Umgebungen mit hohem C-Gehalt sehr niedrig. Die Autoren diskutieren außerdem, dass die Verringerung des SOC-Gehalts im Boden, die mit der Intensivierung der Landnutzung und dem Klimawandel einhergeht, zu einer Verschiebung des Verhältnisses zwischen mikrobieller Vielfalt und Biomasse führen könnte, mit potenziellen Folgen für zahlreiche Bodenprozesse.

6.3.2 Methodische Herangehensweise

Der hier entwickelte Indikator für das Monitoring der organischen Bodensubstanz basiert auf der Einordnung der Humusgehalte von mineralischen Oberböden anhand des organischen Kohlenstoffs in die Referenzspannweiten des für die einfließenden Messstellen standorttypischen Humusgehalts. Anmoorige Standorte (SOC > 8,7 M.-%) und Moore (SOC > 30 M.-%) bleiben von den Betrachtungen ausgeschlossen. Eine Bewertung erfolgt bezogen auf die zeitliche Entwicklung der Einstufung der SOC-Gehalte inner- oder außerhalb der standorttypischen Humusgehalte. Ziel ist es, einen möglichst hohen Anteil von Messstandorten innerhalb der Referenzspannweite zu halten und den Anteil unterhalb der Referenzspannweiten zu minimieren.

Aufgrund des begrenzten Umfangs zur Verfügung stehender Daten (siehe Kapitel 5) werden zunächst nur Aussagen für Ackerflächen und eine Teilmenge der bundesweiten Humusgehalts-Standorttypen (s. u.) getroffen. Eine Erweiterung auf andere Nutzungen, insbesondere Grünland, Grünland-Wechselwirtschaft und Forst sowie weitere Standorttypen ist grundsätzlich möglich (siehe Abschnitt 6.5). Voraussetzung hierfür ist die Einbindung weiterer geeigneter Daten für die landwirtschaftlichen Nutzungen. Für die Wälder fehlt es bislang an einer geeigneten Übertragung des für landwirtschaftliche Nutzflächen erarbeiteten Konzepts der standorttypischen Humusgehalte.

Das zugrunde liegende Referenzsystem greift auf die Auswertungen des bundesweiten Datensatzes der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE Landwirtschaft) durch das Thünen-

Institut (Drexler et al. 2020) zurück. Die Datenerhebung der BZE erfolgte erstmalig im Zeitraum 2011 bis 2018 in einem Raster von 8 x 8 km auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Es wurde eine deutschlandweite, konsistente und repräsentative Inventur der Kohlenstoffvorräte landwirtschaftlich genutzter Böden durchgeführt (Jacobs et al. 2018). Aufgrund der bundesweiten Abdeckung, des engen Rasters sowie des Vorgehens und der Wahl der Stratifizierungsfaktoren zur Ableitung der standorttypischen Humusgehalte durch Drexler et al. (2020) ist eine hohe Zahl der in Deutschland auftretenden Standorttypen für landwirtschaftlich genutzte Böden abgedeckt. Dieser Datensatz wird zur Generierung des Indikators als fixe Referenz genutzt, um die in der Auswertung berücksichtigten Messwerte für den SOC-Gehalt kategorisieren zu können. Mit Blick auf die Zielsetzung (s. o.) bedeutet dies, dass die Humusgehalte an den Messstellen zukünftig mindestens auf dem Niveau der standorttypischen Werte des Zeitraums 2011 bis 2018 gehalten werden sollen.

Der Indikator wird als Fallstudie auf der Grundlage von Datensätzen der Humusmonitoring-Programme in Bayern und Nordrhein-Westfalen sowie der Boden-Dauerbeobachtung Niedersachsen angelegt. Der Datensatz umfasst insgesamt 252 Messstellen. Die Messungen decken einen Zeitraum von 1985 bis 2021 ab, allerdings setzen die Messprogramme zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein (vgl. Tabelle 1). Der Indikator kann perspektivisch durch Integration von Bodendaten anderer Messprogramme räumlich erweitert und zeitlich verdichtet werden (siehe Abschnitt 6.3.6). Auch diese Werte lassen sich zu dem bundesweit gesetzten Referenzsystem ins Verhältnis setzen.

Tabelle 1: Übersicht über die Anzahl und Messzeiträume der für die Fallstudie ausgewerteten Datensätze

Messprogramm	Anzahl Messstellen	Messzeitraum	Messintervalle
Humusmonitoring Bayern	137	1985 bis 2016	2- bis 5-jährlich
Humusmonitoring Nordrhein-Westfalen	45	2009 bis 2021	jährlich
Boden-Dauerbeobachtung Niedersachsen	70	1991 bis 2017	2- bis 5-jährlich

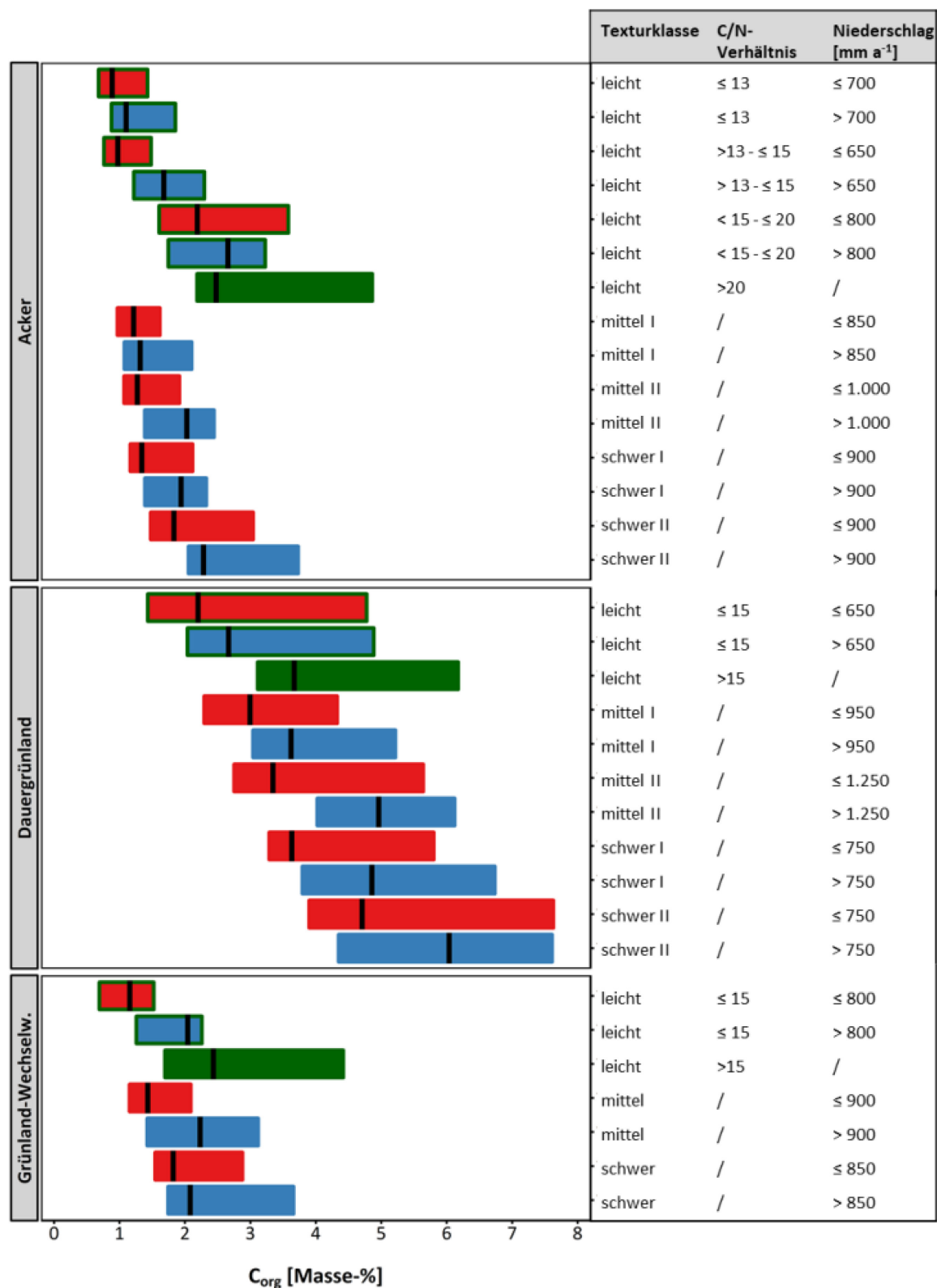
Die für das Referenzsystem verwendeten standorttypischen Humusgehalte von Drexler et al. (2020) ergeben sich aus der Auswahl geeigneter „Stratifizierungsfaktoren“ für die Gruppierung von Standorten mit ähnlichen Standorteigenschaften, die innerhalb der Gruppen zu vergleichbaren Humusgehalten führen. Faktoren, die einen möglichst hohen Anteil der beobachteten Variabilität gemessener SOC-Gehalte in den Böden erklären, sind geeignet, um Standorte bzw. Messstellen mit SOC-Gehalten eines ähnlichen Wertespektrums zusammenzufassen. Für eine detaillierte Darstellung der Herleitung wird hier auf den Thünen Report 75 (Drexler et al. 2020) verwiesen. Im Ergebnis wurden die Landnutzung, die Textur, das C:N-Verhältnis und die Jahresniederschlagssummen als geeignet befunden. Die Stratifizierungsfaktoren mit ihren Unterkategorien sind in Tabelle 2 gegeben.

Die Stratifizierungsfaktoren werden den Standorten landnutzungsspezifisch in Abhängigkeit von der Texturklasse, dem C:N-Verhältnis und dem durchschnittlichen Jahresniederschlag zugeordnet. Für die so gebildeten Gruppen wird schließlich ein standorttypspezifischer Wertebereich dargestellt, der sich aus der statistischen Verteilung der SOC-Gehalte ergibt. Der Wertebereich ist nach unten durch das 12,5 %-Quantil und nach oben durch 87,5 %-Quantil begrenzt. Als Orientierungswert wird zudem der Modalwert angegeben, der den am häufigsten auftretenden und damit den standorttypischsten SOC-Gehalt angibt. Auf Grundlage der BZE-Daten und der gewählten Stratifizierungsfaktoren leiten Drexler et al. (2020) insgesamt 33 standorttypische Humusgehaltssklassen ab (siehe Abbildung 1).

Tabelle 2: Zusammenstellung der Stratifizierungsfaktoren für die Ermittlung standorttypischer Humusgehalte mit Unterkategorien bzw. Klassen aus Drexler et al. (2020)

Stratifizierungsfaktor	Unterkategorien bzw. Klassen	Erläuterung
Landnutzungstyp	Acker Dauergrünland Grünland-Wechselwirtschaft	
Texturklasse	leicht mittel I mittel II schwer I schwer II	Einordnung in Abhängigkeit vom Ton- und Schluffgehalt sowie der zugehörigen Bodenartengruppe nach VDLUFA (2000)
C:N-Verhältnis	für Acker mit leichten Böden ≤ 13 > 13 – ≤ 15 > 15 – ≤ 20 > 20 für Grünland mit leichten Böden ≤ 15 > 15 für Grünland-Wechselwirtschaft mit leichten Böden ≤ 15 > 15 alle anderen	Die C:N-Verhältnis-Klassen werden in Abhängigkeit von der Landnutzung bestimmten Texturklassen zugeordnet.
Durchschnittlicher Jahresniederschlag [mm]	≤ 650, > 650, ≤ 700, > 700, ≤ 750, > 750, ≤ 800, > 800, ≤ 850, > 850, ≤ 900, > 900, ≤ 950, > 950, ≤ 1.000, > 1.000, ≤ 1.250, > 1.250	Die Jahresniederschlags-Klassen werden in Abhängigkeit vom Landnutzungstyp und der Texturklasse bestimmten Klassen für das C:N-Verhältnis zugeordnet.

Abbildung 1: Standorttypische C_{org} -Wertebereiche auf Basis der BZE-Daten aus Drexler et al. (2020)



Die Wertebereiche liegen zwischen dem 12,5 %- und dem 87,5 %-Quantil, der schwarze Strich markiert den Modalwert. Blaue Balken stehen für Klassen mit hohem, rote Balken für Klassen mit geringem Niederschlag. Grün gefüllte bzw. umrandete Balken stehen für Klassen mit einer Aufteilung nach C:N-Verhältnis.

Quelle: Drexler et al. (2020)

6.3.3 Datenquelle

Als Datenquelle zur Berechnung des Indikators stellen die Betreiber der Messprogramme des Humusmonitorings und der Boden-Dauerbeobachtung aus den Daten der untersuchten Flächen Datensätze zusammen, die in sich homogen (z. B. vollständige Beprobungskampagnen, repräsentative Probenahmen) und für die Belange der Indikatorerstellung geeignet sind. Für die Ausführung der Fallstudie im Vorhaben wurde diese Auswahl durch die Forschungsnehmenden vorgenommen.

Folgende Informationen und Messgrößen aus Oberbodenproben sind erforderlich:

- ▶ Standortkennung
- ▶ Messzeitpunkt
- ▶ Landnutzung (Acker, Dauergrünland, Grünland-Wechselwirtschaft)
- ▶ Ton-, Schluff- und Sandgehalt des Feinbodens in Masse-%
- ▶ Gehalt an organischem Kohlenstoff (SOC) in Masse-%
- ▶ Gesamtgehalt an Stickstoff (N_t) in Masse-% oder C:N-Verhältnis
- ▶ Höhe des mittleren Jahresniederschlags der zum Messzeitpunkt gehörenden Klimareferenzperiode in mm (Bestandteil der Datensätze oder alternativ: Ermittlung aus Stationsdaten in Standortnähe oder Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD CDC 2024)).

Die Art des Werts muss jeweils bekannt sein (z. B. Einzelwert, Mittelwert aus mehreren Einzelproben).

6.3.4 Darstellung des Indikators

Schritt 1: Der Indikator wird für Berichtszeiträume von fünf Jahren in zeitlicher Abfolge abgeleitet und dargestellt. Da an einigen Messstellen häufiger als einmal innerhalb von fünf Jahren gemessen wird, werden zunächst messstellenbezogen die Fünfjahresmittelwerte der Messwerte der jeweiligen Berichtsperioden gebildet.

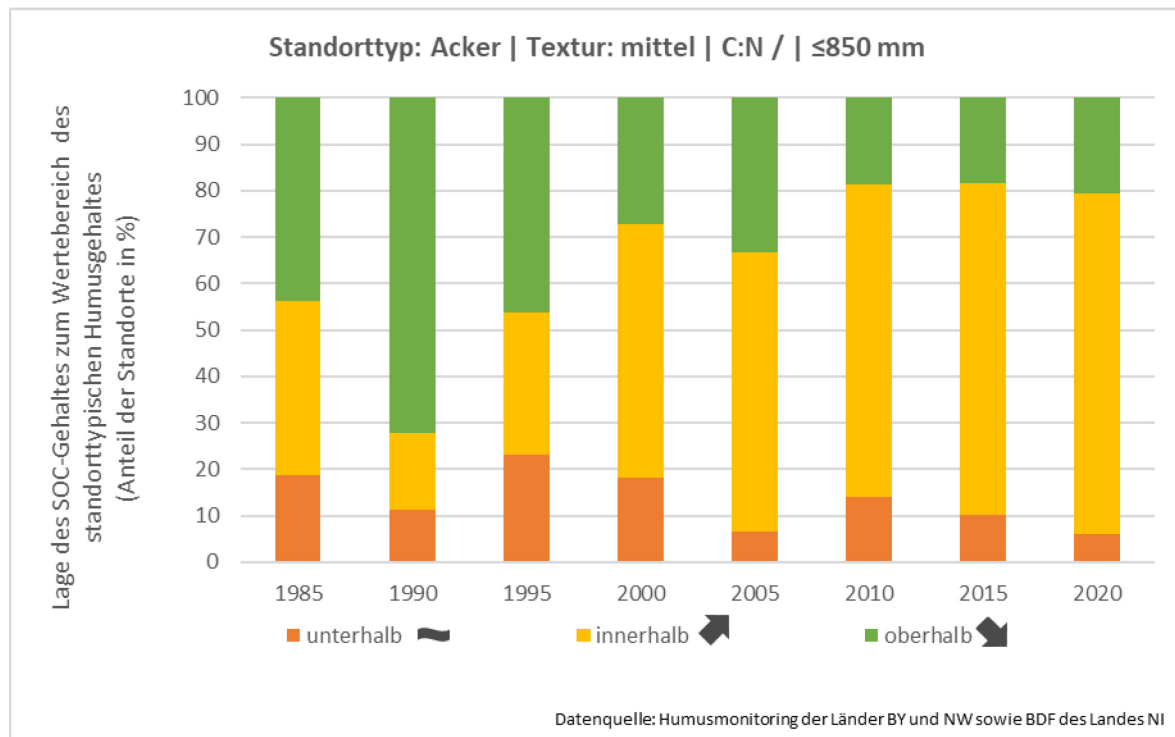
Schritt 2: Anschließend erfolgt die Stratifizierung der Messstellen gemäß dem Verfahren nach Drexler et al. (2020) anhand der o. g. Faktoren, also die Zuweisung zu einem Standorttyp.

Schritt 3: Für jede Messstelle wird dann der mittlere SOC-Gehalt für die Berichtsperiode mit der Referenzspanne des standorttypischen Humusgehalts verglichen.

Schritt 4: Abschließend ist zu erfassen, wie viele Messstellen mit ihrem SOC-Gehalt unter-, inner- oder oberhalb der Referenzspannweite für ihren standorttypischen Humusgehalt liegen. Die Werte fließen in eine Balkengrafik ein, um den Indikator im zeitlichen Zusammenhang zu visualisieren. Ein Vorschlag zur Darstellung des Indikators ist in Abbildung 2 gegeben. Die Wellen- bzw. Pfeildarstellungen in der Legende des Diagramms symbolisieren das Ergebnis einer Trendanalyse (s. u.).

Abbildung 2 zeigt beispielhaft für einen Standorttyp den Verlauf des Anteils von Messstellen, deren SOC-Gehalt im Oberboden, inner- bzw. außerhalb der Referenzspannweiten für den standorttypischen Humusgehalt liegen. Demnach nimmt der Anteil der Messstellen oberhalb der Referenzspannen kontinuierlich ab und der Anteil innerhalb zu. Mithilfe einer Trendanalyse (Lorenz & Kevork 2022; R Core Team 2023) lässt sich die Beobachtung statistisch absichern. Für den Anteil von Messstellen, deren SOC-Gehalt unterhalb der Referenzspannweite liegt, ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Die Symbole sind in Abbildung 3 erläutert.

Abbildung 2: Darstellung des Indikators „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ für den Standorttyp Acker, Texturklasse „mittel I“, ohne Einordnung nach C:N-Verhältnis, Jahresniederschlag ≤ 850 mm



Quelle: eigene Darstellung, ahu GmbH

Abbildung 3: Trendbeschreibung gemäß Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel

	Steigender Trend
	Fallender Trend
	Trend mit Trendumkehr: zuerst fallend, dann steigend
	Trend mit Trendumkehr: zuerst steigend, dann fallend
	Kein Trend

Quelle: Umweltbundesamt (2023)

Eine Bewertung erfolgt anhand der Entwicklung des Anteils von Messstellen unter-, inner- und oberhalb der Referenzspannweiten für standorttypische Humusgehalte und nicht anhand von absoluten SOC-Gehalten. Grundsätzlich ist ein Zuwachs des Anteils von Messstellen innerhalb oder oberhalb des standorttypischen Wertebereichs positiv zu bewerten, da eine Erhöhung der SOC-Gehalte der Bodengesundheit und des Klimaschutzes zuträglich ist. Darüberhinausgehend ist noch ein geeignetes Bewertungsschema zu entwickeln (siehe Abschnitt 6.3.6 Nr. 5).

Die Berechnung des Indikators sowie die Ergebnisse der Trendanalysen werden in einem Daten-Factsheet, das dem UBA vorgelegt wurde, dokumentiert.

Die hier beschriebene Vorgehensweise kann auf alle von Drexler et al. (2020) anhand der BZE-Daten abgeleiteten Humusgehalts-Standorttypen angewendet werden und deckt damit die

durch die BZE im 8 x 8-km-Raster untersuchten landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden in Deutschland ab. Voraussetzung ist, dass sich aus den Daten der Messprogramme ein ausreichend großer Stichprobenumfang für die auszuwertende Zeitreihe zusammenstellen lässt (siehe Abschnitt 6.3.5).

6.3.5 Einschränkungen

Einschränkungen hinsichtlich der Aussagekraft des Indikators ergeben sich vor allem mit Blick auf die räumliche und zeitliche Abdeckung durch die für eine Indikatorberechnung zur Verfügung stehenden Messstellen.

Aus den BZE-Daten leiten Drexler et al. (2020) insgesamt 33 Humusgehalts-Standorttypen ab (vgl. Abbildung 1). Die Daten der Fallstudie mit insgesamt 252 Messstellen in drei Bundesländern decken aktuell 27 dieser Standorttypen ab. Allerdings sind nur für sechs Standorttypen Mindestanforderungen an räumliche und zeitliche Repräsentativität erfüllt. Diese orientieren sich an der grundsätzlichen Überlegung, dass ein bundesweiter Indikator statistisch belastbar sein muss, sowie am zur Verfügung stehenden Datensatz. Demnach sollte ein Humusgehalts-Standorttyp durch mindestens 20 Messstellen repräsentiert sein. Für jeden Berichtszeitraum sollten auch mindestens 20 Messstellen in die Berechnungen einfließen. Diese Anforderungen lassen sich aufgrund der Datensituation in der Fallstudie für einzelne Berichtszeiträume vor allem zu Beginn der Messreihen nicht durchgehend erfüllen. Im Mittel flossen je Berichtszeitraum mehr als 10 Messstellen ein. Als ein Minimum wurde die Zahl von vier Messstellen angesetzt (vgl. Tabelle 3 und Daten-Factsheet, das dem UBA vorgelegt wurde).

21 Standorttypen erfüllen diese Kriterien nicht, da weniger als zehn Messstellen vorliegen oder wiederholt weniger als vier Messstellen für die Auswertung eines Berichtszeitraums zur Verfügung stehen bzw. die mittlere Anzahl der Messstellen je Berichtszeitraum < 10 ist (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Besatz der Humusgehalts-Standorttypen mit Messstellen des Datensatzes für das Fallbeispiel; fett formatiert: Standorttypen, für die der Indikator berechnet wurde

Land-nutzungs- typ	Textur- Klasse	C:N- Klasse	Nie- der- schlags klasse [mm]	Anzahl Mess- stellen	mittlere Anzahl Messstellen je Berichtszeit- raum	minimale An- zahl Messstel- len für mindes- tens einen Berichtszeit- raum	maximale An- zahl Messstel- len für mindes- tens einen Berichtszeit- raum
Acker	leicht	≤ 13	≤ 700	25	14,3	5	25
Acker	leicht	≤ 13	> 700	16	8,0	2	16
Acker	leicht	> 13 - ≤ 15	≤ 650	1	1,0	1	1
Acker	leicht	> 13 - ≤ 15	> 650	27	15,7	6	27
Acker	leicht	> 15 - ≤ 20	≤ 800	11	5,4	3	11
Acker	leicht	> 15 - ≤ 20	> 800	41	16,7	2	41
Acker	leicht	> 20	/	10	5,5	2	10

Land-nutzungs- typ	Textur- Klasse	C:N- Klasse	Nie- der- schlags klasse [mm]	Anzahl Mess- stellen	mittlere Anzahl Messstellen je Berichtszeit- raum	minimale An- zahl Messstel- len für mindes- tens einen Berichtszeit- raum	maximale An- zahl Messstel- len für mindes- tens einen Berichtszeit- raum
Acker	mittel I	/	≤ 850	159	57,4	13	159
Acker	mittel I	/	> 850	17	7,6	2	17
Acker	mittel II	/	≤ 1.000	79	41,9	12	79
Acker	schwer I	/	≤ 900	33	17,6	4	33
Acker	schwer I	/	> 900	6	2,8	1	6
Acker	schwer II	/	≤ 900	21	12,1	6	21
Dauer- grünland	leicht	≤ 15	≤ 650	2	1,2	1	2
Dauer- grünland	leicht	> 15	/	8	4,5	1	8
Dauer- grünland	mittel I	/	≤ 950	8	3,4	2	8
Dauer- grünland	mittel I	/	> 950	1	1,0	1	1
Dauer- grünland	mittel II	/	≤ 1.250	10	5,1	1	10
Dauer- grünland	mittel II	/	> 1.250	4	2,0	1	4
Dauer- grünland	schwer I	/	≤ 750	2	1,4	1	2
Dauer- grünland	schwer I	/	> 750	14	7,8	3	14
Dauer- grünland	schwer II	/	≤ 750	6	3,5	1	6
Dauer- grünland	schwer II	/	> 750	16	9,1	1	16
Grünland- Wech- selw.	leicht	≤ 15	> 800	1	1,0	1	1
Grünland- Wech- selw.	mittel	/	≤ 900	10	5,4	1	10
Grünland- Wech- selw.	mittel	/	> 900	8	2,9	1	8

Land-nutzungs-typ	Textur-Klasse	C:N-Klasse	Nieder-schlags klasse [mm]	Anzahl Mess-stellen	mittlere Anzahl Messstellen je Berichtszeit-raum	minimale An-zahl Messstel-len für mindes-tens einen Berichtszeit-raum	maximale An-zahl Messstel-len für mindes-tens einen Berichtszeit-raum
Grünland-Wech-selw.	schwer	/	≤ 850	3	1,9	1	3
Grünland-Wech-selw.	schwer	/	> 850	6	2,8	1	6

Die Fallstudie ermöglicht keine Auswertung vollständiger Zeitreihen in dem Sinn, dass von jeder Messstelle für jeden Berichtszeitraum der Zeitreihe eine Messung vorliegt. Vielmehr bilden Messstellen Standortgruppen, auf deren Analyse der Indikator schließlich basiert.

Bezüglich der Vergleichbarkeit von Beprobungstiefen ist anzumerken, dass in der BZE die Beprobungstiefe für Acker und Grünland-Wechselwirtschaft auf 0-30 cm sowie für Dauergrünland auf 0-10 cm angesetzt wird. Bei der Probenahme wurde jedoch auf Horizontgrenzen Rücksicht genommen (Jacobs et al. 2018). In der Fallstudie erfolgte eine Einordnung der Proben nach dem Horizontsymbol bzw. es wurde die Zuordnung der Daten liefernden Stelle, ob es sich um eine Ober- oder Unterbodenprobe handelt, übernommen.

Hinsichtlich der Landnutzungstypen steht der Erweiterung des Indikators auf die forstwirtschaftlichen Nutzflächen zurzeit die bislang fehlende Übertragung des für landwirtschaftliche Nutzflächen erarbeiteten Konzepts der standorttypischen Humusgehalte auf die Wälder entgegen.

6.3.6 Umsetzung und Verstetigung

Für die Umsetzung des hier vorgeschlagenen Indikators für eine bundesweite dauerhafte Berichterstattung zur Entwicklung der SOC-Gehalte in Oberböden lässt sich auf den bestehenden Messprogrammen der Bundesländer und des Bundes aufbauen. Insbesondere die Humusmonitoring- und die Boden-Dauerbeobachtungsprogramme der Länder in Verbindung mit der Ersterhebung der BZE Landwirtschaft stehen heute schon für die Darstellung und Auswertung von Zeitreihen des Indikators „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ für landwirtschaftliche Böden zur Verfügung. Eine Verstetigung erfordert die kontinuierliche Fortführung dieser Messprogramme.

Darüber hinaus sind weitere Voraussetzungen auszubauen oder zu schaffen, die vor allem die Vergleichbarkeit und den Austausch von Daten sowie die räumliche und zeitliche Repräsentativität betreffen:

1. Definition von Standards für die Vergleichbarkeit von Daten

Bei der Zusammenführung von Datensätzen aus verschiedenen Messprogrammen sind Standards hinsichtlich der Probenahmestrategie, Probenaufbereitung und Untersuchungsmethoden von großer Bedeutung für die Vergleichbarkeit der Daten. Während Probenaufbereitung und Untersuchungsmethoden weitestgehend standardisiert sind, bestehen bei der Probenahme Harmonisierungsdefizite. Insbesondere kommen in den Messprogramme sowohl tiefenstufenbezogene als auch horizontbezogene Probenahmestrategien zur Anwendung (Kaufmann-Boll et al. 2022). Eine einmal definierte Variante kann während des laufenden Monitorings jedoch nicht ohne erhebliche Arbeiten zur Anpassung der Daten erfolgen. Mit

dem Blick auf bestehende Messreihen und den Anspruch auf ein langfristiges und umfassendes Monitoring sind deshalb pragmatische Harmonisierungsansätze vorzuziehen. In der Fallstudie wurde der Indikator aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten für den „Oberboden“, d. h. horizontbezogen abgeleitet. Das Referenzsystem der BZE Landwirtschaft arbeitet hingegen mit Tiefenstufenbezug. Es wird empfohlen, bei der Umsetzung des Indikatorvorschlags ebenfalls standardmäßig tiefenstufenbezogen vorzugehen (Acker und Grünland-Wechselwirtschaft 0-30 cm, Grünland und Forst 0-10 cm). Das erfordert eine entsprechende Aufbereitung der Datensätze bereits bei den Daten erhebenden Institutionen, da allein diese über die notwendigen Informationen zur Probenahmestrategie verfügen.

2. Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Repräsentativität

Um eine bundesweite Abdeckung des Indikators zu erreichen, ist die hier ausgeführte Fallstudie um Daten aus weiteren Boden-Dauerbeobachtungs- und Humusmonitoringprogrammen der Bundesländer zu erweitern. Für die landwirtschaftlich genutzten Böden lässt sich feststellen, dass die Daten aus drei Bundesländern bereits 27 der 33 Humusgehaltsstufen der BZE Landwirtschaft mit mindestens einer Messstelle abdecken. Daher ist davon auszugehen, dass sich die räumliche Repräsentativität durch Integration weiterer Daten vergleichsweise einfach verbessern lässt. Gleiches gilt für die zeitliche Repräsentativität, da mit den Daten bislang bestehende Lücken in Zeitreihen gefüllt und die Aussagesicherheit des Indikators erhöht werden kann.

Für zukünftige Indikator-Darstellungen sollten zudem die Zeitintervalle für Zwischeninventuren in den Messprogrammen der Bundesländer einheitlich höchstens 5 Jahre betragen, damit für jeden, zurzeit auf fünf Jahre festgelegten Berichtszeitraum mindestens eine Messung je Standort vorliegt.

Eine Abdeckung früherer Zeiträume als 1985 wäre aufgrund der fehlenden kontinuierlichen Messungen nur punktuell möglich, z. B. mithilfe von Daten aus Dauerfeldversuchen.

3. Definition von Standards für Datenqualität und Datenaustausch

Über die prinzipielle Eignung eines Standorts mit seinen Messdaten als qualitätsgesicherter Bestandteil der für die Indikatorberechnung zur Verfügung gestellten Datensätze entscheidet die datenerhebende Institution. Daher ist der für die Darstellung des Indikators notwendige Parametersatz auf wenige Parameter begrenzt. Obligatorisch sind dabei die Standortkennung, Messzeitpunkt, die Landnutzung, die Höhe des mittleren Jahresniederschlags der zum Messzeitpunkt gehörenden Klimareferenzperiode und als Messgrößen der Ton- und Schluffgehalt sowie die Gehalte an organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff zu den verschiedenen Messzeitpunkten.

Aufbereitet werden sollten die Datensätze dahingehend, dass je Messtermin und Messstelle genau ein Datensatz für die Ableitung des Indikators übergeben wird. Wenn, wie beim bayrischen Humusmonitoring, Teilflächen eines Standorts aufgrund hoher Heterogenität als eigenständige Flächen angesehen werden können, sollte auch diese Zuordnung auf Seiten der Daten erhebenden Stelle erfolgen.

Um die optimale und effiziente Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellter Daten auf Seiten der Berichterstattung zu ermöglichen, ist eine geeignete Datenstruktur, die diese Informationen und Messgrößen sowie zugehörige Metadaten (z. B. Einheiten, Angaben zur Bestimmungsgrenze, Methodencode) beinhaltet, zu vereinbaren und dauerhaft zu etablieren. Das dem UBA vorgelegte Daten-Factsheet gibt die Datenstruktur vor.

4. Etablierung geeigneter Algorithmen für Datenabfrage und Berechnung des Indikators
Nach Vereinbarung geeigneter Datenstrukturen müssen diese sowohl auf Seiten der Daten erhebenden als auch der auswertenden Stelle etabliert werden. Aus den bei den Daten erhebenden Stellen vorliegenden Bodendaten sind die konkret geeigneten Standorte auszuwählen, die Messdaten zusammenzustellen ggf. aufzubereiten und in die vereinbarte Datenstruktur zu überführen (Daten-Factsheet). Es ist davon auszugehen, dass bei den Daten erhebenden Stellen bereits entsprechende Abläufe aus der Auswertung ihrer Bodendaten für verschiedene Fragestellungen etabliert sind. Für die Datenabfrage und Nachverfolgung sowie die erstmalige Zusammenführung der Daten und Erstellung der Indikatorendatensätze sowie deren Visualisierung ist mit erhöhten Zeitaufwänden zu rechnen. Soweit oben genannte Vereinheitlichungen der Datenflüsse gesichert und eine entsprechende Qualitätssicherung etabliert ist, lässt sich der Aufwand für die neue Berechnung und Darstellung der Indikatoren mit 1-3 Arbeitstagen ansetzen. Die Kosten können langfristig geringgehalten werden, wenn klare Kommunikationswege und Datenschnittstellen zwischen den Daten erhebenden und der auswertenden Stelle/n eingerichtet werden.
5. Entwicklung eines geeigneten Bewertungsschemas für Veränderungen des Indikators
Anhand der Fallstudie für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ kann noch kein abschließend verbindliches Bewertungssystem vorgeschlagen werden. Die Bewertung umfasst deshalb bisher die Betrachtung der relativen Veränderungen. Die Herstellung eines Bezuges auf Schwellenwerte, die einen kritischen Zustand feststellen lassen, ist nur dann möglich, wenn Einigung darüber hergestellt wird, sich zukünftig am Humusstatus des Indikator-Referenzsystems, basierend auf dem bundesweiten Datensatz der ersten BZE Landwirtschaft, zu orientieren, Abweichungen davon sind dann entsprechend zu bewerten. Dabei ist zum Beispiel auch zu diskutieren, inwieweit eine hohe Zahl von Standorten oberhalb der standorttypischen SOC-Gehaltsspannen grundsätzlich als besonders günstig zu bewerten ist, da nicht unmittelbar ein Rückschluss auf die Stabilität des SOC gezogen werden kann. Zudem handelt es sich bei der Obergrenze der Wertebereiche standorttypischer Humusgehalte lediglich um eine statistisch basierte Festlegung (87,5-Perzentil). Um den vorgestellten Indikatorvorschlag als Grundlage für politische Entscheidungen über Maßnahmen einsetzen zu können, ist es deshalb notwendig, ein geeignetes Bewertungsschema für die künftig beobachteten Veränderungen zu entwickeln.
6. Weiterentwicklung der betrachteten Landnutzungstypen
Um tatsächlich eine bundesweite Abdeckung des Indikators für die Böden der landwirtschaftlichen und perspektivisch auch forstlichen Landnutzungstypen zu erreichen, ist zu untersuchen, inwieweit das Konzept der standorttypischen Humusgehalte auf die Waldböden erweiterbar ist. Zudem fehlt bislang eine Betrachtung für anmoorige und torfige Standorte mit SOC-Gehalten > 8,7 M.-% im Oberboden.
7. Begleitende Forschung
Unabhängig vom bundesweiten Betrachtungsmaßstab müssen die standortbezogenen Einflussfaktoren auf die Entwicklung der organischen Bodensubstanz weiter untersucht werden. Hier sind Effekte der Bewirtschaftung sowie die Zusammenhänge zwischen Klima und Bodenleben zu nennen. Auch ist der Bezug zur Erfüllung von Bodenfunktionen weiter zu untersuchen und mit Daten zu hinterlegen. Dies ist Bestandteil der Evaluierung politischer und praktischer bodenbezogener Maßnahmen zum Klimaschutz, der Klimaanpassung und dem Erhalt und der Förderung der Biodiversität.

6.4 Weitere Indikatorideen

Weitere Überlegungen, die nicht zur Ausgestaltung eines konkreten Indikatorvorschlags geführt haben, werden im Folgenden dokumentiert. Sie sollen als Anknüpfungspunkt zur Erweiterung der nationalen Berichterstattung für das Medium Boden dienen. Im Folgenden wird die aktuelle Diskussion über die Eignung des SOC:Ton-Verhältnisses zur Identifikation von Ziel-Humusgehalten, welche mit einer guten Bodengesundheit in Zusammenhang gebracht werden, aufgegriffen. Die EU-Kommission nimmt im Entwurf des Bodenüberwachungsgesetzes Bezug auf das SOC:Ton-Verhältnis und schlägt im Annex ein SOC:Ton-Verhältnis von $> 1:13$ als Schwellenwert zur Kennzeichnung eines gesunden Zustands von Mineralböden vor (Europäische Kommission 2023). Ergänzend werden die Anwendbarkeit des erwartbaren SOC-Gehaltes (SOC_{exp}) für einen Indikator untersucht und damit die Ergebnisse einer Untersuchung von Don et al. (2024) sowie der Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“ des UBA vom 17. und 18. April 2024 berücksichtigt.

6.4.1 Eignung des SOC:Ton-Verhältnisses

Herleitung und Begründung

Der gesamte Kohlenstoffkreislauf ist von einer kontinuierlichen Dynamik aus Aufbau der Biomasse und Abbau der toten organischen Substanz geprägt. Zentral ist, dass alle tote organische Substanz überwiegend durch mikrobielle Oxidationsprozesse abgebaut und final zu H_2O und CO_2 mineralisiert wird. Es gilt jedoch als gesichert, dass drei Mechanismen diesen Abbau verzögern können (Lehmann & Kleber 2015; von Lützow et al. 2006): 1. Infolge ihrer chemischen Zusammensetzung werden qualitativ unterschiedliche organischen Substanzen unterschiedlich schnell abgebaut (Rekalzitranz; kurzfristige Stabilisierung); 2. Durch den hauptsächlich biologisch begründeten Einbau der organischen Substanz in Aggregaten kann deren Abbau verzögert werden (Okklusion; kurz- bis mittelfristig); und 3. Durch die Bindung von organischer Substanz an die Feinschluff- und Tonpartikel eines Bodens wird deren Abbau verzögert (Sorptions; mittel- bis langfristig).

Viele Studien zeigen, dass die Kapazität eines Bodens bzw. einer Menge an Bodenmaterial, organische Substanz zu binden und somit vor dem Abbau zu schützen, begrenzt ist. Die meisten Erklärungsansätze verbinden dies mit dem Gehalt des Materials an Feinschluff und Ton bzw. deren spezifischer Oberfläche und/oder deren Aggregierungspotenzial (Mayer et al. 2023; Minasny et al. 2017; Stewart et al. 2007). Das heißt, je mehr feine Partikel ein Bodenmaterial enthält, desto mehr SOC kann in diesem Boden oder Bodenmaterial gebunden werden. In den meisten mineralischen Böden liegt der größte Anteil der organischen Substanz in dieser Schluff- und Tonfraktion vor. Unter konstanten Umweltbedingungen und nachhaltiger Nutzung stellt sich dabei ein Gleichgewicht zwischen Abbau und Anreicherung der organischen Substanz ein (Chenu et al. 2019), das mit der Ausbildung eines charakteristischen SOC:Ton-Verhältnisses einhergeht. Feller & Beare beschrieben schon 1997 den Zusammenhang zwischen Ton und dem daran komplexierten/gebundenen Kohlenstoff. Dexter et al. konnten dann 2008 anhand von vier existierenden Datensätzen nachweisen, dass mehrere physikalische Eigenschaften eines gegebenen Bodenmaterials nicht von der Gesamtmenge an SOC, sondern dem SOC:Ton-Verhältnis beschrieben werden. Sie stellten für diese Datensätze fest, dass die untersuchten Eigenschaften eine optimale Ausprägung bei einem SOC:Ton-Verhältnis von 1:10 haben. Dieses Verhältnis wurde im Anschluss für verschiedene Regionen oder Staaten nachgewiesen. Johannes et al. stellten 2017 den direkten Zusammenhang zwischen dem SOC:Ton-Verhältnis und der optisch bestimmten Strukturqualität eines Bodens her. Auf diese Weise konnten sie zeigen, dass gut strukturierte Böden im Mittel ein enges SOC:Ton-Verhältnis von 1:8 aufwiesen, wohingegen schlecht strukturierte Böden im Mittel ein weites SOC:Ton-Verhältnis von 1:13 zeigten. Die Grenze zwischen guter und

mittlerer Strukturqualität konnte bei einem Verhältnis von 1:10 identifiziert werden. Die Autoren folgern, dass in der landwirtschaftlichen Praxis pragmatisch ein anzustrebendes SOC:Ton-Verhältnis von 1:10 definiert werden sollte. Prout et al. (2021, 2022) konnten diese Befunde für Böden in England und Wales bestätigen.

Auf den engen Zusammenhang zwischen dem Humusgehalt und der Bodenfunktionalität wurde bereits hingewiesen (siehe Abschnitt 6.3.1). Bei landwirtschaftlich genutzten Böden spielen hier insbesondere die Struktur und deren Belastbarkeit, das Wasserspeichervermögen sowie die Nährstoffverfügbarkeit im Sinne der Bodenfruchtbarkeit zentrale Rollen. Entsprechend enge SOC:Ton-Verhältnisse tragen unter den Bedingungen des Klimawandels deshalb auch zur Ertragssicherheit bei (Droste et al. 2020). Der Beitrag der Bodenlebewesen zu den wichtigsten Bodenprozessen wie dem Um- und Abbau von organischer Substanz, der Dynamik der Nährstoffkreisläufe sowie der Bildung von Humus und Bodenstruktur ist dabei von entscheidender Bedeutung (Hartmann & Six 2022; Hooper et al. 2005).

Der Erhalt eines engen SOC:Ton-Verhältnisses ist daher ein wesentlicher Baustein für die Ertragssicherheit, den Erhalt der Biodiversität, den Klimaschutz und zur Anpassung der Böden an die Folgen des Klimawandels.

Klimaschutz: Die zeitliche Entwicklung des Humusgehalts eines Bodens hat direkte Auswirkungen auf die Minderung des Klimawandels. Je höher der Humusvorrat eines Bodens ist, desto mehr Kohlenstoff wurde der Atmosphäre zu einem früheren Zeitpunkt entzogen. Der freiwillige Zertifikatemarkt (VCM) bedient sich dieses Zusammenhangs, indem die Steigerung des Humusgehalts einer Fläche direkt in eine Kohlenstoffsequestrierung umgerechnet und mit Zahlungen belohnt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich das SOC:Ton-Verhältnis nicht in eine Sequestrierungsrate umrechnen lässt. Es wird angenommen, dass Böden mit einem engen SOC:Ton-Verhältnis weniger zusätzlichen Kohlenstoff fixieren können (Paul et al. 2023). Außerdem geht man davon aus, dass das Potenzial eines Bodens, Kohlenstoff zu speichern, limitiert ist (Powlson et al. 2011; Stewart et al. 2007). Böden mit einem engen SOC:Ton-Verhältnis sind bereits gut mit Humus versorgt und haben daher wahrscheinlich ein kleineres Sequestrierungspotenzial als Böden mit einem weiten SOC:Ton-Verhältnis. Aus dem SOC:Ton-Verhältnis kann deshalb nicht auf das Klimaschutzpotenzial eines Bodens bzw. Standorts geschlossen werden. Für diese Anforderungen gibt es keine Alternative zur direkten Bestimmung der Kohlenstoffvorräte unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte und des Grobbodenanteils.

Anpassung an die Folgen des Klimawandels: Die Erhöhung oder Stabilisierung des Humusgehalts auf einem guten Niveau (SOC:Ton > 1:10) ist positiv für die Anpassung eines Standorts an den Klimawandel. Je höher der Humusgehalt eines Standorts, desto größer ist der Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser und desto höher ist die Infiltrationsrate. Dies bedeutet einen größeren Wasservorrat für Pflanzen und die schnelle Infiltration von Niederschlagswasser während (Stark)Niederschlägen (siehe auch Abschnitt 6.3).

Erhalt der Biodiversität: Viele Studien zeigen einen engen Zusammenhang zwischen dem SOC-Gehalt einer Fläche und verschiedenen Biodiversitätsindikatoren (Bünemann et al. 2018; Koppitzke et al. 2022). Diese Zusammenhänge sind aber eher qualitativ als quantitativ zu verstehen. Grundsätzlich kann jedoch angenommen werden, dass ein höherer Humusgehalt und damit ein engeres SOC:Ton-Verhältnis auf eine höhere biologische Aktivität hinweist. Dies muss jedoch keine höhere Biodiversität bedeuten, da die Zunahme an Aktivität auch durch die höhere Abundanz und entsprechend Aktivität einzelner, sehr gut angepasster Arten gewährleistet werden kann.

Methodische Herangehensweise

Für die folgende Darstellung wurde die im Abschnitt 6.3 für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ beschriebene Vorgehensweise auf das Konzept des SOC:Ton-Verhältnisses übertragen. Dabei wurde auch der Ansatz einer Regionalisierung auf Grundlage der Landnutzung, der Texturklasse, C:N-Verhältnisse und der mittleren Jahresniederschläge beibehalten. Hintergrund für dieses Vorgehen sind die Untersuchungsergebnisse von Poeplau & Don (2023). Diese ergaben, dass das SOC:Ton-Verhältnis bei leichten, sandigen und schweren, tonigen Böden keine sinnvollen Resultate bezüglich des Zusammenhangs zur Bodenstruktur bzw. Bodengesundheit liefert (siehe dazu Abschnitt 6.4.2). Ziel war es deshalb, mit einem entsprechend differenzierteren Ansatz die Eignung regionalisierter SOC:Ton-Verhältnisse für einen bundesweiten Indikator zu überprüfen.

Schritt 1: Ein möglicher auf SOC:Ton basierender Indikator sollte ebenfalls für Berichtszeiträume von fünf Jahren in zeitlicher Abfolge abgeleitet und dargestellt werden können. Dazu werden im ersten Schritt messstellenbezogen die Fünfjahresmittelwerte der Messwerte der jeweiligen Berichtsperioden gebildet.

Schritt 2: Anschließend erfolgt die Stratifizierung der Messstellen gemäß dem Verfahren nach Drexler et al. (2020) anhand der o. g. Faktoren, d. h. die Zuweisung zu einem Standorttyp.

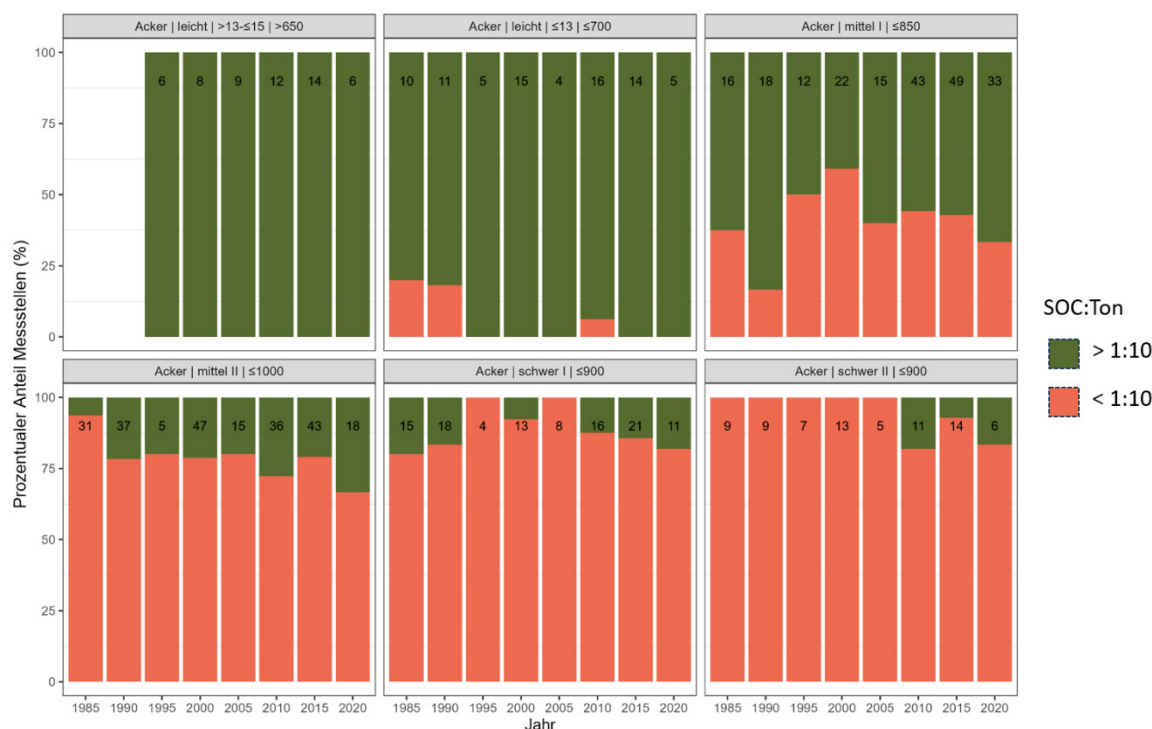
Schritt 3: Für jede Messstelle wird unter Zuhilfenahme des analytisch (Siebung und Sedimentation) bestimmten Tongehalts und des mittleren SOC-Gehalts für die Berichtsperiode das jeweilige SOC:Ton-Verhältnis berechnet.

Schritt 4: Abschließend ist zu erfassen, wie viele Messstellen innerhalb des jeweiligen Standorttyps mit ihrem SOC:Ton-Verhältnis unter- oder oberhalb von 1:10 liegen. Die Werte fließen in eine Balkengrafik ein, um den Indikator im zeitlichen Zusammenhang zu visualisieren.

Darstellung

Der Vorschlag zur Darstellung der Indikatoridee entspricht prinzipbedingt der für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ gewählten Form (vgl. Abschnitt 6.3.4) und ist in der nachfolgenden Abbildung 4 gegeben.

Abbildung 4: Darstellung einer Indikatoridee basierend auf dem SOC:Ton-Verhältnis für sechs Standorttypen (Landnutzung | Texturklasse | C:N-Verhältnis | Jahresniederschlag in mm)



Einschränkungen

Die Abbildung 4 unterstreicht auch in der Variante mit Regionalisierung die Befunde von Poeplau & Don (2023) für leichte und schwere Böden: Das SOC:Ton-Verhältnis der beiden Standorttypen für schwere Böden weist für diese nahezu durchgehend SOC:Ton-Verhältnisse auf, die auf eine Unterversorgung mit SOC und – daraus abgeleitet – eine ungünstige Bodenstruktur hindeuten würden. Dagegen lägen bei den leichten Böden mit einem SOC:Ton-Verhältnis von überwiegend > 1:10 ausnahmslos gesunde Bodenverhältnisse, d. h. gute Bodenstruktur und SOC-Versorgung, vor. Unsicherheiten bestehen dabei aufgrund der Messstellenanzahl je Berichtszeitraum, die sich eher am unteren Ende der minimalen Anforderungen für die räumliche und zeitliche Repräsentativität bewegt. Unabhängig davon zeigen neben den leichten und schweren die besser repräsentierten Böden in der Texturklasse „mittel II“ (sandiger Lehm, Tongehalt zwischen 17 und 25 Masse-%) ein ähnliches Bild. Auch sie wären überwiegend SOC-unterversorgt. Insgesamt ergibt sich in den Standorttypenklassen nur wenig Differenzierung in der zeitlichen Entwicklung der SOC. Ursächlich ist die Reduktion der Bewertung der Bodengesundheit allein auf das SOC:Ton-Verhältnis und damit auf die alleinige Abhängigkeit vom Tongehalt. Im Gegensatz dazu deckt der Indikator-Vorschlag „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ (siehe Abschnitt 6.3) ein breites Spektrum von Böden ab, nämlich alle mit Daten der BZE unterlegten Böden, und berücksichtigt neben der Textur weitere Einflussfaktoren.

Empfehlungen und Perspektiven

Die hier untersuchte Indikatoridee basierend auf dem SOC:Ton-Verhältnis weist die oben beschriebenen Einschränkungen in der Anwendbarkeit für einen bundesweiten Indikator auf und sollte in dieser Form nicht weiter verfolgt werden.

6.4.2 Eignung des SOC:SOC_{exp}-Verhältnisses

Als ein Ergebnis des UBA-Fachgesprächs vom 25.10.2023 in Berlin und beziehungsweise auf die Untersuchungen von Poeplau & Don (2023) wurde die Idee der Anwendung eines sogenannten „erwartbaren SOC-Gehaltes“ für einen bundesweiten Indikator anhand der zur Verfügung stehenden Daten überprüft. Ausgangspunkt waren die Erkenntnisse von Poeplau & Don (2023) aus ihren Untersuchungen zum SOC:Ton-Verhältnis, wonach sich prinzipiell aus dem Zusammenhang zwischen Ton- und SOC-Gehalt Rückschlüsse auf die Bodengesundheit ziehen lassen. Allerdings konnten die Autoren auch zeigen, dass das SOC:Ton-Verhältnis bei leichten, sandigen und schweren, tonigen Böden keine sinnvollen Resultate liefert. Während sandige Böden, wie bspw. Podsole das avisierte Verhältnis von 1:10 häufig unterschritten und somit sehr gute SOC-Gehalte aufwiesen, erreichten viele schluffige bis tonige Standorte, unter anderem Schwarzerden und Pelosole, trotz optimaler Bewirtschaftung das optimale SOC:Ton-Verhältnis von 1:10 nicht und zählten somit als schlecht oder verarmt. Diese Resultate konnten im vorliegenden Projekt anhand des zur Verfügung stehenden Datensatzes nachvollzogen werden (s. Abschnitt 6.4.1).

Poeplau & Don (2023) schlagen daher mit der Bezugnahme auf einen erwartbaren SOC-Gehalt (SOC_{exp}) einen Ansatz vor, der diese aktuellen Erkenntnisse aus der deutschen Bodenzustandserhebung Landwirtschaft berücksichtigt. Durch Kombination des zeitlichen Trends der SOC-Gehalte mit Grenzwerten aus dem SOC:SOC_{exp}-Verhältnis wird ein „kontextspezifischer SOC- bzw. C_{org}-Trend“ als Indikatorvorschlag entwickelt. Die einzelnen Standorte werden bei Poeplau & Don (2023) abhängig davon, wie sie um den SOC_{exp} liegen, und wie die zeitliche Entwicklung des SOC-Gehaltes ist, anhand von zwei Klassen (gut und degradierend) bewertet. Im Kontext eines fallenden SOC-Gehaltstrends sind demnach auch SOC-Gehalte oberhalb des SOC_{exp} als nachteilig (degradierend) zu bewerten. Böden mit SOC-Gehalten unterhalb des 25. Perzentils aus SOC:SOC_{exp} sind dagegen nur dann positiv (gut) zu bewerten, wenn die SOC-Gehalte einen steigenden Trend aufweisen.

Vereinfachend wird im Folgenden lediglich ermittelt, ob ein Standort mit seinem SOC-Gehalt ober- oder unterhalb des SOC_{exp} liegt (SOC:SOC_{exp} > 1 oder SOC:SOC_{exp} < 1). Zudem wird die individuelle kontextspezifische Betrachtung durch die Ermittlung einer Anzahl von Standorten aufgelöst. Dieses Vorgehen skaliert also auf die Standorttypen und stellt dadurch eine Form der Regionalisierung dar. Ein Trend lässt sich durch die beobachtete Entwicklung der Anteile von Standorten ober- bzw. unterhalb des SOC_{exp} untersuchen. Eine Bewertung erfolgt nicht.

In ihrem Ansatz nutzen Poeplau & Don (2023) einen standortspezifischen Humuserwartungswert, der auf einer einfachen Regression mit dem Tongehalt basiert (s. u.). Sie weisen darauf hin, dass sich genauere Werte durch Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren (z. B. Boden, Klima, Landnutzung) erzielen lassen.

Methodische Herangehensweise

Auch für die Indikatoridee SOC:SOC_{exp} wurde die im Abschnitt 6.3 für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ beschriebene prinzipielle Vorgehensweise repliziert. Der SOC_{exp} wird mithilfe einer empirisch durch Poeplau & Don (2023) auf Basis des bundesweiten Datensatzes der BZE Landwirtschaft abgeleiteten Formel berechnet. Eine Regionalisierung dieser Formel erfolgt also nicht. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit der Indikatoridee des SOC:Ton-Verhältnis und dem Indikatorvorschlag in Abschnitt 6.3 wird die Eignung dieser Idee jedoch an den nach den Standorttypen nach Drexler et al. (2020) gruppierten Daten untersucht (Gruppierung nach Landnutzung, Texturklasse, C:N-Verhältnis und mittlerem Jahresniederschlag).

Schritt 1: Ein möglicher auf dem SOC_{exp} basierender Indikator sollte für Berichtszeiträume von fünf Jahren in zeitlicher Abfolge abgeleitet und dargestellt werden können. Im ersten Schritt

werden dem entsprechend messstellenbezogen die Fünfjahresmittelwerte der Messwerte der jeweiligen Berichtsperioden gebildet.

Schritt 2: Anschließend erfolgt die Stratifizierung der Messstellen gemäß dem Verfahren nach Drexler et al. (2020) anhand der o. g. Faktoren, d. h. die Zuweisung zu einem Standorttyp.

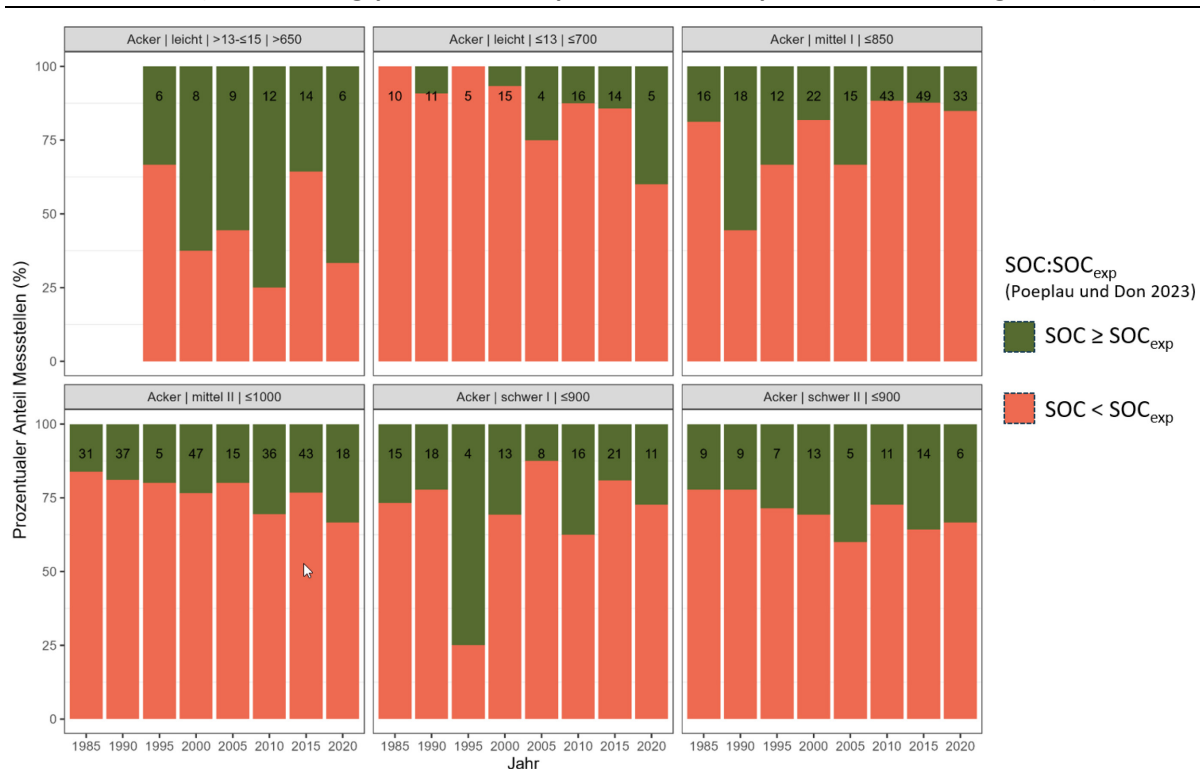
Schritt 3: Für jede Messstelle wird unter Zuhilfenahme des analytisch (Siebung und Sedimentation) bestimmten Tongehalts und der empirisch durch Poeplau & Don (2023) abgeleiteten Formel: $SOC_{exp} = \text{Tongehalt in Masse-\%} \times 0,0288 + 13,674$ der erwartbare SOC-Gehalt berechnet.

Schritt 4: Abschließend wird erfasst, wie viele Messstellen eines Standorttyps mit ihrem SOC-Gehalt unter- oder oberhalb dieses Referenzwerts (i. e. SOC_{exp}) liegen. Die Werte fließen in eine Balkengrafik ein, um den Indikator im zeitlichen Zusammenhang zu visualisieren.

Darstellung

Der Vorschlag zur Darstellung der Indikatoridee entspricht prinzipbedingt der für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ und der Indikatoridee SOC:Ton-Verhältnis gewählten Form (vgl. Abschnitt 6.3.4) und ist in der nachfolgenden Abbildung 5 visualisiert.

Abbildung 5: Darstellung einer Indikatoridee basierend auf SOC: SOC_{exp} für sechs Standorttypen (Landnutzung | Texturklasse | C:N-Verhältnis | Jahresniederschlag in mm)



Die Bezugnahme auf einen erwartbaren SOC-Gehalt (SOC_{exp}) zeigt in der Darstellung grundsätzlich ein nachvollziehbares Bild der Verteilung und zeitlichen Entwicklung von SOC-Gehalten. Im Vergleich zum SOC:Ton-Verhältnis werden leichte und schwere Standorte differenzierter bewertet. In der Tendenz sind zeitliche Entwicklungen erkennbar, wie sie auch beim standorttypischen Humusgehalt zu sehen sind (vgl. Abbildung 2). Unterschiede gibt es zwischen den zwei untersuchten Standorttypen der leichten Böden. Bei den Böden mit einem weiteren C:N-Verhältnis (> 13 bis ≤ 15) ist der Anteil von Standorten mit einem SOC: SOC_{exp} -Verhältnis > 1 deutlich geringer als bei den Böden mit einem C:N-Verhältnis von ≤ 13 . Insgesamt ist bei den

mittleren und schweren Böden der Anteil derer mit einem $SOC < SOC_{exp}$ um ein Vielfaches höher als der mit $SOC \geq SOC_{exp}$.

Einschränkungen

Eine Prüfung auf Über- oder Unterschreitung des SOC_{exp} , wie sie hier vereinfachend durchgeführt wurde, ist nachvollziehbar nicht ausreichend für die Darstellung eines auf SOC_{exp} basierenden Indikators. Eine solche scharfe Grenze würde der praktischen Erfahrung widersprechen, wonach ein sehr viel höherer Anteil landwirtschaftlich genutzter Böden einen guten Bodenzustand aufweist als im Diagramm dargestellt. Dies wurde auch im Fachgespräch im Oktober 2023 so diskutiert. Ein solches Ergebnis würde zudem im Widerspruch zu den Auswertungen für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ stehen, wonach eine hohe Zahl der untersuchten Standorte SOC-Gehalte inner- bzw. oberhalb der typischen Spannweiten aufweisen.

Empfehlungen und Perspektiven

Mit der Anwendung eines erwartbaren SOC-Gehalts geben Poeplau & Don (2023) den Anstoß für die Entwicklung eines Indikators zur Bewertung der Bodengesundheit. Die Bodengesundheit ist dabei im Wesentlichen charakterisiert über die Bodenstruktur bzw. Porosität und den SOC-Gehalt des Bodens. Durch die Berechnung des erwartbaren SOC-Gehalts auf Grundlage einer empirischen Gleichung, die den SOC- und den Tongehalt von Böden integriert, wird der Zusammenhang zwischen beiden Parametern berücksichtigt. Gleichzeitig ist die starke Abhängigkeit einer Bewertung der Bodengesundheit vom Ton-Gehalt, wie sie bei der Einstufung nach dem SOC:Ton-Verhältnis vorliegt (siehe Abschnitt 6.4.1), aufgehoben, da der SOC-Gehalt eines Bodens zum SOC_{exp} ins Verhältnis gesetzt wird.

Die Überprüfung der Eignung eines auf SOC_{exp} basierenden Indikators mithilfe der hier vorliegenden Daten zeigt dessen grundsätzliche Anwendbarkeit. Das von Poeplau & Don (2023) aufgezeigte Konzept der Anwendung eines Unschärfebereichs unterhalb des SOC_{exp} , innerhalb dessen Böden noch als gesund gelten, würde zu einer besseren Differenzierung der Böden führen, konnte jedoch aufgrund des vereinfachten Ansatzes hier nicht umgesetzt werden.

Poeplau & Don (2023) schlagen hierzu das 25. Perzentil der SOC: SOC_{exp} -Verhältnisse räumlich abgegrenzter Standorte (z. B. Deutschland) als eine untere Grenze vor und schränken ein, dass diese nicht wissenschaftlich begründbar ist und durch andere Werte ersetzt werden kann. Eine räumliche Abgrenzung ließe sich zudem nicht nur administrativ, sondern auch geographisch (z. B. durch den Naturraum) erreichen. Denkbar sind daher auch geeignete Standorteigenschaften analog zum Standorttyp für Humusgehalte (siehe Abschnitt 6.3). Durch die Berücksichtigung weiterer über den Tongehalt hinausgehenden Standortfaktoren erwarten Poeplau & Don (2023) auch höhere Genauigkeiten bei der Berechnung erwartbarer Humusgehalte.

6.4.3 Diskussion

Auf der Anwendungsebene bietet ein Indikator, der das Verhältnis SOC: SOC_{exp} zur Bewertung heranzieht, den Vorteil, dass ein gut kommunizierbares Ziel formuliert werden kann (gleichbleibender oder zunehmender SOC-Gehalt). Bodennutzer: Bodennutzerinnen kann mit dem SOC_{exp} ein wissenschaftlich abgestützter optimaler Humusgehalt für ihre Parzelle an die Hand gegeben werden, der sowohl auf eine gute Bodenstruktur zeigt als auch im Sinne einer optimalen Humusversorgung aus der Perspektive der agronomischen Nutzung interpretiert werden kann. Für eine bundesweite Anwendung bieten sich dieselben Datengrundlagen und Messstellen an, die für den Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ geeignet sind (siehe Abschnitt 6.3.2). Die Datengrundlage für die Referenz ist bei beiden Ansätzen mit der ersten BZE Landwirtschaft identisch. Weiterzuentwickeln und zu diskutieren sind dabei die anzu-

wendende Referenzspannweite für das SOC:SOC_{exp}-Verhältnis und die Bewertung von Veränderungen.

Das Konzept des standorttypischen Humusgehalts ist dagegen gut untersucht und basiert auf einer Vielzahl von einschlägigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Es ist in landwirtschaftlichen Fachkreisen etabliert und hat eine hohe Anwendungsreife erreicht. Mit den bundesweit erhobenen Daten der BZE Landwirtschaft steht ein sehr gutes Referenzsystem zur Verfügung. Als nachteilig ist der lediglich indirekte Bezug zur Bodenstruktur zu sehen, weshalb ein darauf basierender Indikator nur bedingt für die Bewertung der Bodengesundheit geeignet ist. Im Kontext der Berichterstattung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel spielt dieses Defizit jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Insbesondere die den klimatischen Standortfaktor Niederschlag berücksichtigende Regionalisierung ermöglicht es, innerhalb der bundesweiten Darstellung die regional unterschiedlichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Humusgehalt der Böden zu erkennen. In der Folge ist es möglich, auch entsprechend differenzierte Handlungsoptionen zu entwickeln und Maßnahmen gegen einen klimawandelbedingten Verlust von Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden zu ergreifen.

Auf der UBA-Tagung am 17./18.04.2024 in Dessau wurde diskutiert, inwieweit ein Indikator basierend auf dem erwartbaren SOC-Gehalt auf organische Böden und Waldstandorte übertragbar wäre. Auf Basis des hier vorliegenden Datensatzes kann dies nicht endgültig geklärt werden. Für organische Böden nehmen wir jedoch an, dass die mineralische Phase bei > 30 % SOC und > 30 cm Mächtigkeit keine entscheidende Rolle für den SOC-Gehalt spielt. In diesen Böden ist die Mächtigkeit der organischen Horizonte entscheidend für den SOC-Vorrat. In Wäldern hat neben dem mineralischen Ah-Horizont die organische Auflage einen großen Anteil sowohl am SOC-Vorrat wie auch dem Zustand des jeweiligen Bodens. Wir folgern daher, dass das SOC:SOC_{exp}-Verhältnis ohne Berücksichtigung weiterer über den Tongehalt hinausgehender Standortfaktoren bei der Berechnung erwartbarer SOC-Gehalte keine sinnvolle Aussage zum Zustand der organischen Bodensubstanz an diesen Standorten zulässt.

6.5 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Ein standortangepasster Humusgehalt ist die Basis für eine nachhaltige Landwirtschaft unter den Bedingungen des Klimawandels mit Extremwetterereignissen wie Starkregen oder extremer Trockenheit. Humus ist dabei die Schlüsselkomponente, da er bei der Ausbildung der Bodenstruktur beteiligt ist und damit Einfluss auf den Luft-, Wasser- und Nährstoffhaushalt für Pflanzen im durchwurzelbaren Bodenraum ausübt. Das gilt auch für nicht landwirtschaftlich genutzte Böden.

Eine Beobachtung der Humusgehalte vor dem Hintergrund des bundesweiten Referenzdatensatzes zu einem fixen Zeitpunkt ist daher essenziell für die Erarbeitung geeigneter Handlungsempfehlungen zum Erhalt des standorttypischen Humusstatus unserer Böden. Beispielsweise werden durch den Erkenntnisgewinn aus der Analyse beobachteter Veränderungen (Verringerungen oder Anstieg) der Humusgehalte zu Beginn der Zeitreihen gegenüber dem Referenzzeitraum Fortschritte für die Bewertung des hier vorgeschlagenen Indikators erwartet.

Der Indikatorvorschlag „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ sollte deshalb Eingang in bestehende Berichtssysteme, beispielsweise in das DAS-Monitoring, finden. Er liegt mit den vorgelegten Beschreibungen und dem Daten-Factsheet, das dem UBA zur Verfügung gestellt wurde, bereits in einer dafür geeigneten Form vor. **Dazu muss der Umsetzungsprozess mit den Daten erhebenden Stellen, deren Mitwirkung für die Fallstudie und eine bundesweiten Erweiterung erforderlich ist, abgestimmt und etabliert werden (siehe Empfehlungen in Abschnitt 6.3.6).**

Für Indikatorideen, die das Verhältnis $SOC:SOC_{exp}$ zur Bewertung heranziehen, wie der vom Thünen-Institut für Agrarklimaschutz vorgeschlagene „kontextspezifische C_{org} -Trend“, könnten Möglichkeiten zur bundesweiten Darstellung von Trends geprüft werden, um Fragestellungen über die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel hinaus zu adressieren. **Bei der Entwicklung von Indikatoren zum Bodenkohlenstoff bietet sich auf nationaler Ebene eine enge Zusammenarbeit von UBA und TI an.**

Der vorangehend vorgestellte Indikatorvorschlag und die ergänzenden Indikatorideen sind nicht ausreichend, sie können nur ein Bestandteil eines umfassenden Monitorings sein, das alle Landnutzungstypen, insbesondere Forst und anmoorige Standorte und Moore einschließt. **Hier sind Konzepte zu entwickeln, die den Bezug von Monitoringwerten auf eine Referenz ermöglichen, da standorttypische Humusgehalte bundesweit bisher ausschließlich für landwirtschaftlich genutzte Böden abgeleitet worden sind.**

7 Prüfung von Indikatorideen und Entwicklung von Indikatoren zur Bodenbiodiversität

7.1 Geprüfte Indikatorideen

Im F+E-Projekt „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Substanz“ (Kaufmann-Boll et al. 2022) sind folgende Indikatoren für die konkrete Weiterentwicklung im Hinblick auf ein bundesweites Monitoring vorgeschlagen worden:

- ▶ Artenzusammensetzung von Tiergruppen,
- ▶ Regenwurmfauna Biomasse,
- ▶ bodenbiologische Aktivität.

Die Recherchen im aktuellen Projekt zu bereits bestehenden Indikatoren und aktuellen Indikatorentwicklungen zum Qualitätsziel „Erhalt/Zunahme der (Boden-)Biodiversität“ (Wolf et al. 2024) ergaben zusammengefasst das folgende Ergebnis: Für das Themenfeld Bodenbiodiversität existieren derzeit auffallend wenig Indikatoren, obwohl diese aufgrund der thematischen Breite zahlreiche Ansätze nahelegt. So schließt die Bodenbiodiversität Mikroorganismen ebenso ein wie Pilze, Insekten oder Säugetiere. Dennoch konnte nur ein einziger ausgearbeiteter Indikator zur Regenwurmfauna in Baden-Württemberg identifiziert werden (LUBW 2020), zudem existieren vergleichbare Ansätze in Brandenburg (LfU 2021). Darüber hinaus wurden bislang nur wenige Indikatorideen entwickelt. Hinzu kommt, dass diese Indikatorideen in der Regel deutlich weniger konkret ausgearbeitet wurden als die zu anderen Themenfeldern. Ausgearbeitete Ansätze und Langzeitdatensätze zur Artenzusammensetzung von Tiergruppen sowie zur bodenbiologischen Aktivität konnten im Rahmen der Recherchen nicht gefunden werden. Diese Ansätze wurden dementsprechend im vorliegenden Projekt nicht weiterverfolgt.

Der Entwurf des Europäischen Boden-Monitoring-Gesetzes sieht zum Thema „Verlust von Boden-Biodiversität“ einen Bodendeskriptor vor, d. h. die „Soil basal respiration ($\text{mm}^3 \text{O}_2 \text{g}^{-1} \text{hr}^{-1}$) in dry soil“ (European Commission 2023). Ergänzend wird in diesem Entwurf auf Folgendes hingewiesen: „Member States may also select other optional soil descriptors for biodiversity such as ‘metabarcoding of bacteria, fungi, protists and animals’, ‘abundance and diversity of nematodes’, ‘microbial biomass’, ‘abundance and diversity of earthworms (in cropland)’, and ‘invasive alien species and plant pests’.“

Bei der Datenrecherche (siehe Kapitel 3 und Kaufmann-Boll et al. 2022) wurde deutlich, dass vor allem die begrenzte Datenverfügbarkeit und die Heterogenität vorliegender Messdaten aktuell der Entwicklung eines bundesweiten Indikators entgegenstehen. Zudem wurde offensichtlich, dass das Thema noch mit vielen offenen methodischen Fragen verbunden ist. So liegen für viele Bodenorganismengruppen bislang keine ausreichenden, einheitlich erhobenen Daten vor, um Zielwerte flächendeckend abzuleiten. Es existieren jedoch Ansätze dazu, spezifische Referenz-Lebensgemeinschaften für bestimmte Biotoptypen zu definieren (Toschki et al. 2021). Eine Ausnahme bilden die Regenwürmer (Lumbriciden), für die bereits verschiedene konkrete Klassifikations- und Bewertungskonzepte vorgestellt wurden (Walter & Burmeister 2019; Beylich & Graefe 2010; UBA 2007) und für die eine Rote Liste und Gesamtartenliste Deutschlands existiert (Lehmitz et al. 2016).

Für die Entwicklung von Indikatoren, die den Zustand und die Veränderung der Bodenbiodiversität darstellen sollen, lag der Fokus in dem hier berichteten Projekt auf typischerweise endogäisch, d. h. im Boden lebenden Tiergruppen, deren Lebensweise in besonderem Maße mit dem Boden verbunden ist. Zudem sollten möglichst Ansätze verfolgt werden, zu denen bereits zugängliche Langzeitdaten vorliegen. Über verschiedene Arten und Artengruppen summierende Parameter, wie beispielsweise die Bodenatmung, wurden nachrangig berücksichtigt, da sie sich allein auf die Funktion der Bodenlebensgemeinschaft beziehen, nicht aber auf deren Struktur bzw. die Biodiversität. Für epigäisch (an der Bodenoberfläche) auftretende Tiergruppen, das heißt die Laufkäfer (Carabiden) und Spinnen (Araneen), wird bereits im Rahmen des geplanten bundesweiten Insektenmonitorings ein Methodenleitfaden entwickelt, um verschiedene Tiergruppen auf den „bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen“ standardisiert zu untersuchen (BfN 2019). Die Umsetzung obliegt den Bundesländern, von denen bereits einige, wie zum Beispiel Baden-Württemberg, mit den Untersuchungen begonnen haben (Oellers et al. 2022).

Bei der Indikatorauswahl war zu berücksichtigen, inwieweit bereits Erfahrungen mit der Umsetzung umfassender Datenerhebungen für einen bestimmten Indikator vorliegen. Generell ist es vorteilhaft, wenn auf bestehende Expertise bei der Durchführung zurückgegriffen werden kann, indem beispielsweise vorhandene Programme erweitert werden, anstatt Messungen bzw. Messprogramme vollständig neu einzurichten. Auch kann ggf. durch die Auswertung von Altdaten ermittelt werden, ob sich vorhandene Indikatoren für den Aufbau langjähriger Datenreihen nutzen lassen und wo Ergänzungsbedarf besteht. Hierzu wurden zunächst grundsätzliche Überlegungen angestellt und dargelegt (siehe Abschnitt 7.2). Aus diesen Überlegungen und aus der recherchierten Datenlage ergab sich die Entscheidung, zwei Indikatorideen in Form von Fallstudien weiterzuverfolgen. Dazu wurden in einem weiteren Schritt bestehende Datensätze aus Beobachtungsprogrammen für die Entwicklung möglicher Indikatoren zusammengestellt, ausgearbeitet und in einem Fachgespräch mit ausgewählten Vertreter*innen der Länder und Fachexpert*innen zur Diskussion gestellt (siehe Kapitel 3). Diese bezogen sich zum einen auf die Regenwurm- und zum anderen auf die Springschwanz-(Collembolen-)Fauna. Die Verwendung der Bodenatmung als möglicher Indikator wurde ebenso zur Diskussion gestellt. Aus dem Fachgespräch wurden allgemeine Hinweise und konkrete Anmerkungen aufgenommen und für die Entscheidung zur Priorisierung der Indikatoridee „Regenwurmfauna“ genutzt, die im Projekt weiter ausgestaltet wurde. In Abschnitt 7.3 wird der Indikator dargestellt und es werden Hinweise zur Umsetzung und Verstetigung gegeben.

7.2 Grundsätzliche Herausforderungen bei der Indikatorentwicklung

Bei der Entwicklung von Indikatoren zur Abbildung der Biodiversität im Boden sind zunächst die konkreten Ziele des zugrundeliegenden Monitorings zu benennen. Die Ziele eines Biodiversitätsmonitorings (NMZB 2024) sind, neben der allgemeinen Kenntnisverbesserung:

- a) die Erfassung des Zustands durch lebensraumbezogene Bestandsaufnahmen,
- b) die Bewertung der Bodengesundheit durch Indikatoren und ein Vergleich mit Referenz- oder Zielwerten,
- c) die Überwachung des Zustands durch zeitliche Trendanalysen und Verfolgung der Bestandsentwicklungen,
- d) das Aufzeigen von Risiken, u. a. mittels Roter Listen sowie
- e) die Identifizierung von Treibern der Bestandsentwicklung (wechselnde (anthropogene) Umweltbedingungen).

Das Monitoring dient u. a. der Politikberatung und ist essenziell für die Ableitung von Handlungserfordernissen.

Folgende grundsätzliche Überlegungen sollten bei der Entwicklung eines Indikators berücksichtigt werden:

Untersuchungs-/Messmethoden

Die Methoden zur Erfassung der Bodentiere sind sehr unterschiedlich und können entsprechende Auswirkungen auf die Interpretation der Daten aufweisen. Die Anwendung unterschiedlicher Methoden wie Bodenfallenfänge, Bodenkernentnahme mit anschließender Austreibung oder Handauslese führt dazu, dass die Daten weder qualitativ noch quantitativ sinnvoll miteinander verglichen werden können. Auch bei Einsatz scheinbar gleicher Methoden, wie der Entnahme von Bodenkernen, ist entscheidend, dass eine standardisierte Methodik eingesetzt wird, d. h., dass der Bodenkerndurchmesser, die Anzahl von Proben bzw. Probenahmezeitpunkten und das räumliche Beprobungsdesign etc. einheitlich sind. Zur Erfassung ausgewählter Bodentiergruppen existieren bereits Standardvorgaben (ISO 23611 Soil quality — Sampling of soil invertebrates). Diese sind jedoch im Hinblick auf die letztgenannten Punkte nicht ausreichend detailliert formuliert (Kaufmann-Boll et al. 2022; Oellers et al. 2022).

Beprobungskampagnen

Aufgrund der großen Anzahl der Untersuchungsflächen war und ist es für die Betreiber der Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) der Länder nicht möglich, alle Standorte innerhalb eines Jahres bodenbiologisch zu beproben. Daraus ergibt sich, dass die Probenahmen auf den BDF der Bundesländer in Abhängigkeit der verfügbaren Kapazitäten in einem ein- bis mehrjährigen Turnus durchgeführt werden. Die Folge ist, dass die zwischen den Jahren variierenden Klimabedingungen, die Einfluss auf die Individuen- und Artenzahlen der Organismen nehmen, die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse einschränken. Darüber hinaus werden in manchen Bundesländern Beprobungsstrategien verfolgt, die dazu führen, dass in manchen Jahren nur Grünland, in manchen nur Äcker etc. untersucht werden. Das hat entsprechende Folgen für die Repräsentativität der Datenerhebungen innerhalb der Landnutzungstypen für die einzelnen Jahre bzw. für die entstehenden Varianzen innerhalb der Datensätze.

Standortauswahl

Für die Standortauswahl ist es erforderlich, dass etwaig ausgewählte Lebensraumtypen aufgrund der lebensraumspezifischen Schwankungen von Arten- und Individuenzahlen jeweils repräsentativ untersucht werden. Je stärker die unterschiedlichen Lebensraumtypen hinsichtlich ihrer Standorteigenschaften variieren, desto höher werden die Varianzen der Arten und dazugehörigen Individuenzahlen ausfallen. Es ist somit zur Erstellung eines Indikators wichtig, das Spektrum unterschiedlicher Standorteigenschaften bei der Standortauswahl zu berücksichtigen und diese dann im Laufe des Monitorings möglichst konstant zu halten.

Beispiel: In den ersten 5 Jahren einer Untersuchung werden 100 artenarme Intensivgrünländer (mittlere Artenzahl 3) und 20 magere naturnahe Grünländer (mittlere Artenzahl 15) untersucht. In den folgenden 5 Jahren werden nur 10 artenarme Intensivgrünländer und 90 magere naturnahe Grünländer untersucht. Werden die Ergebnisse in einem Indikator „Grünland“ zusammengefasst, wäre ggf. das Ergebnis, dass die durchschnittliche Artenzahl über die Jahre zunimmt. Dies liegt jedoch lediglich an der nicht standardisierten Stichprobenauswahl.

Messgrößen und Organismengruppen

Der Boden beherbergt verschiedene Organismengruppen wie Bodentiere, Bakterien, Algen, Pilze oder Pflanzen bzw. deren Wurzeln. Bodentiere sind im Rahmen eines Bodenmonitorings besonders gut geeignet, um als Messgröße eingesetzt zu werden, da sie sich u. a. durch die folgenden Eigenschaften auszeichnen (Kaufmann-Boll et al. 2022; VDI 2014):

- ▶ Bodentiere weisen eine enge Abhängigkeit von ihrem Lebensraum auf,
- ▶ übernehmen wichtige ökosystemare Funktionen,
- ▶ reagieren sensitiv gegenüber anthropogenen Stressoren,
- ▶ sind bereits Gegenstand verschiedener Langzeituntersuchungen,
- ▶ es liegen Kenntnisse zur Bestimmung und Ökologie verschiedener Bodentiergruppen bzw. Arten vor und
- ▶ für einige Bodentiergruppen wurden bereits grundlegende Standard-Untersuchungsmethoden entwickelt.

Die Auswahl geeigneter Tiergruppen für ein Monitoring kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen (VDI 2014):

- a) **Praktikabilität:** Kenntnisse zu Taxonomie und Ökologie einer Tiergruppe sowie Standardmethoden für die Datenerhebungen liegen vor; zudem sind Probenahme und Determination einfach zu handhaben.
- b) **Informationsgehalt:** Der Informationsgehalt ist ein Maß für die Möglichkeit, eine Zönose durch ökologische Gruppierungen und Differenzierungen der Arten zu gliedern und somit Habitatbedingungen und -veränderungen anzuzeigen. Der Informationsgehalt, den eine ausgewählte Tiergruppe aufweist, kann für verschiedene Landnutzungstypen (Grünland, Acker etc.) variieren.
- c) **Lebensform:** Bodentiere weisen gruppenspezifisch eher eine epigäische (Bodenoberfläche, Streuschicht) oder endogäische (Mineralboden) Lebensweise auf.
- d) **Ernährungstyp:** Bodentiergruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Ernährungstyps und nehmen somit unterschiedliche Positionen in den Nahrungsnetzen ein. Hierdurch sind sie in unterschiedlicher Art und Weise den Auswirkungen der Stressoren ausgesetzt.
- e) **Verfügbarkeit** von Experten und Expertinnen etc.

Aus diesen verschiedenen Kriterien wurde eine Matrix entwickelt (VDI 2014), die Hilfestellung bei der Auswahl der für ein Monitoring geeigneten Bodenorganismen bietet und die sich an den o. g. Kriterien orientiert (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Auswahlmatrix zur Identifizierung geeigneter Tiergruppen für Langzeituntersuchungen, verändert nach VDI (2014)

	Äcker			Grasland			Hecken / Wald			Praktikabilität
	zo	ma	mi	zo	ma	mi	zo	ma	mi	
epigäisch	Carabidae	Carabidae		Carabidae	Carabidae		Carabidae	Carabidae		günstig
	Araneae			Araneae			Araneae			
		Gastropoda			Gastropoda			Gastropoda		
	Opiliones			Opiliones			Opiliones			
	Staphylinidae		Staphylinidae	Staphylinidae		Staphylinidae	Staphylinidae		eher günstig	
	Diplopoda		Diplopoda	Diplopoda		Diplopoda	Diplopoda		eher ungünstig	
	Isopoda	Isopoda	Isopoda	Isopoda	Isopoda	Isopoda	Isopoda	Isopoda		
	Chilopoda		Chilopoda			Chilopoda				
endogäisch		Lumbricidae		Lumbricidae			Lumbricidae			günstig
		Collembolen		Collembolen			Collembolen			
	Nematoda	Nematoda		Nematoda	Nematoda		Nematoda	Nematoda		
		Oribatida	Oribatida		Oribatida	Oribatida		Oribatida	Oribatida	
	Gamasiden			Gamasiden			Gamasiden			
		Enchytraeidae	Enchytraeidae		Enchytraeidae	Enchytraeidae		Enchytraeidae	Enchytraeidae	
	Diptera-Larven		Diptera-Larven	Diptera-Larven		Diptera-Larven	Diptera-Larven		eher ungünstig	
	Coleoptera-Larven	Coleoptera-Larven		Coleoptera-Larven	Coleoptera-Larven		Coleoptera-Larven	Coleoptera-Larven	ungünstig	

Die Farben kennzeichnen verschiedene Informationsgehalte: grün = sehr hoch, blau = hoch, schwarz = hoch, allerdings nur für einzelne Arten, grau = niedrig. Ernährungstypen: zo = zoophag, ma = makrophytophag, mi = mikrophytophag.

Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Darüber hinaus ist Biodiversität ein Begriff, der lebensraum- und landschaftsspezifische sowie qualitative und quantitative Aspekte beinhaltet (siehe Aspekte zur Bewertung der Biodiversität).

Aspekte zur Bewertung von Biodiversität

- **Lebensraumspezifisch:** Lebensräume (Biotope) weisen eine typische Zusammensetzung von Arten (Struktur) auf, die aus den Standorteigenschaften (Bodenparameter, Klima, Relief etc.) und den Wechselbeziehungen zwischen den Organismen (z. B. Förderung und Konkurrenz) resultiert. Die Struktur beinhaltet sowohl Arten mit hoher Bindung an den Lebensraum (Kennarten) als auch solche ohne eine besondere Bindung (Begleiter). Das Vorkommen bestimmter Arten bzw. Artengruppen in einem Lebensraum kann somit wertgebend für einen bestimmten Lebensraum sein. Gleiche Arten können in einem anderen Lebensraum als wertmindernd gesehen werden (vgl. Lennartz 2003; Toschki et al. 2021).
- **Landschaftsspezifisch:** Biodiversitätsmerkmale sind eng an den biogeographischen Raum (Verbreitung) und die Bodenverhältnisse der Landschaft geknüpft. Damit verbunden sind wiederum anthropogen bedingte Biotopausprägungen und Strukturelemente. Aufgrund dieser Zusammenhänge sind neben lebensraumspezifischen Merkmalen auch landschaftsspezifische Ausbildungen von Biodiversität zu berücksichtigen (Rumohr et al. 2023; Seibold et al. 2019; Uhler et al. 2021).
- **Qualitativ:** Für den Wert (Erhaltungsziel) der Biodiversität ist nicht die reine Artenzahl von Bedeutung. Manche Lebensräume besitzen eine sehr hohe Wertigkeit und beherbergen typischerweise nur eine geringe Artenzahl (z. B. Hochmoore). Für die Ermittlung der Qualität ist vielmehr die lebensraumspezifische Zusammensetzung der typischen Arten von Bedeutung. So kann beispielsweise ein Lebensraum mit 30 Arten qualitativ hochwertig und schützenswert oder aber degradiert bzw. gestört sein. Grundlage für die Bewertung ist somit der Lebensraum und die speziell darin vorkommenden Arten, d. h. beispielsweise das Auftreten wertgebender Spezies oder Störzeiger sowie deren Funktionen im Ökosystem. Im Zuge der Klimaveränderungen unterliegen viele Lebensgemeinschaften einer strukturellen Veränderung. Dabei können bei insgesamt gleichbleibender Artenzahl ein Teil der Arten einer Tiergruppe von der Verände-

rung profitieren und zunehmen, andere jedoch gleichzeitig abnehmen (Fürst et al. 2023; Irmeler 2022).

- *Quantitativ*: Die Individuenzahlen von Bodentieren geben Auskunft über die Vitalität der Populationen von Arten oder Artengruppen. Individuenzahlen unterliegen normalen jahreszeitlichen Schwankungen sowie Veränderungen über die Jahre (Filser 2000). Die Individuenzahlen unterliegen dabei deutlich höheren Schwankungen als das generelle Vorkommen einer Art, was dazu führt, dass für die Qualitätsbewertung von Lebensräumen und Biodiversität zunächst die Präsenz und nachgeordnet die Individuenzahlen herangezogen werden sollten (Toschki 2008). Des Weiteren können z. B. in Grünländern die Gesamt-Individuenzahlen in nährstoffreicheren Lebensräumen gegenüber denen in nährstoffarmen höher ausfallen, was unterstreicht, dass hohe Individuenzahlen nicht zwingend mit Lebensraumqualitäten wie der Naturnähe assoziiert werden können (Toschki et al. 2021).

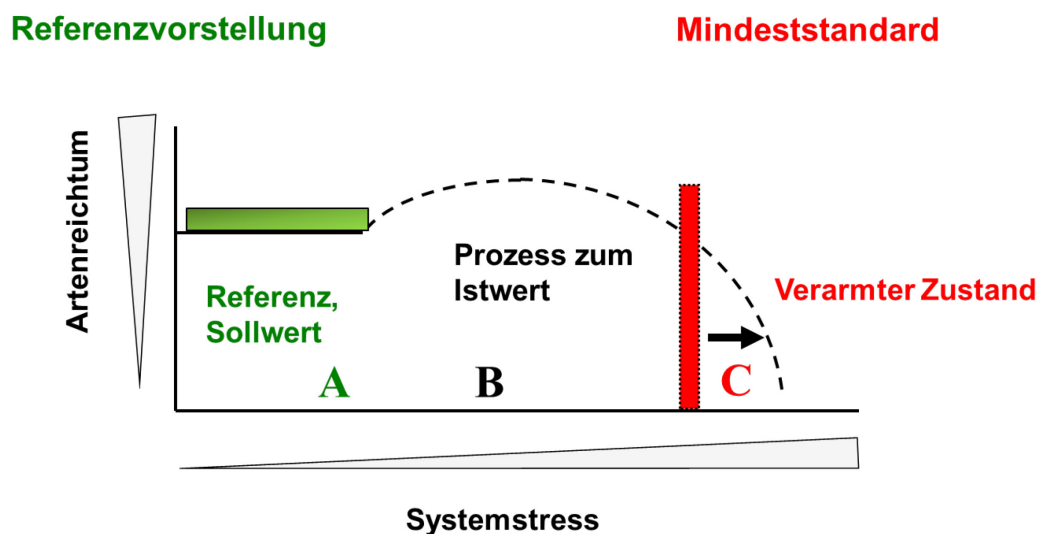
Hinzu kommt, dass verschiedene Stressoren gleichzeitig auf die Lebensgemeinschaften einwirken, wie die Nutzung bzw. Bewirtschaftung, der Klimawandel oder das aktuelle Wetter (Müller et al. 2023; Nabel et al. 2021; Rumohr et al. 2023). Daher ist bei einer Interpretation der Messdaten kaum zwischen den Auswirkungen der multiplen Stressoren zu unterscheiden.

Eine weitere Herausforderung betrifft die Bewertung der Bodengesundheit, wobei die Frage beantwortet werden muss, welcher Zustand der Lebensgemeinschaften als „gut“ zu bewerten ist und ab wann eine erhebliche Abweichung eintritt. Bei einer erheblichen negativen Veränderung sollten entsprechende Maßnahmen zur Erhaltung bzw. zur Verbesserung der Biotope umgesetzt werden. Für diese grundlegende Bewertung müssen lebensraum- und landschaftsspezifische Zielwerte definiert werden, die als Referenzzustände dienen können (vgl. Abbildung 7).

Ein zielführender Ansatz dazu wird in der FFH-Richtlinie verfolgt (Europäische Kommission 1992). In dieser werden Lebensräume anhand ihrer Artenzusammensetzung einem Erhaltungszustand (A: günstig, B: unzureichend, C: schlecht) zugeordnet. Ist der Erhaltungszustand günstig, ist auch die Qualität der Biodiversität als günstig einzustufen, d. h. innerhalb des Lebensraums sind die wertgebenden Arten präsent und in angemessener Populationsgröße enthalten. Im Fall, dass die Artenzahl zwar hoch, aber die Artenzusammensetzung von Störzeigern geprägt ist, wäre der Erhaltungszustand entsprechend abzuwerten. Die Biodiversität innerhalb einer Region kann dann über das räumliche Nebeneinander der Lebensräume in den entsprechenden Erhaltungszuständen bewertet werden.

Für diesen Ansatz ist es somit erforderlich, Referenzen für die unterschiedlichen Lebensraumtypen zu erstellen, anhand derer der Erhaltungszustand basierend auf ausgewählten taxonomischen Gruppen bewertet und eingestuft werden kann (BMUV 2023; Toschki et al., 2021).

Abbildung 7: Ableitung von Schwellenwerten von Referenzzuständen: A, B und C entsprechen verschiedenen Erhaltungszuständen in Bezug auf den Systemstress bzw. eine schädliche Bodenveränderung (aus Toschki et al. 2021)



Quelle: eigene Darstellung, gaia e. V.

7.3 Indikator „Regenwurmfauna“

Der Indikator „Regenwurmfauna“ wird für die zukünftige Anwendung auf nationaler Ebene vorgeschlagen. Er beinhaltet die Entwicklung der mittleren Abundanz (Individuenzahl) sowie der Artenzahl unterschiedlicher Lebensformtypen der Regenwurmfauna an Messstandorten auf Acker- und Grünlandböden. Im Folgenden sind die für die praktische Umsetzung des Indikators erforderlichen Angaben zusammengestellt. Die aktuell mögliche Umsetzung des Indikators „Regenwurmfauna“ auf Bundesebene wird anhand einer Fallstudie mit Daten aus den Bundesländern Bayern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein dargestellt. Ein Weg für eine langfristige Etablierung und Verstetigung des Indikators wird in Abschnitt 7.3.7 aufgezeigt.

7.3.1 Herleitung und Begründung

Bedeutung der Regenwürmer im Nahrungsnetz

Regenwürmer zählen zur Makrofauna des Bodens und können in Deutschland bis zu 30 cm (eine seltene Art bis 60 cm) lang werden (Sims & Gerard 1999; VDI 2014). Ihre Biomasse ist im Vergleich zu anderen Bodentiergruppen standortabhängig sehr hoch und kann durchschnittlich zwischen etwa 40-400 g/m² x 30 cm Tiefe liegen (Langer et al. 2012). Damit haben Regenwürmer eine besondere Bedeutung als Nahrungsquelle für andere Organismen (zum Beispiel Vögel, Säuger). Regenwürmer sind an der Zerkleinerung bzw. am Abbau von pflanzlichem Material beteiligt, durchmischen und durchlüften den Boden, unterstützen die Bildung von Ton-Humus-Komplexen und fördern hierdurch die Wasserhaltekapazität (Edwards & Shipitalo 1998; Lavelle et al. 1997; Petersen & Luxton 1982). Durch ihre Lebensweise fördern sie somit auf vielfältige Art und Weise die Bodenfruchtbarkeit und werden als „ecosystem engineers“ bezeichnet. Die erzielten Ökosystemleistungen dieser Gruppe sind weder durch andere Tiergruppen noch durch gezielte menschliche Maßnahmen vollumfassend substituierbar (vgl. Ehrmann 2012). Innerhalb der Regenwürmer lassen sich drei verschiedene ökologische Gruppen bzw. Lebensformen unterscheiden: Die endogäisch lebenden Mineralschichtbewohner, die epigäisch lebenden Streuschichtbewohner und die anecischen Tiefgräber (Bouché 1977; Sims & Gerard 1999; VDI 2014).

Diese drei Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Morphologie und Lebensweise. Eine neue detaillierte Klassifikation nach Capowiez et al. (2024) aus jüngster Zeit gilt es hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit in der Zukunft zu prüfen. Es muss jedoch angemerkt werden, dass Regenwürmer in Deutschland im Vergleich zu anderen Bodentiergruppen relativ artenarm vorkommen (Beylich & Graefe 2010). Die getrennte Erfassung von juvenilen und adulten Tieren lässt, neben Hinweisen zum Regenwurm-Bestand, Rückschlüsse auf die Vitalität der Populationen zu.

Wirkung klimatischer Faktoren auf die Regenwurm-Lebensgemeinschaften

Regenwürmer reagieren sensibel auf den Einfluss verschiedener klimatischer Faktoren, wie insbesondere auf eine Veränderung der Feuchteverhältnisse oder der Temperatur (Berry & Jordan 2001; Daniel 1990; Doube & Styan 1996; Ehrmann 2012; Ehrmann et al. 2002; Gerard 1967; Nordström & Rundgren 1974; Singh et al. 2019). Dabei verfügen sie über artspezifische Anpassungen an den Lebensraum oder Reaktionen auf die spezifische Belastungssituation. Regenwürmer vermeiden meist niedrige Luftfeuchtigkeit und weisen an trockeneren Standorten deutlich niedrigere Besiedlungszahlen auf als in feuchteren Lebensräumen. Zudem verfolgen sie zur Vermeidung von trockenheitsbedingten Verlusten spezielle Anpassungsstrategien, d. h. sie wandern vertikal in tiefere Bodenschichten oder horizontal in feuchtere Bereiche. Des Weiteren werden spezielle Höhlungen („Kokons“) geschaffen, die die Regenwürmer durch eine Schleimschicht vor Austrocknung schützen (Ehrmann 2012). Regenwürmer sind nur bedingt frostresistent, so dass sie strategisch frostfreie Standorte aufsuchen. Populationen können sich durch das Überleben von Dauerstadien, wie Eier oder Kokons, nach Kälte- oder Trockenstress wieder erholen. Wärmere frostfreie Winter werden dabei voraussichtlich zu einer erhöhten Aktivität von Regenwürmern führen (Ehrmann 2012).

Kenntnisstand

Im Vergleich zu anderen Bodentiergruppen ist über die Regenwürmer mittlerweile viel zu Habitatansprüchen, Verbreitung der Arten und die Lebensweise bekannt (Ehrmann 2012; Jänsch et al. 2013; Toschki et al. 2021, u. v. a.). Für die Erfassung dieser Tiergruppe existieren standardisierte Probenahmemethoden (ISO-Guideline 23611-1), und es wurde eine Rote Liste der Regenwürmer Deutschlands erstellt (Lehmitz et al. 2016). Des Weiteren existieren bereits erste Ableitungen notwendiger Schwellenwerte für die Beurteilung von Regenwurmbeständen von Beylich & Graefe (2010) sowie von Walter & Burmeister (2019). Zudem wurden die Arten- und Individuenzahlen der Regenwürmer im Rahmen des EU-Projekts „ENVASSO“ (Environmental Assessment of Soil for Monitoring) als Indikatoren für ein Monitoring der Bodenbiodiversität empfohlen (Bispo et al. 2009).

Zusammenfassung

Entsprechend der Matrix zur Auswahl von Indikatorgruppen für Langzeituntersuchungen nach VDI (2014) (vgl. Abbildung 6) sind die Regenwürmer als Vertreter für die endogäischen bzw. makrophytophagen Tiergruppen als gut geeignet für ein Bodenmonitoring einzustufen. Regenwürmer werden bereits im Rahmen der BDF in einigen Bundesländern untersucht und somit liegen bereits entsprechende Erfahrungen aus Langzeitstudien vor. Die Anpassungen der Regenwürmer an Trockenstress sowie ihre Vermeidungsstrategien bei hohen bzw. frostigen Temperaturen zeigen, dass sie empfindlich auf klimatische Änderungen reagieren.

Aus den genannten Gründen ist es sinnvoll, die Entwicklungen der Individuen- und Artenzahlen der Regenwürmer als Indikatoren zu verwenden. Ein Monitoring der Individuen- und Artenzahlen bietet die Möglichkeit, langfristige Veränderungen dieser Messgrößen innerhalb der untersuchten Standorte und Standorttypen zu dokumentieren. Um bundesweit repräsentative Aussagen zu den Bestandsentwicklungen treffen zu können, ist jedoch eine Erweiterung und Standardisierung der bestehenden Bodenmonitoring-Programme erforderlich. Eine bundesweit ange-

legte, räumlich und zeitlich repräsentativ angelegte Langzeituntersuchung der Regenwürmer würde zudem das Wissen um Standortansprüche einzelner Arten sowie charakteristische Artenzusammensetzungen vergrößern. Dies würde eine zukünftige Erweiterung der Datenauswertungen ermöglichen, die eine stärkere Berücksichtigung der Struktur der Regenwurm-Zönosen beinhaltet.

7.3.2 Methodische Herangehensweise

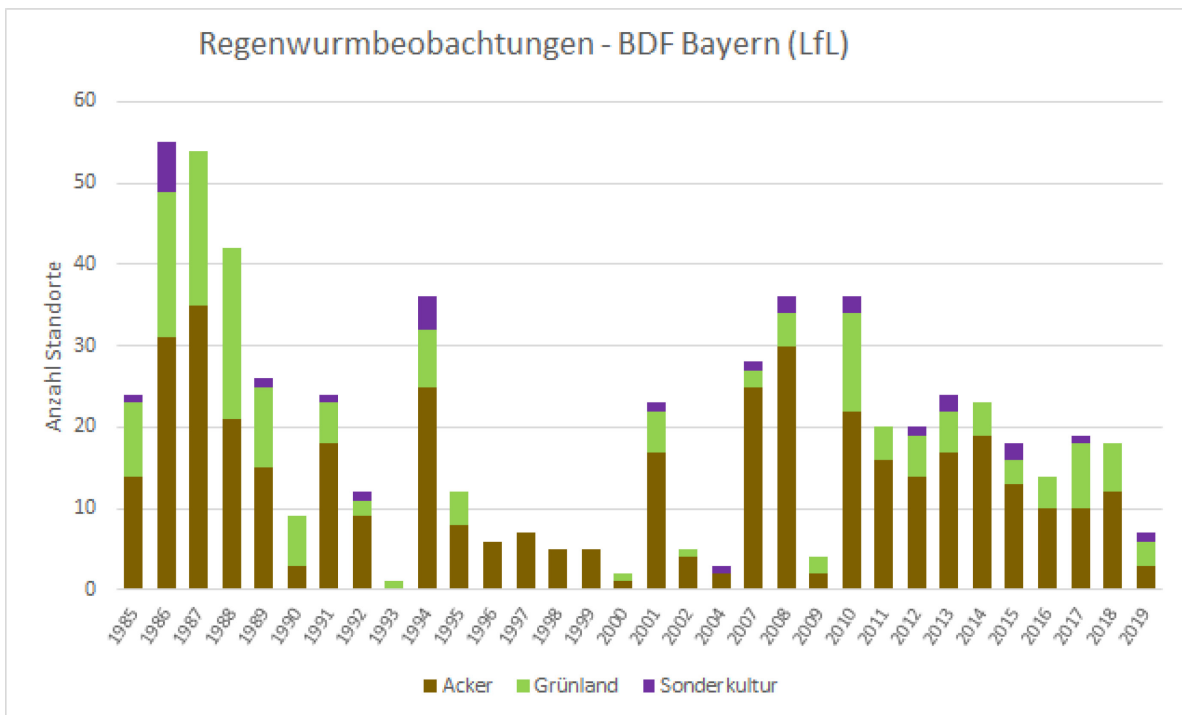
Für die Beprobung von Regenwürmern liegen die unterschiedlichen Standards DIN EN ISO 23611-1 und DIN ISO 11268-3 vor. Zudem kommen weitere Methoden in der Praxis zur Anwendung. Die verschiedenen Methoden unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der Art und Menge des chemischen Extraktionsmittels, des Volumens bzw. der Fläche des entnommenen und beprobten Bodens, der Reihenfolge der kombinierten Extraktionsverfahren, der Anzahl der Probenahmen sowie der Konservierungsflüssigkeit. Diese methodischen Unterschiede spiegeln sich auch in den jeweiligen Praktiken der Länder wider (s. u.).

In der Flächenkulisse der BDF werden in verschiedenen Bundesländern seit den 1980er bzw. 1990er Jahren Erhebungen zu Regenwürmern durchgeführt; die umfangreichsten davon in Bayern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Nachfolgend werden die Beprobungen und dabei verwendeten Methoden in den unterschiedlichen Ländern vorgestellt.

In *Bayern* werden seit 1985 von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) regelmäßig Regenwürmer auf insgesamt 121 BDF (90 Ackerflächen, 24 Grünländer, 7 Flächen mit sonstiger Nutzung) untersucht. Die Erfassung erfolgte 1985-1988, 1989-1999, 2000-2009 und 2010-2019 in vier Kampagnen. Daten wurden vollständig bis 2018 übermittelt und in die Auswertung eingebunden. Hinterlegte Daten von 2019 sind nicht vollständig und müssen zukünftig ergänzt werden. Einzelne BDF wurden über mehrere Jahre jährlich beprobt, um kurzfristige Populationsschwankungen von langfristigen Trends zu differenzieren. Eine Übersicht ist in Abbildung 8 dargestellt. Von 1985 bis 2009 erfolgte die Beprobung ausschließlich mit einer Austreibungsmethode (Formalin), die ab 2010 durch eine sich anschließende Handauslese innerhalb derselben Fläche bzw. in einer Teilfläche ergänzt wurde. Eine Auswertung der Methoden-Effektivität ergab, dass auf Äcker im Mittel nur etwa 25 % der Individuen durch die Austreibungsmethode erfasst werden und ein Großteil erst durch die Handauslese festgestellt wird. Absolute Bestandsbeurteilungen der Individuenzahlen oder Biomassen lassen somit nur die Daten, die seit 2010 erhoben wurden, zu.

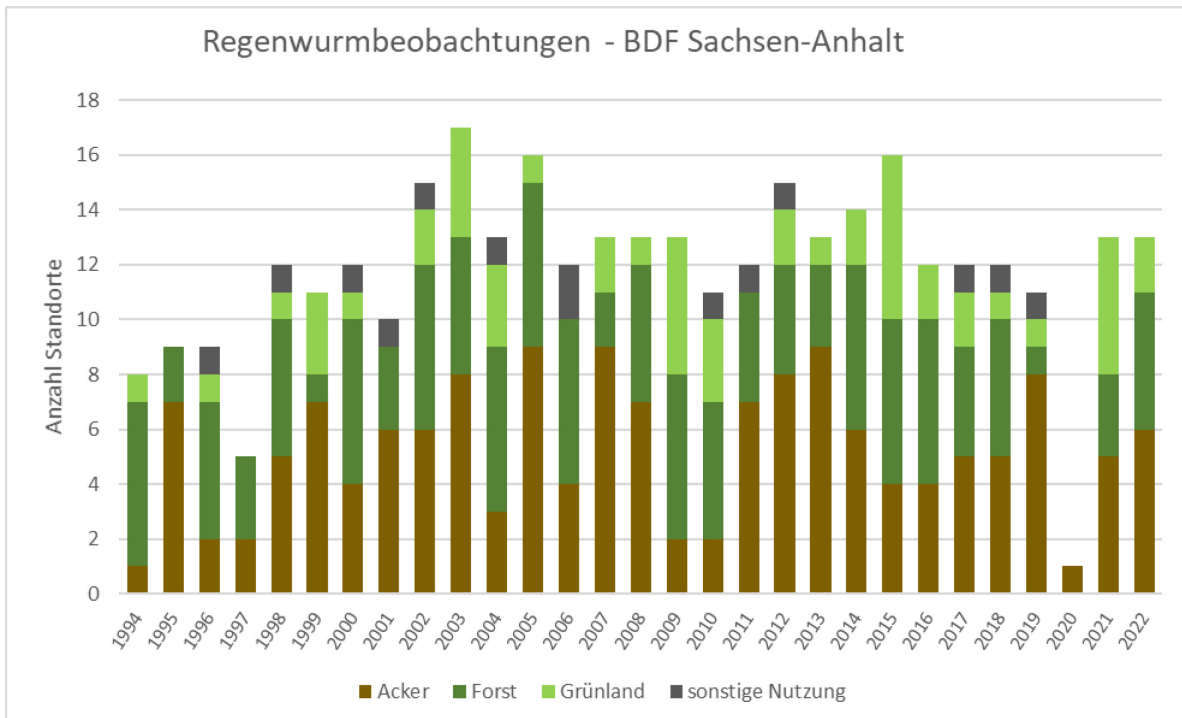
In *Sachsen-Anhalt* werden seit 1994 jährlich auf 70 BDF (32 Ackerflächen, 24 Forste, 11 Grünländer, 3 Flächen mit sonstiger Nutzung) Regenwurmdaten erhoben. Die Zahl der untersuchten Landnutzungstypen in den einzelnen Jahren ist in Abbildung 9 dargestellt. Als Methode wird hier eine Kombination von Austreibung und Handauslese in Anlehnung an DIN EN ISO 23611-1 und DIN ISO 11268-3 angewendet. Im Unterschied zur Vorgabe aus der ersteren Standardmethode wurden auf manchen Flächen zunächst die Tiere mit Formalin ausgetrieben und im Anschluss per Hand nach Regenwürmern durchsucht.

Abbildung 8: Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Bayern



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

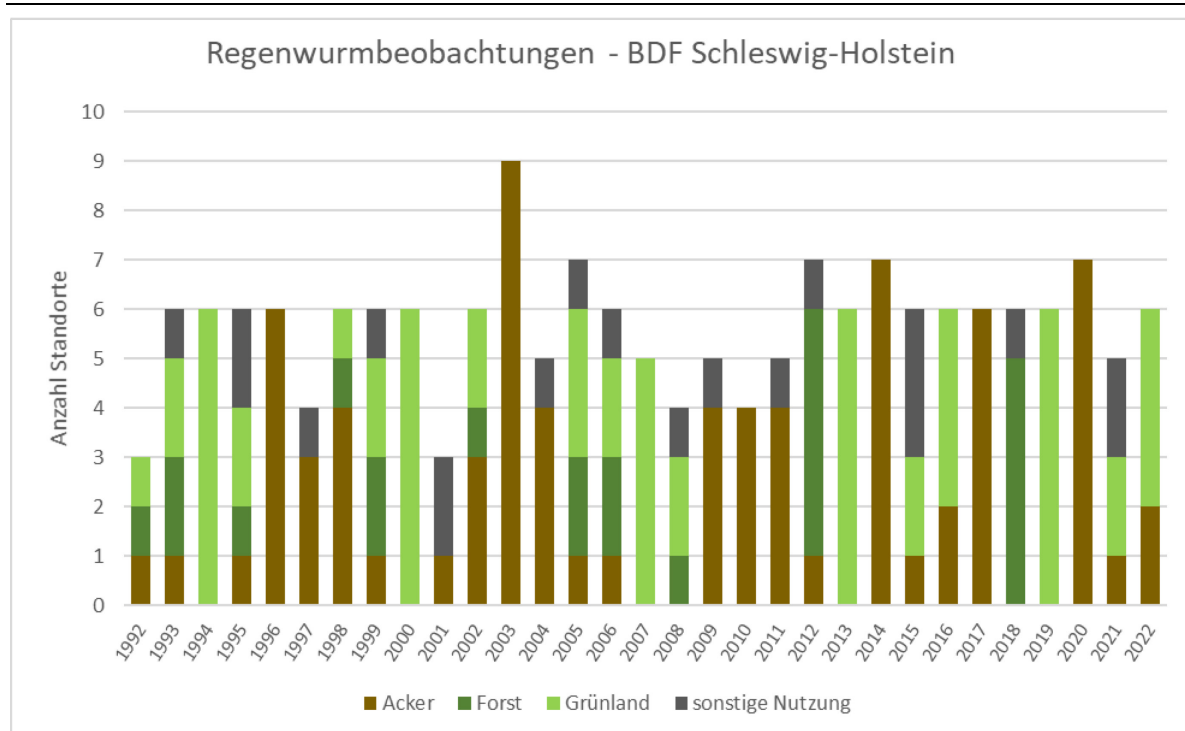
Abbildung 9: Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Sachsen-Anhalt



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

In *Schleswig-Holstein* werden seit 1992 jährlich auf 39 BDF (16 Ackerflächen, 5 Forste, 13 Grünländer, 5 Flächen mit sonstiger Nutzung) Regenwurmdaten erfasst. Die Anzahl der beprobten Standorte mit Angaben zu den Landnutzungstypen in den unterschiedlichen Jahren ist in Abbildung 10 dargestellt. Für die Erfassung werden zwei verschiedene Methoden parallel angewendet. Die erste Methode beruht auf einer Handauslese, wobei die etwaig übersehenen Tiere anschließend noch in einer Kempson-Apparatur ausgetrieben werden. Daneben wird eine zweite Methode angewendet, die auf einer Formalin-Austreibung beruht. Da die Methoden nebeneinander angewendet werden und die Effektivität der jeweiligen Methoden in keinem vergleichbaren Rahmen liegen, ist eine Kombination der Ergebnisse zur Ableitung von Gesamtbundanz pro Quadratmeter nicht möglich. Für die Indikatorberechnung werden somit nur die Daten der Handauslese mit anschließender Kempson-Austreibung verwendet.

Abbildung 10: Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Schleswig-Holstein

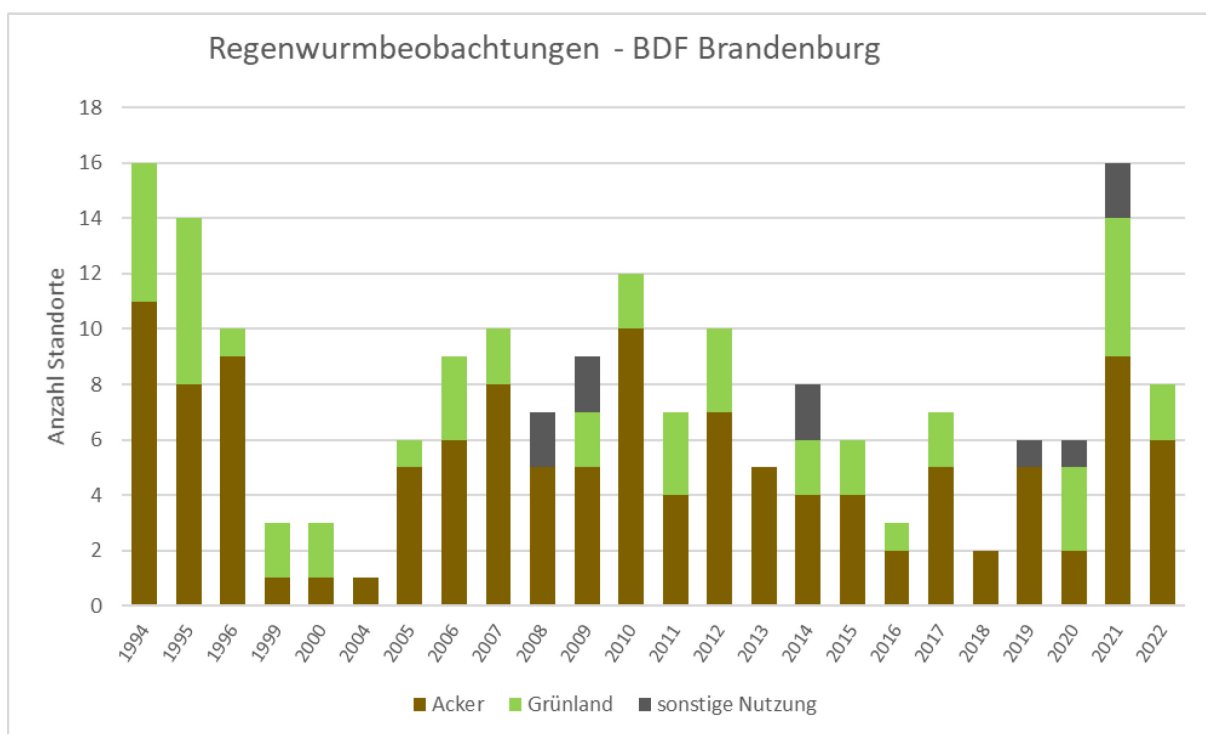


Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

In *Brandenburg* werden auf insgesamt 31 BDF (22 Ackerflächen, 7 Grünländer, 2 Flächen mit sonstiger Nutzung) Regenwurmdaten erfasst. In Abbildung 11 ist das Beprobungsschema für die einzelnen Jahre dargestellt. Die Erfassung der Lumbriciden erfolgt dabei nach DIN EN ISO 23611-1:2018. Die Probestellen werden entsprechend den Vorgaben 20 cm tief ausgehoben und händisch auf Lumbriciden durchsucht. Im Anschluss wird in das ausgehobene Loch Formalin gegeben (Formalinaustrieb), um tiefgrabende Tiere zu erfassen. Alle Tiere werden getrennt nach der jeweils genutzten Methode konserviert, bestimmt und gewogen.

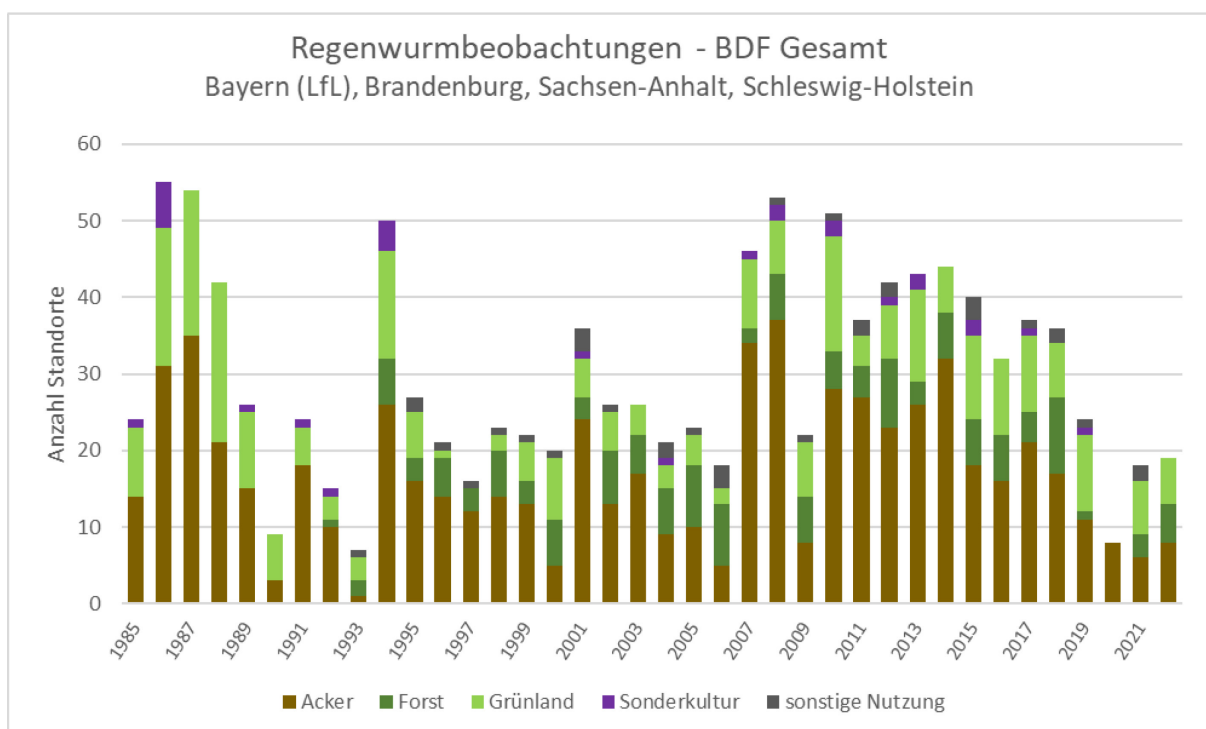
Für die Einrichtung der BDF in den verschiedenen Bundesländern wurde auf Repräsentativität hinsichtlich Landschaft, Boden, Nutzung und Belastungen geachtet (Barth et al. 2000, 2022). Bei der gemeinsamen Betrachtung der Standorte über die vier Bundesländer hinweg zeigt sich zudem in den meisten Jahren insbesondere für die beiden Landnutzungstypen Grünland und Acker eine repräsentative Berücksichtigung (Abbildung 12).

Abbildung 11: Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren im Bundesland Brandenburg



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Abbildung 12: Anzahl der beprobten BDF in den Untersuchungsjahren für die betrachteten Bundesländer



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Fazit über die Nutzbarkeit der Ergebnisse aus den verschiedenen Bundesländern für die Ableitung eines bundesweiten Regenwurm-Indikators

Durch den Einsatz unterschiedlicher Erfassungsmethoden in den Bundesländern sind die erhobenen Daten nur eingeschränkt vergleichbar. So ist beispielsweise der ermittelte Abundanzwert von Formalinaustreibungen nicht mit dem von Handauslesen vergleichbar, da durch die alleinige Austreibung meist deutlich weniger Tiere und nicht die vollständige Lebensgemeinschaft erfasst werden. Es ist auch ein Unterschied zwischen den Ergebnissen zu erwarten, wenn die Reihenfolge von Austreibung und Handauslese verändert wird. Im Fall von Schleswig-Holstein werden die Methoden nebeneinander durchgeführt, was für eine Zusammenschau der Ergebnisse nicht geeignet ist, wohl aber für einen Methodenvergleich. Unter der Voraussetzung, dass mit den jeweiligen Methoden eine repräsentative Stichprobe erzielt wird, können methodenbezogene Trends (z. B. prozentuale Zu- oder Abnahmen) auf den jeweiligen Flächen berechnet und dargestellt werden.

Für die Ableitung von Indikatoren ergeben sich folgende Konsequenzen:

Die Erfassung des **Zustands von Bodenbiodiversität** ist durch den Einsatz der unterschiedlichen Methoden sowie die fehlende Repräsentativität der wesentlichen Lebensraumtypen derzeit nur sehr eingeschränkt für die Landnutzungstypen Acker und Grünland möglich. Auch müsste zunächst erarbeitet werden, welche Lebensraumtypen für die Erfassung der Bodenbiodiversität als wesentlich gelten müssen (vgl. BMUV 2023). Auch die **Bewertung der Bodengesundheit** erfordert zunächst eine Referenz („normal operating range“) für die verschiedenen Lebensraumtypen, um nachfolgend etwaige Abweichungen hiervon nachweisen und bewerten zu können. Die Entwicklung von Referenzen erfordert eine genaue Beschreibung der Abundanzen und Artenzusammensetzungen in einem Lebensraum. Eine vollumfassende Vergleichbarkeit der Daten, die auf einer einheitlichen Erfassungsmethodik basiert, wäre somit die Grundlage für die Ableitung dieser Referenzwerte. Diese Vergleichbarkeit ist, wie oben beschrieben, nicht vollständig gegeben, dennoch soll in Abschnitt 7.3.4 A: *Darstellung absoluter Veränderungen* exemplarisch eine Verknüpfung und gemeinsame länderübergreifende Darstellung vorgestellt werden. Neben einer Abschätzung von Veränderungen können hiermit auch absolute Häufigkeiten in verschiedenen Landnutzungstypen quantifiziert und sichtbar gemacht werden.

Die **Überwachung der Veränderungen** kann derzeit bereits ergänzend über relative Vergleiche der zu- und abnehmenden Trends an den einzelnen Beobachtungsflächen erfolgen. Auch wenn Referenzen derzeit noch nicht entwickelt sind, lassen sich Entwicklungen der Individuen- und Artenzahlen der Regenwürmer konkret darstellen und auf übergeordneten Skalenebenen, z. B. innerhalb eines Bundeslandes, zusammenfassen. Diese Trends lassen sich zudem zum **Aufzeigen von Risiken** nutzen. Diese Form der Indikation wird in Abschnitt 7.3.5 B: *Forschungsansatz – Vergleich der BDF-spezifischen zeitlichen Veränderung von Abundanz und Biomasse* dargestellt.

7.3.3 Datenquelle

Als Datenquelle für die Berechnung des Indikators stellen die Betreiber der BDF der Länder aus den Daten der untersuchten Flächen Datensätze zusammen, die in sich homogen (z. B. vollständige Beprobungskampagnen, repräsentative Probenahmen) und für die Belange der Indikatorerstellung geeignet sind. Aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen der verschiedenen Bundesländer und der daraus resultierenden, teilweise recht heterogenen Beprobungsstrategien in Kampagnen, Parallelen und Verdichtungen zur Beantwortung von Einzelfragen etc. ist diese gezielte Vorauswahl der Betreiber dringend notwendig. Die Datenauswahl für die Ausführung der Fallstudie wurde hier durch die Forschungsnehmenden durchgeführt.

Die Datensätze beinhalten die auf einen Quadratmeter berechneten Individuenzahlen (adulte und juvenile Individuen) für die nachgewiesenen Regenwurm-Arten (bzw. taxonomischen Gruppen, Arten, Gattungen, Familien etc.) einer oder mehrerer repräsentativer Beprobungen für ein Kalenderjahr (z. B. Beprobung im Frühjahr und Herbst) sowie die den Datenerhebungen zugrundeliegenden Methoden. Für das Monitoring sowohl der Individuen- als auch der Artenzahlen ist es notwendig, auch Erhebungen ohne Funde zu protokollieren und dem Datensatz beizufügen.

Daraus werden, den Zielsetzungen entsprechend, mittlere Individuen- (arithmetischer Mittelwert) und Artenzahlen (Summen) der Regenwürmer pro BDF und Jahr bzw. entsprechende Trends errechnet. Alternativ können von den Daten erhebenden Stellen direkt Mittelwerte für Individuen- und Artenzahlen der Regenwürmer pro BDF und Jahr bereitgestellt werden.

7.3.4 A: Darstellung absoluter Veränderungen

Für die nachfolgenden Berechnungen und Ergebnisdarstellungen wurden Daten von Acker- und Grünlandstandorten der Bundesländer Bayern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein verwendet (vgl. Abschnitt 7.3.2). Um einen Vergleich aufgrund unterschiedlicher Methodik zu ermöglichen, wurden aus Bayern ausschließlich die Daten berücksichtigt, die seit dem Jahr 2010 erhoben wurden. Aus den Daten, die aus Schleswig-Holstein stammen, wurden nur die der Handsortierung und Kempson-Austreibung verwendet; die hier zusätzlich erhobenen separaten Daten auf Basis der Formalinaustreibung wurden nicht in die Berechnungen miteinbezogen. Aus Brandenburg und Sachsen-Anhalt wurden alle erhobenen Daten verwendet. Von den Betreibern in Brandenburg und Schleswig-Holstein wurden Daten zu Arten für adulte und juvenile Individuen übermittelt, aus Sachsen-Anhalt und Bayern liegen nur Daten zu den adulten Tieren vor. Die Anzahl der juvenilen Individuen wurde hier dem Datensatz separat als Summe je Erfassungsdatum zugefügt.

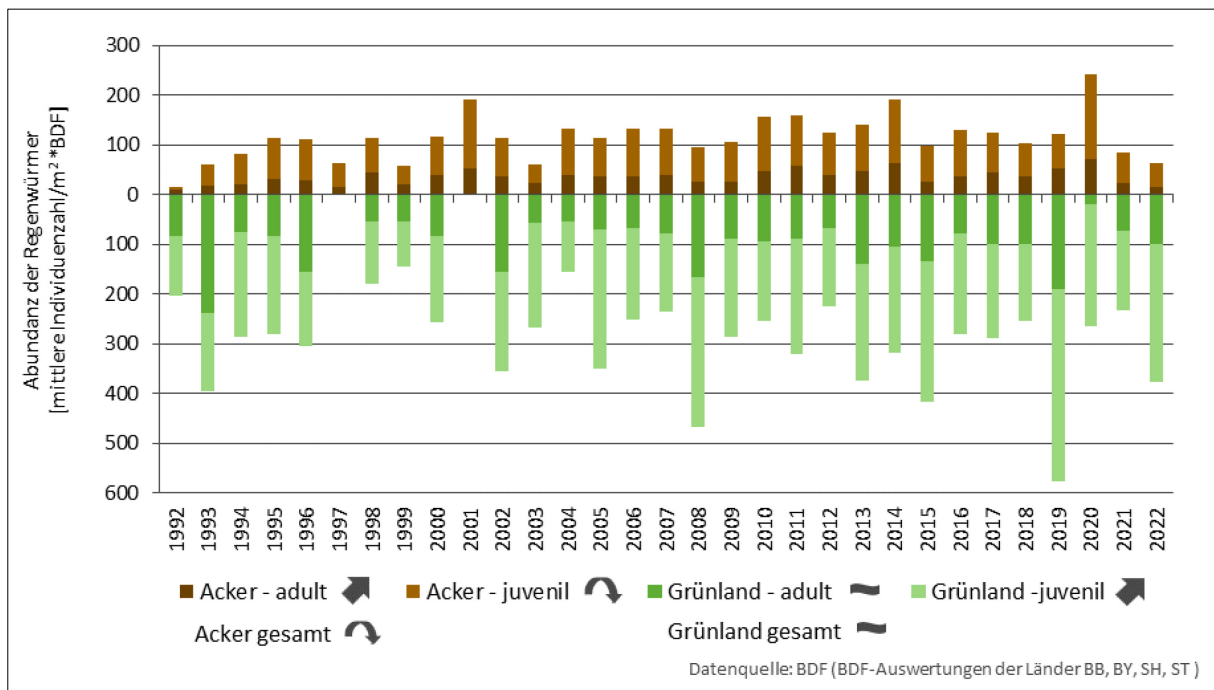
7.3.4.1 Teilindikator Regenwurmfauna – mittlere Abundanz

Schritt 1: Für jede BDF wird auf der Basis der Wiederholungen (Anzahl Proben/Erfassungstermin und Anzahl Erfassungen im Jahresverlauf) ein quadratmeterbezogener Mittelwert der Individuenzahl/BDF*Jahr berechnet. Diese mittlere Individuenzahl wird für die einzelnen Jahre sowohl für juvenile als auch adulte Tiere separat dargestellt.

Schritt 2: Auf der Grundlage der gemittelten Individuenzahlen aus Schritt 1 wird über die verschiedenen BDF hinweg (alle Standorte eines Landnutzungstyps) ein Mittelwert der Individuenzahlen gebildet (Abbildung 13).

Trends werden statistisch mit Hilfe des R Core Teams Pakets ermittelt (Lorenz & Kevork 2022) und wie die Berechnung des Indikators im Daten-Factsheet, das dem UBA vorgelegt wurde, dokumentiert.

Abbildung 13: Indikator Regenwurmfauna: Mittlere Individuenzahl/m²*BDF der Jahre 1992-2022, für adulte und juvenile Regenwürmer sowie deren Summe (Gesamt) aller beprobten BDF der Länder Bayern (Lfl, Datenerhebungen 2010-2019), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein für die Landnutzungstypen Acker und Grünland

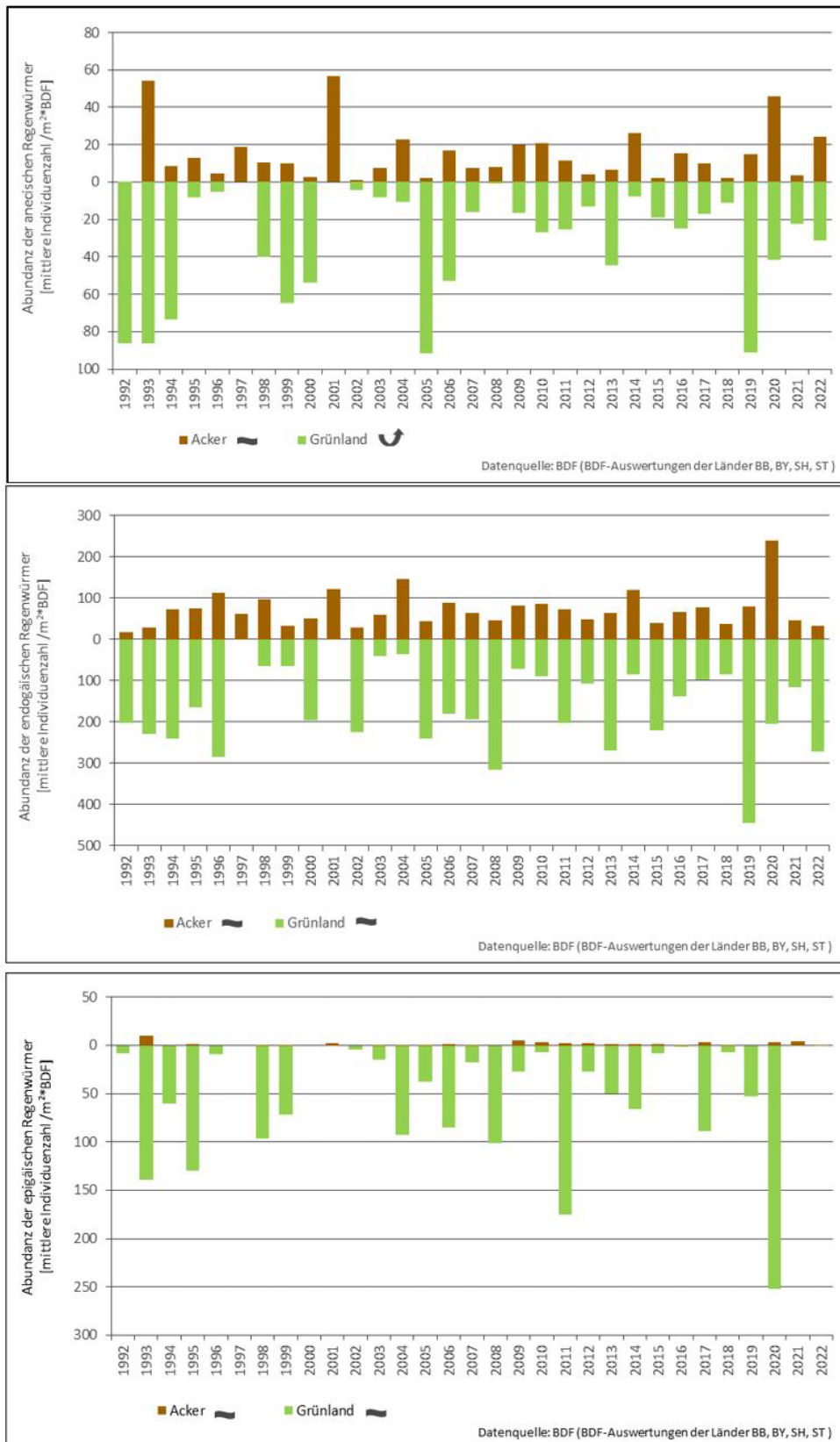


Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Über alle Ackerflächen hinweg zeigen die Individuenzahlen der juvenilen und adulten Regenwürmer (Indikator "Acker -Gesamt") einen zunächst zunehmenden und dann abnehmenden Trend der Individuenzahl. Dieses Muster wird hauptsächlich durch die juvenilen Tiere bestimmt, die ebendiesen Trendverlauf zeigen. Adulte Tiere weisen an Ackerstandorten hingegen über die Jahre hinweg einen steigenden Trend auf (Abbildung 13). An Grünlandstandorten ist nur für juvenile Tiere ein steigender Trend zu verzeichnen, während sowohl für die adulten Regenwürmer als auch für die Gesamt-Individuenzahl keine Veränderung festgestellt werden kann (Abbildung 13). Die Symbole für die Trendbeschreibung sind in Abbildung 3 erläutert.

Die oben beschriebene Vorgehensweise wird in einem weiteren Schritt auf die drei ökologischen Gruppen (bzw. anecische, endogäische oder epigäische Lebensformen, Abbildung 14), die einen direkten Bezug zu klimatischen Bedingungen aufweisen (siehe Abschnitt 7.3.1), sowie auch separat für die einzelnen Bundesländer (Abbildung 15) angewendet.

Abbildung 14: Teilindikator “Regenwurmfauna Lebensformen”: Oben: Anecische Arten, Mitte: Endogäische Arten, unten: Epigäische Arten; mittlere Abundanz/m² aller beprobten BDF der Länder Bayern (Lfl, Datenerhebungen 2010-2019), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein für die Landnutzungstypen Acker und Grünland

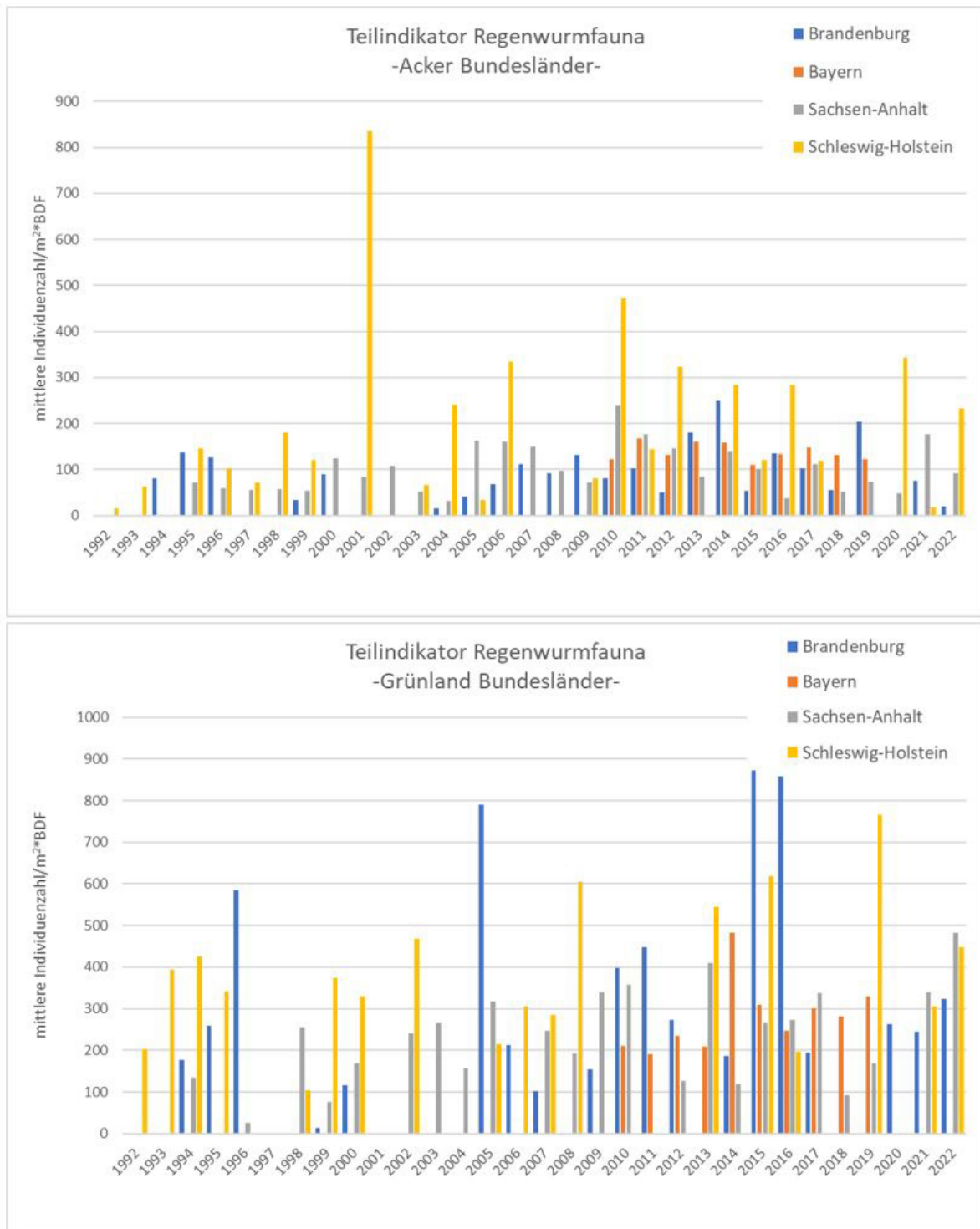


Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Hinsichtlich der Lebensformtypen zeigt sich für alle drei Lebensformtypen für den Nutzungstyp Acker kein statistisch signifikanter Trend über die Jahre. Für den Nutzungstyp Grünland zeigen nur die anecischen Lebensformen einen Trend, der zunächst sinkende Zahlen und dann wieder ansteigende Zahlen anzeigt. Da nur adulte und eindeutig bis zur Art bestimmte Tiere einer Lebensform zugeordnet wurden, kann diese Analysen nicht eins zu eins mit denen der Gesamtabundanz, die juvenile Tiere beinhaltet, verglichen werden. Trends in der Gesamtabundanz, die durch juvenile Tiere angezeigt werden, sind hier für die Lebensformtypen somit nicht zu erwarten. Der für die einzelnen Lebensformtypen fehlende steigende Trend auf Ackerstandorten weist darauf hin, dass der o. g. Trend der Gesamtabundanz nicht auf eine der Lebensformen allein zurückzuführen ist, sondern über alle Lebensformen hinweg entsteht.

Werden die mittleren Individuenzahlen separat für die einzelnen Bundesländer dargestellt, ergibt sich ein heterogenes Bild (vgl. Abbildung 15). Dies ist u. a. in der heterogenen Beprobung an den unterschiedlichen Standorten/Landnutzungstypen in den verschiedenen Jahren begründet. Für die einzelnen Bundesländer weisen sowohl die Grünland- als auch die Ackerstandorte größere Lücken bei der Datenerhebung auf. Diese Lücken entstanden teilweise durch eine Beprobung in Form von landesspezifischen Kampagnen oder durch das zeitweise Aussetzen der Untersuchungen. Auf eine Trendanalyse der Individuenzahlen auf der Basis der Daten der einzelnen Länder wurde aufgrund der heterogenen Datenstruktur an dieser Stelle verzichtet.

Abbildung 15: Teilindikator “Regenwurmfauna Bundesländer”: Oben: Landnutzungstyp Acker, unten: Landnutzungstyp Grünland; mittlere Abundanz/m², getrennt dargestellt für die BDF der Länder Bayern (LfL, Datenerhebungen 2010-2019), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



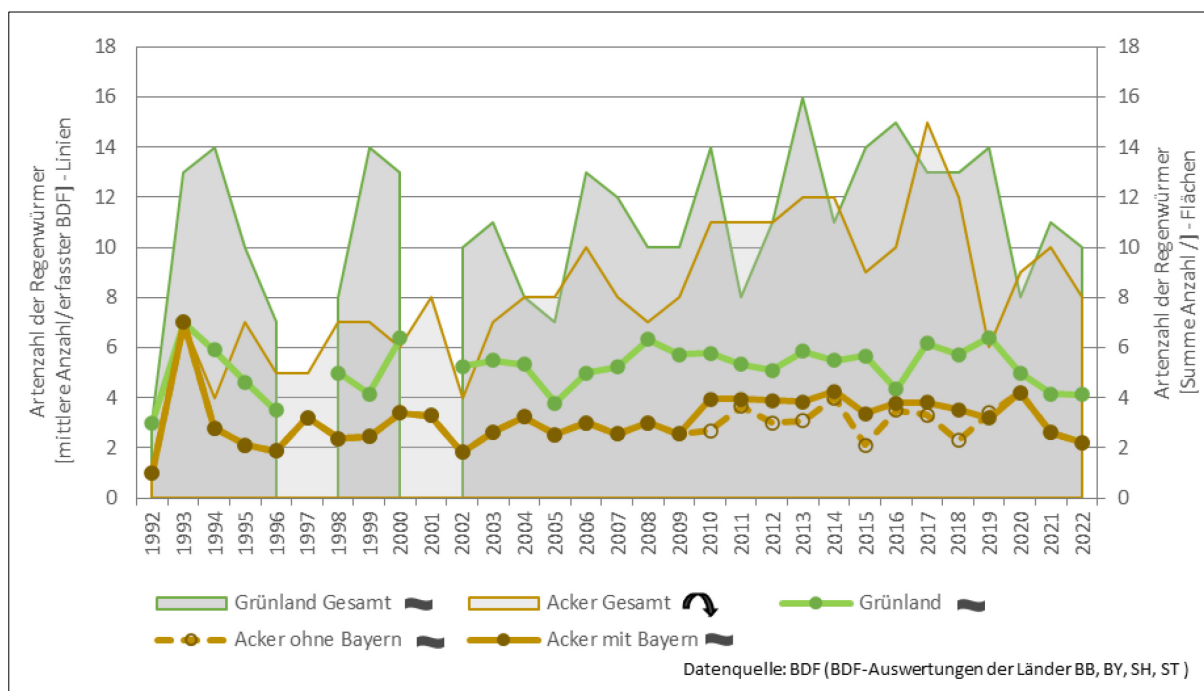
Quelle: eigene Darstellung, gaia e. V.

7.3.4.2 Teilindikator Regenwurmfauna – mittlere Artenzahl

Schritt 1: Die Betreiber übermitteln für jede Regenwurm-Art die Summe der Standorte, an der sie nachgewiesen wurde. Aus dieser Summe und der entsprechenden Anzahl an beprobten BDF im jeweiligen Jahr wird die mittlere Artenzahl/erfasster BDF ermittelt und dargestellt (Abbildung 16). In diese Berechnung werden nur adulte und bis zur Art bestimmbare Individuen einbezogen.

Schritt 2: Neben der mittleren Artenzahl pro BDF in Schritt 1 wird zum Vergleich auch die Gesamtartenzahl über alle Standorte je Landnutzungstyp mitgeführt. Dieser Wert wird aus der Summe der Arten über alle erfassten BDF errechnet. Der erste Wert spiegelt somit die Artenzahl wider, mit der bei einer Beprobung eines Standortes zu rechnen ist. Die Gesamtartenzahl zeigt hingegen an, ob sich die Artenzahl insgesamt, d. h. über alle Länder und alle Standorte hinweg, verändert (Abbildung 16).

Abbildung 16: Indikator Regenwurmfauna: Darstellung der mittleren Artenzahl/BDF der Jahre 1992-2022 sowie der Gesamtartenzahl/Jahr aller BDF-Standorte aus Bayern (Lfl, nach 2010), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Die mittlere Artenzahl der nachgewiesenen Regenwürmer blieb über die Jahre sowohl für die Ackerstandorte als auch für die Grünländer konstant. Auf Ackerstandorten wurden im Mittel etwa 3 Arten erfasst. Ab dem Jahr 2010 steigt die mittlere Artenzahl um etwa 0,5 an, was am Datensatz aus Bayern liegt, dessen Werte ab diesem Zeitpunkt in die Berechnungen einbezogen werden (vgl. Abbildung 16). Die Berücksichtigung dieser Werte im Trend würde den Eindruck einer leichten Artenzunahme anzeigen. Für die Grünlandstandorte dagegen ist dieser Einfluss nicht im gleichen Maße ausgeprägt. Hier bleibt die Artenzahl über die Jahre vergleichsweise konstant bei im Mittel etwa 5 Arten/BDF.

Die Gesamtartenzahl aller Standorte zeigt deutliche Schwankungen zwischen den Jahren für beide Landnutzungstypen. Die maximale Artenzahl ergaben die Grünlandstandorten mit insgesamt 16 erfassten Arten im Jahr 2013, an Ackerstandorten lag der Höchstwert im Jahr 2015 bei 15 nachgewiesenen Arten.

7.3.5 B: Forschungsansatz – Vergleich der BDF-spezifischen zeitlichen Veränderung von Abundanz und Biomasse der Regenwürmer

Für die nachfolgenden, aktuell sich noch in der Weiterentwicklung und Validierung befindlichen Berechnungen und Ergebnisdarstellungen wurden Daten von Acker- und Grünlandstandorten der Bundesländer Bayern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein verwendet (vgl. Abschnitt 7.3.2). Aus Bayern wurden ausschließlich die Daten berücksichtigt, welche mittels Formalin-Austreibung erhoben wurden. Aus den Daten, die aus Schleswig-Holstein stammen, wurden nur die der Handsortierung und Kempson-Austreibung verwendet. Die hier zusätzlich erhobenen separaten Daten auf Basis der Formalinaustreibung wurden nicht in die Berechnungen miteinbezogen. Die Anzahl der juvenilen Individuen wurde hier dem Datensatz separat als Summe je Erfassungsdatum zugefügt.

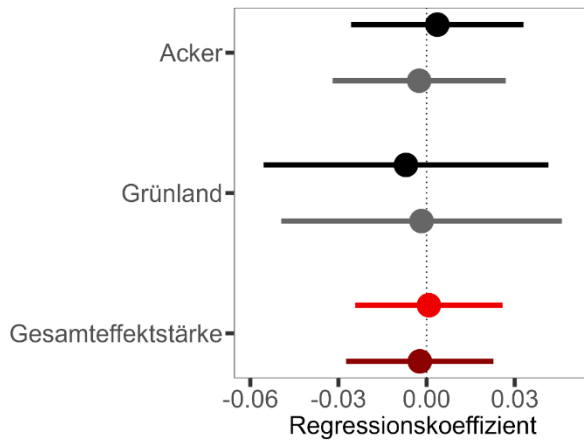
Teilindikator Regenwurmfauna Trends – Abundanz und Biomasse

Schritt 1: Für jede BDF wird basierend auf den quadratmeterbezogenen Werten jeweils eine lineare Regression für die Abundanz und Biomasse über alle verfügbaren Erfassungstermine hinweg berechnet. Um eine Vergleichbarkeit aller BDF zu gewährleisten, wurden die quadratmeterbezogenen Werte zuvor skaliert. Bei der Skalierung, auch z-Transformation genannt, werden von den Rohdaten die flächenspezifischen Mittelwerte abgezogen und durch die flächenspezifischen Standardabweichungen geteilt. Dabei wird folgende Gleichung verwendet: $z = ((x - \mu) / S)$; μ - Mittelwert; S - Standardabweichung. Die skalierten Rohdaten (jetzt z-Scores genannt) sind negativ, wenn die Rohdaten unterhalb des Mittelwerts lagen und positiv, wenn die Rohdaten oberhalb des Mittelwerts lagen. Die Verhältnisse bzw. Beziehungen der einzelnen Datenpunkte zueinander bleiben dabei erhalten.

Schritt 2: In getrennten Metaregressionsmodellen (basierend auf den Funktionen des R-Pakets ‚metafor‘ (Viechtbauer 2010)) werden für die in Schritt 1 erhaltenen Regressionskoeffizienten, d. h. Anstiege der linearen Funktionen und Standardfehler, für Abundanzen und Biomassen die gewichtete mittlere Gesamteffektstärke berechnet. Die Wichtung der Anstiege der linearen Funktionen basiert auf dem Inversen der Standardfehler, d. h. einem Anstieg einer linearen Funktion mit großem Standardfehler wird weniger Gewicht in der Berechnung der mittleren Gesamteffektstärke zugeschrieben als einem Anstieg einer linearen Funktion mit geringem Standardfehler. Zusätzlich werden in den Metaregressionsmodellen mögliche erklärende gruppierende Variablen, wie Landnutzungstyp oder dominante Bodentextur, als Prädiktoren integriert, um die Varianz in den Trends der Regenwurmabundanz bzw. -biomasse zu erklären. Darüber hinaus können die gruppierenden Variablen genutzt werden, um gruppenspezifische Effektstärken zu berechnen. Dies ermöglicht zum Beispiel einen Vergleich von Trends der Regenwurmabundanz in Acker- und Grünlandflächen. Da bei der Berechnung der Gesamteffektstärke sowie gruppenspezifischen Effektstärken Daten aus allen Bundesländern einfließen, wird das Bundesland als sogenannter Zufallseffekt in die Modelle mit aufgenommen.

Die Metaregressionsmodelle ergaben weder für die Abundanz (Gesamteffektstärke = 0,008, $p > 0,05$) noch für die Biomasse (Gesamteffektstärke = -0,002, $p > 0,05$) der Regenwurmfauna einen statistisch signifikanten Effekt (Abbildung 17). Ebenso konnten keine signifikanten Effekte im Acker (Abundanz: Effektstärke = 0,004, $p > 0,05$; Biomasse: Effektstärke = -0,003, $p > 0,05$) oder Grünland (Abundanz: Effektstärke = -0,007, $p > 0,05$; Biomasse: Effektstärke = -0,002, $p > 0,05$) nachgewiesen werden. Basierend auf dieser Analyse kann daher die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich die Regenwurmabundanz und -biomasse über den betrachteten Zeitraum nicht verändert hat und der Landnutzungstyp keinen Einfluss auf Trends der Regenwurmfauna aufwies. Dies bedeutet allerdings nicht, dass auf einzelnen Flächen nicht eine Veränderung der Regenwurmabundanz oder -biomasse stattfand. Detaillierte Analysen sind notwendig, um diesen spezifischen Unterschieden nachzugehen.

Abbildung 17: Indikator Regenwurmfauna Trends: Darstellung der gewichteten Gesamteffektstärke und landnutzungsspezifischen Effektstärke für die Gesamtabundanz (schwarz und hellrot) sowie die Gesamtbiomasse (grau und dunkelrot) über alle BDF-Standorte aus Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

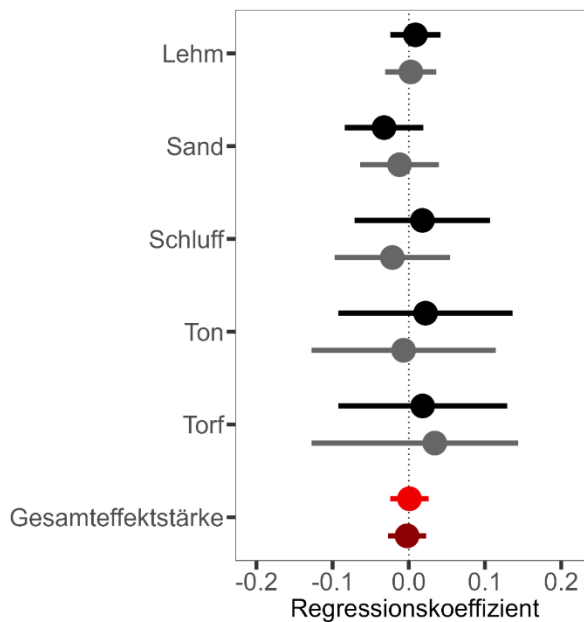


Der Punkt bildet die Effektstärke und die Linien bilden die Konfidenzintervalle ab. Anzahl Datenpunkte: Gesamteffektstärke n = 225, Acker n = 168, Grünland n = 57.

Quelle: eigene Darstellung, iDiv

Weiterhin konnten ebenfalls keine signifikanten Effekte in Abhängigkeit von der dominanten Bodentextur nachgewiesen werden (Abbildung 18, Tabelle 4).

Abbildung 18: Indikator Regenwurmfauna Trends: Darstellung der gewichteten Gesamteffektstärke und bodentexturspezifische Effektstärke für Gesamtabundanz (schwarz und hellrot) sowie Gesamtbiomasse (grau und dunkelrot) über alle BDF-Standorte aus Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



Der Punkt bildet die Effektstärke und die Linien bilden die Konfidenzintervalle ab. Anzahl Datenpunkte: Gesamteffektstärke n = 225, Lehm n = 125, Sand n = 57, Schluff n = 23, Ton n = 11, Torf n = 9.

Quelle: eigene Darstellung, iDiv

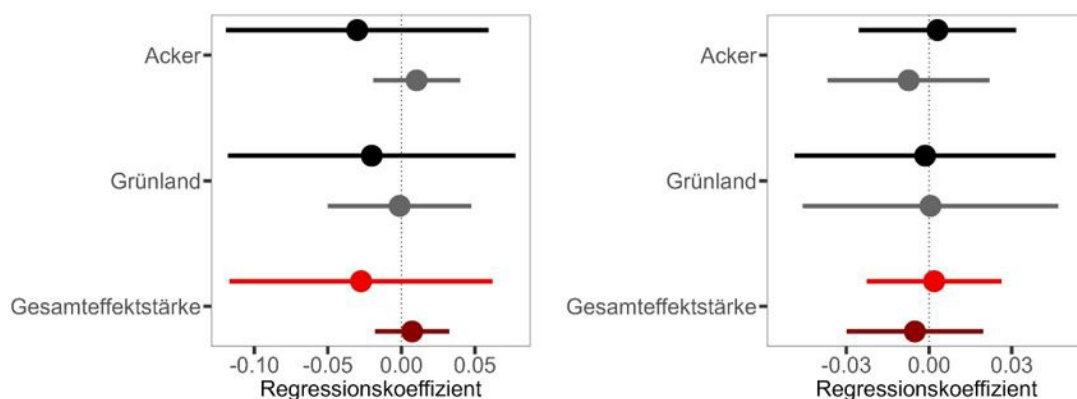
Tabelle 4: Bodentexturspezifische Effektstärken und p-Wert für die Trends der Gesamtregenwurmabundanz und -biomasse basierend auf linearen Regressionen und Metaregressionsmodellen über alle BDF-Standorte auf Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

Bodentextur	Abundanz	Biomasse
Lehm	Effektstärke = 0,009, $p > 0,05$	Effektstärke = 0,003, $p > 0,05$
Sand	Effektstärke = -0,033, $p > 0,05$	Effektstärke = -0,012, $p > 0,05$
Schluff	Effektstärke = 0,018, $p > 0,05$	Effektstärke = -0,022, $p > 0,05$
Ton	Effektstärke = 0,022, $p > 0,05$	Effektstärke = -0,007, $p > 0,05$
Torf	Effektstärke = 0,018, $p > 0,05$	Effektstärke = 0,034, $p > 0,05$

Separate Analysen nur für adulte bzw. juvenile Individuen ergaben keine signifikanten Abnahmen oder Zunahmen der Abundanz und Biomasse über alle untersuchten BDF (Abbildung 18). Ebenso zeigten die gruppenspezifischen Effektstärken, d. h. die Veränderung der Abundanz und Biomasse in Acker- bzw. Grünlandflächen, weder für adulte noch juvenile Individuen einen signifikanten Trend (Abbildung 18). In anderen Worten heißt das, dass die beiden untersuchten Facetten der Regenwurmfaua, d. h. Abundanz und Biomasse, über den betrachteten Zeitraum Schwankungen unterlegen waren, im Mittel aber konstant geblieben sind. Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen aus Abschnitt 7.3.3, die z. B. eine Zunahme der adulten Individuen auf Ackerflächen anzeigten, was sich aber mit den unterschiedlichen Auswertungsverfahren begründen lässt.

Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass eine Methodenweiterentwicklung und -validierung anzustreben ist, um die hier zur Verfügung stehenden heterogenen Daten auszuwerten und zu konsistenten Ergebnissen zu gelangen.

Abbildung 17: Indikator adulte und juvenile Regenwurmfaua Trends: Darstellung der gewichteten Gesamteffektstärke und landnutzungsspezifische Effektstärke für Abundanz (schwarz und hellrot) sowie Biomasse (grau und dunkelrot) von Individuen über alle BDF-Standorte aus Bayern (LfL), Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



Links: adulte Regenwurmfaua, Rechts: juvenile Regenwurmfaua.

Der Punkt bildet die Effektstärke und die Linien bilden die Konfidenzintervalle ab. Anzahl Datenpunkte: Gesamteffektstärke $n = 225$, Acker $n = 168$, Grünland $n = 57$.

Quelle: eigene Darstellung, iDiv

Limitierungen und Perspektiven

Der vorangehend vorgestellte Forschungsansatz befindet sich in Entwicklung und unterliegt dadurch einigen Limitierungen. So erlaubt der Ansatz die Analyse von Veränderungen der Regenwurmfauna über den gesamten Betrachtungszeitraum, aber benötigt wiederholte Beprobungen derselben Fläche unter Verwendung derselben Methode über mehrere Jahre. Darüber hinaus kann zurzeit nicht modelliert werden, wann eine Zeitreihe aufgenommen wurde. In anderen Worten bedeutet das, dass z. B. Zeitreihen von 1990–2000 mit Zeitreihen von 2010–2020 verglichen werden. Um diesen Limitierungen gerecht zu werden, besteht die Möglichkeit, anstelle des gesamten Betrachtungszeitraums Veränderungen von Beprobung zu Beprobung zu analysieren oder den Beprobungszeitraum in vorher definierte Zeiträume zu unterteilen. Dies war im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht möglich, wird aber im Rahmen des fortschreitenden Forschungsvorhabens „Soil BON Earthworm“ (Ganault et al. 2024), das u. a. am Deutschen Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig bearbeitet wird, getestet.

Trotz der erwähnten Limitierungen bietet der Forschungsansatz vielversprechende Möglichkeiten, die Veränderungen der Regenwurmfauna in Deutschland statistisch zu analysieren. Allen voran erlaubt die verwendete Methode nicht nur die Richtung der Veränderung (Zunahme oder Abnahme), sondern auch deren Stärke (z. B. die relative Zunahme oder Abnahme der Abundanz oder Biomasse pro Jahr) zu berechnen und zu analysieren. Weiterhin können die hier verwendeten Modelle leicht erweitert werden, um z. B. den Einfluss von Umweltvariablen wie Temperatur, Feuchtigkeit oder Boden-pH-Wert auf die Richtung und Stärke der Veränderung der Regenwurmfauna zu untersuchen. Wie oben beispielhaft vorgestellt, können alle Analysen nicht nur auf der Basis der Gesamtheit der Regenwurmfauna und BDF berechnet werden, sondern ebenfalls auf der Grundlage zuvor definierter Gruppen, wie z. B. Landnutzung, Bundesland, Entwicklungsstadium oder ökologische Gruppe. Ein weiterer Vorteil, der die Berechnung und Verwendung von Effektstärken mit sich bringt, ist, dass Daten, welche mit unterschiedlichen Methoden erhoben wurden, sowohl gemeinsam analysiert werden als auch die Methoden miteinander verglichen werden können. Abschließend sei erwähnt, dass der hier verwendete Ansatz nicht nur auf Abundanzen und Biomasse, sondern ebenfalls auf andere Variablen, wie z. B. Artenanzahl oder Shannon-Diversität, angewendet werden kann.

7.3.6 Einschränkungen

Wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, weisen verschiedene Lebensräume typische Artenzusammensetzungen und entsprechende Individuenzahlen der darin vorkommenden Arten auf, wobei insbesondere die Individuenzahlen jahreszeitlichen und natürlichen Schwankungen unterliegen. Mit der Feststellung einer steigenden Individuen- oder Artenzahl in einem Lebensraum kann ohne die Kenntnis, welche Arten zu- beziehungsweise abnehmen und welche ökologische Rolle diese Arten im System spielen, somit nicht unbedingt auf eine qualitative Verbesserung des entsprechenden Lebensraums geschlossen werden.

Hinsichtlich der Landnutzungstypen werden mit der Untersuchung von Grünland- und Ackerstandorten nur zwei wesentliche Typen erfasst. Forstlich genutzte Ökosysteme werden dagegen in deutlich geringer Zahl und nur in Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein im Hinblick auf die Regenwurmfauna untersucht. Aussagen zu Regenwürmern in Wäldern, Auen etc., die vergleichsweise naturnahe Zönosen erwarten lassen, können aufgrund der derzeitigen Datenlage nicht getroffen werden.

Die unterschiedlichen methodischen Standards, die in den verschiedenen Bundesländern angewendet werden, führen zu Verzerrungen in den Datensätzen, die nicht vollständig aus der Analyse entfernt bzw. herausgerechnet werden können. Die in Abschnitt 7.2 formulierten Ziele zur Erfassung des Zustands und der Bewertung der Bodengesundheit anhand von Regenwürmern

erfordern somit zunächst eine Harmonisierung der Erfassungsmethodik sowie der Beprobungsstrategie.

Regenwürmer als „ecosystem engineers“ verändern und verbessern durch ihre Grabetätigkeit die Bodenstruktur und verbessern dadurch die Fruchtbarkeit für die landwirtschaftliche Nutzung in erheblichem Maß, daher ist ihre Förderung durch verschiedene Umweltmaßnahmen in Agrarlebensräumen von großer Bedeutung (Walter & Burmeister 2019). Einschränkend soll angemerkt werden, dass die vergleichsweise artenarmen Lebensgemeinschaften der Regenwürmer in der Agrarlandschaft keine Muster typischer Arten zeigen (vgl. Toschki et al. 2021) und daher ihre Aussagekraft hinsichtlich der „Gesamt-Biodiversität“ als eher gering einzustufen ist. Aus diesem Grunde sollten zukünftig weitere Bausteine der Biodiversität für eine Gesamtbewertung integriert werden (siehe dazu Abschnitt 7.5).

7.3.7 Umsetzung und Verstetigung

Für die Entwicklung eines deutschlandweit aussagkräftigen Indikators wären fortlaufende, methodisch vergleichbare und bundesweite Erhebungen von Regenwürmern auf repräsentativen Standorten erforderlich. Folgende Punkte gilt es dabei zu berücksichtigen:

1. Umsetzung der fortlaufenden Regenwurm-Erhebungen zumindest für die Landnutzungstypen Acker und Grünland in allen Bundesländern.
Für die Vergleichbarkeit der Daten wäre es ratsam, hierfür z. B. Grünlandtypen mit ähnlicher Nährstoffversorgung und Nutzung sowie auf vergleichbaren Bodentypen zu untersuchen. Gleiches gilt für Äcker, wobei hier zudem die Anbaukultur (Getreide, Hackfrucht, Dauerkultur etc.) als Begleitvariable dokumentiert beziehungsweise berücksichtigt werden sollte. Ausweitungen der Beprobungen auf die Landnutzungstypen Laub- und Nadelforst (vgl. LUBW 2020) sind anzustreben.
2. Angleichung der methodischen Standards in den verschiedenen Bundesländern.
Für die einheitlichen Datenerhebungen ist die Verwendung einer kombinierten Methode von Handauslese und anschließender Austreibung an selbiger Stelle zu empfehlen. Einer Anpassung und Harmonisierung der Methoden steht fachlich derzeit nichts im Wege, da die Daten aktuell nur relativ zueinander ausgewertet werden können, d. h. Trends können ausschließlich über standortspezifische Modelle (siehe Abschnitt 7.3.4) sinnvoll analysiert werden, und Vergleiche der absoluten Abundanzen sind zurzeit nur innerhalb der wenigsten Bundesländer, nicht aber uneingeschränkt zwischen den verschiedenen Ländern möglich. Eine Harmonisierung würde somit keine wesentliche Verschlechterung herbeiführen, aber vielmehr große Gewinne hinsichtlich absoluter Werte erbringen.
3. Etablierung einer homogenen Beprobungsstrategie.
Durch eine ausgewogenere Beprobungsstrategie hinsichtlich Design, Landnutzungs- bzw. Biotoptyp und Beprobungsintervall können Varianzen minimiert werden, so dass aussagekräftigere Trends zu erwarten wären. Die bereits bestehenden Erfahrungen aus den Bundesländern Bayern, Brandenburg, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt, aber auch der hier nicht weiter betrachteten Bundesländer mit Regenwurm-Datenerhebungen (z. B. Thüringen, Baden-Württemberg) könnten dazu als Vorlage dienen. In Bundesländern ohne Erfahrungen müssten entsprechende fortlaufende Erhebungen etabliert werden.
4. Basiserhebungen zur Referenzwertermittlung in relevanten Lebensraumtypen, um eine qualitative Bewertung der Erhebungsdaten zu ermöglichen.
5. Berücksichtigung der Anforderungen an die Datenlieferung.
Es ist erforderlich, dass die beteiligten Länder die Messgrößen Individuenzahl/m² und Artenzahl/erfasster BDF in den jeweiligen Untersuchungsjahren liefern. Für eine effiziente und machbare Zusammenführung ist dazu vorab eine einheitliche Strukturierung der Datenliefe-

rung zu etablieren. Dies kann beispielsweise mit Hilfe des Daten-Factsheets, das dem UBA vorgelegt wurde, geschehen.

6. **Qualitätssicherung.** Die übermittelten Daten der jeweiligen Bundesländer müssen hinsichtlich der methodischen Anforderungen sowie der Datenqualität vor der Übergabe von den Betreibern selbst einer Qualitätskontrolle unterzogen werden. Um Übergabefehler zu vermeiden, wird nach der Datenlieferung und vor der Zusammenführung der verschiedenen Länderdaten in der ausführenden Stelle zudem ein Plausibilitätscheck durchgeführt.

Für die erstmalige Erstellung der Indikatorendatensätze und deren Visualisierung ist mit einem erhöhten Zeitaufwand zu rechnen. Soweit oben genannte Vereinheitlichungen der Datenflüsse gesichert und entsprechende Qualitätschecks etabliert sind, ist der Aufwand für die neue Berechnung und Darstellung der Indikatoren mit 1-3 Arbeitstagen anzusetzen. Die Kosten können langfristig gering gehalten werden, wenn entsprechende klare Kommunikationswege zwischen BDF-Betreibern und ausführender Stelle eingerichtet werden.

7.4 Weitere Indikatorideen

Ansätze, die neben dem vorangehend beschriebenen Indikator „Regenwurmfauna“ im Projekt diskutiert und weiter ausgearbeitet wurden, sind nachfolgend dargestellt. Sie können als Grundlage für weitere Überlegungen dienen.

7.4.1 Fallstudie Springschwanzfauna (Baden-Württemberg)

Herleitung und Begründung

Innerhalb der Nahrungsnetze nehmen Collembolen (Springschwänze), die verschiedene Nahrungsquellen aufschließen können, eine wichtige Funktion bei der Streuzersetzung und damit in Stoffumwandlungsprozessen ein (Lavelle & Spain 2005, Scheu & Falca 2000, Toschki et al. 2021, VDI 2014). Zudem gelten Collembolen als wichtige Beuteorganismen für Tiere höherer trophischer Ebenen. Sie sind über ihre Körperform und ihr Verhalten an den Lebensraum angepasst, wobei drei unterschiedliche Lebensformtypen unterschieden werden (vgl. Hopkin 1997, Toschki et al. 2021, VDI 2014): Epedaphische Arten besiedeln die Bodenoberfläche und sind durch eine starke Pigmentierung, ausgeprägte Körperanhänge und Sehvermögen an diese Lebensweise angepasst. Euedaphische Arten sind dagegen meist blind, weisen keine Pigmentierung auf und auch ihre Körperanhänge sind weitgehend reduziert, was einer Anpassung an ihre Lebensweise im Porenraum des Mineralbodens geschuldet ist. Hemiedaphische Arten leben in den oberen Grenzschichten des Bodens und stehen morphologisch zwischen den ersten beiden Gruppen. Collembolen besiedeln somit verschiedene ökologische Nischen in den unterschiedlichen Ökosystemen.

Einfluss des Klimas auf die Collembolen-Lebensgemeinschaften: Die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Bodenlebensgemeinschaften wurden bereits in unterschiedlichen Studien untersucht. Mikroarthropoden (Acari, Collembola) zeigen verschiedene Reaktionen auf Temperaturerhöhungen (Lindberg 2003, Thakur et al. 2017, 2018, 2023). Diese Reaktionen fallen in Kombination mit anderen Klimafaktoren, z. B. den Niederschlagssummen, unterschiedlich aus (Abnahme oder Zunahme der Individuenzahlen, keine Effekte). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration zu einem vergrößerten C/N-Verhältnis in der Laubstreu und damit verbunden zu einer veränderten Verfügbarkeit von Nährstoffen für Bodenorganismen führte, sodass auch indirekte Effekte auf die Nahrungsnetze nachgewiesen werden konnten (Hüttel et al. 2012). Zudem existieren Hinweise darauf, dass Collembolen auf eine monatelang andauernde Trockenheit in Wäldern mit signifikanten Veränderungen ihrer Artenzusammensetzung reagieren (Slawska & Slawski 2017). Die

Veränderungen von Bodenlebensgemeinschaften im Zuge des Klimawandels sind daher vielfältig und von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig.

Kühle- und wärmezeigende Collembolen-Arten: In Anlehnung an die Ableitung von Ellenbergzahlen für Pflanzen können für Collembolen-Arten Präferenzen für kühlere bzw. wärmere Standorte abgeleitet werden (vgl. Toschki et al. 2018, unveröffentlichter Bericht der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg). Die Ableitung erfolgte gestuft mit Hilfe der Datenbank Edaphobase (<https://portal.edaphobase.org/>, Burkhardt et al. 2014) über die Korrelation der einzelnen Arten zu:

1. Höhenlage des Fundorts,
2. mittlerer Jahres-Temperatur am Fundort,
3. Biotoptyp des Fundorts,
4. Verbreitung der Art,
5. sonstige weitergehende Informationen.

Mit Hilfe der abgeleiteten Wärme- und Kühlezeiger können direkte klimabedingte Trends abgebildet werden. Es kann sowohl die Individuen- als auch die Artenzahl der Zeigerarten und deren Arealverschiebung im Höhengradienten verfolgt werden.

Entsprechend der Matrix zur Auswahl von Indikatorgruppen für Langzeituntersuchungen nach VDI (2014) (vgl. Abbildung 6) sind die Collembolen als Vertreter für die endogäischen bzw. mikrophytophagen Tiergruppen als gut geeignet für ein Bodenmonitoring einzustufen. Hinzu kommt, dass Collembolen bereits im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung der Länder in einigen Bundesländern untersucht werden und somit bereits Erfahrungen aus Langzeitstudien vorliegen. Die o. g. Ausführungen zeigen, dass Collembolen generell auf klimatische Änderungen reagieren. Darüber hinaus ist bekannt, dass diese Tiergruppe auch auf weitere Stressoren wie die Bewirtschaftung sensibel reagiert (Bardgett et al. 1993, Tsiafouli et al. 2015 u. v. m.). Zudem wurden die Arten- und Individuenzahlen der Collembolen im Rahmen des EU-Projekts „ENVA-SSO“ (Environmental Assessment of Soil for Monitoring) als Indikatoren für ein Monitoring der Bodenbiodiversität empfohlen (Römbke et al. 2009).

Die genannten Gründe sprechen dafür, die Entwicklungen der Individuen- und Artenzahlen sowie der Artengemeinschaften der Collembolen als Indikatoren zu verwenden. Das erfordert allerdings eine Erweiterung und Standardisierung der bestehenden Bodenmonitoring-Programme. Ein solches Monitoring bietet die Möglichkeit, langfristige Veränderungen dieser Messgrößen innerhalb der untersuchten Standorte zu dokumentieren. Eine bundesweit angelegte, räumlich und zeitlich repräsentativ angelegte Langzeituntersuchung der Collembolen würde zudem das Wissen um Standortansprüche einzelner Arten sowie charakteristischer Artensammensetzungen vergrößern. Dies würde eine zukünftige Erweiterung der Datenauswertungen ermöglichen, die eine stärkere Berücksichtigung der Struktur der Collembolen-Zönosen beinhaltet.

Methodische Herangehensweise

Die Landesanstalt für Umwelt in Baden-Württemberg (LUBW) erhebt seit über 30 Jahren im Rahmen der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung (MUB) Daten zur Collembolenfauna auf insgesamt 79 BDF in verschiedenen Regionen ihres Landes. Die überwiegende Anzahl der Beobachtungsstellen befindet sich in Wäldern und zu etwa einem Viertel auf Grünlandstandorten. Diese Langzeitmonitoring-Datenbasis mit vergleichbaren Datensätzen für Collembolen über die Jahre ist für Deutschland und darüber hinaus als besonders wertvoll einzustufen (vgl. Römbke et al. 2012).

Für die nachfolgenden Berechnungen und Ergebnisdarstellungen werden Erhebungen von 21 sogenannten Premium-Waldstandorten verwendet, die im Rahmen dieses Monitorings untersucht werden. Die Datenerhebungen an diesen Standorten sind methodisch sowie hinsichtlich der Beprobungszahlen zwischen den einzelnen Jahren vergleichbar.

Zur Auswertung der Daten für die Fallstudie stehen Ergebnisse der Jahre 1986/1987 (Aufteilung der 21 Standorte auf zwei Jahre), 1988/1990 (Aufteilung der 21 Standorte auf zwei Jahre), 1997, 2003, 2011, 2015-2017, 2019-2021 zur Verfügung. Die jährlichen Probenahmen bestanden jeweils mindestens aus einer Frühjahrs- und einer Herbstbeprobung. In einigen Jahren wurden auch im Sommer Beprobungen durchgeführt, die jedoch zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden.

Die LUBW MUB stellte für alle untersuchten BDF die auf einen Quadratmeter berechneten Individuenzahlen für die nachgewiesenen Arten eines Probenahmetermins (Frühjahr/(Sommer)/Herbst) sowie die den Datenerhebungen zugrundeliegenden Methoden zur Verfügung. Daraus werden Arten- und Individuenzahlen der Collembolen pro BDF und Jahr errechnet.

Schritt 1: Für jede BDF wird auf der Basis der Wiederholungen (Anzahl Samples/Erfassungstermin und Anzahl Erfassungen im Jahresverlauf) ein quadratmeterbezogener Mittelwert der Individuenzahl/BDF*Jahr berechnet. Des Weiteren wird die Summe der nachgewiesenen Collembolenarten/BDF*Jahr ermittelt.

Schritt 2: Auf Grundlage der gemittelten Individuenzahlen und der Artensummen aus Schritt 1 wird über die verschiedenen BDF-Flächen hinweg (hier 21 Premium-Waldstandorte) ein Mittelwert sowohl der Individuenzahlen als auch der Artenzahlen gebildet (vgl. Abbildung 19).

Die oben beschriebene Vorgehensweise kann in einem weiteren Schritt auch auf ausgewählte Artengruppen, wie die unterschiedlichen Lebensformtypen oder die wärmezeigenden Arten (vgl. Abbildung 20) und kühlezeigenden Arten (vgl. Abbildung 21), angewendet werden.

Für die Entwicklung eines bundesweiten Indikators wäre ein methodisch vergleichbares bundesweites Monitoring von Collembolen auf repräsentativen Standorten erforderlich. In allen Bundesländern müsste eine Flächenauswahl getroffen und eine Erhebungsstrategie hinsichtlich Design, Biotoptyp, Methode und Intervall abgestimmt werden. Die bereits vorliegenden Erfahrungen aus dem Monitoring der 21 Premiumstandorte in Baden-Württemberg könnten dazu als Vorlage dienen.

Einschränkungen

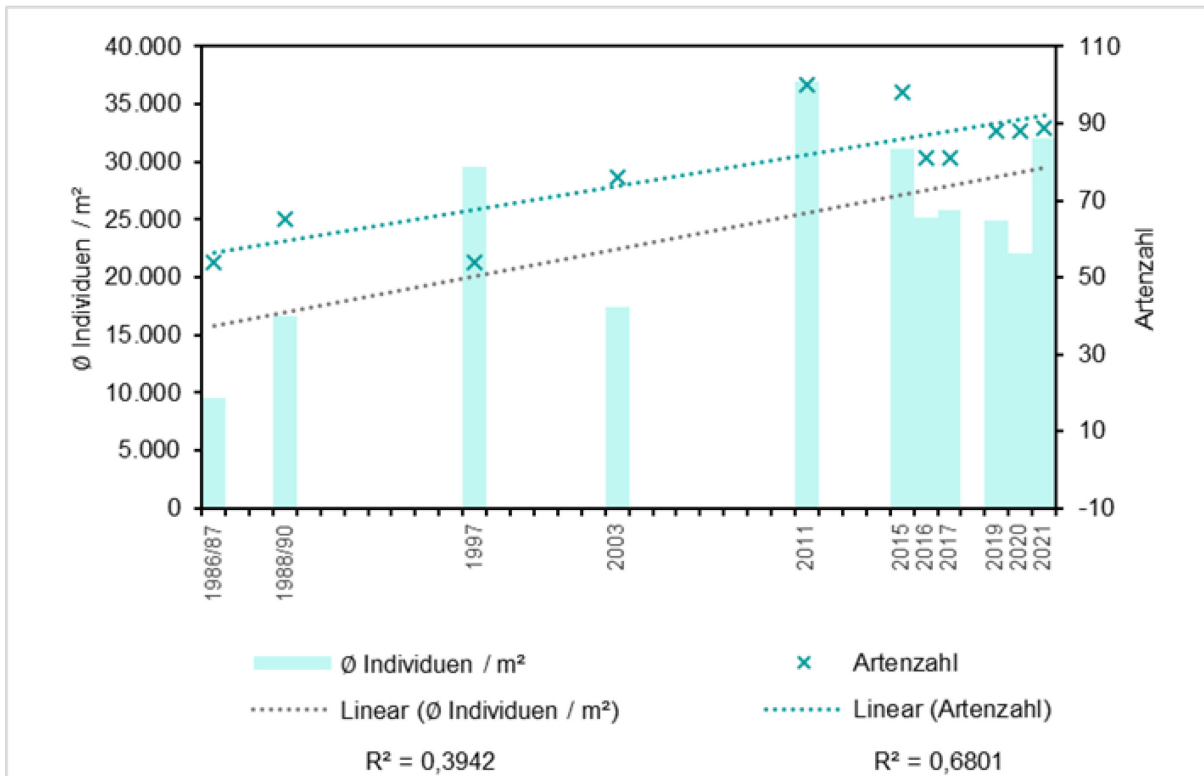
Wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, weisen verschiedene Lebensräume lebensraumtypische Artenzusammensetzungen und entsprechende Individuenzahlen der darin vorkommenden Arten auf, wobei insbesondere die Individuenzahlen jahreszeitlichen sowie natürlichen Schwankungen unterliegen. Mit der Feststellung einer steigenden Individuen- oder Artenzahl in einem Lebensraum kann somit nicht unbedingt auf eine qualitative Verbesserung des entsprechenden Lebensraums geschlossen werden. Erhöhungen können auch durch z. B. Störung anzeigende oder invasive Arten herbeigeführt worden sein. Eine eingehende Bewertung der Gemeinschaftsstruktur wäre durch weiterführende strukturelle Analysen sowie mit Hilfe von Community-Indizes (z. B. Shannon-Weaver, Evenness) möglich.

Die derzeitigen Abstände der Probenahmen lassen noch keine sichere Trendanalyse über den gesamten Untersuchungszeitraum zu. Erst ab dem Jahr 2015 bieten die jährlichen Daten zu den Premium-Standorten (Ausnahme 2018) die Möglichkeit, eine Trendanalyse durchzuführen.

Darstellung

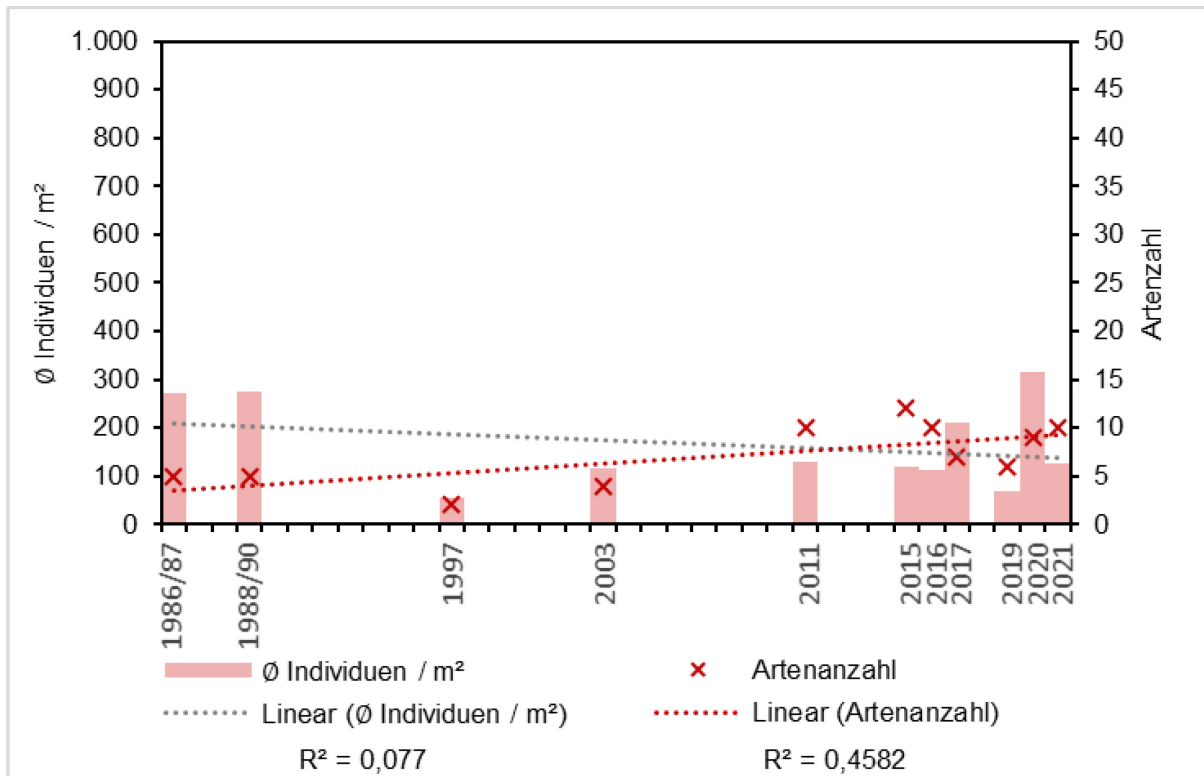
Anhand der durchgeführten Berechnungen der Arten- und Individuenzahlen aller Collembolen-Arten sowie der Wärme- und Kühlezeiger wurden drei Abbildungen erstellt, die die Entwicklung dieser Messgrößen im Untersuchungszeitraum darstellen (Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 21). Wie oben bereits beschrieben, sollten die Ergebnisse jedoch aufgrund der anfänglich großen Abstände zwischen den Probenahmen mit Vorsicht interpretiert werden.

Abbildung 19: Individuen- und Artenzahl (Gesamt) der Collembolen



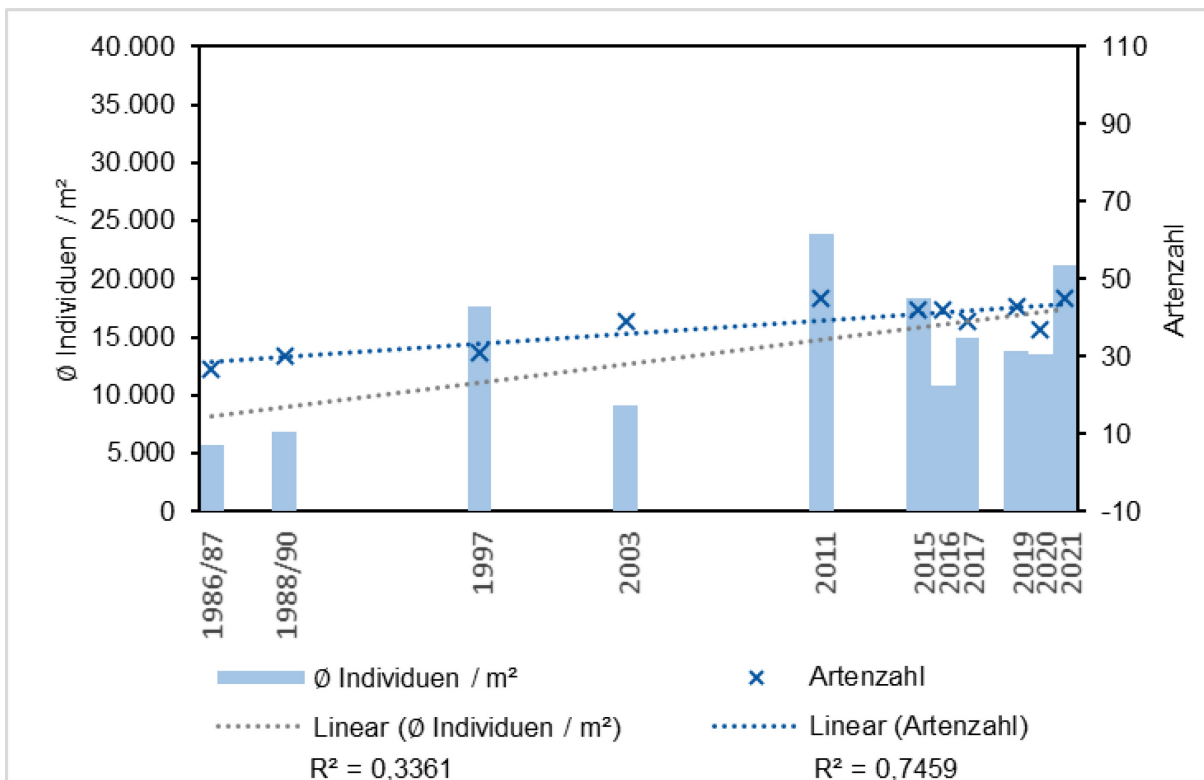
Quelle: eigene Darstellung, gaia e. V.

Abbildung 20: Individuen- und Artenzahl der wärmezeigenden Collembolen-Arten



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

Abbildung 21: Individuen- und Artenzahl der kühlezeigenden Collembolen-Arten



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.

7.4.2 Eignung der Bodenatmung als Indikator

Die basale Bodenatmung ist generell ein Maß für die Atmungsaktivität der Bodenlebewesen, die die organischen Substanzen im Boden unter Kohlendioxid-Produktion umsetzen. Dabei wird entweder der Sauerstoffverbrauch oder aber die Kohlendioxid-Produktion gemessen (Anderson 1983, Phillips & Nickerson 2015, Römbke et al. 2009, Ryan & Law 2015).

In der Schweiz ist die Bodenatmung Teil eines Sets zur Ermittlung von Referenzwerten für einen guten Bodenzustand. Diese können dann mit aktuell gemessenen Werten verglichen werden (Hug et al. 2018, 2021).

In Deutschland wird die Basalatmung auf den BDF in Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt regelmäßig gemessen, in vier Bundesländern (Brandenburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Thüringen) fanden Messungen statt, diese wurden jedoch wieder eingestellt.

Als Ergebnis des ENVASSO-Projekts wird vorgeschlagen, die Bodenatmung als Indikator für den Zustand der Bodenfunktionen – neben Datenerhebungen zu Collembolen und Lumbriciden – im ersten Level der Umsetzung eines Bodenmonitorings zu nutzen (Römbke et al. 2009).

Die basale Bodenatmung wurde von der Europäischen Kommission in den Katalog der geforderten EU-weiten Bodenindikatoren aufgenommen und wird derzeit in Fachkreisen kritisch diskutiert. Im Oktober 2023 wurde eine Stellungnahme auf breiter Basis in Wissenschaftskreisen formuliert. Folgender Auszug daraus macht die Problematik dieses Indikators deutlich: „This is a very basic soil biological measurement which is extremely sensitive to temporal, temperature and moisture variations and as such does not provide a good measure of the soil biodiversity.”⁴

Verschiedene Lebensräume weisen jeweils biotoypische Arten- und Individuenzahlen sowie Biomassen auf, d. h. hohe Arten- und Individuenzahlen sowie Biomassen sind nicht in jedem Habitat unbedingt positiv zu bewerten. Die Bodenatmung als Summenparameter zeigt lediglich die Atmungsaktivität aller Bodenlebewesen an und lässt keine Rückschlüsse auf die Artenausstattung und damit auf wichtige strukturelle und funktionale Charakteristika der Bodenlebensgemeinschaft und damit der Bodengesundheit zu. Zudem sind Lebensgemeinschaften unterschiedlichen Stressoren unterworfen. Da bei der Messung der Bodenatmung nicht zwischen den verschiedenen taxonomischen Gruppen oder Arten unterschieden wird, lassen sich keine Hinweise auf die Auswirkungen einzelner Stressoren, beispielsweise des Klimawandels, auf besonders sensible Arten ableiten.

Eine Metastudie zu den Zusammenhängen zwischen der Bodenatmung und der Biodiversität der Mikroorganismen kommt dagegen zu dem Schluss, dass es durchaus Zusammenhänge zwischen der Stärke der Bodenatmung und der Bodenbiodiversität geben könnte. Jedoch wird dieses Ergebnis in der Metastudie selbst aufgrund u. a. methodischer Mängel in den ausgewerteten Studien kritisch diskutiert (De Graaf et al. 2015).

Bei bereits durchgeführten Langzeitmessungen der Bodenatmung auf den BDF in NRW hat sich gezeigt, dass die Bodenatmung insbesondere in Böden mit mächtiger Humusaufgabe teilweise sehr große Schwankungen aufweist, was die Ermittlung von Trends erschwert.

Aus den genannten Gründen wird in diesem Projekt keine Entwicklung eines Indikators auf der Basis der Bodenatmung vorgenommen.

⁴ <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/environmental-research/show-wenr/petition-calls-for-the-proposed-eu-soil-health-law-to-be-supported-but-also-tightened.htm>

7.5 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Biodiversität im Boden wird durch zahlreiche Organismengruppen mit vielen verschiedenen Arten in einem verknüpften, interagierenden (trophischen) System gebildet (Abbildung 22). Die Bodenbiodiversität umfasst dabei alle im und auf dem Boden lebenden Organismen, d. h. Mega-, Makro-, Meso- und Mikrofauna sowie Algen und Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Protisten, Archaeen). Aus diesem System heraus können einige Ökosystemleistungen der Bodenorganismen sowie durch Bodenorganismen unterstützte Bodenfunktionen abgeleitet werden.

Abbildung 22: Klassifizierung verschiedener Organismengruppen anhand ihrer Größe und deren schematische Darstellung im Bodennahrungsnetz



Quelle: eigene Darstellung, gaiac e. V.; Bilder: pxhere.com CC BY 2.0, pixabay, R. Schmelz, A. Toschki

Der Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ sollte – als erster mit den derzeit verfügbaren Messdaten umsetzbare Ansatz – in bestehende Berichtssysteme, beispielsweise in das DAS-Monitoring, aufgenommen werden. Er liegt mit den vorgelegten Beschreibungen und dem Daten-Factsheet, das dem UBA zur Verfügung gestellt wurde, bereits in einer dafür geeigneten Form vor. **Der Umsetzungsprozess mit den Daten erhebenden Stellen, deren Mitwirkung für die Fallstudie und eine bundesweiten Erweiterung erforderlich ist, muss zu diesem Zweck abgestimmt und etabliert werden (siehe Empfehlungen in Abschnitt 7.3.7).**

Für eine umfassende Bewertung von Biodiversität wäre es jedoch erforderlich, die wesentlichen Elemente des gesamten Systems zu kennen und zu erfassen. Darüber hinaus ist es möglich, neben taxonomischen Endpunkten (Art, Gattung etc.) auch Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen sowie die funktionelle Diversität der Bodengemeinschaft selbst zu messen und somit zu erfassen (Guerra et al. 2021). **Gemeinsam mit Informationen zur taxonomischen Diversität können Daten zu Ökosystemfunktionen, wie z. B. zu Nährstoffumsetzungen oder zur funktionellen Diversität genutzt werden, um bodenökologische Indikatoren (siehe Guerra et al. 2021) abzuleiten, welche ihrerseits einen direkten Bezug zu den globalen Zielen der Convention on Biological Diversity (CBD), den Sustainable Development Goals (SDGs), und dem Übereinkommen von Paris haben** (Guerra et al., 2021). Auch sind Netzwerkanalysen und daraus resultierende multitrophische Verknüpfungen als Bewertungsgrundlage denkbar (u. a. Chakraborty et al. 2012; Jochum et al. 2023). Dies erfordert eine an die unterschiedlichen trophischen Ebenen angepasste methodische Vorgehensweise.

Für eine umfassende Betrachtung der Bodenbiodiversität gilt es somit, die wichtigsten funktionellen Gruppen des Bodennahrungsnetzes zu erfassen. Dies sind, neben den betrachteten Regenwürmern, die folgenden Organismengruppen (vgl. EEA 2023): Enchytraeiden, Bodenmilben, Collembolen, Nematoden, Protisten, Bakterien und Pilze.

Enchytraeiden, Hornmilben und Collembolen gehören zu den arten- und individuenreichen Tiergruppen im Boden, die unterschiedliche Biotope besiedeln. Zu diesen Gruppen liegen bereits weitreichende Erfahrung hinsichtlich Erhebungsmethodik und ihrer Einbindung in Monitoringprogramme vor (EEA 2023; FAO et al. 2020; Toschki et al. 2021).

Für die Entwicklung eines bundesweiten Indikators für die Springschwanzfauna müsste zunächst ein methodisch vergleichbares bundesweites Monitoring von Collembolen auf repräsentativen Standorten etabliert werden, wobei insbesondere auf die in Baden-Württemberg vorhandenen Erfahrungen aufgebaut werden kann (siehe Abschnitt 7.4.1).

Auch zu den ebenfalls sehr arten- und individuenreichen Nematoden existieren langjährige Erfahrungen im Rahmen der Bodenqualitätsbewertung. So wurden bereits Bodenqualitätsindizes auf Basis der Zusammensetzung ihrer Gemeinschaft (Sieriebriennikov et al. 2014) entwickelt, wobei die Nematoden derzeit noch mikroskopisch identifiziert werden müssen. Es wird jedoch zunehmend dazu übergegangen, molekulare Gemeinschaftsprofile zu erstellen (FAO et al. 2020). Diese Profilerstellung kann gut in etablierte Bodenqualitätsindizes integriert werden, obwohl eine Kalibrierung noch erforderlich ist (Griffiths et al. 2018).

Bodenbewohnende Bakterien, Archaeen, Pilze und Protisten werden heute unter dem Begriff „Bodenmikrobiom“ zusammengefasst, wobei jede dieser Gruppen in vielfältiger Weise zur Funktion von Böden und ihren Ökosystemleistungen beiträgt. Die Vielfalt der einzelnen Organismen und ihre Variabilität in verschiedenen Böden ist bisher unüberschaubar groß, und ihre Veränderlichkeit durch die Bodennutzung oder unter dem Einfluss des Klimawandels kaum vorhersehbar. **Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für die Bodengesundheit, z. B. im Zuge des Abbaus und Aufbaus organischer Bodensubstanz oder ihrer einzigartigen Fähigkeiten bei der Umsetzung von Stickstoffverbindungen, aber auch ihrer unerwünschten Aktivität bei der Bildung von Treibhausgasen, sollte diese komplexe Lebensgemeinschaft für ein Monitoring nicht außeracht gelassen werden.** Dabei kann der Fokus nicht darauf liegen, einzelne Arten oder Organismengruppen als Biodiversitätsindikatoren auf Artniveau zu etablieren, denn jede tragende Bodenfunktion kann durch unterschiedliche Organismengruppen zur Verfügung gestellt werden. Für ein Monitoring bieten sich hier zwei komplementäre Ansätze an:

1.) Erfassung bodenenzymatischer Leistungen mit standardisierten Tests als Indikatoren für Funktionen, z. B. Zellulasen, Aminopeptidasen oder Phosphatasen sowie 2.) Erfassung der strukturellen Zusammensetzung des Bodenmikrobioms auf Grundlage der Sequenzierung von Boden-DNA. Empfehlenswert wären hierbei PCR-basierte Methoden zur Charakterisierung von ubiquitären Marker-Genen, z. B. für 16S rRNA oder ITS-Sequenzen, oder auch funktionellen Genen, wie unter anderem *amoA* für Nitrifikation oder *nifH* für Stickstoff-Fixierung, im Vergleich zur direkten DNA-Sequenzierung, der sog. Bodenmetagenomik. **Als Indikatoren für den gesunden Boden könnten, neben klassischen Analysen des Bodenmikrobioms (z. B. Biodiversitätsindizes), hier insbesondere komplexe bioinformatische und statistische Verfahren wie Netzwerkanalysen vielversprechende Ansätze liefern.**

Für die Biodiversitätserhebung im Boden ist es ebenso wichtig, perspektivisch eine Schnittstelle zum Monitoring oberirdischer Insekten zu schaffen, da eine Trennung ober- und unterirdischer Lebensbereiche nur einer formalen, nicht aber einer natürlichen Verteilung folgt. So existieren erhebliche Überschneidungen der Lebensgemeinschaften ober- und unterirdisch lebender Organismen, beispielsweise von Arten, die ihre Larvalzeit im Boden verbringen und dann in späteren Lebensabschnitten oberirdisch emergieren. Darüber hinaus wer-

den im bundesweiten, sich im Aufbau befindlichen Insektenmonitoring epigäische, d. h. auf dem Boden aktive Organismengruppen (z. B. Laufkäfer, Spinnen) erfasst (BfN 2019), die ebenso der Lebensgemeinschaft des Bodens zuzuordnen sind.

Fragen der Koordination, der Bildung von Schnittstellen und Nutzung von Synergien von Monitoringaktivitäten sollten weiterhin am Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB, Leipzig) in verschiedenen Fachgremien bearbeitet werden. „Das Nationale Monitoringzentrum bringt Akteure aus Forschung und Praxis zusammen, um mit ihnen das bundesweite Biodiversitätsmonitoring weiterzuentwickeln und langfristig zu verankern“ (www.monitoringzentrum.de).

8 Fazit

In Bund und Ländern besteht ein vielfältiger Bedarf an aussagekräftigen, vertrauenswürdigen und praktikablen Bodenindikatoren, der sich insbesondere aus der Umsetzung und Ausgestaltung folgender Gesetze, Strategiepapiere und internationalen Übereinkommen ergibt: Bundesbodenschutzgesetz, Klimaanpassungsgesetz des Bundes (KAnG), Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie und Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt sowie Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Desertifikation (UNCCD). Indikatoren sind wichtig, um den Bodenzustand und seine Veränderungen mit Blick auf die Bodengesundheit im zeitlichen Kontext beschreiben und bewerten zu können. Meilensteine auf dem Weg zu gesunden Böden und einer bestmöglichen Anpassung an den Klimawandel können so abgebildet, passende bundesweite wie auch regionale Handlungserfordernisse und -optionen erkannt und wirksame Maßnahmen ergriffen werden.

Im Projekt sind Zusammenstellungen und Vorschläge für Bodenindikatoren sowie Konzepte für die gemeinsame Arbeit auf Bundes- und Länderebene entwickelt worden, die Impulse für die bundesweite Berichterstattung für das Medium Boden geben können.

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

Sachstand zu Indikatoren in der bodenbezogenen Berichterstattung Deutschlands und der EU

Bodenthemen wie Wasser- und Stoffhaushalt, Bodenstruktur, Biodiversität sowie Landnutzung werden von den recherchierten Indikatoren und Indikatorideen unterschiedlich umfangreich und vollständig abgebildet, wobei die vorhandenen bodenbezogenen Indikatoren meist auf einen bestimmten Landnutzungs- oder Ökosystemtyp fokussiert sind.

Besonders viele Indikatoren und Indikatorideen beschreiben Sachverhalte der Themenfelder Landnutzung, Stoff- und Wasserhaushalt, während bisher sehr wenige Indikatoren für die Bodenstruktur (Erosion, Verdichtung) und die Bodenbiodiversität vorhanden oder angedacht sind. Lücken in Indikatorensystemen sind dabei häufig durch fehlende und nicht ausreichende harmonisierte Daten begründet.

Informationsbedarf besteht sowohl für themenübergreifende Ziele wie „Erhalt der Funktionsfähigkeit von Böden“ als auch für Ziele im Zusammenhang mit dem Bodenwasserhaushalt, mit Schadstoffen, Nährstoffen und Humus, mit Bodenerosion und Schadverdichtung sowie mit Bodenbiodiversität und Landnutzung. Für eine Berichterstattung zur Umsetzung bodenbezogener Ziele, die in vielen sektorpolitischen Strategien, beispielsweise zu biologischer Vielfalt, Nachhaltigkeit, Anpassung an den Klimawandel, Raumentwicklung, Ackerbau und Wald, formuliert sind, wird ein breites Set an Indikatoren gebraucht. Nicht aus allen Strategien ließ sich jedoch ein konkreter Informationsbedarf ableiten.

Eine umfassende Beschreibung und Bewertung des Bodenzustands und seiner Veränderungen werden nach Auffassung der Autorinnen:Autoren nur mit Hilfe von Indikatoren-Sets möglich, das heißt mit einer Kombination aus mehreren Einzelindikatoren.

Der im Projekt erarbeitete Sachstand zu Indikatoren in der bodenbezogenen Berichterstattung Deutschlands und der EU wurde als UBA-Text veröffentlicht (Wolf et al. 2024). Behörden in Bund und Ländern sowie Forschungseinrichtungen können die gebündelten Informationen nutzen, um mit dem Blick auf die bereits etablierten Indikatoren und die im Raum stehenden Ideen ihre eigenen Aktivitäten zur Indikatorentwicklung und Berichterstattung weiter auszugestalten.

Vorschläge für neue bodenbezogene Indikatoren

Aufbauend auf Vorarbeiten des UBA und Messdaten von Institutionen der Bundesländer und des Bundes wurden im Projekt folgende zwei Vorschläge für Indikatoren im Zusammenhang mit der

organischen Bodensubstanz und der Bodenbiodiversität ausgearbeitet und für die zukünftige Anwendung auf nationaler Ebene vorbereitet:

- ▶ Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“
- ▶ Indikator „Regenwurmfauna“

Beide Indikatoren werden im vorliegenden Bericht begründet und in ihrer methodischen Herangehensweise beschrieben, zudem werden Darstellungsvorschläge vorgelegt. Die für die Umsetzung erforderliche Dokumentation der Datenquellen und Berechnungen liegt mit den Daten-Factsheets vor. Diese sind grundsätzlich geeignet, um die Indikatoren in bestehende Indikator- und Berichtssysteme einzugliedern. Die für das DAS-Monitoring entwickelten Arbeitsinstrumente der Indikator- und Daten-Factsheets haben sich als sehr nützlich für die Entwicklung und Dokumentation von bodenbezogenen Indikatoren erwiesen.

Für eine nationale Berichterstattung mit diesen beiden Indikatoren werden zukünftig Daten benötigt, die von den Daten erhebenden Stellen ausgewählt, aufbereitet und qualitätsgesichert worden sind.

Empfehlungen für die Umsetzung neuer Indikatoren

Zwischen Bund und Ländern sollte ein **langfristiger Datenaustausch-Prozess nach FAIR-Prinzipien** für die vorgeschlagenen Indikatoren etabliert werden (Lieferung von qualitätsgesicherten Daten festgelegter Messgrößen und Kennwerte in einheitlichen bzw. übertragbaren Formaten, wie beispielsweise den Daten-Factsheets nach dem Format des DAS-Monitorings).

Die Daten erhebenden Stellen in den Ländern sollten aufgrund der oft begrenzten personellen Kapazitäten bei der **Aufbereitung und Bereitstellung von qualitätsgesicherten Daten** für nationale Bodenindikatoren unterstützt werden.

Es sollten nach Möglichkeit **Ziel-, Richt- und Schwellenwerte für die Bewertung der Indikatoren** festgelegt werden, um Erfordernisse von Anpassungs-, Minderungs-, Wiederherstellungsmaßnahmen ableiten zu können. Wenn diese Werte fehlen, fehlen Bewertungsmaßstäbe, und eine Bewertung von unkritischen bzw. problematischen Entwicklungen ist nicht möglich.

Über die beiden oben genannten Indikatoren hinaus wurden im Projekt weitere Ideen geprüft: Das SOC:Ton-Verhältnis sowie das Verhältnis des SOC zu einem erwartbaren SOC-Gehalt als Indikatoren zur organischen Bodensubstanz sowie die Springschwanzfauna und die Bodenatmung als Indikatoren für die Bodenbiodiversität. Diese Überlegungen, die im vorgelegten Bericht dokumentiert, aber nicht zur Ausgestaltung eines konkreten Indikatorvorschlags geführt haben, können als Anknüpfungspunkte für weitere Arbeiten zur Erweiterung der nationalen Berichterstattung für das Medium Boden dienen.

Der Indikator „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ vergleicht die Humusgehalte von Messstandorten auf Acker- und Grünlandböden mit den Referenzspannweiten des standorttypischen Humusgehalts. Dazu werden die Humusgehalte in Oberböden mithilfe des organischen Kohlenstoffs quantifiziert. Als Indikator dient die Entwicklung des prozentualen Anteils von Messstandorten ober-, inner- und unterhalb der Referenzspannweiten des standorttypischen Humusgehalts.

Mit der Anwendung eines erwartbaren SOC-Gehalts (SOC_{exp}) geben Poepflau und Don (2023) den Anstoß für die Entwicklung eines Indikators zur Bewertung der Bodengesundheit. Die Bodengesundheit ist dabei im Wesentlichen charakterisiert über die Bodenstruktur bzw. Porosität und den SOC-Gehalt des Bodens.

Empfehlungen Organische Bodensubstanz (siehe Abschnitt 6.3.6 und 6.5)

Der Indikatorvorschlag „Übereinstimmung mit standorttypischen Humusgehalten“ sollte in bestehende Berichtssysteme, beispielsweise in das DAS-Monitoring, aufgenommen werden. Um den Indikatorvorschlag in einer nationalen Berichterstattung umzusetzen, ist es erforderlich:

- a) die **Datenqualität und den Datenaustausch zu standardisieren**,
- b) die **Fallstudie auf das Bundesgebiet zu erweitern** und damit räumliche und zeitliche Lücken zu füllen, indem weitere in den Ländern vorliegende Bodendaten und Messprogramme zur Generierung des Indikators nutzbar gemacht werden und
- c) ein geeignetes **Bewertungsschema** für Veränderungen zu entwickeln.

Des Weiteren werden **Forschung und Entwicklung** für weitere Landnutzungstypen und für organische Böden empfohlen, um zukünftig alle Landnutzungstypen – insbesondere Forste – in die Betrachtungen einschließen zu können. Weitere Forschung zu den Zusammenhängen mit Bewirtschaftung, Klima und Bodenleben ist erforderlich.

Das **SOC:Ton-Verhältnis** sollte als Indikator zum Bodenkohlenstoff aufgrund seiner eingeschränkten Eignung für die in Deutschland verbreiteten sandigen und humusreichen tonigen Standorte **nicht weiterverfolgt bzw. unterstützt** werden.

Für Indikatorideen, die das **Verhältnis SOC:SOC_{exp}** zur Bewertung heranziehen, wie der vom Thünen-Institut für Agrarklimaschutz vorgeschlagene „kontextspezifische C_{org}-Trend“ sollten **Möglichkeiten zur bundesweiten Darstellung von Trends** weiterverfolgt werden, um Fragestellungen über die DAS hinaus zu adressieren.

Bei der Entwicklung von Indikatoren zum Bodenkohlenstoff bietet sich auf nationaler Ebene eine **enge Zusammenarbeit von UBA und TI** an.

Der Indikator „Regenwurmfauna“ betrachtet die Entwicklung der mittleren Abundanz (Individuenzahl) sowie der Artenzahl unterschiedlicher Lebensformtypen der Regenwurmfauna auf Acker- und Grünlandböden. Regenwürmer sind als Vertreter für die endogäischen und makrophytophagen Tiergruppen gut für ein Bodenmonitoring geeignet. Mit dem Indikatorvorschlag kann die Umsetzung einer nationalen Berichterstattung mit bodenbiologischen Indikatoren begonnen werden, um diese dann fortlaufend weiterzuentwickeln und zu verbessern. Das ANK-Projekt „Stärkung der Bodenbiodiversität als unverzichtbarer Beitrag für den Natürlichen Klimaschutz“ ist dabei ein wichtiges Instrument, um erstmals den ökologischen Bodenzustand auf Grundlage einer Basiserhebung beschreiben zu können. Vorgesehen ist eine großflächige Erfassung der Bodenbiodiversität und die Erarbeitung von Referenzwerten, um darauf aufbauend die bestehenden Monitoring-Programme zur Biodiversität auszubauen und weiterzuentwickeln. Dazu gehört auch die Entwicklung weiterer methodischer Standards.

Empfehlungen Bodenbiodiversität (siehe Abschnitt 7.3.7 und 7.5)

Der Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ sollte als erster, mit den derzeit verfügbaren Messdaten umsetzbare Ansatz in bestehende Berichtssysteme, beispielsweise in das DAS-Monitoring, aufgenommen werden. Um den Indikatorvorschlag langfristig in einer nationalen Berichterstattung umzusetzen, sind folgende Schritte erforderlich:

- a) **methodische Standards zur Harmonisierung der Daten** entwickeln,
- b) eine **ausgewogene Beprobungsstrategie** für den bundesweiten Indikator etablieren,

c) die **Fallstudie für Grünland und Ackerstandorte auf das Bundesgebiet erweitern**, indem fortlaufende Regenwurm-Erhebungen zumindest für die Landnutzungstypen Acker und Grünland in allen Bundesländern durchgeführt werden,

d) **Referenzwerte** für wesentliche Lebensraumtypen als qualitative Bewertungsgrundlage ermitteln (Basiserhebung ANK).

Eine **bundesweit angelegte, räumlich und zeitlich repräsentativ angelegte Langzeituntersuchung der Regenwürmer** ist sinnvoll, um das Wissen um Standortansprüche einzelner Arten sowie charakteristische Artenzusammensetzungen zu vergrößern. Dies würde eine zukünftige Erweiterung der Datenauswertungen dahingehend ermöglichen, dass die Struktur der Regenwurm-Zönosen stärker berücksichtigt werden kann.

Weitere Datenauswertungen mit den Methoden des in Abschnitt 7.3.5 vorgestellten Forschungsansatzes können eingesetzt werden, um die Veränderungen der Regenwurmfauna in Deutschland zu analysieren (z. B. zum Einfluss von Umweltvariablen).

Für die Entwicklung eines bundesweiten **Indikators für die Springschwanzfauna** müsste zunächst ein methodisch **vergleichbares bundesweites Monitoring von Collembolen** auf repräsentativen Standorten etabliert werden, wobei insbesondere auf den in Baden-Württemberg vorhandenen Erfahrungen aufgebaut werden kann.

Für eine umfassende Betrachtung der Bodenbiodiversität und ihrer Bedeutung für die Bodengesundheit sollten **weitere Bausteine der Biodiversität** in die Gesamtbewertung integriert werden, indem die wichtigsten funktionellen Gruppen des Bodennahrungsnetzes erfasst werden. Dies sind neben den Regenwürmern auch die Enchytraeiden, Bodenmilben, Collembolen, Nematoden sowie das Bodenmikrobiom mit den bodenbewohnenden Protisten, Bakterien und Pilzen.

Gemeinsam mit Informationen zur taxonomischen Diversität können **Daten zu Ökosystemfunktionen**, beispielsweise zu Nährstoffumsetzungen oder zur funktionellen Diversität, genutzt werden, um bodenökologische Indikatoren abzuleiten.

Zur Entwicklung von Indikatoren für den gesunden Boden sollten neben **klassischen Analysen des Bodenmikrobioms (z. B. Biodiversitätsindizes)** auch **komplexe bioinformatische und statistische Verfahren wie Netzwerkanalysen** weiterverfolgt werden.

Für die Biodiversitätserhebung im Boden sollte perspektivisch eine **Schnittstelle zum Monitoring oberirdischer Insekten** geschaffen werden, da eine Trennung ober- und unterirdischer Lebensbereiche nur einer formalen, nicht aber einer natürlichen Verteilung folgt.

Fragen der Koordination, der Bildung von Schnittstellen und Nutzung von Synergien von bodenbiologischen Monitoringaktivitäten sollten weiterhin am **Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität bearbeitet** werden. Die Fortsetzung der **Kooperation des UBA** mit diesem Zentrum ist sinnvoll.

Ergebnisse aus der Fachtagung zu bodenbezogenen Indikatoren am 17./18. April 2024 in Dessau

Die im April 2024 durchgeführte Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“ bot ein Forum für die Diskussion und den Informationsaustausch über vorliegende Ideen und Konzepte zur Indikatorentwicklung auf nationaler Ebene. Die Vortragenden und Teilnehmenden haben die im Vorhaben entwickelten Vorschläge für Indikatoren und die methodischen konzeptionellen Ansätze für deren Weiterentwicklung im Grundsatz begrüßt. Deutlich wurde aber auch, dass an den Konzepten weitergearbeitet und die Fachdiskussion fortgesetzt werden muss. Die Fachdiskussionen haben deutlich gemacht, dass "mutige" Vor-

schläge und Entwürfe (von Indikatoren) eine kreative und konstruktive Fachdiskussion anstoßen können. Im gemeinsamen Ringen um konkrete Verbesserungen dieser vorliegenden Vorschläge ist es möglich, aussagekräftigen Indikatoren näher zu kommen.

Entwicklung und Verstetigung bundesweit aussagekräftiger Indikatoren

In der Zusammenschau des Sachstands zu bodenbezogenen Indikatoren in Deutschland und den im Projekt geführten Diskussionen wurde deutlich, dass sich die bodenbezogene Berichterstattung mit Indikatoren in Deutschland im Vergleich zu anderen Umweltsektoren noch am Anfang befindet. Fachliche Grundlagen und Prozesse sind in großen Teilen noch zu entwickeln und mit den Akteurinnen in Bund, Ländern und Forschungsinstitutionen zu diskutieren. Die Arbeiten des Forschungsprojekts geben einen konkreten Anstoß zur weiteren fachlichen Verbesserung der Indikatormöglichkeiten im Zusammenhang mit der organischen Bodensubstanz und der Bodenbiodiversität. Generell resultieren aus dem Vorhaben die folgenden Empfehlungen für das weitere Vorgehen bei der Entwicklung und Verstetigung bundesweit aussagekräftiger Bodenindikatoren.

Empfehlungen für das weitere Vorgehen bei der Entwicklung von Bodenindikatoren

Es ist notwendig, durch eine fortgesetzte **Entwicklungs- und Forschungsarbeit** Indikatorideen für alle bodenbezogenen Themen – und später ggf. Indikatoren-Sets – weiter oder neu zu entwickeln. Als Arbeitsinstrumente werden die in der DAS-Berichterstattung eingesetzten **Indikator- und Daten-Factsheets** oder vergleichbare Strukturen empfohlen.

Um über die Länder hinweg aggregierte Darstellungen zu ermöglichen, wird eine **stärkere Harmonisierung von Messdaten und Erfassungsmethoden (Methodenstandardisierung) in Bund und Ländern** als erforderlich angesehen (Wolf et al. 2024).

Um weitere Indikatoren zur Unterstützung der nationalen Berichterstattung zu etablieren, wird eine **zielgerichtete Anpassung und Ergänzung von Messaktivitäten in den Ländern** je nach Festlegung der erforderlichen Messgrößen und Erhebungsmethoden empfohlen.

Empfohlen wird die **Nutzung der gleichen bodenbezogenen Indikatoren in verschiedenen Berichtsformaten der nationalen Berichterstattung**, um übereinstimmende Informationen für das Monitoring der Zielerreichung verschiedener sektorpolitischer Strategien zu nutzen. Wenn in Berichterstattungen des Bundes und der Bundesländer übereinstimmende Indikatoren verwendet werden, fördert dies die Nachvollziehbarkeit in Politik und Gesellschaft, vermeidet Widersprüche und nutzt Synergieeffekte. Idealerweise sollten Bodenindikatoren auch über die europäischen Staaten hinweg harmonisiert sein, um Bodenveränderungen auf EU-Ebene erkennen zu können (Wolf et al. 2024).

Die im Projekt entwickelten Definitionen (siehe Kapitel 4) können Grundlage für die Einigung auf ein **gemeinsames Begriffsverständnis auf nationaler Ebene** bzw. auf der Bund-Länder-Ebene sowie für die ressortübergreifende Zusammenarbeit sein.

Die weitere Arbeit an bundesweiten Bodenindikatoren sollte **mit engem Bezug auf die Ziele der in § 3 der im Juli 2024 in Kraft getretenen KAnG verankerten vorsorgenden Klimaanpassungsstrategie** konzipiert werden. Die im Projekt erarbeiteten zwei Indikatorvorschläge finden dabei bereits Berücksichtigung bei der Formulierung messbarer Ziele, Indikatoren und Maßnahmen/Instrumente für das Handlungsfeld „Boden“ im Cluster „Land und Landnutzung“.

Für die künftige Entwicklungsarbeit in Bezug auf Bodenindikatoren sollte der **Fortgang der Abstimmungen auf EU-Ebene im Hinblick auf die Bodendeskriptoren** berücksichtigt werden, die in das finale Bodenüberwachungsgesetz aufgenommen werden.

Eine **Koordinierung der indikatorbasierten Berichterstattung für das Medium Boden** wird empfohlen, um die Integration von Indikatorvorschlägen in Berichtssysteme und die Entwicklung neuer Bodenindikatoren ressortübergreifend abzustimmen und Aktivitäten an Entwicklungen auf EU-Ebene im Zusammenhang mit dem Bodenüberwachungsgesetz anzupassen. Die Koordinierung kann beispielsweise durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit anderen koordinierenden Institutionen und Gremien (Bund-/Länder-Arbeitsgruppen) sowie Daten erhebenden Stellen durchgeführt werden.

Die **ressortübergreifende Fachdiskussion und Abstimmung** (Umweltschutz, Forstwirtschaft, Landwirtschaft) zu methodischen Konzepten für die Indikatorenentwicklung und zur Erarbeitung von Bewertungskriterien für einen gesunden Bodenzustand sollte fortgesetzt werden.

Die **Ausbildung wissenschaftlicher Nachwuchskräfte** in Bezug auf die bodenkundliche und bodenbiologische Datenerhebung und Entwicklung von Strategien und praxistauglichen Konzepten ist zu stärken, um die aktuell in Deutschland noch vorhandene Expertise langfristig zu behalten bzw. wiederaufzubauen.

Regelungen zur Datenerhebung, Datenerfassung und zum Datenaustausch sollten im Zuge der Weiterentwicklung des Bodenschutzrechts – wie von Bodle et al. (2023) zur Diskussion gestellt – weiter ausgestaltet werden, um die Berichterstattung anhand von Bodenindikatoren auf eine zuverlässige Grundlage zu stellen.

9 Quellenverzeichnis

- Ad-hoc AG Boden (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (5. Auflage). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten. Hannover.
- Angst, Š., Mueller, C. W., Cajthaml, T., Angst, G., Lhotáková, Z., Bartuška, M., Špaldoňová, A., & Frouz, J. (2017). Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter. *Geoderma*, 289, 29–35. DOI:[10.1016/j.geoderma.2016.11.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.017).
- Barth, N., Borho, W., Cordsen, E., Heller, C., Höper, H., Ludwig, B., Marx, M., Meesenburg, H., Spörlein, P., & Weller, M. (2022). *Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen*. Ad-hoc-AG Boden-Dauerbeobachtung des Ständigen Ausschusses Informationsgrundlagen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO). https://www.labo-deutschland.de/documents/Methodenhandbuch_BDF.pdf.
- Barth, N.; Brandtner, W.; Cordsen, E.; Dann, T.; Emmerich, K.-H.; Feldhaus, D.; Kleefisch, B.; Schilling, B. & Utermann, J. (2000). Boden-Dauerbeobachtung – Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. *Bodenschutz – Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser* 32. Lfg. XI/00, 33. Lfg. III/01, hrsg. v. Bachmann, G., König, W. & Utermann, J.
- Bastida, F., Eldridge, D. J., García, C., Kenny Png, G., Bardgett, R. D., & Delgado-Baquerizo, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal*, 15(7), Article 7. DOI:[10.1038/s41396-021-00906-0](https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0).
- Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M., & Kirk, G. J. D. (2005). Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature*, 437(7056), 245–248. DOI:[10.1038/nature04038](https://doi.org/10.1038/nature04038).
- Berry, E. C., & Jordan, D. (2001). Temperature and soil moisture content effects on the growth of *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta: Lumbricidae) under laboratory conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(1), 133–136. DOI:[10.1016/S0038-0717\(00\)00112-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00112-7).
- Beylich, A., & Graefe, U. (2010). *Regenwürmer und Kleinringelwürmer als Bioindikatoren im Bodenmonitoring*.
- BfN - Bundesamt für Naturschutz (2019). *Einheitlicher Methodenleitfaden „Insektenmonitoring“ (Stand Januar 2023)*. <https://www.bfn.de/insektenmonitoring>.
- Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, Ph., Sousa, Jp., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., & Römbke, J. (2009). Indicators for Monitoring Soil Biodiversity. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(4), 3 (717-719). DOI:[10.1897/IEAM-2009-064.1](https://doi.org/10.1897/IEAM-2009-064.1).
- Blum, W. (2005). Soils and Climate Change. *Journal of Soils and Sediments*, 5(2), 67–68. DOI:[10.1065/jss2005.02.006](https://doi.org/10.1065/jss2005.02.006).
- Blume, H.-P., Brämmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2010). *Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Auflage). Heidelberg.
- BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022). *Eckpunkte für eine Novelle des nationalen Bodenschutzrechts. Perspektiven und Änderungsbedarfe*. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/eckpunktepapier_novelle_bodenschutzrecht_bf.pdf.
- BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023). *Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz—Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023*. Arbeitsgruppe Öffentlichkeitsarbeit, Online-Kommunikation, Trends & Analysen.

- Bodle, R., Dück, L.-M., Hermann, A., Miller, R., Stockhaus, H., & von Vittorelli, L. (2023). *Überarbeitung des Bodenschutzrechts. Diskussionspapier. Ergebnisse zu ausgewählten Rechtsfragen*. Umweltbundesamt. <https://www.ecologic.eu/de/19345>.
- Bouché, M. B. (1977). Strategies lombriciennes. *Soil Organisms as Components of Ecosystems, Ecological Bulletins* (25), 122–132.
- Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) (2021). <http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BBodSchG.pdf>.
- Bundesrat (Hrsg.) (2021). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie—Weiterentwicklung 2021: Beschluss des Bundesrates*. (Drucksache, Nummer 217/21). [https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2021/0201-0300/217-21\(B\).pdf](https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2021/0201-0300/217-21(B).pdf).
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. DOI:[10.1016/j.soilbio.2018.01.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030).
- Capowiez, Y., Marchán, D., Decaëns, T., Hedde, M., & Bottinelli, N. (2024). Let earthworms be functional—Definition of new functional groups based on their bioturbation behavior. *Soil Biology and Biochemistry*, 188, 109209. DOI:[10.1016/j.soilbio.2023.109209](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109209).
- Capriel, P. (2010). *Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern* (05; Schriftenreihe). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_38740.pdf.
- Capriel, P. (2013). Trends in organic carbon and nitrogen contents in agricultural soils in Bavaria (south Germany) between 1986 and 2007. *European Journal of Soil Science*, 64(4), 445–454. DOI:[10.1111/ejss.12054](https://doi.org/10.1111/ejss.12054).
- Chakraborty, S., Pangga, I. B., & Roper, M. M. (2012). Climate change and multitrophic interactions in soil: The primacy of plants and functional domains. *Global Change Biology*, 18(7), 2111–2125. DOI:[10.1111/j.1365-2486.2012.02667](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02667).
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., & Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41–52. DOI:[10.1016/j.still.2018.04.011](https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011).
- Council of the European Union (2023a). Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience, COM(2023) 416 final, 2023/0232 (COD) 69 (2023). <https://op.europa.eu/publication-detail/-/publication/b0d5d6a6-2cc8-11ef-a61b-01aa75ed71a1>.
- Council of the European Union (2023b). *ANNEXES to the proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law)*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/100844fd-2a0e-11ee-839d-01aa75ed71a1/language-en>.
- Daniel, O. (1990). *Life Cycle and population dynamics of the earthworm Lumbricus terrestris L.* ETH Zurich.
- Deutscher Bundestag (2021). *Grobkonzept für das nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität*. Drucksache 19/26454. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/264/1926454.pdf>.
- De Vries, F. T., Brown, C., Stevebs, C. J. (2016). Grassland species root response to drought: consequences for soil carbon and nitrogen availability. *Plant and Soil*, 409/1-2, 297-312. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-016-2964-4>.
- Dexter, A. R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E. A., Jolivet, C., & Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*, 144(3–4), 620–627. DOI:[10.1016/j.geoderma.2008.01.022](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.022).

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Veerman, C., Pinto Correia, T., Bastioli, C., Biro, B., Bouma, J., Cienciala, E., Emmett, B., Frison, E., Grand, A., Hristov, L., Kriauciūnienė, Z., Pogrzeba, M., Soussana, J., Vela, C., & Wittkowski, R. (2020). *Caring for soil is caring for life : ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate : report of the Mission board for Soil health and food*, Publications Office. DOI:[10.2777/821504](https://doi.org/10.2777/821504).

Don, A., Drexler, S., & Poeplau, C. (2024). Indikatoren zur Bewertung von Humusgehalten für die Bodengesundheit. *Bodenschutz*, 1, 4. DOI:[10.37307/j.1868-7741.2024.01.04](https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2024.01.04).

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining soil quality for a sustainable environment. *Biological Indicators of Soil Health* (S. 1–28). CAB International.

Doube, B. M., & Styan, C. (1996). The response of *Aporrectodea rosea* and *Aporrectodea trapezoides* (Oligochaeta: Lubricidae) to moisture gradients in three soil types in the laboratory. *Biology and Fertility of Soils*, 23(2), 166–172. DOI:[10.1007/BF00336058](https://doi.org/10.1007/BF00336058).

Drexler, S., Broll, G., Don, A., & Flessa, H. (2020). *Standorttypische Humusgehalte landwirtschaftlich genutzter Böden Deutschlands*. Thünen Report 75, hrsg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_75.pdf.

Drexler, S., Broll, G., Flessa, H., & Don, A. (2022). Benchmarking soil organic carbon to support agricultural carbon management: A German case study#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(3), 427–440. DOI:[10.1002/jpln.202200007](https://doi.org/10.1002/jpln.202200007).

Droste, N., May, W., Clough, Y., Börjesson, G., Brady, M. V., & Hedlund, K. (2020). Soil carbon insures arable crop production against increasing adverse weather due to climate change. *Environmental Research Letters*. DOI:[10.1088/1748-9326/abc5e3](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc5e3).

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007). *Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands. Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo*. Bearb. v. Düwel, O., Siebner, C., Utermann, J., & Krone, F. (Tgb.-Nr.: 10782/06, Archiv-Nr. 0126616). https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Schriften/Downloads/Humusgehalte_Bericht.html.

DWD CDC - DWD Climate Data Center (2024). *Raster der vieljährigen Mittel der Niederschlagshöhe für Deutschland (verschiedene Zeiträume/Klimareferenzperioden). Version v1.0*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/precipitation/

Edwards, W. & Shipitalo, M. J. (1998). Consequences of earthworms in agricultural soils. *Earthworm ecology*, 147–161. CRC Press.

Ehrmann, O. (2012). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden- Württembergs - Literaturstudie zur Bedeutung von Regenwürmern und den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Arten und Populationen der Regenwürmer* (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Hrsg.).

Ehrmann, O., Sommer, M., Vollmer, T. (2002). Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs. In: Sommer, M., Ehrmann, O., Friedel, J.K., Martin, K., Vollmer, T., Turian, G., *Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs*.

Europäische Kommission (1992). *Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen* (OJ L 206 22.07.1992, p. 7, ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/1992/43/oj>).

Europäische Kommission (2021). *Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses zur „Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: EU-Bodenstrategie für 2030 — Die Vorteile gesunder Böden für Menschen, Lebensmittel, Natur und Klima nutzen“* (COM(2021) 699 final) (OJ C, C/290, 29.07.2022, p. 131, CELEX: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021AE5627>).

Europäisches Parlament (2024). *Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsrichtlinie) Legislative Entschließung des Europäischen Parlaments vom 10. April 2024 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Bodenüberwachung und -resilienz (Bodenüberwachungsgesetz)* (COM(2023)0416 – C9- 0234/2023 – 2023/0232(COD)) (P9_TA(2024)0204). https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0204_DE.pdf

European Commission (2013). European Commission: Directorate-General for Environment, *Mapping and assessment of ecosystems and their services – An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020 – Discussion paper – final*, April 2013, Publications Office, 2013, DOI:[10.2779/12398](https://doi.org/10.2779/12398).

Feller, C., & Beare, M. H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79(1–4), 69–116. DOI:[10.1016/S0016-7061\(97\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00039-6).

Filser, J. (2000). Sinn und Unsinn der Bewertung von Standorteigenschaften mit Mesofaunagemeinschaften. *Bewertung von Mesofauna-Gemeinschaften für Standort-Eigenschaften*.

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2019). *Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands—Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung*. Kurzfassung: https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf.

Fürst, J., Bollmann, K., Gossner, M. M., Duelli, P., & Obrist, M. K. (2023). Increased arthropod biomass, abundance and species richness in an agricultural landscape after 32 years. *Journal of Insect Conservation*, 27(2), 219–232. DOI:[10.1007/s10841-022-00445-9](https://doi.org/10.1007/s10841-022-00445-9).

Ganault, G., Ristok, C., Phillips, H. R., Hedde, M., Capowiez, Y., Bottinelli, N., Decaëns, T., Marchan, D., Gerard, S., Mathieu, J., Potapov, A., Cameron, E. K., Brown, G., Bartz, M., Zeiss, R., Zi, Y., Tsiafouli, M., Russell, D. J., Guerra, C., & Eisenhauer, N. (2024). Soil BON Earthworm—A global initiative on earthworm distribution, traits, and spatiotemporal diversity patterns. *Soil Organisms*, Vol. 96 No. 1 (2024). DOI:[10.25674/362](https://doi.org/10.25674/362).

Gerard, B. M. (1967). Factors Affecting Earthworms in Pastures. *Journal of Animal Ecology*, 36(1), 235–252. DOI:[10.2307/3024](https://doi.org/10.2307/3024).

Goidts, E., & Van Wesemael, B. (2007). Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955–2005). *Geoderma*, 141(3–4), 341–354. DOI:[10.1016/j.geoderma.2007.06.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.013).

Gubler, A., Wächter, D., Schwab, P., Müller, M., & Keller, A. (2019). Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(5), 277. DOI:[10.1007/s10661-019-7435-y](https://doi.org/10.1007/s10661-019-7435-y).

Guerra, C. A., Bardgett, R. D., Caon, L., Crowther, T. W., Delgado-Baquerizo, M., Montanarella, L., Navarro, L. M., Orgiazzi, A., Singh, B. K., Tedersoo, L., Vargas-Rojas, R., Briones, M. J. I., Buscot, F., Cameron, E. K., Cesarz, S., Chatzinotas, A., Cowan, D. A., Djukic, I., Hoogen, J. van den, ... Eisenhauer, N. (2021). Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity. *Science*, 371(6526), 239–241. DOI:[10.1126/science.abd7926](https://doi.org/10.1126/science.abd7926).

Hartmann, M., & Six, J. (2022). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 4–18.

Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V., & Regina, K. (2013). Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology*, 19(5), 1456–1469. DOI:[10.1111/gcb.12137](https://doi.org/10.1111/gcb.12137).

Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A. J., Vandermeer, J., & Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3–35. DOI:[10.1890/04-0922](https://doi.org/10.1890/04-0922).

Irmeler, U. (2022). Seasonal shift in carabid phenology over a period of 18 years. *European Journal of Entomology*, 119, 183–190. DOI:[10.14411/eje.2022.020](https://doi.org/10.14411/eje.2022.020).

Jacobs, A., Flessa, H., & Don, A. (2018). *Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland—Ergebnisse der Bodenzustandserhebung*. Thünen Report 64, hrsg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Thuenen_Report_64_final.pdf.

Jänsch, S., Scheffczyk, A., Römbke, J., Rojo, V., Vierna, J., Vizcaíno, A., Natal da Luz, T., Alves, D., Martins, P., Mendes, S., Scopel, L., Sousa, J. P., Krogh, P. H., Sapkota, R., & Schmelz, R. M. (2023). *Bewertung der biologischen Vielfalt mittels DNA-Extraktion aus Bodenproben von BDF*. UBA TEXTE 142/2023, hrsg. v. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/142_2023_texte_bewertung_der_biologischen_vielfalt.pdf.

Jänsch, S., Steffens, L., Höfer, H., Horak, F., Roß-Nickoll, M., Russell, D., Toschki, A., & Römbke, J. (2013). State of knowledge of earthworm communities in German soils as a basis for biological soil quality assessment. *Soil Organisms* 85 (3), December 2013, 215–233. https://www.senckenberg.de/wp-content/uploads/2019/08/07_artikel_stephan_jansch_et_al.pdf.

Jochum, M., Zizka, V., Scheu, S., Eisenhauer, N., & Pollierer, M. (2023). Global change in above-belowground multitrophic grassland communities. *Research Ideas and Outcomes*, 9, e113960. DOI:[10.3897/rio.9.e113960](https://doi.org/10.3897/rio.9.e113960).

Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, 302, 14–21. DOI:[10.1016/j.geoderma.2017.04.021](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021).

Kaneda, S., & Kaneko, N. (2008). Collembolans feeding on soil affect carbon and nitrogen mineralization by their influence on microbial and nematode activities. *Biology and Fertility of Soils*, 44, 435–442. DOI:[10.1007/s00374-007-0222-x](https://doi.org/10.1007/s00374-007-0222-x).

Kaufmann-Boll, C., Kern, M., Kastler, M., Niederschmidt, S., Kappler, W., Müller, F., Oellers, J., Toschki, A., Steffens, M., & Wiesmeier, M. (2022). *Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Bodensubstanz*. UBA TEXTE, 67/2022, hrsg. v. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_67-2022_konzeption_und_umsetzung_eines_klimafolgen-bodenmonitoring-verbunds_fuer_bodenbiologie_und_organische_bodensubstanz.pdf

KBU - Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (2019). *Das Konzept der Ökosystemleistungen – ein Gewinn für den Bodenschutz*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_16_pp_kbu_oekosystemleistungen_final_online.pdf.

Kopittke, P. M., Berhe, A. A., Carrillo, Y., Cavagnaro, T. R., Chen, D., Chen, Q.-L., Román Dobarco, M., Dijkstra, F. A., Field, D. J., Grundy, M. J., He, J.-Z., Hoyle, F. C., Kögel-Knabner, I., Lam, S. K., Marschner, P., Martinez, C., McBratney, A. B., McDonald-Madden, E., Menzies, N. W., ... Minasny, B. (2022). Ensuring planetary survival: The centrality of organic carbon in balancing the multifunctional nature of soils. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(23), 4308–4324. DOI:[10.1080/10643389.2021.2024484](https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2024484).

Körshens, M., & Schulz, E. (1999). *Die organische Bodensubstanz. Dynamik—Reproduktion—Ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte* (UFZ-Bericht 13/1999). Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ).

Lal, R. (2007a). Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(2), 303–322. DOI:[10.1007/s11027-006-9036-7](https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7).

Lal, R. (2007b). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 815–830. DOI:[10.1098/rstb.2007.2185](https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185).

- LfU - Landesamt für Umwelt Brandenburg (2021). *Klimawandelmonitoring im Land Brandenburg— Aktualisierungsbericht*. Fachbeiträge des LfU, Heft Nr. 160. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK).
- Langer, U., Kuhn, K., Weniger, T., & Neubert, E. (2012). *17 Jahre Regenwurmerfassung auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Sachsen-Anhalt*. https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Bodenschutz/Bodenbeobachtung/Boden_Dauerbeobachtung/Dateien/Regenwurmerfassung_Endbericht.pdf.
- LANUV - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2023). *Klimaatlas NRW. Klima NRW Monitoring. Umwelt. Humusvorrat*. <https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-monitoring/umwelt/boden/humusvorrat>.
- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Hrsg.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Lavelle, P., Bignell, D. E., Lepage, M., & Wolters, V. (1997). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(4), 159–193. DOI: [10.4236/am.2011.22024](https://doi.org/10.4236/am.2011.22024).
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553. DOI: [10.1038/s43017-020-0080-8](https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8).
- Lehmann, J., Hansel, C. M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S., Nunan, N., Reichstein, M., Schimel, J. P., Torn, M. S., Wieder, W. R., & Kögel-Knabner, I. (2020). Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*, 13(8), Article 8. DOI: [10.1038/s41561-020-0612-3](https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3).
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68. DOI: [10.1038/nature16069](https://doi.org/10.1038/nature16069).
- Lehmitz, R., Römbke, J., Graefe, U., Beylich, A., & Krück, S. (2016). Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer (Lumbricidae et Criodrilidae) Deutschlands. *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, 70(4), 565–595.
- Lennartz, G. (2003). *Der bioökologisch-soziologische Klassifikationsansatz und dessen Anwendung in der Naturschutzpraxis: Dargestellt am Beispiel der Borstgrasrasen (Violion) der Eifel unter Berücksichtigung der Laufkäfer, Spinnen, Heuschrecken, Tagfalter und Schwebfliegen*. Shaker Verlag.
- Letten, S., Van Orshoven, J., Van Wesemael, B., Muys, B., & Perrin, D. (2005). Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990. *Global Change Biology*, 11(12), 2128–2140. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2005.001074.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001074.x).
- LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2019). *Regenwürmer in bayerischen Ackerböden* (S. 12) [Merkblatt]. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/merkblaetter/regenwuermer-ackerboeden_lfl-merkblatt.pdf.
- LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017). *Indikatoren zu Klimafolgen und Klimaanpassung in Bayern. Machbarkeitsstudie*. https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00151.htm.
- Lorenz, M., & Kevork, S. (2022). *trenda: Trend Detection in Time Series* (Version 1.0.0) [Software]. <https://github.com/kevorks/trendanalysis>
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2020). *Monitoringbericht 2020 zur Anpassungsstrategie an den Klimawandel in Baden-Württemberg*. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Klima/Monitoringbericht-2020.pdf.

Marx, M., & Gaul, V. (2021). Gehaltsspannen von organischem Kohlenstoff in Ackerböden. *Bodenschutz*, 4/2021, 120–127. DOI:[10.37307/j.1868-7741.2021.04.03](https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2021.04.03).

Marx, M., Schilli, C., Rinklebe, J., Kastler, M., Molt, C., Kaufmann-Boll, C., Lazar, S., Lischeid, G., & Körschens, M. (2016). *Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes. Teil 3: Bestimmung der Veränderungen des Humusgehalts und deren Ursachen auf Ackerböden Deutschlands*. UBA TEXTE 26/2016, hrsg. v. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-fachlicher-rechtlicher-0>

Mayer, M., Leifeld, J., Szidat, S., Mäder, P., Krause, H.-M., & Steffens, M. (2023). Dynamic stability of mineral-associated organic matter: Enhanced stability and turnover through organic fertilization in a temperate agricultural topsoil. *Soil Biology and Biochemistry*, 184, 109095. DOI:[10.1016/j.soilbio.2023.109095](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109095).

Meersmans, J., Van Wesemael, B., De Ridder, F., Fallas Dotti, M., De Baets, S., & Van Molle, M. (2009). Changes in organic carbon distribution with depth in agricultural soils in northern Belgium, 1960–2006. *Global Change Biology*, 15(11), 2739–2750. DOI:[10.1111/j.1365-2486.2009.01855.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01855.x).

Meersmans, J., Van Wesemael, B., Goidts, E., Van Molle, M., De Baets, S., & De Ridder, F. (2011). Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960–2006: SPATIAL ANALYSIS OF SOIL ORGANIC CARBON EVOLUTION. *Global Change Biology*, 17(1), 466–479. DOI:[10.1111/j.1365-2486.2010.02183.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02183.x).

Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., ... Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86. DOI:[10.1016/j.geoderma.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002).

MULE - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt (2020). *Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Monitoringbericht 2020*. https://mwu.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MWU/Klimaschutz/00_Startseite_Klimawandel/210315_Monitoring_2020_bf_.pdf.

Müller, J., Hothorn, T., Yuan, Y., Seibold, S., Mitesser, O., Rothacher, J., Freund, J., Wild, C., Wolz, M., & Menzel, A. (2023). Weather explains the decline and rise of insect biomass over 34 years. *Nature* 628, 349–354 (2024). DOI:[10.1038/s41586-023-06402-z](https://doi.org/10.1038/s41586-023-06402-z).

Murphy, B. (2015). Key soil functional properties affected by soil organic matter—Evidence from published literature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 25, 012008. DOI:[10.1088/1755-1315/25/1/012008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/25/1/012008).

Nabel, M., Selig, C., Gundlach, J., v. d. Decken, H., Klein, M., & Jessel, B. (2021). *BfN Bodenreport: Vielfältiges Bodenleben - Grundlage für Naturschutz und nachhaltige Landwirtschaft*. https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/210108_BodenBioDiv-Report.pdf.

NMZB - Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität (2024). *Ziele Monitoring Bodenbiodiversität*. <https://www.monitoringzentrum.de/ziele-monitoring-bodenbiodiversitaet>.

Nordström, S., & Rundgren, S. (1974). Environmental factors and lumbricid associations in southern Sweden. *Pedobiologia*, 14(1), 1–27. DOI:[10.1016/S0031-4056\(23\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(23)00068-9).

Oellers, J., Fürste, A., Hannig, K., Koslowski, S., Miller, S., Peeters, S., Theves, F., & Toschki, A. (2022). Standardisierte Erfassung der Laufkäfer (Coleoptera: Carabidae) und der Biomasse der Bodenarthropoden auf Ackerflächen – ein Beitrag aus dem landesweiten Insektenmonitoring in Baden-Württemberg. *Naturschutz und Landschaftspflege Baden-Württemberg*, 81. <https://pd.lubw.de/10364>.

- Oellers, J., Toschki, A., Mathews, J., & Kaufmann-Boll, C. (2022). Vernetzung von Bodenmonitoring-Aktivitäten in Deutschland. Chancen für die Bodenbiodiversität. *Bodenschutz*, 2/2022. DOI:[10.37307/j.1868-7741.2022.02.04](https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2022.02.04).
- Paul, C., Bartkowski, B., Dönmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., Weigl, S., Wiesmeier, M., Wolf, A., & Helming, K. (2023). Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. DOI:[10.1016/j.jenvman.2022.117142](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142).
- Petersen, H., & Luxton, M. (1982). A Comparative Analysis of Soil Fauna Populations and Their Role in Decomposition Processes. *Oikos*, 39(3), 288–388. DOI:[10.2307/3544689](https://doi.org/10.2307/3544689).
- Poeplau, C., & Don, A. (2023). A simple soil organic carbon level metric beyond the organic carbon-to-clay ratio. *Soil Use and Management*, 39(3), 1057–1067. DOI:[10.1111/sum.12921](https://doi.org/10.1111/sum.12921).
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 42–55. DOI:[10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x).
- Prout, J. M., Shepherd, K. D., McGrath, S. P., Kirk, G. J. D., & Haefele, S. M. (2021). What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio. *European Journal of Soil Science*, 72(6), 2493–2503. DOI:[10.1111/ejss.13012](https://doi.org/10.1111/ejss.13012).
- Prout, J. M., Shepherd, K. D., McGrath, S. P., Kirk, G. J. D., Hassall, K. L., & Haefele, S. M. (2022). Changes in organic carbon to clay ratios in different soils and land uses in England and Wales over time. *Scientific Reports*, 12(1), 5162. DOI:[10.1038/s41598-022-09101-3](https://doi.org/10.1038/s41598-022-09101-3).
- Puissant, J., Mills, R. T. E., Robroek, B. J. M., Gavazov, K., Perrette, Y., De Danieli, S., Spiegelberger, T., Buttler, A., Brun, J.-J., & Cécillon, L. (2017). Climate change effects on the stability and chemistry of soil organic carbon pools in a subalpine grassland. *Biogeochemistry*, 132(1–2), 123–139. DOI:[10.1007/s10533-016-0291-8](https://doi.org/10.1007/s10533-016-0291-8).
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Reijneveld, A., Van Wensem, J., & Oenema, O. (2009). Soil organic carbon contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004. *Geoderma*, 152(3–4), 231–238. DOI:[10.1016/j.geoderma.2009.06.007](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.007).
- Römbke, J., Jansch, S., Ross-Nickoll, M., Toschki, A., Höfer, H., Horak, F., Russell, D., Burkhardt, U., & Schmitt, Heike. (2012). Erfassung und Analyse des Bodenzustands im Hinblick auf die Umsetzung und Weiterentwicklung der Nationalen Biodiversitätsstrategie. UBA TEXTE, 33/2012, hrsg. v. Umweltbundesamt.). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erfassung-analyse-des-bodenzustands-im-hinblick-auf>.
- Rumohr, Q., Baden, C. U., Bergtold, M., Marx, M. T., Oellers, J., Schade, M., Toschki, A., & Maus, C. (2023). Drivers and pressures behind insect decline in Central and Western Europe based on long-term monitoring data. *PLOS ONE*, 18(8), e0289565. DOI:[10.1371/journal.pone.0289565](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289565).
- Saby, N. P. A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemerrier, B., Follain, S., Walter, C., & Schvartz, C. (2008). Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990–2004. *Soil Use and Management*, 24(3), 254–262. DOI:[10.1111/j.1475-2743.2008.00159.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00159.x).
- Salako, G., Russell, D., Stucke, A., & Eberhardt, E. (2023). *Erarbeitung von Referenzwerten für Bodenorganismen für die Böden in Deutschland. Abschlussbericht*. Unveröffentlichter Entwurf, UBA TEXTE, hrsg. v. Umweltbundesamt.
- Schönthaler, K., & von Andrian-Werburg, S. (2015). *Handbuch zur Verstetigung der indikatorbasierten Berichterstattung zur Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/das-indikatoren_organisationshandbuch.pdf.

- Seibold, S., Gossner, M. M., Simons, N. K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarlı, D., Ammer, C., Bauhus, J., Fischer, M., Habel, J. C., Linsenmair, K. E., Naus, T., Penone, C., Prati, D., Schall, P., Schulze, E.-D., Vogt, J., Wöllauer, S., & Weisser, W. W. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, 574(7780), 671–674. DOI:[10.1038/s41586-019-1684-3](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3).
- Sims, R. W., & Gerard, B. M. (1985). Earthworms. *Synopses of the British Fauna*, vol. 31.
- Singh, J., Schädler, M., Demetrio, W., Brown, G. G., & Eisenhauer, N. (2019). *Climate change effects on earthworms - A review*. DOI:[10.25674/SO91ISS3PP114](https://doi.org/10.25674/SO91ISS3PP114).
- Sleutel, S., De Neve, S., & Hofman, G. (2007). Assessing causes of recent organic carbon losses from cropland soils by means of regional-scaled input balances for the case of Flanders (Belgium). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78(3), 265–278. DOI:[10.1007/s10705-007-9090-x](https://doi.org/10.1007/s10705-007-9090-x).
- Sleutel, S., De Neve, S., Hofman, G., Boeckx, P., Beheydt, D., Van Cleemput, O., Mestdagh, I., Lootens, P., Carlier, L., Van Camp, N., Verbeeck, H., Vande Walle, I., Samson, R., Lust, N., & Lemeur, R. (2003). Carbon stock changes and carbon sequestration potential of Flemish cropland soils. *Global Change Biology*, 9(8), 1193–1203. DOI:[10.1046/j.1365-2486.2003.00651.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00651.x).
- SMUL - Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (2015). *Klimawandel in Sachsen—Wir passen uns an!* <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22321>
- Sokol, N. W., Slessarev, E., Marschmann, G. L., Nicolas, A., Blazewicz, S. J., Brodie, E. L., Firestone, M. K., Foley, M. M., Hestrin, R., Hungate, B. A., Koch, B. J., Stone, B. W., Sullivan, M. B., Zablocki, O., & Pett-Ridge, J. (2022). Life and death in the soil microbiome: How ecological processes influence biogeochemistry. *Nature Reviews Microbiology*, 20(7), Article 7. DOI:[10.1038/s41579-022-00695-z](https://doi.org/10.1038/s41579-022-00695-z).
- Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., & Six, J. (2007). Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86(1), 19–31. DOI:[10.1007/s10533-007-9140-0](https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0).
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. D. R. D., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80–99. DOI:[10.1016/j.agee.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001).
- Sümmerer, M., & Wiesmeier, M. (2023). *Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern*. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 01/2023. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/standorttypische_humusgehalte_von_ackerboeden_in_bayern_2023_schriftenreihe.bf.pdf.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J. E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H. S., Lægdsmand, M., Greve, M. H., & Christensen, B. T. (2014). Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils between 1986 and 2009. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 730–740. DOI:[10.1111/ejss.12169](https://doi.org/10.1111/ejss.12169).
- Toschki, A. (2008). *Eignung unterschiedlicher Monitoring-Methoden als Grundlage zum Risk Assessment für Agrarsysteme: Am Beispiel einer bioökologischen Reihenuntersuchung und einer Einzelfallstudie*. Diss. RWTH Aachen. https://publications.rwth-aachen.de/record/50282/files/Toschki_Andreas.pdf.
- Toschki, A., Burkhardt, U., Haase, H., Höfer, H., Jänisch, S., Oellers, J., Römbke, J., Roß-Nickoll, M., Salomon, J.-A., Schmelz, R. M., Scholz-Starke, B., & Russell, D. (2021). *Edaphobase-Länderstudien. Synökologische Untersuchungen von Bodenorganismen in einem Biotop- und Standortgradienten in Deutschland 2014–2018*. (Bd. 14). https://elib.tiho-hannover.de/receive/tiho_mods_00006143.
- Uhler, J., Redlich, S., Zhang, J., Hothorn, T., Tobisch, C., Ewald, J., Thorn, S., Seibold, S., Mitesser, O., Morinière, J., Bozicevic, V., Benjamin, C. S., Englmeier, J., Fricke, U., Ganuza, C., Haensel, M., Riebl, R., Rojas-Botero, S., Rummler, T., ... Müller, J. (2021). Relationship of insect biomass and richness with land use along a climate gradient. *Nature Communications*, 12(1), 5946. DOI:[10.1038/s41467-021-26181-3](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26181-3).

- UBA - Umweltbundesamt (2023). *Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023>.
- UBA - Umweltbundesamt (2007). *Bodenbiologische Bewertung von BDF anhand von Lumbriciden - Workshop in Weimar 30. November bis 01. Dezember 2006*. UBA TEXTE 34/2007, hrsg. v. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodenbiologische-bewertung-von-boden>.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2014). *Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Wirkungen auf Bodenorganismen* (VDI 4331 Blatt 1).
- VDLUFA - Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (2000). *Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden* (Standpunkt). [https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/Themen.nsf/8194aab8c7a68191c1258290002d2611/c058440e17ffef5c12570c2002836b4/\\$FILE/VDLUFA%20-%20Standpunkt%20Kalkung.pdf](https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/Themen.nsf/8194aab8c7a68191c1258290002d2611/c058440e17ffef5c12570c2002836b4/$FILE/VDLUFA%20-%20Standpunkt%20Kalkung.pdf).
- Viechtbauer, W. (2010). Conducting Meta-Analyses in R with the metafor Package. *Journal of Statistical Software*, 36(3), 1–48. DOI:10.18637/jss.v036.i03.
- Vogel, H.-J., Bartke, S., Daedlow, K., Helming, K., Kögel-Knabner, I., Lang, B., Rabot, E., Russell, D., Stöbel, B., Weller, U., Wiesmeier, M., & Wollschläger, U. (2018). A systemic approach for modeling soil functions. *SOIL*, 4(1), 83–92. DOI:10.5194/soil-4-83-2018.
- Vogel, H.-J., Eberhardt, E., Franko, U., Lang, B., Ließ, M., Weller, U., Wiesmeier, M., & Wollschläger, U. (2019). Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Frontiers in Environmental Science*, 7. DOI:10.3389/fenvs.2019.00164.
- von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 426–445. DOI:10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Dominik, P., Ilg, K., Schmitt, A., Zeitz, J., Gahre, F., Schulz, E., Ellerbrock, R., Utermann, J., Düwel, O., & Siebner, C. (2008). *Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG* (Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 202 71 264; Publikationen des Umweltbundesamtes). <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3707.pdf>.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149–162. DOI:10.1016/j.geoderma.2018.07.026.
- Wolf, M., Schönthaler, K., & Ölmez, C. (2024). *Übersicht über Indikatoren in der bodenbezogenen Berichterstattung Deutschlands und der EU. Teilbericht*. UBA TEXTE 23/2024, hrsg. v. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_texte_uebersicht_ueber_indikatoren.pdf.
- Zikeli, S., & Gruber, S. (2017). Reduced Tillage and No-Till in Organic Farming Systems, Germany—Status Quo, Potentials and Challenges. *Agriculture*, 7(4), 35. DOI:10.3390/agriculture7040035.

A Ergebnisdokumentation zur Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“

Carolin Kaufmann-Boll, Konstanze Schönthaler, Johanna Oellers, Andreas Toschki und Michael Kastler

A.1 Einführung

Die Fachtagung „Bodenindikatoren im Kontext zur Klimaanpassung und zum Bodenschutz“ fand am 17./18. April 2024 im Umweltbundesamt in Dessau-Roßlau im Rahmen des UBA-Forschungsprojekts „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0, statt. Ziel der Tagung war es, auf fachlicher Ebene Zielsetzungen und Grundlagen künftig angedachter Berichterstattungsprozesse vor dem Hintergrund der Bodenschutz- und Klimaschutzgesetzgebung sowie Vorstellungen zur Entwicklung ergänzender bodenbezogener Indikatoren zu vermitteln und zu diskutieren.

Die Tagung vermittelte zum Einstieg einen Eindruck vom Bedarf von Indikatoren und eine Übersicht über die Indikatoren, mit denen aktuell bundesweit, in den einzelnen Bundesländern oder auch international zum Bodenzustand und seinen Veränderungen berichtet wird. Darauf aufbauend fokussierte die Veranstaltung auf Erfahrungen aus der Entwicklung bodenbezogener Indikatoren und deren Überführung in die Praxis (Beispiele) und widmete sich der Frage, wie sich bestehende Lücken bei der Indikatorentwicklung schließen und vorhandene Indikatoren mit weiteren Daten untersetzen lassen. Inwieweit neue Technologien Möglichkeiten dafür eröffnen, wurde mit Blick auf die Potenziale der Fernerkundung und der Künstlichen Intelligenz (KI) betrachtet. Schließlich fanden ein vertiefter Austausch und Diskussionen zu Möglichkeiten der nationalen Berichterstattung für die Themen Bodenkohlenstoff, Bodenbiodiversität, Bodenversiegelung und Schadstoffgehalte in Böden statt.

Teilgenommen haben rund 100 Akteur*innen aus Institutionen, die in Deutschland mit der Berichterstattung zum Thema Boden, mit der Erhebung und Bewertung von bodenbezogenen Messdaten und der Entwicklung von Bodenindikatoren befasst sind. Dazu gehörten Vertreter*innen von BMUV, BLE, BMWSB, UBA, NMZB, BGR, TI, JKI, DWD, GIZ, BSt, BBSR, StatBA, ZALF, UFZ, iDiv, Hochschule Eberswalde, Uni Halle-Wittenberg, RWTH Aachen, Uni Osnabrück, Uni Leipzig, TU Berlin, Senckenberg Museum, LTZ Augustenberg sowie Vertreter*innen der Länder Bayern, Baden-Württemberg, Berlin, Brandenburg, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Weiterhin haben Vertreter*innen von Gutachterbüros, Verbänden und Städten teilgenommen.

Vorträge und Impulse wurden von den Forschungsnehmenden des Forschungsprojekts „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0, sowie von Vertreter*innen des BMUV, des UBA, der BGR, der GIZ, des DWD, des TI, des StatBA, des Ministeriums für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft sowie des Bundesamts für Umwelt in der Schweiz eingebracht. Die Veranstaltung wurde von Carla Schönfelder und Yvonne Knapstein (team ewen GbR, Darmstadt) moderiert. Begleitend wurde ein Rahmenprogramm mit einem gemeinsamen Abendessen und einem Besuch des Bauhausmuseums in Dessau angeboten.

Die vorliegende Ergebnisdokumentation fasst die Inhalte der Tagung zusammen und stellt heraus, welche Punkte in der Diskussion zustimmend aufgegriffen bzw. kontrovers diskutiert wurden, sowie welche Empfehlungen an das UBA für das künftige Handeln des UBA vermittelt worden sind. Die Vortragsfolien wurden, sofern von den Autor*innen freigegeben, auf der Internetseite des UBA veröffentlicht.

A.2 Programm

17. April 2024, 13:00 – 18:00 Uhr

Begrüßung

Dr. Christoph Schulte, UBA, II 2

I. Anforderungen und Rahmenbedingungen

Interview zum Bedarf an bodenbezogenen Indikatoren und Anforderungen

Christiane Heiß (BMUV, T III 1), Dr. Anastasiia Gotgelf (GIZ), Florian Ebertseder (LfL Bayern), Padia Lariu (BMUV, N III 4)

Bodenbezogene Indikatoren und Indikatorenideen – Ergebnisse aus einem FuE-Projekt des UBA

Definitionen, Begrifflichkeiten und Arbeitsinstrumente

Carolin Kaufmann-Boll (ahu GmbH)

Übersicht über bodenbezogene Indikatoren – Erreichtes, Lücken und Diskussionsbedarf

Konstanze Schönthaler (Bosch & Partner GmbH)

II. Erfahrungen aus der Entwicklung von Indikatoren und deren Überführung in die Praxis (Beispiele)

Der LAWA-Abstimmungsprozess zur Entwicklung eines gemeinsamen Indikatorensets in Bund und Ländern

Eckhard Kohlhas (Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, Ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern)

Vorgehen in der Schweiz zum Monitoring der Ressource Boden

Dr. Thomas Drobnik (Bundesamt für Umwelt, Schweiz)

III. Wie lassen sich bestehende Lücken bei der Indikatorentwicklung schließen und vorhandene Indikatoren mit weiteren Daten untersetzen? Welche zusätzlichen Möglichkeiten eröffnen uns dafür neue Technologien?

Mögliche Indikatoren zur Beurteilung von Wasserverfügbarkeit und Trockenstress in Wäldern

Dr. Paul Schmidt-Walter (Deutscher Wetterdienst)

Potenziale der Fernerkundung zur Lösung bodenkundlicher Aufgaben – Nutzung und Vernetzung

Dr. Elke Fries (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Wie kann KI dabei helfen, Datenlücken bei der Entwicklung bodenbezogener Indikatoren zu schließen?

Viola Rädle (Anwendungslabor für Künstliche Intelligenz und Big Data, UBA)

Abschlussdiskussion und Ausblick auf Tag 2

18. April 2024, 9:00 – 13:30 Uhr

Vortragssession 1: Ansätze für Indikatoren zur Biodiversität auf nationaler Ebene

Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ - Ergebnisse aus einem FuE-Projekt des UBA
Dr. Andreas Toschki, Johanna Oellers (gaiaC) & Dr. Christian Ristok, Kristin Paschke (iDiv)

Erfahrungsbericht: Monitoring des Bodenmikrobioms – Erfahrungen aus dem MonViAProjekt
Prof. Dr. Christoph Tebbe (Thünen Institut für Biodiversität)

Erfahrungsbericht: Biodiversitätsmonitoring im Boden an BZE und Level II Standorten
Dr. Erik Grüneberg (Thünen Institut für Waldökosysteme)

Diskussion

Vortragssession 2: Ansätze für Indikatoren zum Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene

Indikatoren zur Bewertung von Humusgehalten für die Bodengesundheit
Prof. Dr. Axel Don (Thünen Institut für Agrarklimaschutz)

Indikatorvorschlag „Standorttypischer Humusgehalt“ – Ergebnisse aus einem FuE-Projekt des UBA
Dr. Michael Kastler (ahu GmbH), Dr. Markus Steffens (FiBL) & Dr. Martin Wiesmeier (LfL Bayern)

Diskussion

Bericht aus den Sessions im Plenum

Workshop 1: Überlegungen für einen Versiegelungsindikator

Impulsvortrag Indikator „Bodenversiegelungsgrad“ auf Basis von Copernicus-Daten
Laurin Faust und Kirstin Marx (UBA FG II 2.7)

Impulsvortrag Integration der Fernerkundungsdaten in die Arbeit des Statistischen Bundesamtes am Beispiel der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie
Jonathan Reith (Statistisches Bundesamt)

Diskussion über methodische Ansätze

Workshop 2: Überlegungen zur Berichterstattung über Schadstoffgehalte in Böden anhand von Indikatoren

Impulsvortrag Vorstellung vorliegender Ideen und Konzepte des UBA
Pia Kotschik (UBA FG IV 1.3), Jörg Frauenstein (UBA, FG II 2.6) & Silvia Pieper (UBA FG II 2.7)

Diskussion und Austausch zu möglichen Indikatoren

Kurzvorstellung der Ergebnisse im Plenum

Zusammenfassung und Ausblick

Jeannette Mathews, Dr. Marc Marx, UBA, II 2.7

A.3 Vortragsblock I. Anforderungen und Rahmenbedingungen

Im Interview mit Vertreter*innen des BMUV (T III 1 und N III 4), der GIZ und der LfL Bayern wurde deutlich, dass ein vielfältiger Bedarf an verständlichen, vertrauenswürdigen und praktikablen Indikatoren besteht. Dieser ergibt sich aus der indikatorenbasierten Berichterstattung auf Bundes- und Länder- sowie auf internationaler Ebene. Er begründet sich u. a. aus der Umsetzung und Ausgestaltung folgender Gesetze, Strategiepapiere und internationalen Übereinkommen: Bundes-Bodenschutzgesetz, Klimaanpassungsgesetz, Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie und Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Desertifikation (UNCCD) sowie Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Es ist herausfordernd, eine Balance zwischen den Ansprüchen der Verständlichkeit (Einfachheit) von Indikatoren auf der einen Seite, der wissenschaftlich fundierten und abgestimmten Ableitung sowie der Machbarkeit in der Umsetzung

(Kosten) und der Justiziabilität auf der einzelnen Fläche auf der anderen Seite herzustellen. Entwicklungen müssen – gerade im Bodenbereich, wo sich Veränderungen oftmals schleichend vollziehen und teilweise die Messungenauigkeiten hoch sind – mit langen Zeitreihen beobachtet werden, um bei Bedarf gegensteuern zu können. Zum Teil liegt die Zuständigkeit für Maßnahmen auf der Ebene der Kommunen und Kreise, so dass auch diese Ebene zu berücksichtigen ist. Viele Fragen hinsichtlich der Definition eines „guten Bodenzustands“, der Einigung auf Schwellenwerte und der Zusammensetzung von Indikatoren-Sets sind bisher offen.

Um zu einem gemeinsamen Verständnis von grundlegenden Begriffen bei der Veranstaltung zu kommen, wurden vorab erarbeitete Definitionen vorgestellt, die im Plenum Zustimmung fanden (siehe unten). Während Deskriptoren (Parameter) den Bodenzustand beschreiben, zielen Indikatoren stets auf eine Bewertung der Veränderung des Bodenzustands ab. Indikatoren sollen Auskunft darüber geben, ob und wann Ziele erreicht oder verfehlt werden. Für die Indikatorentwicklung wichtige Arbeitsinstrumente sind Referenz-, Ziel- und Schwellenwerte, Trendanalysen und Dokumentationsstrukturen wie beispielsweise die Indikator- und Daten-Factsheets aus dem DAS-Monitoring.

Bodenmonitoring

ist die regelmäßige und langfristige Überwachung von Böden zur Erfassung von Veränderungen des Bodenzustands bzw. der Bodengesundheit. Bodenmonitoring nutzt In-situ-Erhebungen, Fernerkundungsdaten und Modellierungen. Unter Bodenmonitoring wird hier auch die Erfassung von Gefährdungen der Bodenfunktionen verstanden, wie Schadstoffeinträge oder Versiegelung. Zum Bodenmonitoring gehört es, Daten aufzubereiten, darzustellen und zu veröffentlichen. Das kann z. B. geschehen, indem aus Messdaten des Bodenmonitorings Indikatoren abgeleitet werden.

Bodenindikatoren

aggregieren Daten und stellen komplexe Sachverhalte verständlich dar. Sie beschreiben und bewerten den Zustand und die Entwicklung der Umwelt in Bezug auf das Medium Boden. Sie zeigen Entwicklungen kontinuierlich über lange Zeiträume auf und erleichtern die Kommunikation von Herausforderungen des Bodenschutzes. Als Indikatoren kommen Messparameter, abgeleitete Größen und Parameterbündel in Frage, die auf quantitativen oder qualitativen Informationen beruhen. Gute Indikatoren sind ausreichend sensitiv, um Veränderungen anzuzeigen, sind leicht interpretierbar, können bewertet werden, sind für einen definierten Raum repräsentativ, basieren auf Daten, die längerfristig verfügbar sein werden und sind „nützlich“, d. h. es lassen sich Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen aus ihnen ableiten.

Bodendeskriptoren

werden von der Europäischen Kommission im Vorschlag für das Bodenüberwachungsgesetz von 2023 als „Parameter, die ein physikalisches, chemisches oder biologisches Merkmal der Bodengesundheit beschreiben“ definiert. Bodendeskriptoren sollen zur Beschreibung der Bodendegradation festgelegt werden und den Überwachungsrahmen auf EU-Ebene definieren. Sie können gemessen oder geschätzt werden. Für einige Bodendeskriptoren sind im Richtlinien-Vorschlag Kriterien für einen gesunden Bodenzustand formuliert.

Im Ergebnis des Forschungsprojekts „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0, wurde deutlich, dass es für viele Boden-Themen und Zielfelder bisher keine befriedigenden Indikatoren gibt, gleichwohl aber zahlreiche Aktivitäten zur Entwicklung neuer Indikatoren und neuer Monitoringsysteme laufen. Weiterentwicklungsbedarf besteht

in allen bodenbezogenen Themenfeldern, ganz besonders zu Biodiversität, Bodenschadverdichtung und Erosion. Es sind weitere Überlegungen zu Aggregationen für Aussagen zur Bodengesundheit und zu Bodenfunktionen notwendig, ebenso eine stärkere Harmonisierung und Systematisierung der Vorgehensweise beim Monitoring und der Auswertung. Hier wäre insbesondere auch die LABO als koordinierendes Gremium gefragt. Eine Präzisierung von politischen Zielen im Sinne des Bodenschutzes ist wünschenswert, jedoch nicht immer durchsetzbar (so beispielsweise für Versiegelung). Wenn konkrete Ziele fehlen, müssen zumindest Tendenzen bewertet werden. Neben den Aktivitäten zur Indikatorentwicklung darf das Handeln nicht vergessen werden. Mit der Veröffentlichung des UBA TEXTES 23/2024 (Wolf et al., 2024) wurde eine Grundlage für die weitere gemeinsame Arbeit von Bund, Ländern und Forschungseinrichtungen zu bodenbezogenen Indikatoren vorgelegt.

A.4 Vortragsblock II. Erfahrungen aus der Entwicklung von Indikatoren und deren Überführung in die Praxis

Der LAWA-Abstimmungsprozess zur Entwicklung eines gemeinsamen Indikatorensets in Bund und Ländern

Die methodische Herangehensweise in der LAWA zur Entwicklung von Klimaindikatoren für die Wasserwirtschaft umfasste die Schritte 1) Beurteilung der Eignung und Priorisierung auf der Grundlage einer bundesweiten Abfrage nach vorhandenen Monitoringprogrammen und Indikatoren zum Klimawandel, 2) Systematisierung der Indikatoren in solche zur Messung von Klimaänderungen, Klimaschutzmaßnahmen, Klimafolgen (Impact), Klima-Anpassung (Response) und Wirksamkeit von Maßnahmen, 3) Standardisierung im Hinblick auf die Auswahl bzw. Anwendbarkeit von Indikatoren (Aussagekraft, Vertrauenswürdigkeit, Umgang mit uneinheitlichen Methoden), 4) vertiefende thematische Auswahl und 5) Strukturierung der Arbeit mit Unterstützung eines Dienstleisters, Bildung von kleinen Fachteams und Austausch mit Dritten. Ergebnis sind 19 Indikatoren, die in das DAS-Monitoring eingebracht werden konnten; weitere sind in Bearbeitung. An der Operationalisierung der Indikatoren mit einer regelmäßigen, möglichst jährlichen Aktualisierung der Datenreihen durch die Länder wird gearbeitet und es wird auf einheitliche Methoden hingewirkt. Prinzipiell besteht der Anspruch, alle treibenden Kräfte, die auf Indikatoren wirken, einzubeziehen, z. B. auch Entwässerungsmaßnahmen, die neben Klimafaktoren wirksam sind. Indikatoren, die dominant von anderen Einflüssen überlagert werden, wurden im DAS-Monitoring nicht berücksichtigt. Eine allgemeine umfassende Datensammlung fand nicht statt, sondern es wurde – mit Indikatorideen im Hintergrund – gezielt nach geeigneten Beispieldatensätzen zur Indikatorentwicklung gesucht.

Vorgehen in der Schweiz zum Monitoring der Ressource Boden

In der Schweiz wird die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) aktuell mit dem Blick auf Indikatoren neu ausgerichtet. Zu der 1985 begonnenen und ursprünglich auf Schwermetallbelastungen, Nährstoffe und Versauerung ausgerichteten Beobachtung mit 117 Standorten kommen Erweiterungen für Pflanzenschutzmittel (PSM) und „neue“ Schadstoffe (PFAS, Mikroplastik, Screenings), Verdichtung, Erosion und Bodenbiologie sowie ggf. neue Standorte auf organischen Böden und ein Monitoring von Klimaschutzmaßnahmen im Hinblick auf Humus hinzu. Ein Monitoringkonzept für Bodenversiegelung wird erarbeitet. Organisatorisch in die NABO einbezogen sind das Bundesamt für Umwelt (BAFU), das Amt für Raumentwicklung (ARE) und das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). Eingerichtet wurden Fachgruppen für „Biologie & Humus“, „Bodenphysik“, „Schadstoffe“ und „Versiegelung“. Für sieben Module von „Bodenstruktur/Verdichtung“ bis „Quantität und Qualität“ wurden der aktuelle Stand, die Ziele, das Vorgehen und die angedachten Indikatoren vorgestellt. Schnittstellen der NABO sind vorhanden zur Nationalen Bodenkartierung, zu Kantonalen Messstandorten, zum ökologischen Leistungsna-

weis ÖLN, zum Trockenheitsmonitoring, zu LUCAS Soil, zum EU Soil Monitoring Law, zum Global Soil Laboratory Network GLOSOLAN und zum Biodiversitätsmonitoring der Schweiz. Die gemessenen PSM werden nach der Reproduzierbarkeit der Messung und nach Ökotoxizität ausgewählt; die Beprobung findet im Winter im Sinne eines Hintergrundmessnetzes statt. Voraussetzungen erhöhen sich mit dem EU-Monitoring Law die Anforderungen an die Dichte des Messnetzes. In der Schweiz werden bisher Acker-, Grasland- und Waldflächen sowie zwei Stadtparks einbezogen, mehr Standorte sind wünschenswert. Bei vielen mit dem Bodenmonitoring zusammenhängenden Themen stellen sich in der Schweiz die gleichen Herausforderungen wie in Deutschland. Vor diesem Hintergrund werden eine Zusammenarbeit und der weitere gemeinsame Informationsaustausch von beiden Seiten begrüßt und angestrebt.

A.5 Vortragsblock III. Möglichkeiten für das Schließen von Lücken bei der Indikatorentwicklung und das Untersetzen vorhandener Indikatoren mit weiteren Daten

Mögliche Indikatoren zur Beurteilung von Wasserverfügbarkeit und Trockenstress in Wäldern

Im Bodenfeuchteviewer des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind seit März 2024 neue Bodenfeuchtekarten für Wald (Buche, Eiche, Kiefer, Fichte) verfügbar. Verknüpft sind Bodenfeuchteprofile der letzten 30 Tage. Aus diesen Daten in Verbindung mit dem Modell LWF-Brook90 wurden drei Trockenstressindikatoren abgeleitet: der mittlere relative Wassergehalt (REW, „% nFK“), die Unterschreitungsintensität von Trockenstress-Grenzwerten (vREW) und die Transpirationdifferenz (TD). Die Parametrisierung des Modells ist mit Daten von Level II-Standorten vorgenommen worden. Alle Indikatoren zeigen eine Abnahme der Wasserverfügbarkeit seit Ende der 1980er Jahre. Sichtbar wird ein deutlicher Unterschied von mittlerer Wasserspeicherung (REW) und Bodentrockenheit (vREW) in der Vegetationszeit zwischen 1961-1990 und 1991-2020. TD und vREW sind einander sehr ähnlich, wobei sehr ausgeprägte Trockenjahre besser mit der TD differenziert werden können. Angeregt werden eine dynamische Einbindung des Blattflächenindex und eine Berücksichtigung von Durchwurzelungsbarrieren. Die Indikatoren könnten auch auf einzelne Standorte angewendet werden. Die zugrundeliegenden Daten können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Potenziale der Fernerkundung zur Lösung bodenkundlicher Aufgaben – Nutzung und Vernetzung

Das Copernicus Erdbeobachtungsprogramm umfasst die Satelliten der Sentinel-Reihe sowie Expansionsmissionen wie z. B. die Copernicus Hyperspectral Imaging Mission CHIME (2028). Die Daten und Dienste sind frei zugänglich. Eine flächenhafte Erfassung von Bodenparametern zur Unterstützung klassischer terrestrischer Verfahren bietet sich vor allem für datenarme Gebiete an. Vorteile sind die hohe zeitliche Auflösung, geringer Aufwand und geringe Kosten sowie die Möglichkeit, nachträgliche Datenauswertungen vorzunehmen. Nutzbar sind die Daten beispielsweise auch, um effizientere Probenahmedesigns zu entwickeln. Indirekte Aussagen sind möglich z. B. über C_{org} und Textur zu Nährstoffspeicherung und -verlust, Wasserspeichervermögen, Schadstoffrückhalt, Bodenverdichtung und Erosionsanfälligkeit. Methodische Einschränkungen bestehen vor allem darin, dass nur an der Oberfläche und nicht in der Tiefe gemessen wird (Eindringtiefe 15 μm), dass die Messung auf unbedeckte Böden limitiert und die Auflösung in der Fläche gering ist. Routineverfahren für bodenbezogene Anwendungen sind noch nicht einsetzbar. Aktuelle Aktivitäten der BGR zu Potenzialen der Fernerkundung für Bodennutzung und Bodenschutz sind F+E-Projekte, Gremienarbeit und fachlicher Austausch. Das „Copernicus Netzbüro Boden“ bündelt Informationen zu Dienstleistern, Produkten und Projekten und befasst sich mit User-Bedarfen, Vernetzung und der Optimierung von Dienstleistungen und Bodenprodukten. In einem ersten Workshop zur Nutzung von Fernerkundungsdaten für bodenkundliche Aufgaben mit ca. 80 Teilnehmenden aus Behörden, Forschungsinstituten, Universitäten, Stiftungen und Unternehmen im Februar 2024 wurden Potenziale insbesondere für Erosion,

Quellen/Schrumpfen und Drainagedetektion gesehen. Als häufigste zukünftige Anwendungsfelder wurden Bodeneigenschafts- und Bodenfunktionskarten und Moorbodenmonitoring angegeben. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass die in Deutschland in hoher Qualität bei den geologischen Diensten vorliegenden Bodenkarten verbessert oder In-situ-Messungen durch Satellitenfernerkundung ersetzt werden können. Die Daten der CHIME-Mission mit einer Auflösung von 30 x 30 m in der Fläche und einem Intervall von sechs Tagen bieten ab 2028 besonderes Potenzial. Der wissenschaftliche Nachwuchs muss darin besser ausgebildet werden, Fernerkundungsdaten auszuwerten und zu operationalisieren. Die Satellitenfernerkundung ist von vor Ort-Methoden der gamma-Spektrometrie zu trennen.

Wie kann KI dabei helfen, Datenlücken bei der Entwicklung bodenbezogener Indikatoren zu schließen?

Das Anwendungslabor für Künstliche Intelligenz und Big Data (KI-Lab) am UBA hat seine Arbeit 2023 aufgenommen und betreibt Forschung, Entwicklung, Kompetenzaufbau, Beratung und Wissenstransfer im Geschäftsbereich des BMUV. Zur Beantwortung der Frage, inwieweit KI dabei helfen kann, Datenlücken bei der Entwicklung bodenbezogener Indikatoren zu schließen, werden diese Datenlücken anfangs charakterisiert. Für das Schließen der Lücken kommen unter anderem folgende Methoden zum Einsatz: data dropping (Löschen) und single imputation (mit anderem Wert füllen) – u. a. durch Mittelwertbildung, Regression oder Entscheidungsbaum. Mit Hilfe der multiple imputation werden Lücken unter Beachtung von Unsicherheiten gefüllt (Bootstrap, Bayesianische Statistik u. a.). Imputationen sind limitiert und schaffen es nicht, messtechnisch bedingt fehlende Werte zu ersetzen. Um räumliche Datenlücken zu füllen, sind Methoden der räumlichen Interpolation wie Inverse distance weight geeignet. Für das Erkennen eines „gesunden Bodens“ kommen Methoden des supervised learning in Frage, wobei zunächst die „Wahrheit“, d. h. der „gesunde Bodenzustand“ zu definieren ist. Insbesondere bei zeitlich hoch aufgelösten Daten wird ein Potenzial der vorgestellten Methoden gesehen. Eine Plausibilisierung anhand gemessener Daten ist immer notwendig. Es bietet sich an, Vorhersagen anhand eines Testdatensatzes auszuprobieren. Von Dr. Ute Wollschläger wurde auf die Arbeiten von Prof. Mareike Ließ (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf) hingewiesen, die BZE-Daten mit Maschinellem Lernen ausgewertet hat⁵. Elke Dietz (LWF Bayern) machte im Zusammenhang mit der Anwendung von KI-Methoden auf Arbeiten der Universität Tübingen zur Bodenkartierung aufmerksam. In der Abschlussdiskussion wurden keine weiteren Hinweise gegeben.

A.6 Vortragssession 1: Ansätze für Indikatoren zur Biodiversität auf nationaler Ebene

Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ - Ergebnisse aus einem FuE-Projekt des UBA

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0 wurde der Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ für landwirtschaftlich genutzte Böden erarbeitet. Leitend für die Ausarbeitung des Indikators war das Ziel, generelle Entwicklungen auf nationaler Ebene erkennen zu können und eine kurzfristige Umsetzung zu ermöglichen (verfügbare Daten, bundesweite Abdeckung, Anzahl und Abstand der Messkampagnen). Der Vorschlag wurde in einem Fachgespräch im Oktober 2023 mit Expertinnen*Experten diskutiert und im Anschluss weiter ausgearbeitet. Die vorgestellte Fallstudie bezieht über 200 Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Bayern, Sachsen-Anhalt, Schleswig-

⁵ Ließ, M. (2022). [Modeling the Agricultural Soil Landscape of Germany—A Data Science Approach Involving Spatially Allocated Functional Soil Process Units](#). *Agriculture*, 12(11), 1784.

Ließ, M. (2022). [3D soil parameter space of the agricultural landscape](#) [Germany, Version 2], Dataset, BonaRes Repository, DOI: 10.20387/bonares-13qm-mw25Copy

Holstein und Brandenburg ein, deren Messreihen teilweise bis 1985 zurückreichen. Die Messintervalle variieren zwischen 3 und 7 Jahren. Methodische Unterschiede bestehen hinsichtlich der Regenwurmaustreibung und der Flächengröße. Neben einem Vergleich der absoluten mittleren Abundanzen und Artenzahlen wurde ein Forschungsansatz mit einem Vergleich der BDF-spezifischen zeitlichen Veränderung von Abundanz und Biomasse vorgestellt. Auf Einschränkungen hinsichtlich der Repräsentativität der BDF, der methodischen Unterschiede in der Datenerhebung und der Aussagekraft für die Gesamt-Biodiversität wurde hingewiesen. Datengrundlagen für weitere relevante Landnutzungstypen wie Wälder und andere Lebensräume wie Auen fehlen bislang. Ein Darstellungsvorschlag als Säulengrafik und das Ergebnis von Trendanalysen liegen vor.

Der Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ ist ein erster bedeutsamer Schritt, um das Thema Bodenbiodiversität in die nationale Berichterstattung einbringen zu können. Dazu sind folgende weitere Schritte erforderlich 1) die Fallstudie für Grünland und Ackerstandorte auf das Bundesgebiet erweitern, 2) methodische Standards zur Harmonisierung der Daten entwickeln, 3) eine ausgewogene Beprobungsstrategie für den bundesweiten Indikator etablieren und 4) Referenzwerte für wesentliche Lebensräume als qualitative Bewertungsgrundlage ermitteln. Anforderungen an Datenlieferungen und Qualitätssicherung wurden benannt. Das ANK-Projekt „Stärkung der Bodenbiodiversität als unverzichtbaren Beitrag für den Natürlichen Klimaschutz“ ist dabei ein wichtiges Instrument, in dem erstmals Methodenstandards vereinheitlicht werden und eine Basiserhebung für verschiedene Nutzungsarten durchgeführt wird.

Erfahrungsbericht: Monitoring des Bodenmikrobioms – Erfahrungen aus dem MonViAProjekt

Beim Thünen-Institut für Biodiversität liegen Erfahrungen zum Monitoring des Mikrobioms (Mikroorganismen) aus dem MonViA-Projekt für ein bundesweites Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften vor. Hier werden Aussagen zur zeitlichen Dynamik des Mikrobioms getroffen. Von Bedeutung sind hier praxistaugliche Monitoring-Methoden mit Boden-DNA, die Aussagen zur Abundanz und Diversität ermöglichen. Hinweise für geeignete Methoden der Probenahme und Probenvorbehandlung wurden gegeben. Methoden des maschinellen Lernens weisen Potenzial für die Datenauswertung zur Mustererkennung auf. Für das Mikrobiom-Monitoring im Kontext der Bodenzustandserhebung (BZE) II (Agrar) sind 192 Standorte ausgewählt worden. Das Mikrobiom sollte ein wesentlicher Bestandteil sein, soweit Aussagen zum Gesamt-Artenreichtum getroffen werden sollen. Die standortbezogenen Daten eignen sich jedoch nicht, um in die Fläche übertragen zu werden.

Erfahrungsbericht: Biodiversitätsmonitoring im Boden an BZE und Level II Standorten

Mit der Biologischen Bodenzustandserhebung deutscher Wälder (BBZE-Wald), die vom Thünen-Institut für Waldökosysteme koordiniert wird, wird die BZE Wald um ein systematisches und bundesweit repräsentatives Monitoring zur Erfassung der Biodiversität im Boden ergänzt. Das Projekt ist für 3 ½ Jahre angelegt und umfasst die Entnahme von Bodenproben, die Bestimmung der Makrofauna (Regenwurmfänge) und Mesofauna (Bestimmung von Collembolen, Hornmilben und Enchyträen) sowie Laboranalysen zur Mikrobiologie (Mikroflora, Pilze, Bakterien, Archaeen und andere Einzeller) an Level II- und ausgewählten BZE-Wald-Standorten. Die Vorgaben zur Probenentnahme und Analytik, zur Qualitätssicherung und Harmonisierung sowie der Stand der Erhebung wurden vorgestellt.

Diskussion

- ▶ Die Datenbasis aus der Boden-Dauerbeobachtung für Regenwürmer in Acker- und Grünlandböden ist solide. Ein Monitoring für Waldböden kann aufbauend auf dem Ansatz der BBZE entwickelt werden.

- ▶ Mit dem Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ wurde ein Anfang gemacht, um das Thema Bodenbiodiversität öffentlich kommunizieren zu können und in die laufenden Strategiediskussionen einzubringen (bspw. in die Formulierung messbarer Ziele im Rahmen der Klimaanpassungsstrategie der Bundesregierung). Der Ansatz muss jedoch weiterentwickelt und verbessert werden (Standorte, Nutzungstypen, Probenahmen). Mit Hilfe des Forschungsansatzes besteht die Möglichkeit, die Erhebungsmethoden anzupassen, ohne die Auswertbarkeit der Altdaten zu verlieren.
- ▶ Für Aussagen bzgl. der Biodiversität sollte ergänzend zu quantitativen Daten auch das Artenspektrum als Indikator aufgenommen werden.
- ▶ Generell sind Referenzwerte als Bewertungsgrundlagen notwendig. Derzeit wird über das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) eine Basiserhebung vorbereitet mit dem Ziel, einen guten ökologischen Bodenzustand abzuleiten.
- ▶ Die Bildung von Schwellenwerten ist schwierig.
- ▶ Gegebenenfalls sind regionale Indikatoren sinnvoll, weil die treibenden Kräfte nicht bundesweit einheitlich zu bewerten sind.
- ▶ Die Einbeziehung des Lebensraums ist wichtig.
- ▶ Die Nutzung der BBZE würde langfristig den Regenwurmindikator für Wälder voranbringen; Synergien und Anpassungen wären zu prüfen.
- ▶ In Wäldern muss zwischen Laub- und Nadelwald unterschieden werden (Boden unter Nadelwald ist zu sauer für Regenwürmer, daher fehlen sie dort häufig).
- ▶ Bei Datenerhebungen im Ackerland ist das Bodenmanagement von Bedeutung (Vor-Ort-Daten dazu fehlen teilweise, Datenauswertungen sind z. B. über InVeKoS-Daten möglich). Für das Auftreten der Regenwürmer ist die Anbaukultur nachrangig; Sandstandorte sollten jedoch getrennt betrachtet werden.
- ▶ Bei Grünlandstandorten sollte eine Abwägung der Differenzierung der Standorttypen stattfinden (keine zu feine Auftrennung und auch keine Mischung aller Standorttypen; Trennung: extensiv, intensiv, feucht, trocken).
- ▶ Die strukturierte Zusammenführung der bei Bund und Ländern vorliegenden vielfältigen Daten zur Bodenbiodiversität an einer zentralen Stelle/Datenbank wurde andiskutiert. In diesem Zusammenhang ist die Verwendbarkeit vorliegender Datenbanksysteme wie beispielsweise Edaphobase zu prüfen. Für die Indikatorberechnung ist eine strukturierte Aufnahme bei den Daten erhebenden Stellen notwendig.
- ▶ Das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität arbeitet an vielen verwandten Themen. Mit dem UBA besteht eine gute Zusammenarbeit. Hierbei werden die angesprochenen Fragen weiterbearbeitet.
- ▶ Bei Weiterentwicklungen zur Erfassung der Bodenbiologie sollte angestrebt werden, die Artengruppen auch nach ihren Funktionen zu bewerten, um so Aussagen zu den Einflüssen von Abundanzveränderungen auf die Bodenfunktionen treffen zu können.
- ▶ Im Wald sollten andere Funktionen und Ökosystemleistungen berücksichtigt werden als in der Agrarlandschaft.

- ▶ Auch Enzymmessungen (z. B. Phosphatasen) sind wichtig, um zu verstehen, wie viele Organismen die Ökosystemleistungen erbringen, da dies Hinweise auf Resilienz und Dynamik der Mikroorganismen liefert.
- ▶ Fehlende Expertise kann Projekte zum Scheitern bringen. Es sollte verstärkt daran gearbeitet werden, Expertise aufzubauen, da fachlich ausgebildete Nachwuchskräfte und Dienstleister fehlen.
- ▶ Durch die aktuelle Vergabepaxis besteht die Schwierigkeit für die Unternehmen, Expert*innen in größerer Zahl für Erhebungsaufgaben einzustellen bzw. einzuarbeiten, die dann ggf. nach Projektabschluss kurze Zeit später nicht mehr beschäftigt werden können.
- ▶ An der Aufgabe der Entwicklung eines Indikators zur Bodenbiodiversität sollte weitergearbeitet werden.

An der Vortragsession haben ca. 30 Personen teilgenommen.

A.7 Vortragsession 2: Ansätze für Indikatoren zum Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene

Indikatoren zur Bewertung von Humusgehalten für die Bodengesundheit

Humus unterstützt viele Bodenfunktionen und ist zentral für die Bodengesundheit. Humusgehalte allein reichen als Indikatoren für eine Bewertung nicht aus. Humus wird stark durch die Bewirtschaftung beeinflusst und ist sehr variabel. Vom Thünen-Institut für Agrarklimaschutz wurde die Eignung verschiedener Messgrößen als Indikatoren bewertet: 1) C_{org}/Ton -Verhältnis, 2) C/C_{exp} basierend auf Daten der BZE Landwirtschaft, 3) Standorttypische Humusgehalte auf Grundlage der BZE Landwirtschaft und 4) „Naturnahes Ökosystem“ als Referenz (C_{org} im Acker < 60% im Grünland). Aufgrund von Nachteilen der vier Ansätze wurde der „Kontextspezifische C_{org} -Trend“ als neuer Indikator vorgeschlagen. Dieser berücksichtigt, dass Grenzwerte für Humusgehalte aufgrund der oft linearen Beziehung zu Bodenfunktionsgrößen nicht ableitbar sind und ein „Mehr“ an Humus immer positiv ist. Mit diesem Indikator lässt sich an Standorten bewerten, wann Humus zu erhöhen oder zu erhalten ist. Bei starker Unterschreitung des Humuserwartungswerts (C_{exp}) (25. Perzentil) werden höhere Anforderungen an den Bodenkohlenstofftrend gestellt, als wenn der Humusgehalt innerhalb oder über dem Humuserwartungswert liegt.

Indikatorvorschlag „Standorttypischer Humusgehalt“ – Ergebnisse aus einem FuE-Projekt des UBA

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0, wurde der Indikatorvorschlag „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ erarbeitet. Er betrachtet die Humusgehalte in Oberböden mithilfe des organischen Kohlenstoffs und vergleicht diese mit dem standorttypischen Humusgehalt anhand der Entwicklung des prozentualen Anteils von Messstandorten auf Acker- und Grünlandböden ober-, inner- und unterhalb der Referenzspannweiten des standorttypischen Humusgehalts. Leitend für die Ausarbeitung des Indikators war das Ziel, generelle Entwicklungen auf nationaler Ebene erkennen zu können und eine kurzfristige Umsetzung zu ermöglichen (verfügbare Daten, bundesweite Abdeckung, Anzahl und Abstand der Messkampagnen). Der Vorschlag wurde in einem Fachgespräch im Oktober 2023 mit Expert*innen diskutiert und im Anschluss weiter ausgearbeitet. Die vorgestellte Fallstudie bezieht 252 Messstellen in Bayern, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen ein, deren Messreihen teilweise bis 1985 zurückreichen. Als Referenzzustand wird die bundesweite BZE Landwirtschaft (2008-2018) zugrunde gelegt. Die Messinter-

valle variieren zwischen 1 und 5 Jahren. Eine Vergleichbarkeit der Erhebungsmethoden ist prinzipiell gegeben. Der Indikator lässt Veränderungen erkennen, bewertet diese jedoch nicht im Sinne einer funktionell ausreichenden Humusversorgung. Auf weitere Einschränkungen wurde hingewiesen. Ein Darstellungsvorschlag als Säulengrafik liegt vor, ebenso wie die Ergebnisse von Trendanalysen für sechs Standorttypen mit ausreichender Anzahl von Messstellen. Um den Indikatorvorschlag zum Zweck einer nationalen Berichterstattung umzusetzen, ist es erforderlich: 1) die Fallstudie auf das Bundesgebiet zu erweitern und damit räumliche und zeitliche Lücken zu füllen, 2) ein geeignetes Bewertungsschema für Veränderungen zu entwickeln und 3) die Datenqualität und den Datenaustausch zu standardisieren. Weiterhin wird Forschung und Entwicklung für weitere Landnutzungstypen (Forst) und organische Böden sowie zu Zusammenhängen mit Bewirtschaftung, Klima und Bodenleben empfohlen.

Die vorgeschlagenen Indikatoren „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ und „Kontextspezifischer C_{org} -Trend“ stehen in einem engen Zusammenhang. Beide nutzen Humusgehalte als Deskriptor und sie beziehen sich auf Daten der BZE Landwirtschaft entweder als Referenzzustand oder zur Ableitung eines standortspezifischen Humuserwartungswerts (C_{exp}). Das Konzept des „kontextspezifischen C_{org} -Trends“ ist auf Standorte anwendbar. Für die Darstellung des Indikatorvorschlags „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ wurde ein Prinzip zur Aggregation von Messstellen vorgeschlagen und dieses im Rahmen einer Fallstudie für drei Bundesländer mit Daten aus Humusmonitoring und Boden-Dauerbeobachtung getestet.

Diskussion

- ▶ Das SOC/Ton-Verhältnis ist nicht als Indikator für Böden in Deutschland geeignet.
- ▶ Die Ergebnisse der Fallstudie „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ sind noch nicht ausreichend, um sie in einer nationalen Berichterstattung zu veröffentlichen. Hierzu ist eine Erweiterung um weitere Daten erforderlich.
- ▶ Die Verwendung unterschiedlicher Zeiträume in der Fallstudie „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ kann problematisch sein.
- ▶ Der kontextspezifische C_{org} -Trend ist im Prinzip gut. Dafür müsste die Probenahme angepasst werden (mehr Probenahmepunkte). Angeregt wird die Berücksichtigung der Krumentiefung.
- ▶ Aus Sicht von Hr. Don (TI) ist die Praxistauglichkeit des Indikatorvorschlags „kontextspezifischer C_{org} -Trend“ gegeben. Wie ist der Trend in der Fläche abbildbar? Fernerkundungsmethoden liefern erstaunlich gute Vorhersagen von C-Gehalten in unbedeckten Böden.
- ▶ Willkürlich gesetzte Grenzen sind angreifbar; Funktionen sollten im Mittelpunkt stehen.
- ▶ Das Konzept der standorttypischen Humusgehalte wird bisher für Forstböden nicht angewendet. Ist der „kontextspezifische C_{org} -Trend“ auch für Wald anwendbar?
- ▶ Der erwartbare Kohlenstoffgehalt muss für Acker, Grünland, Wald differenziert werden.
- ▶ Anmoorige Böden und Moorstandorte sind in beiden Vorschlägen nicht berücksichtigt worden.
- ▶ Für die Analyse von Trends sind mindestens sieben Datenpunkte erforderlich (Anforderung im DAS-Monitoring).

- ▶ Mit den vorgestellten Indikatorvorschlägen lassen sich nicht alle Fragestellungen abdecken, beispielweise sind für Klimaschutzfragen stets Vorräte zu betrachten.
- ▶ Die Entwässerung der Landschaft führt zu Humusverlusten; dies ist auf der Maßnahmensseite zu berücksichtigen.
- ▶ Die Folgen von Grünlandumbruch sollten in den Indikatoren erkennbar sein.
- ▶ Der Zusammenhang mit Stickstoff sollte berücksichtigt werden.
- ▶ Im Rahmen der BZE-Arbeitsgremien findet ein Austausch zur Erhebung von Kohlenstoff in Böden statt.
- ▶ Die Diskussion von Indikatorenansätzen zum Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene ist nicht abgeschlossen und sollte fortgesetzt werden.

An der Vortragsession haben ca. 35 Personen teilgenommen.

A.8 Workshop 1: Überlegungen für einen Versiegelungsindikator

Als erster Impuls von Seiten des Umweltbundesamtes (Fachgebiet II 2.7) diente die Betrachtung eines möglichen Indikators „Bodenversiegelungsgrad“ auf Basis von Copernicus-Satellitendaten. Gefragt wurde nach Hindernissen für die Nutzung dieses Indikators. Verschiedene politische Zieloptionen wurden zur Diskussion gestellt: 1) Regionalspezifische Ziele gekoppelt an Bevölkerungszahlen, 2) Netto-Null-Bodenversiegelung bis 20XX und 3) Limitierung der Bodenversiegelung auf X % der Gesamtfläche. Die Imperviousness könnte als Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)-Indikator zur Bodenqualität geeignet sein.

Als zweiter Impuls wurde ein Bericht des Statistischen Bundesamtes über die Integration von Fernerkundungsdaten in die Arbeit des Statistischen Bundesamtes am Beispiel der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie eingebracht. Ergänzend zu Methoden der Flächenerhebung in Verbindung mit dem Verdichtungsmaß werden Fernerkundungsdaten der Copernicus-Satelliten als geeignet für die Erhebung eines Versiegelungs-Indikators angesehen. Zeitreihen sind möglich, wobei zwischen 2015 und 2018 ein Zeitreihenbruch zu berücksichtigen ist. Europaweite Vergleichbarkeit ist gegeben, es kann auf beliebiger administrativer Ebene aggregiert werden und es ist eine Darstellung nach Flächeninanspruchnahme möglich. Auf Einschränkungen wurde hingewiesen. Beispielsweise können Dachbegrünungen fälschlicherweise als unversiegelte Böden eingestuft werden; von Bäumen dicht überstandene versiegelte Parkplätze werden nicht als versiegelt erkannt. Hilfreich kann es sein, die Daten mit verfügbaren Gebäudeumrissdaten zu verschneiden, um Fehlklassifikationen zu reduzieren.

Diskussion

- ▶ Die Entwicklung eines Versiegelungsindikators auf nationaler Ebene auf der Grundlage von Satelliten-Fernerkundung wird unterstützt.
- ▶ Der vorgeschlagene bundesweite Versiegelungsindikator auf Basis der Copernicus-Daten wird durchgehend positiv bewertet. Es handelt sich um einen gut dokumentierten standardisierten Indikator. Er ist für den bundesweiten Maßstab sehr gut geeignet.
- ▶ Es besteht großes öffentliches Interesse an der Reduzierung der Versiegelung. Der Indikator ist gut für die diesbezügliche Kommunikation geeignet.

- ▶ Die Anwendung von Fernerkundungsdaten für einen Versiegelungsindikator bietet Chancen, hat aber auch Grenzen. Diese Grenzen sollten gut kommuniziert werden.
- ▶ Die Maßstabsebene ist von großer Bedeutung. Für Analysen auf kommunaler Ebene sind die Möglichkeiten stark eingeschränkt, da es im Detail zu vielen Fehlklassifikationen kommt. Hier kann das bisher eingesetzte Schätzwertverfahren (Ableitung des Versiegelungsanteils aus der Flächeninanspruchnahme) zu valideren Ergebnissen führen. Für die kommunale Ebene sind Methoden (weiter) zu entwickeln, die Ergebnisverbesserungen mithilfe von Datenanreicherungen, z. B. Gebäudeumrisse, ermöglichen.
- ▶ Die methodische und technische Weiterentwicklung darf Zeitvergleiche nicht erschweren. So sollte eine konstante Bildauflösung der Satellitensensoren priorisiert werden, um die Zeitreihenkonsistenz zu erhalten.
- ▶ Auf eindeutige Begriffsdefinitionen und -verwendung ist zu achten, z. B. Siedlungs- und Verkehrsfläche vs. Versiegelung. Der Begriff „Netto-Null“ steht im Zusammenhang mit dem DNS-Flächensparziel der Bundesregierung (bezogen auf Siedlungs- und Verkehrsfläche), wird teilweise aber auch für die Begrenzung der Versiegelung genutzt (z. B. Berlin).
- ▶ Wünschenswert wäre, vergleichbar dem Flächenverbrauchsziel auch ein Ziel zur maximalen Neuversiegelung zu entwickeln und dieses dann auch zu regionalisieren (für die Regionalisierung wäre allerdings eine Relativierung zu Bevölkerungszahlen erforderlich).
- ▶ Versiegelung kann nicht überall gleich bewertet werden. Es kommt wesentlich darauf an, welche Bodenqualitäten und -funktionen am Ort der Versiegelung verloren gehen (ggf. können Verschneidungen mit Bodenfunktionsbewertungen hier weiterhelfen).
- ▶ Bilanzierungen unter Berücksichtigung von Ver- und Entsiegelungen sind bisher nicht möglich. Ziele zur Begrenzung der Neuversiegelung wird man aber nur über ausreichend umfangreiche Entsiegelungen erreichen können. Es ist daher von großer Wichtigkeit, auch am Thema Entsiegelungspotenziale und Bilanzierung von Entsiegelung weiter zu arbeiten. Die Möglichkeiten, Entsiegelung über die Kompensation nach Eingriffsregelung zu finanzieren, müssten stärker genutzt werden.

Am Workshop haben ca. 35 Personen teilgenommen.

A.9 Workshop 2: Überlegungen zur Berichterstattung über Schadstoffgehalte in Böden anhand von Indikatoren

Die Beschreibung des stofflichen Bodenzustands gehört zur Definition eines guten Bodenzustands dazu. Aus drei Fachgebieten des Umweltbundesamtes (IV 1.3, II 2.6, II 2.7) wurden vorliegende Ideen, Überlegungen und Konzepte im Zusammenhang mit Indikatoren für Schadstoffgehalte skizziert. Der Rahmen ergibt sich z. B. aus der DAS, dem BBodSchG, dem Klimaanpassungsgesetz und dem EU-Vorschlag einer Bodenrichtlinie (Bodenüberwachungsgesetz). Abgestimmte Indikatoren national/international fehlen bislang. Als wichtig wird erachtet, ein gemeinsames Verständnis über den Indikator-Begriff herzustellen, die verschiedenen Anforderungen zu kennen und Konsistenz zwischen nationalen und europäischen Indikatoren anzustreben. Zu differenzieren sind flächenhaft stoffliche Bodenbelastungen und Belastungen aus Punktquellen (z. B. Altlasten). Es stellen sich Fragen zur Auswahl von Deskriptoren, zur Repräsentativität, zur Ableitung von Bewertungskriterien, zur Bildung von Einzelindikatoren oder einem Gesamtindikator sowie zur Aussagekraft. Als Beispiele für Indikatoren für Bodenbelastungen in Europa wurden 1) Multiple Belastungen von Pestiziden und Bodenorganismen (Joint Research Centre)

und 2) Multiple Belastungen von Pestiziden und Bodenorganismen in unterschiedlichen Ökosystemtypen (European Topic Centre) genannt.

Diskussion Handlungsfeld punktuelle & flächenhafte Bodenbelastung

- ▶ Es bedarf einer klaren Abgrenzung von flächenhaften stofflichen Belastungen in Böden und der Altlastenthematik.
- ▶ Linienhafte Belastungen wie an Verkehrswegen sollten berücksichtigt werden.
- ▶ Im standortbezogenen Bodenmonitoring können flächenhaft-ubiquitäre und diffuse Bodenbelastungen erfasst werden. Dazu gehören auch Belastungen im Umfeld von Altlasten oder auf Siedlungsflächen.
- ▶ Alternative Datenquellen neben standortbezogenem Bodenmonitoring sind für punktuelle Belastungen geeignet: Dokumentation der Altlastenbearbeitung und des Sanierungsstatus, neu hinzukommende Altlasten(verdachts)flächen. In-situ-Bodenmonitoring auf Altlast(verdachts)flächen ist nicht zielführend.
- ▶ Sollte der Fokus auf der zukünftigen Belastung liegen?
- ▶ Einträge aus der Luft oder Bewirtschaftung bieten sich für eine Überwachung an. Die Sicht sollte auf die Treiber gelenkt werden. Lufttransport kann modelliert werden.
- ▶ Hinweis auf PINETI-IV-Projekt Entwicklung der atmosphärischen Stickstoffdeposition.
- ▶ Hintergrundwerte für Schadstoffe in Böden liegen bundesweit vor und geben Auskunft über das (geogene) Inventar.

Diskussion Aggregation von Deskriptoren für einen Gesamtindikator

- ▶ Wenn Einzelindikatoren (Einzelstoffe) gemittelt werden, kann das dazu führen, dass Risiken übersehen werden.
- ▶ Es muss auch berücksichtigt werden, welche Maßnahmen welche Stoffe erfassen.
- ▶ In einem Beispiel mit bergbaubedingt flächenhaften Bodenbelastungen auf der Planungsebene werden Einzelstoffe anhand der Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV nach dem One-Out-all-out-Prinzip behandelt.
- ▶ Das One-out-all-out-Prinzip kann auf Einzelstoffe angewendet werden, sollte aber nicht beim Hinzunehmen weiterer Deskriptoren wie z. B. Erosion angewendet werden.
- ▶ Kommunizierbarkeit fordert eine Aggregation von Einzelstoffen. Einzelstoffe sollten aber stets zusätzlich von Fachleuten bewertet werden.
- ▶ Wir brauchen einen Nutzungsbezug → Problem auf EU-Ebene, dass er dort in den aktuellen Überlegungen zum SML außen vor bleibt.
- ▶ Eventuell sind für verschiedene Ebenen verschiedene Aggregationen vorzunehmen.
- ▶ Wie kann Mischungstoxizität berücksichtigt werden?
- ▶ Je nach Ziel sind unterschiedliche Bewertungskriterien heranzuziehen: z. B. Menschliche Gesundheit vs. Ökosystem/Bodengesundheit.
- ▶ Im Bodenmonitoring der Länder werden oder wurden folgende organische Schadstoffe erhoben: in der Regel PAK, PCB, dlPCB sowie, zum Teil CKW, PFAS, Dioxine, DDT.

- ▶ Es sollte auf nationaler Ebene vorgegeben werden, welche „neuen“ Stoffe zu messen sind und geklärt werden, wie die Messungen finanziert werden können.
- ▶ Zu messende Einzelstoffe sollten standort- bzw. nutzungsabhängig definiert werden.
- ▶ Wie kann mit dem Vorsorge-Aspekt umgegangen werden? Nutzungsbezogen.

Am Workshop haben ca. 30 Personen teilgenommen.

A.10 Resümee und Ausblick

Die Tagung sollte ein Forum für den fachlichen Austausch bieten und über aktuell vorliegende Ideen und Konzepte zur Indikatorentwicklung auf nationaler Ebene informieren. Das Angebot wurde von den Rednern und den Tagungsteilnehmenden aus einer Vielzahl von Behörden und Institutionen in Bund und Ländern gut angenommen. Fragen und Diskussionspunkte wurden in einer wohlwollenden und konstruktiven Atmosphäre behandelt. Vorschläge für Indikatoren und methodische Ideen sind als Ansätze, die weiterverfolgt werden können, begrüßt worden. Es wurde aber auch deutlich, dass daran weitergearbeitet und die Fachdiskussion fortgesetzt werden muss. Insgesamt entstand der Eindruck, dass die Teilnehmenden eine große Bereitschaft haben, die weitere Indikatorentwicklung mitzugestalten und gleichzeitig auch den Wunsch, intensiver zu kooperieren und Austausch zu pflegen.

Die in der Tagung spürbare Aufbruchstimmung sollte genutzt werden, um in eine weiterführende Diskussion zur Entwicklung von Indikatoren auf nationaler Ebene mit Akteuren verschiedener Ressorts und Institutionen in Bund und Ländern, aber auch international einzutreten. Die in der Tagung herausgearbeiteten Themen und Hinweise sollen bei der weiteren Arbeit des Umweltbundesamtes zur Indikatorentwicklung berücksichtigt werden. Dazu gehört es, die in der Tagung vorgestellten Vorschläge für Indikatoren weiterzuverfolgen bzw. aufzugreifen und weitere Aktivitäten und Veranstaltungen anzubieten, die eine Diskussion im Netzwerk von Fachexpert*innen ermöglichen.

Folgende Empfehlungen wurden für die künftige Arbeit auf nationaler Ebene ausgesprochen bzw. ließen sich diese aus den Redebeiträgen ableiten:

Allgemein

- ▶ Für alle Themen- und Zielfelder im Kontext von Klimaanpassung und Bodenschutz gibt es Bedarf zur Weiter- oder auch Neuentwicklung bodenbezogener Indikatoren.
- ▶ Wenn zufriedenstellende Einzelindikatoren vorliegen, können Methoden zur Aggregation dieser Einzelindikatoren entwickelt werden.
- ▶ Die Vorgehensweise bei Monitoring (Messung) und Datenauswertung zur Generierung bodenbezogener Indikatoren muss länderübergreifend stärker harmonisiert und systematisiert werden. Die LABO könnte diesbezüglich in Zukunft eine stärker koordinierende Rolle übernehmen.
- ▶ Gebraucht werden Indikatoren und Deskriptoren, mit denen sich der Bodenzustand und seine Veränderungen mit Blick auf die Bodengesundheit im zeitlichen Kontext beschreiben und bewerten lassen. Meilensteine auf dem Weg hin zu gesunden Böden können so abgebildet, passende Maßnahmen zur Zielerreichung (weiter-)entwickelt und der Erfolg von Bodenschutzmaßnahmen kontrolliert werden.

- ▶ Es ist sinnvoll, Vorschläge für Indikatoren auszuarbeiten, und auf dieser Grundlage an weiteren Optimierungen zu arbeiten.
- ▶ Indikatoren müssen in Fachkreisen ressortübergreifend (Umweltschutz, Forstwirtschaft, Landwirtschaft) diskutiert werden.
- ▶ Für die Nutzung von Modellen als Grundlage eines Indikators sind die vorherige Validierung und daraus ableitbare Unsicherheiten zu berücksichtigen.
- ▶ Wissenschaftliche Nachwuchskräfte sollten in Bezug auf die Auswertung von Fernerkundungsdaten besser ausgebildet werden, wobei zunächst grundsätzlich der Bedarf besteht, die Ausbildung wissenschaftlicher Nachwuchskräfte für bodenkundliche Erhebungen zu fördern.
- ▶ Ein fachlicher Austausch zur Vorgehensweise beim Monitoring, der Datenauswertung und Indikatorentwicklung ist zur Bewältigung der bekannten Herausforderungen sowohl in Deutschland mit Vertreter*innen von Bund, Ländern und Forschungseinrichtungen sinnvoll als auch mit dem Bundesamt für Umwelt der Schweiz, das mit der dortigen Nationalen Bodenbeobachtung betraut ist.

Ansätze für Indikatoren zur Biodiversität auf nationaler Ebene

- ▶ Mit dem Indikatorvorschlag „Regenwurmfauna“ kann die Umsetzung einer nationalen Berichterstattung mit Indikatoren begonnen werden. Die Indikatoren sind weiterzuentwickeln und zu verbessern.
- ▶ Weitere Arbeiten zu Zielen, Methoden und Infrastruktur sind erforderlich.
- ▶ Das ANK-Projekt „Stärkung der Bodenbiodiversität als unverzichtbarer Beitrag für den Natürlichen Klimaschutz“ ist dabei ein wichtiges Instrument, um erstmals den ökologischen Bodenzustand auf Grundlage einer Basiserhebung beschreiben zu können.
- ▶ Die Fortsetzung der Kooperation mit dem Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität, das an vielen verwandten Themen arbeitet, ist sinnvoll.
- ▶ Es sollte verstärkt daran gearbeitet werden, Expertise für die Messung und Auswertung biologischer Größen aufzubauen, da fachlich ausgebildete Nachwuchskräfte und Dienstleister fehlen.
- ▶ Bei Ausschreibungen für Monitoring-Leistungen sollte berücksichtigt werden, dass es für Dienstleister bei befristeten Aufträgen oft nicht wirtschaftlich ist, die erforderlichen Kapazitäten und Kompetenzen vorzuhalten, um diese im Auftragsfall spontan abrufen zu können. Dies ist auch der Grund, dass es oftmals keine Reaktionen auf entsprechende Ausschreibungen zur Übernahme von Monitoringaufgaben gibt.
- ▶ Aktivitäten zur Förderung der Datendokumentation und des Datenaustauschs nach FAIR-Prinzipien sind für die zukünftige Arbeit mit Daten zu Bodenbiodiversität auf nationaler Ebene erforderlich.

Ansätze für Indikatoren zum Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene

- ▶ Das SOC/Ton-Verhältnis als Indikator zum Bodenkohlenstoff ist nicht für Böden in Deutschland geeignet und sollte nicht weiterverfolgt bzw. unterstützt werden.

- ▶ Vor einer Veröffentlichung von Ergebnissen des Indikators „Übereinstimmung mit dem standorttypischen Humusgehalt“ in einer nationalen Berichterstattung ist eine Erweiterung der Fallstudie auf weitere Regionen und Zeitpunkte erforderlich.
- ▶ Für den Indikatorvorschlag „kontextspezifischer C_{org} -Trend“ könnten Möglichkeiten zur bundesweiten Darstellung von Trends geprüft werden.
- ▶ Die Diskussion der Indikatoransätze zum Bodenkohlenstoff auf nationaler Ebene ist nicht abgeschlossen und sollte fortgesetzt werden.

Überlegungen für einen Versiegelungsindikator

- ▶ Die Entwicklung eines Versiegelungsindikators auf nationaler Ebene auf der Grundlage von Satelliten-Fernerkundung wird unterstützt.
- ▶ Der vorgeschlagene bundesweite Versiegelungsindikator auf Basis der Copernicus-Daten wird durchgehend positiv bewertet. Er ist für den bundesweiten Maßstab sehr gut geeignet.
- ▶ Für die kommunale Ebene sind Methoden (weiter) zu entwickeln, die Ergebnisverbesserungen mithilfe von Datenanreicherungen, z. B. Gebäudeumrisse, ermöglichen.
- ▶ Eine konstante Bildauflösung der Satellitensensoren sollte priorisiert werden, um die Zeitreihenkonsistenz zu erhalten.
- ▶ Auf eindeutige Begriffsdefinitionen und -verwendung ist zu achten, z. B. Siedlungs- und Verkehrsfläche vs. Versiegelung.
- ▶ Wünschenswert wäre, vergleichbar dem Flächenverbrauchsziel auch ein Ziel zur maximalen Neuversiegelung zu entwickeln und dieses dann auch zu regionalisieren.
- ▶ Bei der Bewertung von Versiegelung sollte berücksichtigt werden, welche Bodenqualitäten und -funktionen am Ort der Versiegelung verloren gehen.
- ▶ Es ist von großer Wichtigkeit, am Thema Entsiegelungspotenziale und Bilanzierung von Entsiegelung weiterzuarbeiten. Die Möglichkeiten, Entsiegelung über die Kompensation nach Eingriffsregelung zu finanzieren, müssten stärker genutzt werden.

Überlegungen zur Berichterstattung über Schadstoffgehalte in Böden anhand von Indikatoren

- ▶ Weiterführende Diskussionen von Fragen zur Indikatorentwicklung zur Berichterstattung über Schadstoffgehalte in Böden sind notwendig.
- ▶ Es sollte auf nationaler Ebene vorgegeben werden, welche „neuen“ Stoffe zu messen sind und geklärt werden, wie die Messungen finanziert werden können.
- ▶ Zu messende Einzelstoffe sollten nutzungsabhängig definiert werden.
- ▶ Eine Harmonisierung der Indikatorentwicklung in der EU und national ist notwendig.

B Konzeptentwurf für den Aufbau des Nationalen Bodenmonitoringzentrums beim UBA und des damit verbundenen Netzwerks (Stand: 3. Mai 2023)

Jeannette Mathews, Dr. Marc Marx, Dr. Frank Glante (UBA FG II 2.7) unter Mitwirkung von Padia Lariu (BMUV Referat N III 4), Carolin Kaufmann-Boll, Maike Kern, Frank Müller (ahu GmbH), Mareike Wolf, Konstanze Schönthaler (Bosch & Partner GmbH)

B.1 Hintergrund

Der Schutz des Bodens ist im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) gesetzlich verankert. Im Sinne des Gesetzes sind Funktionen des Bodens zu schützen und wiederherzustellen, schädliche Bodenveränderungen abzuwehren und Vorsorge gegen nachteilige Bodeneinwirkungen zu treffen. Dies soll zukünftig auch die Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden umfassen, denn der Erhalt von Bodenfunktionen kann maßgeblich zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz beitragen. Im Boden als zentralem Kompartiment terrestrischer Ökosysteme überlagern sich Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre. Bodenmonitoring überwacht, welche Prozesse dort ablaufen und ob es zu nachteiligen Wirkungen kommt. Es ist als integrierter Teil eines Umweltmonitorings für die Interpretation von Umweltveränderungen unerlässlich. Das Bodenmonitoring hat daher eine Kompartiment-übergreifende Bedeutung.

Auf europäischer Ebene soll die Bodenverschmutzung gemäß der EU-Bodenstrategie bis zum Jahr 2050 so weit verringert werden, dass für Mensch und Umwelt keine Gefahr mehr besteht. Die weitere Verschlechterung der Bodenqualität zu vermeiden und die Bodenfunktionen zu erhalten, sind dabei wichtige Kernpunkte der Aktivitäten. Für Aussagen über den Bodenzustand, seine Veränderungen und deren Ursachen benötigen die Europäische Union (EU) und die Bundesregierung bundesweite qualitätsgesicherte Bodendaten. Die Auswertungen dieser Daten ermöglicht es, Ziele und Maßnahmen zum Boden- und zum Klimaschutz abzuleiten, den Erfolg von Maßnahmen zu überprüfen und Entwicklungen zu prognostizieren. Auch für die Forschung, Politikberatung und Information der Öffentlichkeit sind Bodendaten grundlegend. Das bereits bestehende und zukünftige bodenbezogene Berichtswesen auf nationaler und EU-Ebene erfordert Indikatoren auf der Basis qualitätsgesicherter Bodendaten.

Das Umweltressort ist für die Erhebung, Auswertung und Beschreibung des Umweltzustands zuständig. Unabhängig davon liegen die bisherigen Programme zur Erhebung des Bodenzustands und zum Bodenmonitoring in Deutschland in verschiedenen Verantwortungsbereichen und fokussieren auf die Beantwortung ausgewählter fachlicher Fragestellungen. Die dafür genutzten methodischen Ansätze, die Strukturen der Datenhaltung und die verwendeten Formate unterscheiden sich in den Ressorts und den Bundesländern deutlich voneinander. Das erschwert eine messnetzübergreifende Vergleichbarkeit der Daten und damit bundesweite Aussagen zum Boden bzw. macht diese unmöglich. Zwischen Bund und Ländern bestehen über die Verwaltungsvereinbarung zum Datenaustausch von 1994 hinaus bisher keine Vereinbarungen zu Datenflüssen für Monitoring und Zustandserhebungen. Es fehlen Regelungen für eine bundesweite Koordinierung von Aktivitäten in Zusammenhang mit dem Bodenmonitoring oder zur Auswertung von Bodenmonitoring-Daten.

Im Koalitionsvertrag zur 20. Legislaturperiode bekennt sich die Bundesregierung klar zum europäischen Bodenschutz und verankert den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums. Diesen Beschluss bestärkt sie im Aktionsprogramm „Natürlicher Klimaschutz“ (ANK), was die folgenden Zitate unterstreichen:

„Das Bundesbodenschutzrecht werden wir evaluieren und an die Herausforderungen des Klimaschutzes, der Klimaanpassung und den Erhalt der Biodiversität anpassen und dabei die unterschiedlichen Nutzungen berücksichtigen. Auf EU-Ebene werden wir uns für einen verbesserten Schutz der Böden und verbindliche Regelungen einsetzen. Wir werden ein nationales Bodenmonitoringzentrum einrichten.“ (Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen SPD, Bündnis 90/die Grünen und FDP „Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit“).

„Wir werden – in Anlehnung an die Strukturen der Emissionsberichterstattung – ein Bodenmonitoringzentrum beim Umweltbundesamt in enger Kooperation mit dem Thünen-Institut und auch anderen Akteuren einrichten, um die in Deutschland erhobenen Daten zum Bodenzustand zusammenzuführen und so weit wie möglich allgemein nutzbar zu machen.“ (Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) der Bundesregierung, Maßnahme 8.3).

Folgende Anforderungen auf nationaler und auf EU-Ebene sind der Anlass für den Aufbau eines Nationalen Bodenmonitoringzentrums:

- ▶ Die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG)⁶, des Klimaschutzplans 2050⁷ und der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)⁸ sowie die Anforderungen des Aktionsplans Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie (APA)⁹, des Monitoringberichts zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel¹⁰ und der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland (KWRA)¹¹ erfordern bundesweite, qualitätsgesicherte und hochaufgelöste Bodeninformationen für Aussagen über die Betroffenheit der Böden im Klimawandel und ihre Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf.
- ▶ Mit dem am 29. März 2023 vom Bundeskabinett verabschiedeten Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK)¹² will die Bundesregierung substanziell dazu beitragen, dass die Ziele zum Klimaschutz, zum Schutz der biologischen Vielfalt und zur Vorsorge gegen die Folgen der Klimakrise erreicht werden können. Mit einer Maßnahme zur großflächigen Erfassung der Bodenbiodiversität und der Erarbeitung von Referenzwerten wird ein wichtiger Baustein zur Bewertung der Bodengesundheit und deren Beitrag für den natürlichen Klimaschutz geschaffen. Bestehende Monitoring-Programme zur Biodiversität sollen ausgebaut und weiterentwickelt werden. Dazu werden methodische Standards entwickelt und eine bodenbiologische Basiserhebung durchgeführt.
- ▶ Mit der am 17. November 2021 veröffentlichten EU-Bodenstrategie 2030 zeichnen sich Datenanforderungen an Bund und Länder ab. Ziel ist es, bis 2030 eine Bodendegradationsneutralität im Sinne des SDG 15.3¹³ zu erreichen. Intention der Europäischen Kommission ist es, dafür ein europaweit einheitliches Monitoring- und Reportingsystem zu schaffen, welches dann auch von deutscher Seite bedient werden muss. Es könnte auch zur Überwachung der von der EU formulierten Bodenziele genutzt werden. Darüber hinaus ist „ein integriertes

⁶ <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BINR251310019.html>

⁷ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html>

⁸ <https://www.bmuv.de/download/deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel>

⁹ <https://www.bmuv.de/download/aktionsplan-anpassung-zur-deutschen-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel>

¹⁰

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf

¹¹

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_zusammenfassung_bf_21_1027_0.pdf

¹² <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/bundesumweltministerin-steffi-lemke-stellt-eckpunkte-fuer-aktionsprogramm-natuerlicher-klimaschutz-vor>

¹³ UN-Nachhaltigkeitsziel „Landdegradationsneutralität“ (Land Degradation Neutrality)

Bodenindikatorensystem erforderlich, das als Schirm für die weitere Überwachung und Berichterstattung dienen kann.“ (EU-Bodenstrategie 2030, EU-KOM, Brüssel 17.11.2021). Hier spielen auch Datenanforderungen und Verbindungen mit anderen Politikbereichen eine Rolle¹⁴.

- ▶ Ende des Jahres 2020 initiierte die EU das Soil Observatory (EUSO) unter dem Dach des Europäischen Zentrums für Bodendaten (ESDAC – European Soil Data Center). Dort werden harmonisierte und qualitätsgesicherte Bodeninformationen von den Mitgliedstaaten benötigt, um die Fortschritte in der EU bei der nachhaltigen Bewirtschaftung von Böden und bei der Wiederherstellung degradierter Böden verfolgen und bewerten zu können.
- ▶ Die Europäische Umweltagentur (EEA) und die gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Union (JRC) planen, alle zwei Jahre einen „Report on soil contamination“ zu erstellen.
- ▶ Das von der EU im Dezember 2019 vorgestellte Konzept des European Green Deals verankert das Ziel, bis zum Jahr 2050 in der Europäischen Union die Netto-Emissionen von Treibhausgasen auf Null zu reduzieren. Dies ist ein zentraler Bestandteil der Klimapolitik der Europäischen Union. Die Reihe der beschlossenen Maßnahmen für die einzelnen Handlungsfelder wie Handel, Industrie sowie Land- und Forstwirtschaft beinhaltet viele Bezüge zum Boden und damit auch zu Indikatoren, die aus Bodendaten entwickelt werden und mit denen der Erfolg der Maßnahmen bewertet werden kann.
- ▶ Land Use and Cover Area Frame Survey (LUCAS Soil): LUCAS Soil ist ein EU-weites Projekt, in dem eine Grundlage für europaweit vergleichbare Boden- und Landnutzungsdaten erarbeitet wird. Die LUCAS-Erhebungen sollen die Verfügbarkeit harmonisierter Daten über Bodenparameter in Europa verbessern.

Mit diesen Entwicklungen geht eine zunehmende Nachfrage nach einheitlich erhobenen Daten und aussagekräftigen Indikatoren sowie ihrer Verknüpfung mit nationalen und EU-weiten Datensätzen einher, um auf deren Grundlage die Umsetzung politischer Konzepte und Strategien zu prüfen und weiterzuentwickeln.

Trotz der Vielzahl der in den einzelnen Ressorts laufenden Aktivitäten zum Bodenmonitoring und zur Bodenzustandserhebung (vgl. Anlage A/B.7) sind bundesweite Aussagen zu themenbezogenen Aspekten des Bodenzustands, seinen Veränderungen und deren Ursachen bisher nur eingeschränkt möglich (siehe Tabelle 5). Diese Situation soll durch den Aufbau des Nationalen Bodenmonitoringzentrums beim UBA und eines damit verbundenen Bodenmonitoring-Netzwerks verbessert werden.

¹⁴ Null-Schadstoff-Aktionsplan, Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, Chemikalienstrategie, Biodiversitätsstrategie für 2030, Paket „Fit for 55“, Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, Strategie „Vom Hof auf den Tisch“, Übereinkommen von Rio und SDGs, Grünes Finanzwesen & Taxonomie, Gemeinsame Agrarpolitik, Mission „Ein Boden-Deal für Europa“, Bioökonomie-Strategie und Waldstrategie

Tabelle 5: Bundes- und EU-weit bedeutsame Themen und aktuelle Aussagefähigkeit des Bundes (Quelle: Stocktaking über vorhandene Daten 06/2022 im Beitrag zur 36. BOVA-Sitzung am 24./25.01.2023 von Marx, K; Mathews, J.; Glante, F., ergänzt)

Thema	Aktuelle Aussagefähigkeit des Bundes 2023 (durch Bundesinstitutionen)
Bodenwasserhaushalt	Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden (bundesweit) (DWD) und Waldböden in Bayern (LfL BY)
Bodenwärmehaushalt	Temperatur im Oberboden (bundesweit) (DWD)
Bodenstoffhaushalt	Kohlenstoff: Bundesweit Bodenkohlenstoff TI (bisher 1-3 Zeitpunkte), BÜK1.000 BGR, JKI; Veränderung des Bodenkohlenstoffs gemäß THG-Berichterstattung TI (modelliert/gemessen, Treiber Landnutzungsänderung) Schadstoffe: PFAS: UBA anhand Umweltprobenbank und Länderdaten; Belastung mit Stoffen allgemein: UBA auf Grundlage von BDF-Daten der Länder Fehlend: Nährstoffe und Versauerung
Altlasten	Altlastenstatistik (LABO) (bisher Flächen- und Standortanzahl verfügbar)
Bodenstruktur	Erosionsgefährdung, Erosionswiderstand durch Wasser und/oder Wind (BGR, JKI, UBA ¹⁵); fehlend: Bodenverlust durch Erosion, konservierende Bodenbewirtschaftung, Verdichtung
Bodenbiodiversität	Flächen mit Ökolandbau (BMEL), HNV-Farmland (BfN), Zwischenfrüchte, Fruchtfolgen (JKI); fehlend: Erstversion in Bearbeitung: Referenzwerte für Bodentiere in Deutschland/BÜK250 (BGR)
Landnutzung	Moorböden, Landnutzungsänderungen (BKG); High Nature Value-Farmland (BfN), Heterogenität der Landschaft, u. a. Shannon Index (JKI)

Durch eine bundesweite, ressortübergreifende Zusammenarbeit in einem Bodenmonitoring-Netzwerk und die fachliche Verknüpfung und Bündelung der einzelnen Aktivitäten in Bund und Ländern kann die Aussagesicherheit für den Zustand des Bodens und für seine Veränderungen wesentlich verbessert werden. Nur gemeinsam können der Bodenzustand und seine Entwicklung überwacht, unter einem bundesweiten Blickwinkel interpretiert und umfassend fachlich bewertet werden. Ausgehend von diesen gemeinsam entwickelten Bewertungen können die Bundesressorts (ebenso wie die Länder) fachspezifische Strategien und Maßnahmen zum Schutz der nicht erneuerbaren Ressource Boden ableiten und erfolgreich umsetzen.

Die beschriebenen Anforderungen und das Wissen um die aus einer verstärkten Zusammenarbeit und Vernetzung resultierenden Chancen und Möglichkeiten, den Boden- und den Klimaschutz weiter voranzubringen, münden in dem Beschluss der Bundesregierung zum Aufbau des Nationalen Bodenmonitoringzentrums im UBA.

Der Aufbau des Bodenmonitoringzentrums und des damit verbundenen Netzwerks ist als ein iterativer Prozess zu verstehen. Das Konzept wird in Zusammenarbeit mit den beteiligten Akteur*innen weiterentwickelt, konkretisiert und Schritt für Schritt in die Praxis überführt.

Grundlage sind die vorhergehenden Forschungsarbeiten von Bundesumwelt- und Verbraucherschutzministerium (BMUV) und Umweltbundesamt (UBA) zum Aufbau eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds¹⁶. Neben einem Überblick über die laufenden Aktivitäten zur Erhe-

¹⁵ UBA-Texte 16/2011: Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Autoren: Wurbs, D.; Steininger, M., FKZ 3708 71 205.

¹⁶ Veröffentlicht als UBA-Texte 67/2022, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzeption-umsetzung-eines-klimafolgen->

bung des Bodenzustands und zum Bodenmonitoring wurden die dringlich zu bearbeitenden Themen Bodenerosion, Bodenwasserhaushalt, Bodenbiodiversität und organische Bodensubstanz unter dem Einfluss des Klimawandels identifiziert. Darüber hinaus erklärten sich 50 Institutionen auf verschiedenen Ebenen (Bund, Länder, Forschung) mit insgesamt rund 9.000 Messstandorten in Deutschland bereit, in solch einem Verbund mitzuwirken. Auf dieser Bereitschaft zur Mitarbeit der verschiedenen Akteur*innen baut die Arbeit des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des damit verbundenen Bodenmonitoring-Netzwerks auf.

B.2 Begriffsbestimmungen

Um ein gemeinsames Verständnis für die Arbeit des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des damit verbundenen Bodenmonitoring-Netzwerks zu entwickeln, werden zentrale Begriffe definiert:

► **Bodenmonitoring**

Bodenmonitoring ist die regelmäßige und langfristige Überwachung von Böden zur Erfassung von Veränderungen des Bodenzustands. Bodenmonitoring nutzt In-situ-Erhebungen physikalischer, chemischer und biologischer Eigenschaften des Bodens wie Nährstoffgehalt, Bodenfeuchte, Bodenstruktur und Bodenorganismen. Diese können durch digitale Messtechniken wie Fernerkundung, durch Bürgerwissenschaft und Datenverarbeitungsinstrumente (z. B. Geostatistik, Wirkmodelle) ergänzt werden. Unter Bodenmonitoring wird hier auch die Erfassung und Darstellung von Gefährdungen verstanden, die die Bodenfunktionen beeinträchtigen, wie Schadstoffeinträge oder Versiegelung. In Abgrenzung zu Projektionen betrachtet das Bodenmonitoring den Zustand in der Vergangenheit. Ziel des Bodenmonitorings ist es, langfristige Trends und Veränderungen zu erkennen, sodass frühzeitig negative Auswirkungen auf die Umwelt oder auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzung durch das Ergreifen von Maßnahmen verhindert werden können. Bodenmonitoring wird von Behörden, Umweltorganisationen, Bewirtschafter*innen und anderen Akteur*innen genutzt, um Entscheidungen in Bezug auf Bodennutzung, Umweltschutz, Land- und Forstwirtschaft zu treffen.

► **Bodenbezogene Indikatoren**

Das Bodenmonitoring arbeitet mit bodenbezogenen Indikatoren. Das nationale Bodenmonitoring versucht dabei, deutschlandweite oder regionale Aussagen zu treffen, die die Daten vieler Messstandorte aggregieren. Mit bodenbezogenen Indikatoren werden der Zustand und die Entwicklung der Umwelt in Bezug auf das Medium Boden anhand ausgewählter Kenngrößen veranschaulicht und bewertet. Eine Grundlage für bodenbezogene Indikatoren können Umwelt- und Nachhaltigkeitsziele sein, die in politischen Strategien, Gesetzen oder Richtlinien formuliert sind. Als Kenngrößen kommen Messparameter, abgeleitete Größen und Parameterbündel in Frage. Bodenbezogene Indikatoren sollen, wo möglich, auf gemessenen, belastbaren Daten basieren (analog zum DAS-Monitoring). Modellierungen sollen nur eingesetzt werden, wenn Messungen fehlen. Bodenbezogene Indikatoren sollen die Bewertung einer Entwicklung ermöglichen, d. h. ausreichend sensitiv und interpretierbar sein, für eine definierte Fläche repräsentativ sein und sich gut vermitteln lassen. Die Darstellung und Bewertung von Indikatoren kann mit Bezugnahme auf festgelegte Referenz-, Ziel- oder Schwellenwerte, auf ein Wertespektrum, auf einen natürlichen Optimalzustand – sofern bekannt oder modellierbar – oder anhand einer relativen Veränderung vorgenommen werden. Materielle Maßstäbe wie Vorsorgewerte für die Besorgnis schädlicher Bodenveränderungen können bei der Bewertung von Indikatoren berücksichtigt werden.

► **DPSIR als ein möglicher Rahmen für das Bodenmonitoring**

DPSIR ist der von der Europäischen Umweltagentur angenommene Kausalrahmen zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft und Umwelt: treibende Kräfte (Driving forces), Belastungen (Pressures), Zustände (States), Auswirkungen (Impacts), Reaktionen (Responses).

B.3 Ziele und Aufgaben

Die Ziele des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des Bodenmonitoring-Netzwerks sind es, den Bodenzustand in Deutschland zu kennen, zu bewerten, den Handlungsbedarf zu identifizieren und damit zum Bodenschutz beizutragen.

Ein Fragenkatalog (fortführbare Loseblattsammlung) unterstreicht den Dienstleistungscharakter des Zentrums und verdeutlicht die Notwendigkeit der Vernetzung und Zusammenarbeit der Akteure. Der Katalog beschreibt und dokumentiert die national bedeutsamen Fragen, die vom Nationalen Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Bodenmonitoring-Netzwerk beantwortet werden sollen. Er vermittelt zudem einen Überblick, zu welchen bodenbezogenen Fragen die Bundesregierung gegenwärtig aussagefähig ist und für welche sie künftig Antworten anstrebt (siehe Abschnitt B.5.1.1).

Das Nationale Bodenmonitoringzentrum übernimmt in Kooperation mit dem Bodenmonitoring-Netzwerk folgende Aufgaben:

- **Beantwortung von Fragestellungen und Berichterstattung:** Das Zentrum fungiert als nationale Anlaufstelle und Dienstleister für das bodenbezogene Berichtswesen und für Auswertungen zur nationalen und EU-weiten Berichterstattung zum Boden. Bestehende Berichtspflichten verbleiben bei den dafür verantwortlichen Institutionen und werden weiterhin durch diese erfüllt. Anfragen zum bundesweiten Bodenzustand, zu seinen Veränderungen und deren Ursachen sollen kurzfristig und mit Auswertungsergebnissen qualitätsgesicherter Daten beantwortet werden können. Dazu gehören auch die fachliche Unterstützung bei der Projektion des zukünftigen Bodenzustands in Deutschland und die Formulierung von Empfehlungen für Maßnahmen, um negative Umweltauswirkungen zu minimieren. Metadaten, Ergebnisse und Projektinformationen werden durch ein Internetangebot und einen Kartenviewer für Anwender*innen in Wissenschaft und Verwaltung leicht zugänglich gemacht.
- **Weiterentwicklung des Bodenmonitorings:** Das Zentrum etabliert Prozesse unter Beteiligung von Vertreter*innen der Akteure verschiedener Fachbereiche, um das Bodenmonitoring in Deutschland auch im Sinne einer bundesweiten Berichterstattung weiterzuentwickeln. Dies betrifft z. B. methodische Standardisierung, Indikatorentwicklungen und Forschung.
- **Regelung der Zusammenarbeit und Vernetzung:** Indem durch das Zentrum Instrumente und Prozesse etabliert werden, die die Aktivitäten der Messstellenbetreiber*innen und Anwender*innen verstärkt vernetzen, wird die Kooperation auf nationaler und internationaler Ebene gestärkt.
- **Politikberatung:** Das Zentrum unterstützt die Erarbeitung von Strategiepapieren, beispielsweise
 - a) zur EU-Bodenstrategie 2030 mit dem Ziel, die Bodengesundheit zu definieren,
 - b) zum Klimaschutz, indem Vorschläge zur Emissionsminderung ausgearbeitet werden, und
 - c) zum Klimaanpassungsgesetz sowie zur Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

Welche Produkte und Dienstleistungen das Nationale Bodenmonitoringzentrum im Rahmen dieser Aufgaben erarbeitet bzw. erbringt und welche Rollen die Akteure des Bodenmonitoring-Netzwerks und die beteiligten Gremien dabei einnehmen, erläutert das Kapitel B.5.

B.4 Organisationsstrukturen

Die Zuständigkeit für die Erhebung, Auswertung und Beschreibung des Umweltzustands liegt beim Umweltressort, d. h. beim Ministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).

Innerhalb des Umweltressorts findet ein enger Austausch des Nationalen Bodenmonitoringzentrums mit anderen Akteur*innen wie dem Nationalen Zentrum für Umwelt- und Naturschutzinformationen umwelt.info (UBA Fachgebiet I 1.5), dem Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass, UBA Fachgebiet I 1.6), der Nationalen und internationalen Umweltberichterstattung (UBA Fachgebiet I 1.7) sowie dem Nationalen Monitoring-Zentrum zur Biodiversität (NMZB im BfN) statt. Durch die Nutzung von vorhandenen oder aktuell in Entwicklung befindlichen Berichts- und Umweltinformationssystemen und die Berücksichtigung von bestehenden Anforderungen an Datenstrukturen sowie Monitoring- und Auswertungsaktivitäten werden so Parallelentwicklungen vermieden.

Mit Blick auf die vielfältigen Bodennutzungen ist darüber hinaus eine Zusammenarbeit mit den Bundesressorts Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bildung und Forschung (BMBF), Digitales und Verkehr (BMDV), Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie Gesundheit (BMG) unabdingbar und erwünscht.

Aufgrund der Zuständigkeiten für die Erhebung von Bodendaten (siehe Anlage A) basiert die Arbeit des Nationalen Bodenmonitoringzentrums auf einer Zusammenarbeit mit weiteren Bundesoberbehörden, den Ländern und mit Forschungseinrichtungen in einem Netzwerk. Alle Institutionen und Stellen, die Monitoring- und Zustandserhebungsdaten erheben und/oder auswerten, sind eingeladen, im Netzwerk mitzuwirken.

Um die relevanten Akteur*innen auf Länderebene fortlaufend zu informieren, kann auf die Strukturen der bestehenden Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaften, insbesondere der LABO „Bodenschutz“ und der hier verorteten Ausschüsse 1 „Recht“ (BORA) und 2 „Vorsorgender Bodenschutz“ (BOVA) zurückgegriffen werden. Weiterhin kann es Schnittstellen zu weiteren bestehenden Gremien wie der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Naturschutz Landschaftspflege und Erholung (LANA) und der Länderinitiative Kernindikatoren (LiKi) geben.

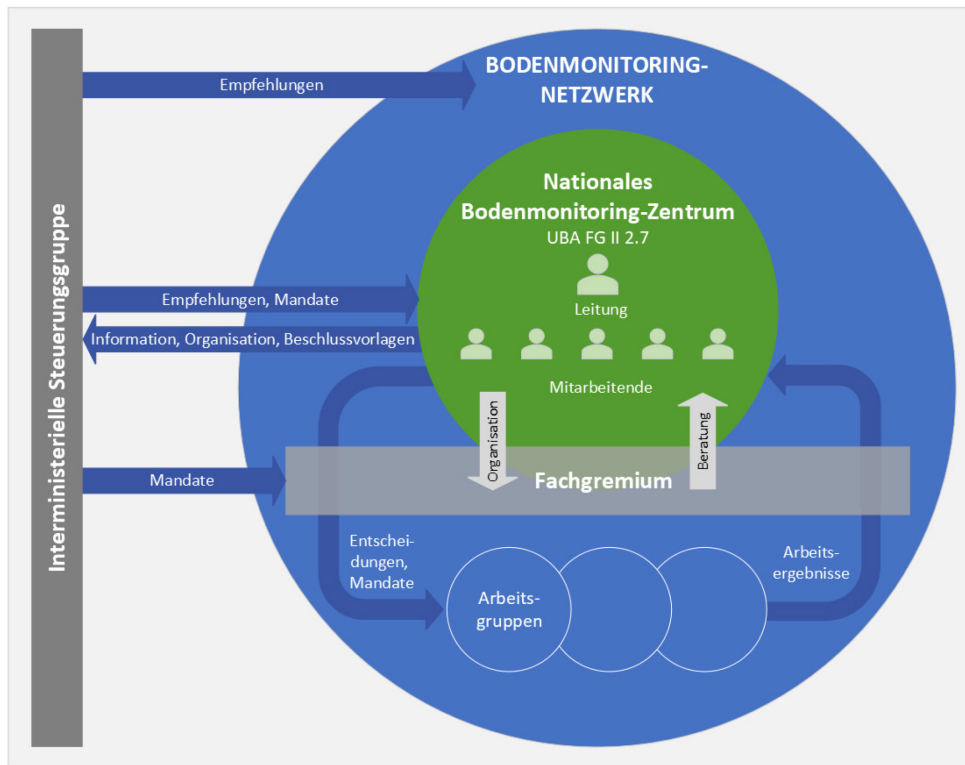
Eine Einbindung der Bundesländer in die Organisationsstrukturen des Bodenmonitoring-Netzwerks ist vorgesehen.

Die vorgeschlagene Organisationsstruktur hat fünf Elemente (s. Abbildung 23):

- ▶ das Nationale Bodenmonitoringzentrum im UBA,
- ▶ das Bodenmonitoring-Netzwerk,
- ▶ eine interministerielle Steuerungsgruppe, besetzt mit Vertreter*innen der obersten Bundesbehörden (Ministerien) und der Länder,
- ▶ das Fachgremium, besetzt mit Vertreter*innen von Bundesoberbehörden, Bundesforschungsinstituten, Länderbehörden und Forschungseinrichtungen sowie
- ▶ ständig oder nach Bedarf eingerichtete Arbeitsgruppen, besetzt je nach Aufgabe.

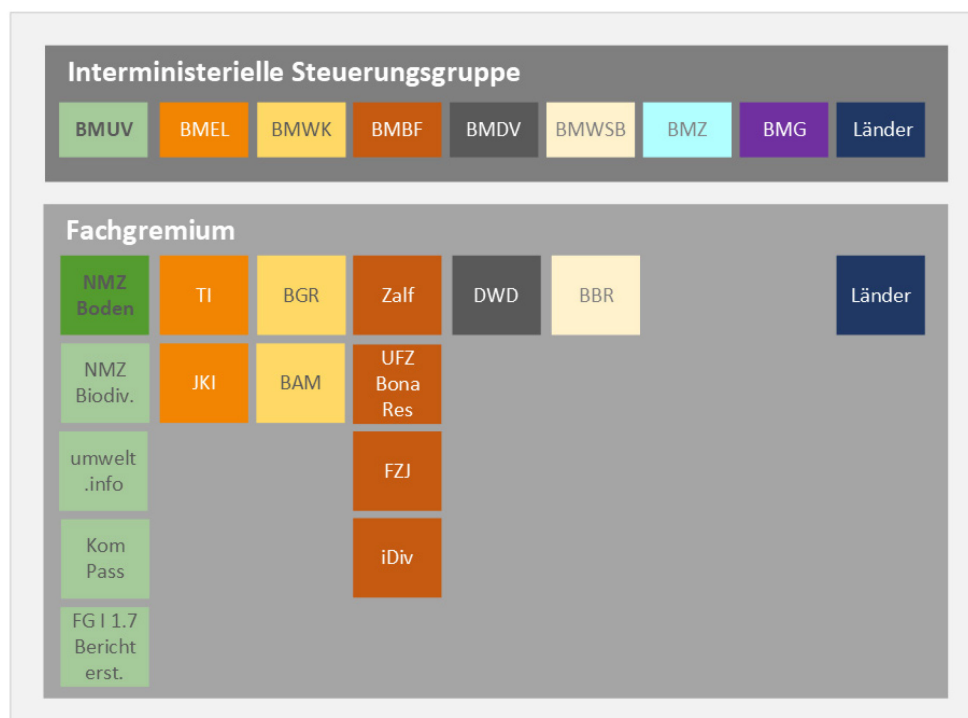
Die Abbildung 24 gibt einen Überblick darüber, welche Institutionen in der interministeriellen Steuerungsgruppe und im Fachgremium vertreten sein sollen.

Abbildung 23: Organisationsstrukturen und Rollen



Quelle: eigene Darstellung, ahu GmbH

Abbildung 24: Zusammensetzung der interministeriellen Steuerungsgruppe und des Fachgremiums



NMZ = Nationales Monitoringzentrum

Quelle: eigene Darstellung, ahu GmbH

B.4.1 Nationales Bodenmonitoringzentrum

Das Nationale Bodenmonitoringzentrum ist im Fachgebiet (FG) II 2.7 „Bodenmonitoring und Bodenzustand“ des Umweltbundesamtes angesiedelt und arbeitet in der Ressortzuständigkeit des BMUV. Die anfallenden Kosten werden aus dem Haushalt des BMUV finanziert.

Die Leitung des Nationalen Bodenmonitoringzentrums liegt im Aufgabenbereich der FG-Leitung II 2.7 und umfasst:

- ▶ fachliche Steuerung und Koordination des Gesamtprozesses für den Zentrumsaufbau und den Betrieb des Netzwerks,
- ▶ verwaltende und organisatorische Arbeiten (Haushaltsmittel, Vergaben, Personalentwicklung, Tätigkeitsberichte),
- ▶ Kommunikation nach außen und innen, d. h. mit der Interministeriellen Steuerungsgruppe sowie mit dem Fachgremium, den Arbeitsgruppen und weiteren Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks,
- ▶ Einberufung von Arbeitsgruppen und Formulierung von deren Arbeitsaufträgen (gemeinsam mit dem Fachgremium),
- ▶ Koordinierung der Datenauswertungen und der Standardisierung,
- ▶ Steuerung der Zusammenarbeit auf nationaler und EU-Ebene,
- ▶ Leitung der Öffentlichkeitsarbeit.

Aufgaben der Mitarbeitenden des Nationalen Bodenmonitoringzentrums:

- ▶ Unterstützung der FG-Leitung bei der Koordinierung und Leitung des Zentrums,
- ▶ Vorbereitung und Nachbereitung der Sitzungen der interministeriellen Steuerungsgruppe und des Fachgremiums, ggf. organisatorische Unterstützung von Arbeitsgruppen,
- ▶ Definition und fachliche Begleitung der Prozesse zur Bearbeitung der bodenbezogenen Fragestellungen mit Nachverfolgung des Fortschritts,
- ▶ Datenauswertungen, Modellierungen und Prognosen, Szenarientwicklung in Zusammenarbeit mit den Akteur*innen oder durch Auftragsvergabe, Erstellung von nationalen Berichten (FuE-Projekte, Gutachten),
- ▶ Konzeption und Weiterentwicklung von bodenbezogenen Indikatoren,
- ▶ Entwicklung und Abschluss von Kooperations- und Nutzungsvereinbarungen mit den Akteuren des Bodenmonitoring-Netzwerks (siehe unten),
- ▶ Koordinierung und fachliche Begleitung der für den Betrieb des Zentrums auszuarbeitenden Instrumente: Handbuch mit fachlichen Qualitätsstandards, Kartendienst, technisches Austauschformat für Stammdaten und Angaben zu Messgrößen, Datenaustauschprozess, ggf. Data hub (Konzeption und Ausarbeitung über Sachverständigengutachten bzw. FuE-Projekte),
- ▶ Zusammenarbeit auf nationaler und auf EU-Ebene, Vernetzung der bodenbezogenen Monitoring- und Erhebungs-Programme (national, EU),

- ▶ Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation (Webseite, Veranstaltungen, Newsletter usw.).

Bis Ende 2023 stehen fünf Mitarbeitende zur Verfügung. Für 2024 werden weitere Stellen beantragt.

B.4.2 Bodenmonitoring-Netzwerk

Entscheidend für die Handlungsfähigkeit des Nationalen Bodenmonitoringzentrums sind die Institutionen und Stellen, die Monitoring- und Zustandsdaten erheben, d. h. Behörden und Institutionen in Bund und Ländern sowie Forschungseinrichtungen. Die fachliche Expertise dieser Institutionen in Methodenentwicklung, Datenerhebung und Auswertung sind eine wichtige Grundlage für die Zielerreichung des Nationalen Bodenmonitoringzentrums.

Im Bodenmonitoring-Netzwerk sind alle Akteur*innen des Bodenmonitorings miteinander verbunden. Das im BBodSchG verankerte Ziel, Funktionen des Bodens zu schützen und wiederherzustellen, schädliche Bodenveränderungen abzuwehren und Vorsorge gegen nachteilige Bodeneinwirkungen zu treffen, eint alle Akteur*innen und bringt sie über den Fragenkatalog zusammen. Die wesentlichen Akteur*innen des Netzwerks sollen – ggf. über ausgewählte Vertreter*innen – im Fachgremium eingebunden sein.

Die Zusammenarbeit im Netzwerk soll auf einer verbindlichen Kooperationszusage beruhen. Die im Bodenmonitoring-Netzwerk kooperierenden Institutionen erklären sich bereit, Messdaten oder deren Auswertungsprodukte für weitere Auswertungen zu Fragestellungen des Umwelt- und Bodenschutzes sowie für den Klimaschutz und die Anpassung an Klimawandelfolgen an Datennutzer*innen aus dem Netzwerk zur Verfügung zu stellen, sofern dies nicht z. B. durch einen eigenen Forschungsvorbehalt oder Datenschutzbelange eingeschränkt ist. Die Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks können bei Erhalt eines entsprechenden Mandats als Datennutzer*innen auftreten und Auswertungen durchführen.

Wer Teil des Netzwerks ist, hat die Möglichkeit, die bundesweite Nutzung und die Weiterentwicklung des Bodenmonitorings aktiv mitzugestalten. Auch drückt die Beteiligung im Netzwerk die Bedeutung der langfristigen Datenerhebungen für den Bund und dessen Berichtsinteressen aus. Durch die vermehrte Nachfrage von Erhebungs- und Monitoring-Daten wird deren Wertschöpfung erhöht und eine zusätzliche Begründung für das Aufrechterhalten oder auch eine Weiterentwicklung der Programme gegeben. Zudem ergibt sich ein Nutzen aus den im Netzwerk gesetzten methodischen Standards für die methodische Weiterentwicklung in einzelnen Programmen und durch die Vernetzung mit anderen Institutionen im Rahmen von regelmäßigen Veranstaltungen für Fachaustausch und Diskussion.

Aufgaben der Akteur*innen des Netzwerks:

- ▶ Mitwirkung und Zusammenarbeit bei der Beantwortung der nationalen Fragestellungen zum Boden.
- ▶ Datenauswertungen für das Nationale Bodenmonitoringzentrum bei Zuständigkeit oder Erhalt eines Mandats.

Erforderlich:

- ▶ Kooperationsvereinbarung zwischen dem Nationalen Bodenmonitoringzentrum und Akteur*innen mit Sicherung von Urheber- und Nutzungsrechten sowie Qualitätssicherung.
- ▶ Nutzungsvereinbarung, die, falls über bestehende Regelungen hinaus erforderlich, Art und Umfang von Datennutzungen sowie Berichte der Ergebnisse regelt.

- ▶ Schaffen von personellen Kapazitäten zur Bearbeitung von Datenanfragen und/oder -auswertungen sowie die Teilnahme an Arbeitsgruppensitzungen und Veranstaltungen.

B.4.3 Interministerielle Steuerungsgruppe

Die interministerielle Steuerungsgruppe wird dauerhaft einberufen, tagt etwa einmal pro Jahr und wird mit Vertreter*innen von Bundesministerien und Ländern besetzt. Es ist zu prüfen, ob der Vorsitz von Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaften wie der LABO als Ländervertretung in Frage kommt.

Ziel der Arbeit ist ein abgestimmtes Vorgehen der Ressorts zur Sicherstellung der Komplementarität der Bodenmonitoring-Aktivitäten in Deutschland und bei der Bearbeitung der Berichtspflichten.

Vorschlag für die Besetzung (vgl. Abbildung 24):

BMUV (Vorsitz), BMEL, BMWK, BMBF, BMDV, BMWSB, BMZ, BMG, Länder

Aufgaben der interministeriellen Steuerungsgruppe:

- ▶ Abstimmung zu grundsätzlichen fachlichen Fragen, z. B. prioritäre Handlungsfelder für das Bodenmonitoring und Ausrichtung des Nationalen Bodenmonitoringzentrums, zu Weiterentwicklungen der Datenerhebungen, zur Interpretation und Bewertung neu oder weiterentwickelter Indikatoren und zur Berichterstattung.
- ▶ Ressourcenallokation.
- ▶ Mandatierung nachgeordneter Behörden und Institute zur Mitwirkung im Fachgremium, zum Personalaufbau und zur Zusammenarbeit.
- ▶ Aussprechen von Empfehlungen an das Nationale Bodenmonitoringzentrum sowie an die Betreiber von Monitoring- und Erhebungsprogrammen.
- ▶ Verabschiedung eines Handbuchs mit fachlichen Qualitätsstandards für die Datenerhebung in Deutschland.

Erforderlich:

- ▶ Geschäftsordnung zur Festlegung der Aufgaben und Entscheidungsbefugnisse.

B.4.4 Fachgremium

Das Fachgremium wird mit Vertreter*innen von Bundesoberbehörden, Bundesforschungsinstituten, von weiteren von den Bundesministerien beauftragten Fachinstitutionen bzw. Projektträgern sowie Landesfachbehörden und Forschungseinrichtungen besetzt. Es tagt etwa ein- bis zweimal pro Jahr. Eine zeitliche Befristung der Besetzung des Fachgremiums ist zu prüfen, um diese ggf. an die im Bodenmonitoring-Netzwerk bearbeiteten Fragen anzupassen. Da nicht alle Bundesländer im Gremium eingebunden sein können, ist in den bestehenden LABO-Gremien (z. B. BOVA) eine Ländervertretung abzustimmen.

Vorschlag für die Besetzung (vgl. Abbildung 24):

Nationales Bodenmonitoringzentrum (Vorsitz), BfN/NMZB, umwelt.info, KomPass, UBA-FG I 1.7 Umweltberichterstattung, TI, JKI, BGR, BAM, Zalf, UFZ/BonaRes, FZJ, iDiv, DWD, BBR, ausgewählte Länderbehörden

Aufgaben des Fachgremiums:

- ▶ Fachliche Beratung für die Arbeit des Nationalen Bodenmonitoringzentrums, z. B. Abstimmung und Festlegung von zu bearbeitenden Fragestellungen, Ziel- und Begleitgrößen¹⁷ für die Datenerhebung, Qualitätskriterien, Mindeststandards, Datenaustauschprozesse, Produktentwicklung (z. B. Karten).
- ▶ Einberufung von Arbeitsgruppen und Formulierung von deren Arbeitsaufträgen (gemeinsam mit Nationalen Bodenmonitoringzentrums).
- ▶ Berichte und Zuarbeiten an die interministerielle Steuerungsgruppe.
- ▶ Abstimmung einer Muster-Kooperationsvereinbarung zur Mitarbeit im Bodenmonitoring-Netzwerk und einer Muster-Nutzungsvereinbarung für Messdaten.
- ▶ Konzeption und Abstimmung eines Handbuchs mit fachlichen Qualitätsstandards (s. Aufgaben der Mitarbeitenden des Nationalen Bodenmonitoringzentrums).
- ▶ Erarbeitung und Abstimmung von Politikempfehlungen des Nationalen Bodenmonitoringzentrums unter Berücksichtigung von eigenständigen Auswertungen, Produkten und Empfehlungen, die die Akteur*innen im Rahmen ihrer Aufgaben erarbeiten.

Erforderlich:

- ▶ Geschäftsordnung zur Festlegung der Aufgaben sowie der Entscheidungsbefugnisse und -prozesse.
- ▶ Schaffen von personellen Kapazitäten für die Mitarbeit im Fachgremium.
- ▶ Modalitäten zur institutionellen Vertretung und personellen Zusammensetzung des Fachgremiums.

Fragen für einen ressortübergreifenden Workshop:

- ▶ Welche Institutionen und welche bestehenden Gremien sind einzubinden, z. B. LiKi, Arbeitsgruppen des Thünen-Instituts zu BZE und THG-Berichterstattung? Welche Rolle nehmen deren Vertreter*innen ein?
- ▶ In welcher Form können Länder eingebunden werden, z. B. durch eine*n BOVA-Vertreter*in, die*der von der LABO auf Zeit bestimmt wird?
- ▶ Berät das Gremium ausschließlich oder kann es auch mandatieren?
- ▶ Wie viele Personen umfasst das Gremium?
- ▶ Von wem werden die Vertreter*innen des Gremiums benannt oder gewählt?

¹⁷ Beispiel für organische Bodensubstanz: Zielgröße: Vorrat des organischen Gesamtkohlenstoffs im Boden; Begleitgrößen: Trockenrohddichte, Grobbodenanteil, Boden-pH-Wert.

B.4.5 Arbeitsgruppen

Arbeitsgruppen werden durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum und das Fachgremium initiiert und eingesetzt. Sie werden ständig oder bei Bedarf einberufen und arbeiten an konkreten Aufgaben (in Abgrenzung zu bestehenden Arbeitsgruppen im BOVA u. a.). Sie bearbeiten messnetzübergreifende Fragen des Bodenmonitorings sowie Aufgaben in Zusammenhang mit der Weiterentwicklung und Standardisierung von Erhebungs- und Auswertungsmethoden oder begleiten diese.

In den themenspezifisch ausgerichteten Arbeitsgruppen können alle relevanten Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks vertreten sein, z. B. Bundesoberbehörden, Bundesforschungsinstitute bzw. von den Bundesministerien beauftragte Fachinstitutionen, Landesfachbehörden, Fachverbände und Experten*Expertinnen.

Aufgaben der Arbeitsgruppen:

- ▶ Fokussierte Bearbeitung messnetzübergreifender Fragen mit Ausarbeitung von Berichten oder Stellungnahmen sowie Aufgaben zur Weiterentwicklung und Standardisierung von Erhebungs- und Auswertungsmethoden und zur Festlegung von Ziel- und Begleitgrößen, fachliche Zuarbeiten für das Handbuch mit Qualitätsstandards zum Bodenmonitoring in Deutschland.
- ▶ Identifikation von Wissenslücken und Herausarbeiten von Handlungsmöglichkeiten.
- ▶ Berichten der Arbeitsergebnisse an das Fachgremium.

Erforderlich:

- ▶ Schaffen von personellen Kapazitäten für die Mitarbeit in Arbeitsgruppen.
- ▶ Modalitäten zur Konstituierung der Arbeitsgruppen.

B.5 Produkte und Dienstleistungen

Um die in Kapitel B.3 genannten Aufgaben zu erfüllen, werden vom Nationalen Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Bodenmonitoring-Netzwerk und den Gremien Produkte entwickelt und bereitgestellt und es werden Dienstleistungen erbracht. Welche Rollen das Zentrum selbst, die Akteur*innen des Netzwerks, die Gremien und Arbeitsgruppen dabei ausfüllen sollen, wird in Tabelle 6 vorgeschlagen. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die einzelnen Produkte und Dienstleistungen näher.

Tabelle 6: Rollen und Verantwortlichkeiten (1. Entwurf)

Aufgaben, Produkte und Dienstleistungen	Nationales Bodenmonitoringzentrum	Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks	Interministerielle Steuerungsgruppe	Fachgremium	Arbeitsgruppen
Fragenkatalog	Bearbeitung, Fortführung	-	Abstimmung und Festlegung	Beratung	-
Bearbeitung von Fragestellungen	Koordinierung und/oder Bearbeitung (bei Zuständigkeit), Tätigkeitsberichte	Koordinierung und/oder Bearbeitung (bei Zuständigkeit)	Kenntnisnahme der Ergebnisse	Beratung	Bearbeitung von Arbeitsaufträgen
Instrumente zur Datenverwaltung und zur Unterstützung der Facharbeit	Erstellung, Bereitstellung, Pflege	Datenbereitstellung, Metadatenerfassung	Verabschiedung des Handbuchs mit Standards	Beratung, Abstimmung des Handbuchs mit Standards	Bearbeitung von Arbeitsaufträgen
Informationsangebote und Berichte	Erstellung, Bereitstellung, Pflege	Nutzung, Anwendung	Nutzung, Anwendung	-	-
Methodische Standardisierung für die Datenvergleichbarkeit	Koordinierung, Steuerung, Moderation	Mitgestaltung	Aussprechen von Empfehlungen	Erarbeitung und Abstimmung von Empfehlungen	Bearbeitung von Arbeitsaufträgen
Weiterentwicklung Indikatoren	Koordinierung, Steuerung, Moderation; Bearbeitung (bei Zuständigkeit)	Bearbeitung (bei Zuständigkeit)	Abstimmung	Beratung	Bearbeitung von Arbeitsaufträgen
Wissenslücken ausweisen, Handlungsmöglichkeiten aufzeigen, Forschung	Bearbeitung	-	-	Beratung	Bearbeitung
Regelung der Zusammenarbeit und Vernetzung	Bearbeitung, Abschluss von Vereinbarungen	Abschluss von Vereinbarungen	Abstimmung von Mustervereinbarungen und Geschäftsordnungen	Abstimmung von Mustervereinbarungen und Geschäftsordnungen	-
Politikberatung	Empfehlungen	-	-	Empfehlungen	Empfehlungen

B.5.1 Beantwortung von Fragestellungen und Berichterstattung

B.5.1.1 Fortführbarer Fragenkatalog des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks

Die national bedeutsamen Fragestellungen zu Bodenschutz, Bodenveränderungen und Monitoring werden durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Fachgremium in einem Fragenkatalog formuliert und mit der interministeriellen Steuerungsgruppe abgestimmt. Der Fragenkatalog legt fest, für welche fachlichen Fragestellungen das Nationale Bodenmonitoringzentrum verantwortlich ist und für welche Fragen andere Bundesinstitutionen zuständig sind. Bereits etablierte Zuständigkeiten für Berichterstattungen und Themen verblei-

ben in den Händen der jeweiligen Institutionen. In Verbindung mit der Prozessbeschreibung für die Bearbeitung von Fragestellungen macht der Fragenkatalog deutlich, wie das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Bodenmonitoring-Netzwerk agiert.

Zum jetzigen Zeitpunkt dient der Katalog der Klarstellung von Aufgaben und Zuständigkeiten und zu deren ressortübergreifender Abstimmung. Im Lauf des Betriebs kann der Fragenkatalog als Loseblattsammlung fortgeführt und in Kombination mit den in Anlage C skizzierten Bearbeitungskonzepten auch zur Dokumentation des Arbeitsfortschritts in Tätigkeitsberichten eingesetzt werden.

Die Fragen des Katalogs leiten sich aus den Aufgaben des Bundes für den Bodenschutz und die bodenrelevanten Aspekte für das Klima ab. Weiterhin spielen bestehende und künftig zu erwartende Berichtsanforderungen auf nationaler und europäischer Ebene eine Rolle (vgl. Anlage B). Der Katalog ist landnutzungs- und ressortübergreifend konzipiert, d. h. es sind Fragestellungen enthalten, die Ziele und Handlungen für den Umweltschutz, für Land- und Forstwirtschaft, für Bauen, Wirtschaft und Verkehr und andere Ressorts berühren. Mit diesem ressortübergreifenden Ansatz sollen bodenbezogene Fragen umfassender beantwortet werden als bisher; die Zusammenarbeit der Ressorts soll gefördert und die bundesweite Berichterstattung erleichtert werden. Ergebnisse von Datenauswertungen und Modellierungen können – auch wenn sie sich auf das Bundesgebiet oder Regionen beziehen – in die Umwelt- oder Nachhaltigkeitsberichterstattung der Länder oder die Arbeit ihrer Klimakompetenzzentren einfließen.

Die Fragen im Katalog stehen in Zusammenhang mit folgenden Umwelt- und Nachhaltigkeitszielen:

- ▶ Nachhaltige Sicherung der Funktionen des Bodens gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz.
- ▶ Schutz des Grundwassers gemäß Wasserhaushaltsgesetz.
- ▶ Klimaschutz und Anpassung an Klimawandelfolgen.
- ▶ Verbesserung der Widerstandsfähigkeit der Böden gegenüber Folgen des Klimawandels.
- ▶ Erhalt der Bodenbiodiversität.
- ▶ Nachhaltige Flächennutzung und Reduzierung der Flächenneuanspruchnahme.
- ▶ Erhöhung des Anteils des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlich genutzten Fläche.
- ▶ Moorbodenschutz.
- ▶ Erhalt der Bodengesundheit im Sinne der EU-Bodenstrategie für 2030.¹⁸

Die Fragen berücksichtigen Handlungsoptionen und Steuerungsmöglichkeiten (Maßnahmen).

¹⁸ Böden sind gesund, wenn sie sich in einem guten chemischen, physikalischen und biologischen Zustand befinden.

Die Gliederung des Katalogs bildet die in Deutschland vorhandenen Gefährdungen für Böden ab und orientiert sich an den Arbeiten der Europäischen Umweltagentur in Zusammenhang mit der EU Soil Mission¹⁹:

- ▶ Bodenwasserhaushalt: Feuchtedefizit im Boden, Verringerung der Grundwasserneubildung.
- ▶ Bodenwärmehaushalt: Temperaturanstieg.
- ▶ Bodenstoffhaushalt: Verlust von organischem Kohlenstoff, Nährstoffverlust, Versauerung, Schadstoffbelastung, Eutrophierung.
- ▶ Bodenstruktur: Bodenerosion, Bodenverdichtung.
- ▶ Bodenbiodiversität: Biodiversitätsverlust.
- ▶ Landnutzung: Bodenversiegelung, Bodenfunktionsverlust.

Von besonderem Interesse für das Etablieren neuer Auswertungsprozesse durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum sind aktuell Fragestellungen in Zusammenhang mit der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: In welchem Maß verändern sich in Deutschland bodenhydrologische Kenngrößen, der Gehalt bzw. Vorrat an organischer Bodensubstanz, die Bodenbiodiversität und die Bodenerosion unter dem Einfluss des Klimawandels und der Bewirtschaftung – auch als Grundlage, um die Ernährungssicherheit in Zukunft zu gewährleisten?

Der Fragenkatalog wird in Tabelle 7 in einer ersten Fassung vorgelegt, die ressortübergreifend (im Fachgremium) abzustimmen und in der Steuerungsgruppe zu vereinbaren ist. Im Anschluss ist der Katalog fortführbar, d. h. es können Fragen und Themen hinzukommen, verändert oder auch verworfen werden. Anlass für die spätere Ergänzung weiterer Fragestellungen können auch politisch begründete Anfragen oder auch eigene Vorschläge des Nationalen Bodenmonitoringzentrums, aus den Gremien und von Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks in Bezug auf den Bodenzustand und Bodenschutz sein. Außerdem sind möglicherweise Fragen zu ergänzen, wenn neue Berichtspflichten etabliert werden.

Der Katalog beinhaltet:

- a) **Etablierte Fragen**, die bereits von Bundesinstitutionen fortlaufend bearbeitet und beantwortet werden und für die ein Arbeitsprozess für die Beantwortung definiert und eingeführt ist
→ Die Definition der Arbeitsprozesse, die Bearbeitung und Weiterentwicklungen obliegen den verantwortlichen Institutionen. Hier wird jeweils auf die Institution und ggf. auf das etablierte Berichtswesen verwiesen. Das Nationale Bodenmonitoringzentrum und das Bodenmonitoring-Netzwerk werden hier ausschließlich beratend tätig, z. B. wenn Weiterentwicklungsmöglichkeiten gesehen werden oder eine gemeinsame Interpretation sinnvoll erscheint.
- b) **Neue Fragestellungen**, für deren Bearbeitung ein Prozess noch zu etablieren ist
→ Die Bearbeitung liegt in der Verantwortung des Bodenmonitoring-Netzwerks. Die koordinierenden und zu beteiligenden Institutionen sind hier jeweils ressortübergreifend abzustimmen. Die neuen Fragestellungen sollen durch die Weiterleitung an zuständige Akteur*innen auf der Grundlage von im Nationalen Bodenmonitoringzentrum selbst ausge-

¹⁹ Soil Monitoring in Europe. Indicators and Thresholds for Soil Quality Assessments. Report. EEA Report. European Environment Agency, 2023. <https://www.eea.europa.eu/publications/soil-monitoring-in-europe>; joint-research-centre.ec.europa.eu/. „EU Soil Observatory - Dashboard with Indicators“, o. J. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/eu-soil-observatory-euso/eu-soil-observatory-dashboard-indicators_en.

werteten Daten oder durch gemeinsame Auswertungen mit anderen Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks bearbeitet werden. Der dazu vorgesehene Prozess wird in Abschnitt B.5.1.2 dargestellt. Bearbeitungskonzepte für erste neue Fragestellungen skizziert die Anlage C.

Im Katalog werden alle Fragestellungen geführt, die aktuell aus fachlicher Sicht auf Bundesebene für das Bodenmonitoring bedeutsam sind. Fragen zur künftigen Entwicklung des Bodenzustands, die mit Projektionen verbunden sind, umfasst der Katalog im Einzelfall (THG-Emissionen).

Ein Bearbeitungskonzept als Startpunkt für die jeweilige Umsetzung (siehe Abschnitt B.5.1.2 und Anlage C/B.9) wird für solche Fragestellungen ausgearbeitet, die aus Sicht des Nationalen Bodenmonitoringzentrums in Abstimmung mit dem Fachgremium und der interministeriellen Steuerungsgruppe vorrangig sind – z. B. wegen erwarteter Berichtserfordernisse – und für die eine Beantwortung in einem absehbaren Zeitraum von ca. fünf bis zehn Jahren vor dem Hintergrund von Datenlücken und methodischen Problemen als machbar angesehen wird.

Tabelle 7: Fortführbarer Fragenkatalog des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks (1. Entwurf)

Fragestellungen des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks		Verantwortlich	Arbeitsprozess definiert in ...
Bodenwasserhaushalt			
X	Wie entwickeln sich die Bodenwasservorräte unter typischen landwirtschaftlichen Kulturen während der Vegetationsperiode (seit 1970) unter dem Einfluss des Klimawandels?	DWD, BGR, UBA-KomPass	DAS-Monitoring
X	Wie verändert sich die Gefahr von Trockenstress in Wäldern unter dem Einfluss des Klimawandels?	TI-WO, UBA-KomPass	DAS-Monitoring
	Wie verändern sich die Bodenfeuchte sowie die Quantität des Sickerwassers in Waldböden, landwirtschaftlich genutzten Böden und Mooren bundesweit unter dem Einfluss des Klimawandels, verschiedener Nutzungen und Bewirtschaftungsformen sowie verschiedener Standortbedingungen? Lassen sich unterschiedliche Entwicklungen in verschiedenen Regionen oder Jahreszeiten beobachten? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: Nationales Bodenmonitoringzentrum in Kooperation mit TI)	
Bodenwärmehaushalt			
X	Wie verändert sich die Temperatur im Oberboden unter Einfluss des Klimawandels?	DWD, UBA-KomPass	DAS-Monitoring
Bodenstoffhaushalt – Kohlenstoff			
X	Wie verändern sich Humusgehalte von landwirtschaftlich genutzten Böden als wesentlicher Faktor für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wirkungen des Klimawandels?	LfL Bayern, UBA-KomPass	DAS-Monitoring

Fragestellungen des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks	Verantwortlich	Arbeitsprozess definiert in ...
X Wie verändern sich Humusvorräte von Waldböden als wesentlicher Faktor für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wirkungen des Klimawandels?	TI-WO, UBA-KomPass	DAS-Monitoring
X Wie tragen Mineralböden und organische Böden aller Landnutzungsformen heute und in Zukunft zu den nationalen Treibhausgasemissionen bei?	TI	Berichterstattung nach UN-Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll
Wie verändern sich der Vorrat und die Qualität des organischen Bodenkohlenstoffs in Waldböden, landwirtschaftlich genutzten Böden und Mooren bundesweit unter Einfluss des Klimawandels, verschiedener Nutzungen und Bewirtschaftungsformen sowie verschiedener Standortbedingungen und bodenbiologischer Faktoren? Lassen sich unterschiedliche Entwicklungen in verschiedenen Regionen beobachten? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: Nationales Bodenmonitoringzentrum in Kooperation mit TI)	
Bodenstoffhaushalt – Nährstoffe, Versauerung, Schadstoffe, Eutrophierung		
Wie verändert sich der Nährstoffhaushalt von Böden? z. B. Inwieweit finden Nährstoffverluste statt? Inwieweit ändern sich C/N- und N/P-Verhältnisse? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)	
Wie verändert sich die Bodenversauerung ? z. B. Wie entwickeln sich die pH-Werte unter dem Einfluss von Stoffeinträgen und Bewirtschaftung? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)	
X Wie entwickelt sich der Flächenanteil empfindlicher Land-Ökosysteme mit Überschreitung der Belastungsgrenzen der Eutrophierung ?	UBA FG II 4.3	UBA-Umweltmonitor
X Wie verändert sich der Stickstoff-Überschuss (die Stickstoff-Gesamtbilanz) landwirtschaftlicher Flächen?	JKI, Universität Gießen, BMEL	UBA-Umweltmonitor
Wie entwickelt sich der Säure- und Stickstoffeintrag auf Freiflächen im Wald? Wie wirken sich Reduzierungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: TI)	
Wie entwickelt sich die Belastung von Böden mit Per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS-Gehalte)? Wie wirken sich Reduzierungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: UBA)	

Fragestellungen des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks	Verantwortlich	Arbeitsprozess definiert in ...
Wie entwickelt sich die Belastung von Böden mit persistenten organischen Schadstoffen (POP-Gehalte) (Stockholmer Übereinkommen ²⁰)? Wie wirken sich Reduzierungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: UBA)	
Wie entwickelt sich die Belastung von Böden mit Schwermetallen und Arsen ? Wie wirken sich Reduzierungsmaßnahmen aus? <i>z. B. Kupfer im Weinbau unter Ökolandbau und konventionell</i>	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: UBA)	
Wie entwickelt sich die Belastung von Böden mit Kunststoffen ? Wie wirken sich Reduzierungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)	
Wie entwickelt sich die Belastung von Böden mit Pflanzenschutzmitteln ? Wie wirken sich Reduzierungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)	
Wie entwickeln sich die Bodenbelastungen auf Altstandorten und Altablagerungen ? Wie wirken sich Sanierungsmaßnahmen aus?	Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: UBA FG II 2.6)	
Bodenstruktur – Erosion, Verdichtung		
X Wie entwickelt sich das potenzielle Erosionsrisiko durch erosive Niederschlagsereignisse unter dem Einfluss des Klimawandels (Regenerosivität; ohne Berücksichtigung von Auswirkungen durch Bodenbewirtschaftung)?	DWD, TUM, UBA-KomPass	DAS-Monitoring
X Wie verändert sich die Fläche, die potenziell von starker Bodenerosion durch Wasser (> 10 Tonnen pro Hektar und Jahr Bodenverlust) betroffen ist? Wie verändert sich der Bodenabtrag durch Bodenerosion durch Wasser und Wind ? ²¹ Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus? <i>z. B. Wie entwickelt sich das aktuelle Erosionsrisiko durch erosive Niederschlagsereignisse unter dem Einfluss sich ändernder Bewirtschaftung? Inwieweit wirkt sich die Neuanlage von Strukturelementen zum Erosionsschutz auf den Bodenabtrag aus?</i>	JRC, Eurostat Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)	SDG-Monitoring

²⁰ <https://www.bmu.de/themen/gesundheitschemikalien/chemikalien/pops>

²¹ KWRA bis 2025: Entwicklung eines operationellen Monitoring- und Prognoseportals, welches auf Erosionsgefährdung und kritische Bodenfeuchten (in Bezug auf Bodenbefahrbarkeit) hinweist.

Fragestellungen des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks	Verantwortlich	Arbeitsprozess definiert in ...
<p>Wie verändert sich die Bodenverdichtung?²² Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus? z. B. Wie entwickeln sich Flächen mit Schadverdichtung im Unterboden?²³</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: UBA)</p>	
Bodenbiodiversität		
<p>In welchem Maß verändern sich die Bodenbiodiversität und ihre Leistungen bundesweit unter dem Einfluss des Klimawandels, verschiedener Nutzungen und Bewirtschaftungsformen sowie verschiedener Standortbedingungen? Lassen sich unterschiedliche Entwicklungen in verschiedenen Regionen oder Jahreszeiten beobachten? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: Nationales Bodenmonitoringzentrum in Kooperation mit NMZB /BfN)</p>	
Landnutzung		
<p>X Wie entwickelt sich die Siedlungs- und Verkehrsfläche?</p>	<p>Statistisches Bundesamt, Länder, UBA FG I 2.5)</p>	<p>DAS- und DNS- und Monitoring</p>
<p>Wie entwickelt sich die Bodenversiegelung?²⁴ Wie wirken sich Maßnahmen aus?</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)</p>	
<p>X Wie verändert sich die Gesamtfläche von Dauergrünland? Wie entwickelt sich der Anteil der Dauergrünlandfläche an der gesamten landwirtschaftlichen Fläche?</p>	<p>UBA FG I 1.5, Statistisches Bundesamt, BMEL, UBA FG II 2.2, UBA-KomPass</p>	<p>DAS-Monitoring, UBA-Umweltmonitor</p>
<p>X Wie entwickelt sich der Anteil des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlich genutzten Fläche?</p>	<p>UBA FG I 1.5, BMEL, Statistisches Bundesamt</p>	<p>UBA-Umweltmonitor</p>
<p>X Wie verändert sich die Gesamtfläche der durch Agrarumweltmaßnahmen geförderten Flächen und die Höhe der dafür gewährten Finanzmittel?</p>	<p>BMEL, BfN</p>	<p>NBS-Monitoring</p>
<p>X Wie verändert sich der Anteil der Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert (High Nature Value Farmland) an der gesamten Landwirtschaftsfläche?</p>	<p>BfN, Bundesländer</p>	<p>NBS-Monitoring</p>
<p>X Wie verändert sich der Anteil der nach PEFC beziehungsweise FSC zertifizierten Waldflächen (nachhaltige Forstwirtschaft) an der gesamten Waldfläche?</p>	<p>PEFC- und FSC-Zertifizierungsstellen, BMEL, BfN</p>	<p>NBS-Monitoring</p>

²² Vorarbeiten am TI (BonaRes-Projekt SOILAssist) zur taggenauen Modellierung und Prognose Bodenbefahrbarkeit vorhanden.

²³ Ein Indikator ist nicht absehbar, da Zeitreihen fehlen. In einem gerade begonnenen UBA-Projekt wird zunächst der aktuelle Zustand ermittelt. Im BonaRes-Projekt SOILAssist des TI werden mit Blick auf Bodenverdichtung Befahrbarkeitstage modelliert. Der Ansatz ist auch als fortschreibbarer jährlicher Indikator umsetzbar.

²⁴ Ein Vorschlag von 2007 zur Entwicklung eines bundesweiten Indikators „Bodenversiegelung“ liegt vor.
<https://bodenschutzdigital.de/ce/die-erhebung-eines-bundesweiten-indikators-bodenversiegelung/detail.html>.

Fragestellungen des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks	Verantwortlich	Arbeitsprozess definiert in ...
<p>Wie verändern sich Moorböden²⁵? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus? z. B. Inwieweit findet ein Verlust von Moorböden statt? Inwieweit werden Moore wieder vernässt? Inwieweit wird der Zustand von Mooren durch Klimawandel, Stoffeinträge und Bewirtschaftung verschlechtert?</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)</p>	
Integrierend		
<p>Wie verändert sich die Bodengesundheit und die Bodenqualität unter dem Einfluss von Klimawandel, Stoffeinträgen und Bewirtschaftung?²⁶ Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)</p>	<p>Zurückgestellt bis Verabschiedung EU-Bodengesundheitsgesetz</p>
<p>Inwieweit werden Bodenschutzgebiete für besonders wertvolle Böden ausgewiesen?</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk (Koordination: N.N.)</p>	<p>Zurückgestellt bis Novellierung BBodSchG</p>

X = Etablierte Fragen

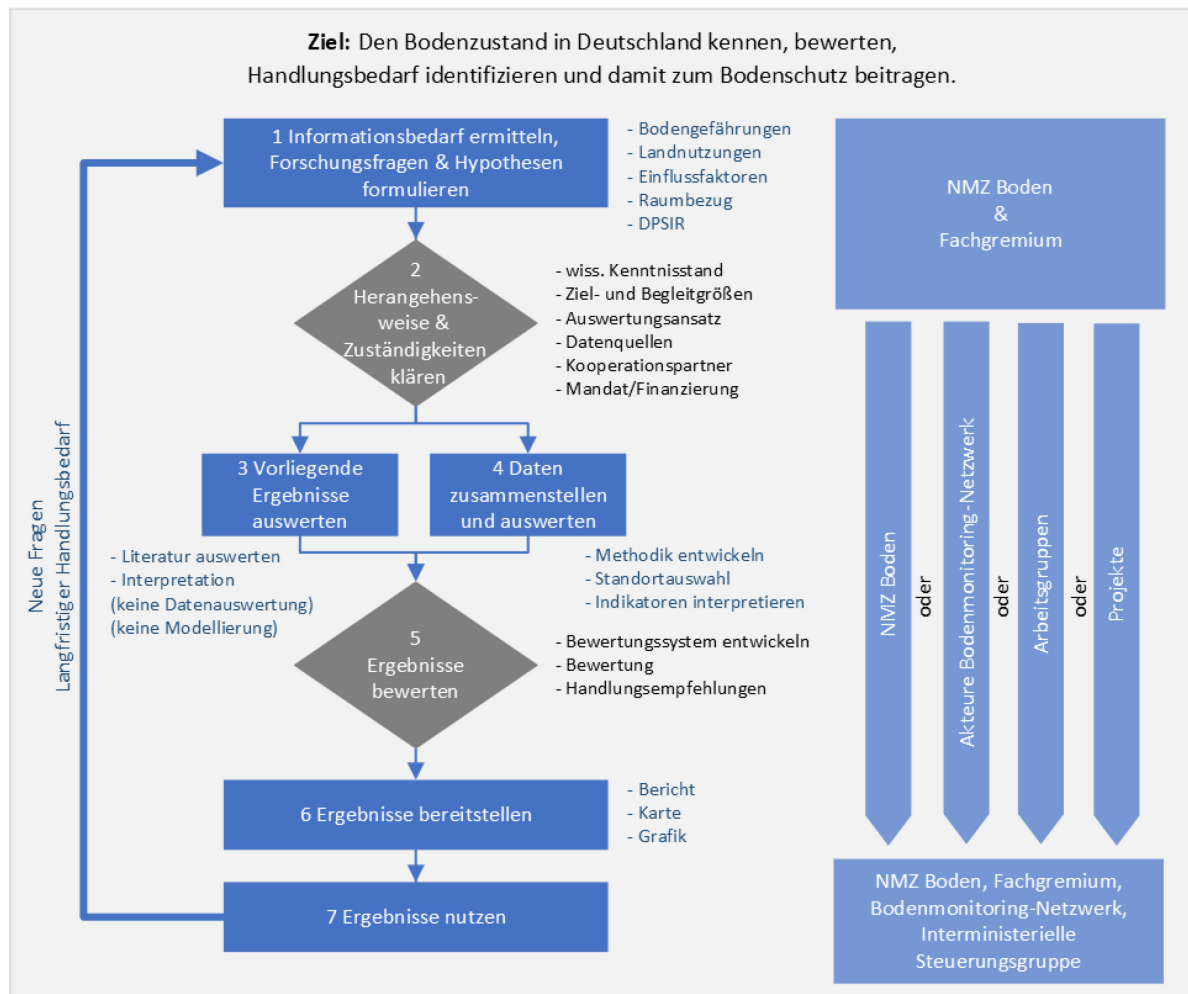
B.5.1.2 Bearbeitung von neuen Fragestellungen

Das Nationale Bodenmonitoringzentrum greift die im Fragenkatalog (Tabelle 7) aufgeführten neuen Fragestellungen auf und verfasst für diese in Zusammenarbeit mit dem Fachgremium konkrete Forschungsfragen und zu untersuchende Hypothesen. In einem abgestimmten Arbeitsprozess werden diese Forschungsfragen von Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks bearbeitet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten dienen der Politikberatung und bilden die Grundlage für erforderliche Maßnahmen. Der Prozessablauf wird in Abbildung 25 veranschaulicht.

²⁵ nationale Aktivitäten zum Moorbodenschutz (MoMoK Thünen-Institut, Maßnahmen im Klimaschutzprogramm 2030) sowie Handlungsfeld im ANK; siehe auch Nationale Moorschutzstrategie; Indikatoren zur regionalen Moorkulisse in „Moorschutz in Deutschland“ (BfN-Skripten 462) [Indikatoren sind nicht etabliert, vorgeschlagene GIS-gestützte Auswertung von Bodenkarten, ATKIS etc.]

²⁶ Eine abgestimmte Definition eines gute ökologischen Bodenzustands fehlt bisher. Indikatoren sind noch in der Entwicklung. Vorläufig in Frage kommt ein Regenwurmindikator, wie etwa bereits im MonVia-Projekt erprobt.

Abbildung 25: Prozessablauf für die Bearbeitung von neuen Fragestellungen des Bodenmonitoring-Netzwerks



NMZ = Nationales Monitoringzentrum

Quelle: eigene Darstellung, ahu GmbH

Geklärt wird jeweils, wofür und in welcher Form die Informationen benötigt und mit welcher Herangehensweise, mit welchen vorliegenden Ergebnissen bereits stattgefundener Auswertungen, mit welchen Ziel- und Begleitgrößen aus Monitoring und Erhebung, mit welchen Daten und mit welchen Methoden die Fragestellung bearbeitet werden soll. Kooperationspartne*innen und zuständige Ansprechstellen werden identifiziert und die Notwendigkeit eines Mandats für die Tätigkeiten oder einer Finanzierung geprüft.

Für die Bearbeitung der einzelnen Fragestellungen sind folgende Schritte notwendig:

- 1. Ermitteln des Informationsbedarfs, Konkretisierung von Forschungsfragen und Hypothesen**, dabei Festlegung der zu untersuchenden Szenarien, ggf. Einordnung in das DPSIR-Modell
- 2. Klärung der Herangehensweise und Zuständigkeiten**
 - a. Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Einflussgrößen, geeignete Ziel- und Begleitgrößen
 - b. Überlegung von geeigneten Auswertungsansätzen
 - c. Recherche von Ergebnissen oder Daten, die zur Beantwortung der Frage geeignet sind

- d. Ermittlung von Kooperationspartnern, d. h. Institutionen und Personen, die Daten bereitstellen und/oder eine Bearbeitung leisten können (z. B. Nationales Bodenmonitoringzentrum, TI, JKI, BGR) mit Blick auf Expertise und Arbeitskapazitäten
- e. Mandatierung/Finanzierung

3. Auswertung vorliegender Ergebnisse (ohne Datenauswertungen und Modellierungen)

- a. Auswertung von Literaturquellen
- b. Interpretation

UND/ODER

4. Datenzusammenstellung und Auswertung

- a. Anforderungsanalyse und Festlegung der Kriterien für zeitliche und räumliche Repräsentativität und Erhebungsmethoden
- b. Anfrage geeigneter Daten, z. B. auf der Grundlage des Standortverzeichnisses des Bodenmonitoring-Netzwerks (siehe Abschnitt B.5.1.3)
- c. Zusammenstellung und Harmonisierung von Daten verschiedener Quellen für programmübergreifende Auswertungen
- d. Methodenwahl für die Datenauswertung oder Modellierung
- e. Sicherstellung der Einhaltung von Qualitätskriterien (Datenerhebung, Untersuchungsmethoden, Standortwahl/Repräsentativität)
- f. Datenanalyse oder Modellierung
- g. ggf. Indikatorentwicklung und Interpretation

5. Bewertung der Ergebnisse

- a. Entwicklung eines Bewertungssystems
- b. Bewertung der Ergebnisse in Abstimmung mit den beteiligten Partner*innen
- c. Formulierung von Defiziten und Handlungsempfehlungen

6. Bereitstellung der Ergebnisse in Form von Berichten, Karten oder Grafiken, dies mit Verweis auf und in enger Absprache mit beteiligten Partner*innen und Klärung der Autorenschaft (Daten bereitstellende Institutionen als Haupt- bzw. Co-Autoren), Verknüpfung auf der Webseite des Nationalen Bodenmonitoringzentrums

7. Nutzung der Ergebnisse für Berichtswesen und Politikberatung sowie Ableitung von neuen Fragen und langfristigem Handlungsbedarf

Die Schritte 1 und 2 werden durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Fachgremium bearbeitet. Die Schritte 3 bis 6 können je nach fachlicher Eignung und Kapazitäten durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum oder durch andere Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks wie TI, BGR, JKI oder andere Bundesinstitutionen, durch im Fachgremium initiierte Arbeitsgruppen oder durch Auftragnehmer*innen nach Vergabe von Projekten (z. B. Refoplan) übernommen werden. Diese werden dann auch schon in Schritt 2 bei der Klärung der Herangehensweise eingebunden. Alle beteiligten Akteur*innen können die Ergebnisse nutzen (Schritt 7).

Für erste neue Fragestellungen des Bodenmonitoring-Netzwerks aus Tabelle 7 ist in Anlage C/B.9 ein Bearbeitungskonzept skizziert, das für die Abstimmung der Herangehensweise und der Zuständigkeiten dienen und zum Einleiten des Arbeitsprozesses genutzt werden kann. Die Herangehensweise, die Zuständigkeiten und die Prozesse für die Bearbeitung der neuen Fragestellungen sind ressortübergreifend im Fachgremium abzustimmen. Um die etablierten Fragen

in diesem Schritt leicht berücksichtigen zu können, sind in Anlage C für diese jeweils kurze Informationen zu deren Bearbeitungsansatz und zu den Datengrundlagen aufgeführt.

Nach Festlegung des Fragenkatalogs sollen während des Betriebs des Nationalen Bodenmonitoringzentrums in Abstimmung mit dem Fachgremium Bearbeitungskonzepte für weitere neue Fragestellungen ausgestaltet werden.

B.5.1.3 Instrumente zur Datenverwaltung und zur Unterstützung der Facharbeit

Die Instrumente des Nationalen Bodenmonitoringzentrums schaffen eine Grundlage für die Berichterstattung und Beantwortung von Fragestellungen, indem sie die Verfügbarkeit und die Vergleichbarkeit von Messdaten fördern. Dazu gehören:

- ▶ ein **Verzeichnis von den der Arbeit des Bodenmonitoring-Netzwerks zugrundeliegenden Messstandorten** mit Stammdaten und Angaben zu Messgrößen (Metadaten) (Standortdatenbank als Vorlage mit Stand 2021 aus FuE 3719 71 204 0 „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ vorhanden, regelmäßige Fortschreibung alle 3 Jahre),
- ▶ ein **standardisiertes technisches Austauschformat für Stammdaten und Angaben zu Messgrößen** sowie zur Datenqualität (fachliche Anforderungen für klimabezogene Themen liegen aus FuE 3719 71 204 0 in UBA-Texte 67/2022 vor, technisch zu entwickeln),
- ▶ eine **Kartenanwendung** zur regionalen und themenspezifischen Recherche von Messstandorten und für Suchanfragen über Messgrößen und Zeitreihenlängen,
- ▶ eine **Plattform, die einen leichten Zugang zu Informationen (Metadaten)** über bodenbezogene Messdaten für Anwender*innen in Wissenschaft und Verwaltung schafft und bestehende sowie geplante Initiativen mit ähnlicher Zielsetzung berücksichtigt (umwelt.info), möglichst als open data (Dazu erforderlich sind die Auswahl einer Metadatenplattform, die Festlegung eines Metadatenprofils mit den erforderlichen Datenfeldern und die Aktivierung von Akteur*innen zur Metadatenerfassung.),
- ▶ ein **digitaler Data hub (zentrale Anlaufstelle)**, wo die in unterschiedlichen Programmen und Messnetzen erhobenen Daten ohne zentrale Datenbank zusammengeführt und Nutzenden zur Verfügung gestellt werden. Der Data hub wird vom Nationalen Bodenmonitoringzentrum betrieben und betreut. Die Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks ermöglichen die digitale Datenbereitstellung, soweit es der Datenschutz und Vereinbarungen innerhalb der bestehenden Monitoringsysteme zulassen. Die zeitliche Freigabe von Datensätzen nach ihrer Erhebung wird Verfahren unterliegen, wie sie bereits in den Programmen und Messnetzen vorgegeben sind, oder auf die sich die Beteiligten einigen,²⁷
- ▶ ein **Handbuch/Manual mit fachlichen Qualitätsstandards für die Datenerhebung**. Inhalt: Verbindliche Empfehlungen für einheitliche Probenahmeterminen, Messintervalle, Bezugstiefen und Untersuchungsmethoden für Ziel- und Begleitgrößen. Der Aufbau auf bereits bestehenden Standards (z. B. ICP Forests Manuale, TERENO- und BonaRes-Standards, Barth et al. 2022 für BDF²⁸, DOI-Nummer für Forschungsdaten, ISO 19115, HFA- und BDF-

²⁷ Hinweise können die Arbeiten des European Joint Research Programmes (EJP SOIL) liefern, z. B. Entwurf für eine Vereinbarung über den Austausch von Bodendaten zwischen den EJP SOIL-Partnern und anderen Institutionen auf nationaler Ebene (siehe <https://ejpsoil.eu/about-ejp-soil/news-events/item/artikel/ejp-soil-maps-european-soil-data>).

²⁸ N. Barth, Natalja; W. Borho; E. Cordsen; C. Heller; H. Höper; B. Ludwig; M. Marx; H. Meesenburg; P. Spörlein; M. Weller (2022): Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen, Juni 2022. https://www.labo-deutschland.de/documents/Methodenhandbuch_BDF.pdf.

Methoden-Code) ist dabei maßgebend (Fortschreibung nach Bedarf) (in Abstimmung mit dem Fachgremium zu erarbeiten).

B.5.1.4 Informationsangebote und Berichte

Das Nationale Bodenmonitoringzentrum vermittelt die Ergebnisse und die Bedeutung einer regelmäßigen und differenzierten Überwachung des Bodenzustands mittels Web-Informationen und gezielter Informations- und Diskussionsveranstaltungen für Akteur*innen, die z. B. im Bodenschutz, in der Planung und im Naturschutz tätig sind oder sich mit bodenbezogenen Fragestellungen des Klimaschutzes und der Anpassung an Folgen des Klimawandels auseinandersetzen. Die Informationsarbeit kann dazu beitragen, überregionale und fachübergreifende Auswertungen voranzutreiben.

Das Nationale Bodenmonitoringzentrum bietet folgende Leistungen an:

- ▶ **Webseite** mit einem öffentlichen und einem internen Bereich für die Gremien. Strukturelle und inhaltliche Ausgestaltung (Informationen zu Aktivitäten von Nationalem Bodenmonitoringzentrum, Netzwerk und Gremien wie Tagungen oder auch Protokolle und Beschlüsse wichtiger Sitzungen, ggf. mit differenzierten Zugriffsrechten, Informationen zu bodenbezogenen Monitoring-Aktivitäten in allen Ressorts und Verweise auf die dafür zuständigen Stellen), technische Umsetzung, Fortschreibungskonzept.
- ▶ **Aktivitäten zur Förderung der Datennutzung**, z. B. Informations-Kampagnen, Informations- und Diskussions-Veranstaltungen für Akteur*innen (Messende und Auswertende) in regelmäßiger Wiederholung, z. B. jährliche Konferenz zum Bodenmonitoring oder angebunden an verwandte Fachtagungen wie DBG oder BonaRes.
- ▶ **Indikatoren-Plattform**, auf der bodenbezogene Indikatoren in regelmäßig aktualisierter Form sowie die dazugehörigen Hintergrunddokumente angeboten werden (z. B. in Form von Daten- und Indikator-Factsheets, wie sie im DAS-Monitoring genutzt werden).
- ▶ **Berichte und Stellungnahmen**, z. B. anlassbezogen themenspezifische Berichte oder Beiträge zu anderen Monitoringberichten (wie DAS, DNS, NBS), sofern diese Aufgaben nicht von anderen Institutionen wahrgenommen werden. Von besonderem Interesse sind für die Anlaufphase des Nationalen Bodenmonitoringzentrums bodenhydrologische Kenngrößen, die organische Bodensubstanz sowie Bodenbiodiversität und Bodenerosion.
- ▶ **Tätigkeitsberichte** zur regelmäßigen Dokumentation der im Nationalen Bodenmonitoringzentrum und Bodenmonitoring-Netzwerk geleisteten Arbeiten und des erreichten Fortschritts, die zur Information der interministeriellen Steuerungsgruppe und des Fachgremiums dienen.

B.5.2 Weiterentwicklung des Bodenmonitorings

Um das bundesweite Bodenmonitoring im Sinne einer bundesweiten Berichterstattung unter Beteiligung von Vertreter*innen verschiedener Fachbereiche weiterzuentwickeln, sind eine Standardisierung von Daten und Methoden sowie Indikatorneuentwicklungen erforderlich. Diese Prozesse werden von Seiten des Nationalen Bodenmonitoringzentrums, z. B. durch Formulierung von Vorschlägen, Eigenforschung, das Verteilen von Mandaten für Aufgaben in Abstimmung mit dem Fachgremium, durch Moderation, die Durchführung von Workshops und die Nachverfolgung des Fortschritts unterstützt. Die Umsetzung von Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Monitoring- und Erhebungsprogramme obliegt den Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks und

hängt von deren Praktikabilität und Finanzierbarkeit ab. Unterstützende Maßnahmen des Bundes sind vorgesehen.

Eine fachliche Basis für die nachfolgenden Ausführungen ist der Abschlussbericht aus dem Forschungsprojekt „Konzeption und Umsetzung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“, der im Juni 2022 als UBA-Texte 67/2022 veröffentlicht worden ist.

B.5.2.1 Methodische Standardisierung für die Datenvergleichbarkeit

Folgende Aktivitäten werden im Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerk durchgeführt:

- ▶ Festlegung themenübergreifender methodischer Standards und einheitlicher Definitionen für künftige Datenerhebungen und zur Methodendokumentation, Formulierung von Qualitätskriterien für die Datenerhebung (z. B. Messtiefen, Zeitpunkt von Messungen im Jahr oder zu erhebende Begleitgrößen) sowie zur Dokumentation der Daten, um damit die Standardisierung von Messgrößen und Methoden in Deutschland langfristig voranzutreiben (fachlich und datentechnisch) sowie langfristig die Vergleichbarkeit der bodenbezogenen Messdaten sicherzustellen, dies unter Berücksichtigung bereits etablierter Verfahren und vorliegender Dokumentationen. Ergebnis ist ein Handbuch/Manual, vgl. Abschnitt B.5.1.3.
- ▶ Identifizierung bestehender Datenquellen und Daten, die bereits jetzt schon zusammen auswertbar sind (durch z. B. vergleichbare Methoden und Tiefenstufen) und Entwicklung der für eine Zusammenführung erforderlichen Datenstrukturen.
- ▶ Entwicklung von Konzepten zur Herstellung der Vergleichbarkeit von Messdaten verschiedener Methoden und/oder geeigneter Auswertungsansätze.
- ▶ Definition des Datenaustauschprozesses, Erarbeitung des technischen Austauschformats für Stammdaten und Angaben zu Messgrößen inkl. Qualitätssicherung (Ergebnis ist ein standardisiertes technisches Austauschformat für Stammdaten, vgl. Abschnitt B.5.1.3.).
- ▶ Formulierung von Empfehlungen für künftiges Bodenmonitoring und Erhebungen, z. B.:
 - Zur Anpassung von Messaktivitäten an einzelnen bestehenden Probenahmestandorten (z. B. durch einheitliche Entnahmetiefen und Messverfahren), so dass mit den Ergebnissen bundesweite Aussagen möglich sind. Um Unterbrechungsfreiheit zu gewährleisten, müssen bei den Anpassungen bestehende Messreihen mit den ursprünglichen Verfahren weitergeführt werden. Hier gilt es praktikable Lösungen zu finden, die z. B. zusätzliche parallele Beprobungen oder Auswertungsansätze (Transferfunktionen) ermöglichen bzw. kombinieren.
 - Zur Erstellung einer ausreichenden Dokumentation von Methoden, um Messdaten auf Vergleichbarkeit prüfen zu können.
 - Zur Einrichtung von neuen Messstandorten (beispielsweise Ausweitung von Bodenfeuchte-Messungen auf landwirtschaftlichen Nutzungen) oder zur Ergänzung des Messumfangs an bestehenden Standorten (insbesondere im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung), um Defizite der Flächenabdeckung zu reduzieren.
 - Zur lückenlosen Dokumentation von Bewirtschaftungsdaten auf landwirtschaftlich genutzten Messstandorten.
 - Für Aussagen zur Bodenerosion: Vereinheitlichung der Methoden zur Erfassung von Bodenabträgen auf Erosionsmessflächen sowie zur Erfassung von Erosionsereignissen in schadensfallabhängigen Kartierungen.

- Für Aussagen zur organischen Bodensubstanz: Verbesserung der Qualität der Dokumentation von Ziel- und Begleitgrößen, Erfassung von SOC (Soil organic carbon)-Vorräten, Anpassung und Vereinheitlichung von Probenahmehäufigkeit, -zeitpunkt, Beprobungstiefe, Erhöhung der Flächenrepräsentativität, Erweiterung des Messspektrums etablierter Messstandorte um Zielgrößen für SOC-Qualität und Begleitgrößen.

B.5.2.2 Weiterentwicklung von bodenbezogenen Indikatoren

Das im September 2022 von BMUV/UBA initiierte FuE-Projekt „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz, FKZ 3722 74 201 0“, wird Antworten liefern zu den Fragen: Welche bodenbezogenen Indikatoren gibt es und wo kommen sie bereits erfolgreich zum Einsatz? In welcher Form kann die bundesweite Berichterstattung mit weiteren bodenbezogenen Indikatoren unterstützt werden? Auf dieser Grundlage werden durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum zusammen mit dem Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerk folgende Dienstleistungen übernommen:

- ▶ Weiterentwicklung von bodenbezogenen Indikatoren für die Berichterstattung und Erfolgskontrolle der Ziele in nationalen und europäischen Strategien sowie Kontrolle politischer, ökonomischer und Umweltschutzmaßnahmen; Untersetzung, Aktualisierung bzw. Weiterentwicklung bereits bestehender Indikatoren, ohne dabei bestehende Berichtspflichten anderer Akteur*innen zu berühren.
- ▶ Untersetzung der bereits vorhandenen Bodenindikatoren mit weiteren belastbaren Daten.
- ▶ Entwicklung von Lösungsansätzen, um Messdaten von Standorten unterschiedlicher Eigenschaften und mit unterschiedlichem Ausgangszustand gemeinsam in einen Indikator zu integrieren.
- ▶ Ermittlung von Referenzwerten (z. B. standorttypische Humusgehalte, Referenzlebensgemeinschaften).
- ▶ Entwicklung von Bewertungssystemen mit Referenz-, Ziel- oder Schwellenwerten.

B.5.2.3 Wissenslücken ausweisen, Handlungsmöglichkeiten aufzeigen, Forschung

Folgende Arbeiten werden durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Abstimmung mit dem Fachgremium durchgeführt:

- ▶ Beobachtung politischer Prozesse und Strategien auf europäischer und nationaler Ebene, Aufzeigen von Wissenslücken zur Erfüllung von Berichtsansforderungen und zur Beantwortung von Fragen sowie Ableitung von Handlungsbedarf.
- ▶ Prüfung, inwieweit in Deutschland weitere zentralisierte Messkampagnen analog zu LUCAS Soil oder eine Kooperation mit LUCAS Soil 2024 zielführend sind (z. B. für zusätzliche Fragestellungen wie neue Stoffe in Böden oder als Initiative/Startphase zur Standardisierung von Methoden).²⁹
- ▶ Bodenbiodiversität: Konzeption und Umsetzung eines deutschlandweiten Messnetzes, um bestehende Datenlücken zu füllen, die räumliche Repräsentativität zu verbessern und nach Möglichkeit an bestehende Messstandorten anzuknüpfen.

²⁹ Siehe dazu die technischen Empfehlungen für eine bessere Vergleichbarkeit der in den einzelnen Ländern vorhandenen Bodendaten im EJP SOIL-Bericht 6.3 „Proposal of methodological development for the LUCAS programme in accordance with national monitoring programmes“: https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/WP6/EJP_SOIL_Deliverable_6.3_Dec_2021_final.pdf.

Bislang fehlen noch aussagekräftige und in der Praxis erprobte Indikatoren und Bewertungsmethoden, um die Bodenbiodiversität umfassend abbilden zu können. Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf Erkenntnisse zu klimasensiblen Arten und zu erforderlichen Referenzwerten (z. B. ursprüngliche Zusammensetzung einer Gemeinschaft), hier sind Aktivitäten im Rahmen einer ANK-Maßnahme zur Bodenbiodiversität geplant.

- ▶ Forschung zu Konzepten für die Herstellung der technischen Kompatibilität von Mess- und Metadaten, (Weiter-)Entwicklung von statistischen Verfahren zur Auswertung von heterogenen Daten aus verschiedenen Programmen unter Berücksichtigung von Variationsursachen (zur Umsetzung der in Abschnitt B.5.2.1 genannten Anforderungen).

B.5.3 Regelung der Zusammenarbeit und Vernetzung

Die Regelung der Zusammenarbeit und Vernetzung umfasst:

- ▶ Organisation des Bodenmonitoring-Netzwerks und der Gremien, die Regelung der Zusammenarbeit der Akteur*innen sowie die Kommunikation innerhalb des Netzwerks:
 - Entwicklung und Abschluss von Kooperations- und Nutzungsvereinbarungen mit den Akteur*innen des Bodenmonitoring-Netzwerks (aufbauend auf den über 50 Institutionen, die ihr Interesse für eine Mitwirkung in einem Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund bekundet haben und Ausweitung auf die Erfordernisse für das Nationale Bodenmonitoring-Netzwerk).
 - Ausgestaltung der Geschäftsordnungen für die interministerielle Steuerungsgruppe und das Fachgremium.
 - Kontaktverwaltung.
 - Veranstaltungsorganisation für Gremien und Netzwerk.

Wichtig ist, dass sich die Monitoring-Aktivitäten in den Geschäftsbereichen von BMUV, BMEL und anderen Ressorts ergänzen, verstärkt vernetzen und Doppelarbeit vermieden wird. Die Rahmenbedingungen dafür werden in der ressortübergreifenden Steuerungsgruppe geschaffen, indem die Zuständigkeiten und prioritären Handlungsfelder für das Bodenmonitoring definiert sowie Mandate für das Vorantreiben der Integration unterschiedlicher Monitoringsysteme erteilt werden.

- ▶ Informationsaustausch und Kooperation mit Institutionen, die zu ähnlichen Fragestellungen arbeiten:
 - BonaRes-Datenzentrum,
 - Nationales Monitoringzentrum für Biodiversität (NMZB),
 - Kompetenzzentrum Boden in der Schweiz (KOBO),
 - Europäische und internationale Gremien und Organisationen (EUSO, LUCAS).

B.5.4 Politikberatung

Das Nationale Bodenmonitoringzentrum unterstützt in Abstimmung mit dem Fachgremium die Erarbeitung von Strategiepapieren, beispielsweise

- ▶ zur EU-Bodenstrategie 2030 mit dem Ziel, die Bodengesundheit zu definieren,
- ▶ zum Klimaschutz, indem Vorschläge zur Emissionsminderung ausgearbeitet werden, und
- ▶ zum Klimaanpassungsgesetz sowie zur Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

Die verschiedenen Ressorts können die Instrumente, Informationsangebote und Arbeitsergebnisse des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des Bodenmonitoring-Netzwerks für ihre Politikberatung nutzen.

B.6 Aufbau und Betrieb

Das Konzept für den Aufbau und den Betrieb des Nationalen Bodenmonitoringzentrums und des damit verbundenen Netzwerks mit den vorgesehenen Gremien baut auf dem Konzept zur praktischen Umsetzung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds auf (UBA-Texte 67/2022). Es wurde vom Umweltbundesamt unter Berücksichtigung erster, noch nicht abschließender Hinweise anderer Ressorts erarbeitet und beinhaltet Vorschläge für die Ziele und Aufgaben für die im Bodenmonitoring-Netzwerk zu beantwortenden Fragestellungen, Zuständigkeiten und Bearbeitungsprozesse.

Wichtige Schritte sind:

- ▶ **Weiterentwicklung des Konzepts im Rahmen der Ressortabstimmung:** Abstimmung des Fragenkatalogs, Aufgabenklärung für Fragestellungen, Sondierung der Möglichkeiten zur Zusammenarbeit bei der Bearbeitung von Fragestellungen und zur Standardisierung von Methoden, Ausgestaltung der Kooperation des Nationalen Bodenmonitoringzentrums mit dem Thünen-Institut und weiteren Bundesoberbehörden und Bundesforschungsinstituten, Ressortgespräche, Beschlussfassung sowie Information in Bund-Länder-Gremien (UMK, LABO).
Meilenstein: → Beschluss eines ressortübergreifend abgestimmten Konzepts bis Herbst 2023.
- ▶ **Konstituierung des Bodenmonitoring-Netzwerks:** Dies betrifft sowohl die Vereinbarung der Zusammenarbeit mit Bundesinstitutionen wie Thünen-Institut, DWD, BGR, NMZB, umwelt.info und Forschungsverbänden wie BonaRes als auch mit den Bundesländern.
Meilenstein: → Kooperationszusagen maßgeblicher Akteur*innen im Netzwerk bis Ende 2023.
- ▶ **Aufbau weiterer Organisationsstrukturen:** Stellenbesetzung im Nationalen Bodenmonitoringzentrum, Räumlichkeiten, Einarbeitung, Team-Organisation, Verträge, Vereinbarungen, Geschäftsordnungen und Mandate für die Gremien, Organisationshandbuch mit allen Ansprechpersonen und operativen Festlegungen.
Meilensteine:
→ Besetzung aller ausgeschriebenen Stellen im Nationalen Bodenmonitoringzentrum.
→ Konstituierung der interministeriellen Steuerungsgruppe und des Fachgremiums bis Mitte 2024.

→ Abgestimmtes Organisationshandbuch für Nationales Bodenmonitoringzentrum, Gremien und Netzwerk.

► **Bereitstellung von Instrumenten und Produkten**

Erste Meilensteine:

→ Veröffentlichung der Webseite bis Ende 2023.

→ Nationale Tagung zu Bodenindikatoren am 17.-18. April 2024 in Dessau.

► **Rechtliche Absicherung des Datenaustauschs**

Überarbeitung der mit dem § 19 BBodSchG in Zusammenhang stehenden Verwaltungsvereinbarung zwischen Bund und Ländern zum Datenaustausch im Umweltbereich (Stand 1994), einschließlich Anhang II 4 (Austausch bodenrelevanter Daten), Ergänzung um klimarelevante Fragestellungen

Meilensteine:

→ Entwurf zur Neufassung der VwV.

→ zwischen Bund und Ländern abgestimmte Neufassung der VwV.

► **Fortschreibung des vorliegenden Konzepts während des Betriebs** durch das Nationale Bodenmonitoringzentrum in Zusammenarbeit mit dem Fachgremium.

Meilenstein: → Fortschreibung des Konzepts bei Bedarf oder nach ca. drei bis fünf Betriebsjahren.

B.7 Anlage A: Aktivitäten und Programme zum Bodenmonitoring und zur Erhebung des Bodenzustands (alphabetische Reihenfolge)
Stand: März 2023

National:

Laufende Aktivitäten und Programme

Bundesweites Moorbodenmonitoring (MoMoK) unter Wald (Thünen-Institut)

Dient der Beantwortung folgender Fragen: Wie viel Kohlenstoff speichert der Bestand im Vergleich zum Moorboden? Wie entwickelt sich der C-Speicher in Boden, Wurzel, Bestand, Totholz und Auflage? Welche Mächtigkeit hat die verbleibende Torfschicht bei entwässerten Mooren und Anmooren? Welche Größen und Maßnahmen steuern die Emissionen? Ziele sind: Verbesserung der THG-Berichterstattung für organische Böden unter Wald und Ableitung von Maßnahmen für organische Böden unter Wald. (2 Intensiv-Flächen, 8 Referenz-Flächen und 50 Standard-Flächen, letztere werden bis Mitte 2025 errichtet).

Bundesweites Moorbodenmonitoring für den Klimaschutz – Offenland (Thünen-Institut)

Dient der Beantwortung folgender Fragen: Wie entwickeln sich die THG-Emissionen in Zukunft in Abhängigkeit von Moor- und Landnutzungstyp? Wie präzise können aus gemessenen Geländehöhenänderungen CO₂-Emissionen abgeleitet werden? Ziele sind: Langfristige, deutschlandweit konsistente und räumlich repräsentative Abschätzung der CO₂-Emissionen für die Emissionsberichterstattung und Aufbau eines langfristigen, deutschlandweit repräsentativen Moorbodenmonitoring-Netzwerks. Ein verbessertes Verständnis von Steuerfaktoren, des Zusammenhangs zwischen Geländehöhenänderungen und Änderungen des Kohlenstoffvorrats sowie die Bewertung von Minderungsmaßnahmen und Szenarienentwicklung (198 Untersuchungsflächen, teilw. mit Überschneidungen von BDF und ICOS-D und weiteren Standorten mit langfristigen Messungen von CO₂-Flüssen).

Boden-Dauerbeobachtung in Deutschland

Die Boden-Dauerbeobachtung ist seit über 35 Jahren fest etabliert. Sie umfasst in den Bundesländern (außer Berlin und Bremen) rund 780 langjährige Basisbeobachtungsflächen und rund 100 Intensivbeobachtungsflächen auf Acker, Grünland, Forst und Sonderkulturen, z. T. auch im Siedlungsbereich oder auf sonstigen Nutzungen. Ziel ist es, den aktuellen Zustand der Böden zu erfassen, ihre Veränderungen langfristig zu überwachen und Entwicklungstendenzen abzubilden. Für die Boden-Dauerbeobachtung sind die Länder zuständig. Die Daten werden in den Ländern und vom Umweltbundesamt für vielfältige Fragestellungen im Bodenschutz abgefragt und eingesetzt.

Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE LW)

Die BZE LW liefert erstmalig eine deutschlandweite, konsistente und repräsentative Inventur der Kohlenstoffvorräte landwirtschaftlich genutzter Böden (Acker-, Grünland-, Sonderkulturflächen) bis 100 cm Tiefe. Sie dient primär der Treibhausgas-Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. Die Probenahme für die bislang einzige Inventur der BZE LW begann im Jahr 2012 und wurde 2018 abgeschlossen.

Bodenzustandserhebung Wald (BZE Wald)

Die BZE Wald ist Bestandteil des forstlichen Umweltmonitorings und beschäftigt sich u. a. mit Fragen zur aktuellen Kohlenstoffspeicherung und zu Änderungen des Kohlenstoffvorrats in Waldböden. Sie dient wie die BZE LW auch der Treibhausgas-Emissionsberichterstattung. Für die Bodenzustandserhebung Wald liegen Messergebnisse aus zwei Inventuren der Zeiträume 1987 bis 1993 (BZE I) und 2006 bis 2008 (BZE II) vor. Die dritte BZE ist im März 2022 gestartet.

BonaRes – Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie

Es handelt sich um ein Förderprogramm, in dem zehn interdisziplinäre Projektverbände die Möglichkeit zur Optimierung von Bodenfunktionen und der Bewirtschaftung von Böden erforschen. Ebenso werden klimabedingte Veränderungen von Bodeneigenschaften erfasst sowie Daten für die Bodenforschung gesammelt und dokumentiert (z. B. Modellierung von Bodenfunktionen/-prozessen). Das BonaRes-Zentrum unterstützt eine bessere Vernetzung der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche.

DFG-Forschungsgruppe Cosmic Sense

Diese Forschung wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (unter dem Projektnamen „Large-Scale and High-Resolution Mapping of Soil Moisture on Field and Catchment Scales – Boosted by Cosmic-Ray Neutrons“). Ziel der Forschung ist die Entwicklung von speziellen Neutronendetektoren und das tiefere Verständnis von Bodenhydrologie und Neutronentransport, um daraus die Bodenfeuchte ableiten zu können.

Dürremonitor des UFZ

Der UFZ-Dürremonitor liefert täglich flächendeckende Informationen zum Bodenfeuchtezustand in Deutschland. Grundlage sind Simulationen mit dem am UFZ entwickelten mesoskaligen hydrologischen Modell mHM³⁰.

Exploratorien zur funktionellen Biodiversitätsforschung

Mit eigenen Klimastationen in drei Langzeituntersuchungsgebieten, einem Messintervall von drei Jahren und der Erfassung von bodenbiologischen Zielgrößen besitzen die Biodiversitäts-Exploratorien ein hohes Eignungspotenzial für die Beobachtung von Änderungen des Bodenkohlenstoffs auf Grünland- und Forststandorten sowie für Bodenmikrobiologie.

³⁰ <https://www.ufz.de/mhm>; <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>.

Integriertes Monitoring in der Agrarlandschaft - Erfassung der ökologischen Auswirkungen des chemischen Pflanzenschutzes (FuE UBA)

Ziel des 2021 abgeschlossenen Projekts war es, zukünftig die Wirksamkeit der Regulierung von Pflanzenschutzmitteln in der Agrarlandschaft kontrollieren zu können. Vorgestellt wird das Konzept eines neuen, integrierten Monitoringansatzes, auf dessen Grundlage die ökologischen Auswirkungen des PSM-Einsatzes in der Agrarlandschaft Deutschlands untersucht und bewertet werden sollen.

Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche (DFV)

Die DFV werden von diversen Einrichtungen (Universitäten, Landes-/Bundesanstalten, Verbänden etc.) betrieben. In der Summe gibt es 205 DFV (davon 168 Ackerbauversuche). Die ältesten Versuche (56 über 50-jährig) können Klimawirkungen abbilden. Sie sind u. a. Forschungsbasis für die Untersuchung von Langzeit-Umwelteffekten auf das System Boden-Pflanze und zur Aufklärung des Kohlenstoffkreislaufs verschiedener Bodennutzungssysteme in Boden-Klima-Regionen Deutschlands. Eine Zusammenstellung findet derzeit im Rahmen des Projektverbunds BonaRes statt.

Nationales Biodiversitätsmonitoring in Agrarlandschaften (FuE Thünen-Institut)

Ziel ist es, eine national umfassende Datengrundlage zu schaffen, um den Zustand und die Entwicklung der Biodiversität in Agrarlandschaften differenzierter erfassen und bewerten zu können. Im Jahr 2019 startete das Monitoring mit Machbarkeitsstudien zur Entwicklung innovativer Indikatorensysteme und einer Methodenentwicklung für die drei Teilbereiche: bundesweites generelles Trendmonitoring, vertieftes Monitoring zu agrarräumlichen und regionalen Fragestellungen und Citizen-Science basiertes Monitoring. Das Trendmonitoring soll auf nationaler Ebene stattfinden und ist für einen längeren Zeitraum (> 20 Jahre) angedacht.

Nationale Forschungsdaten Infrastruktur NFDI (DFG)

Ziel ist der Aufbau einer flexiblen, interoperablen und skalierbaren Forschungsdateninfrastruktur durch Vernetzung bestehender fachspezifischer Infrastrukturen unter Berücksichtigung der Research Data Commons. Zu NFDI gehören 26 Konsortien und der Verbund von Konsortien, Base4NFDI. Diese wurden in einem wissenschaftsgeleiteten Verfahren ausgewählt, welches die Deutsche Forschungsgemeinschaft steuert. Die NFDI-Konsortien sind in drei Förderrunden an den Start gegangen. Die erste Runde wird seit Oktober 2021 gefördert, die zweite Runde seit Oktober 2022 und die dritte Runde seit März 2023. Einen Bezug zum Boden haben potenziell die Konsortien FAIRagro – FAIRe Dateninfrastruktur für die Agrosystemforschung, NFDI4Biodiversity: Biodiversität, Ökologie und Umweltdaten sowie NFDI4Earth: NFDI-Konsortium für Erdsystemforschung.

Bodenfeuchte-Netzwerk und -Datenbank

Die Bodenfeuchte wird im DWD nicht nur modelliert, sondern durch die Abteilung Agrarmeteorologie an mehreren Standorten regelmäßig erhoben und zur Modellkalibrierung und -validierung eingesetzt. Über die InKA (Interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie) ist der DWD eng mit dem Thünen-Institut (TI) und dem Julius-Kühn-Institut (JKI) im Geschäftsbereich des BMEL verzahnt.

Nationales Monitoring-Zentrum zur Biodiversität

Ziel ist es, Biodiversitätsveränderungen mit verlässlicher Sicherheit feststellen, kausal verstehen und daraus Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Das im BfN Leipzig angesiedelte Zentrum versteht sich als ein nationales Beobachtungssystem, das Aussagen über den Zustand der Biodiversität in ganz Deutschland zur Verfügung stellt.

Ökosystem-Monitoring auf bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen (FuE BfN)

Ziel des 2020 abgeschlossenen Projekts war die wiederholte, systematische und flächendeckende Erfassung der Biotop- und Nutzungstypen, Informationen zu Zustand und Veränderungen der

Ökosysteme der Gesamtlandschaft in Deutschland, Darstellung und Quantifizierung des Landnutzungswandels, Intensivierung der Landwirtschaft, Nutzungsdruck und Strukturvielfalt.

TERENO (Terrestrial Environmental Observatories), Teilprojekt SoilCan

TERENO ist ein interdisziplinäres und langfristiges Forschungsprogramm. Die vier Observatorien liefern Messdaten, mit denen Fragen der Klima- und Umweltforschung aufgegriffen und beantwortet werden können, z. B. der Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf verschiedene Ökosysteme (Acker-, Grünland- und Waldstandorte). Das Teilprojekt TERENO SoilCan (Soil can make a difference in climate policy) umfasst ein Lysimeter-Netzwerk, in dem Langzeitfolgen des Klimawandels auf die Stoff- und Wasserflüsse im Boden und Grundwasser untersucht werden.

Geplante bzw. in Diskussion befindliche Aktivitäten:

TerraNet (BMBF)

Ziel ist der Auf- und Ausbau eines räumlich verteilten Echtzeit Beobachtungs- und Vorhersagesystems, basierend auf stationären und mobilen Beobachtungssensoren sowie Fernerkundungsverfahren. Das geplante Messnetzwerk soll bestehende Messprogramme und Beobachtungsplattformen zusammenführen (u. a. TERENO³¹, ICOS³², MOSES³³, Messnetz der Bundesländer) und weiter ausbauen, sodass letztendlich ein „Netzwerk der Netzwerke“ entsteht. Der Fokus liegt auf der Ableitung von Indikatoren, kontinuierlichen Folgeabschätzungen und Vorhersagen für land- und forstwirtschaftliche sowie naturnahe Räume in städtischen Gebieten. Der Boden soll dabei messtechnisch mehr in den Vordergrund gerückt werden.

EU, Schweiz:

Laufende Aktivitäten

International Co-Operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests Level I and II)

Im Schwerpunkt gibt Level I einen Überblick über die räumliche und zeitliche Variation des Kronenzustands europäischer Waldbäume sowie des Bodenzustands. Level II hingegen ermöglicht einen tieferen Einblick in die Interaktionen zwischen den verschiedenen Komponenten des Ökosystems Wald durch eine Kombination von Messungen, u. a. Boden inklusive Bodenwasserhaushalt.

Integrated Carbon Observation System – Deutschland (ICOS-D)

Es handelt sich um ein Netzwerk auf europäischer Ebene, welches eine für Europa einheitliche, kontinuierliche und standardisierte Messung von Treibhausgasen garantiert. Es baut auf den interdisziplinären Ansätzen vorheriger europäischer Projekte wie CarboEurope-IP oder CarboOcean-IP auf. Seit dem Jahr 2015 besitzt ICOS den offiziellen Status eines „European Research Infrastructure Consortium“ (ERIC).

Land Use and Cover Area Frame Survey (LUCAS Soil)

LUCAS Soil ist ein EU-weites Projekt, in dem basierend auf einem regelmäßigen 2 x 2 km-Raster über den gesamten Kontinent verteilt an rund 270.000 Standorten Proben entnommen und untersucht werden. Die Daten bilden die Grundlage für europaweit vergleichbare Boden- und Landnutzungsstatistiken, u. a. für die Ernteschätzung. Im Projekt werden auch terrestrische Daten zur landwirtschaftlichen Nutzung erhoben. Ziel von LUCAS ist eine routinemäßige Umweltberichterstattung in der EU im landwirtschaftlichen Sektor. Anlass war die europaweit unzu-

³¹ <https://www.tereno.net/>.

³² <https://www.icos-cp.eu/>.

³³ <https://www.ufz.de/moses/>.

reichende Datenlage (einige Mitgliedstaaten haben kein Bodenmonitoring) und die mangelnde Verfügbarkeit bzw. Vergleichbarkeit der Daten aus Sicht der EU. Bisherige Kampagnen liefen in den Jahren 2009, 2015, 2018 und 2022.

Nationales Kompetenzzentrum Boden KOBO der Schweiz

Ziele des KOBO sind Vereinheitlichung und Weiterentwicklung von Erhebungs- und Analysemethoden von Bodeneigenschaften sowie das Festlegen von technischen Standards für die Bodenkartierung. Damit werden einheitliche Vollzugsgrundlagen für die Kantone geschaffen. Zudem dient das KOBO als nationale Informations- und Serviceplattform und stellt Methoden für nutzerspezifische Auswertungen von Bodeninformationen und Entscheidungsgrundlagen zur Verfügung.

Projekt Copernicus „Surface Soil Moisture“

Hier erfolgt der Einsatz von Satellitenradarsensoren zur Beobachtung lokaler Niederschlagsauswirkungen auf die Bodenbedingungen. Die Erhebung der Daten erfolgt in einer 1 km-Auflösung. Die Ableitung wird mit den Algorithmen der Technischen Universität Wien vorgenommen.

B.8 Anlage B: Für den Fragenkatalog des Nationalen Bodenmonitoring-Netzwerks berücksichtigte Quellen

Strategien, Rechtsgrundlagen, Berichtsprozesse

- ▶ EU Mission Board for Soil health and food. Caring for soil is caring for life – Ensure 75 % of soils are healthy by 2030 for food, people, nature, and climate. 2020
- ▶ EU-Bodenstrategie für 2030, 2021
- ▶ Soil Monitoring in Europe. Indicators and Thresholds for Soil Quality Assessments“. Report. EEA Report. European Environment Agency, 2023
- ▶ Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)
- ▶ Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)
- ▶ Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz des BMUV, Entwurf 2022
- ▶ Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2020
- ▶ Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) mit dem DAS-Monitoringbericht (2019/2023), der Klimawirkungs- und Risikoanalyse und dem Aktionsplan Anpassung
- ▶ Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050
- ▶ Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS)
- ▶ 5. Bodenschutzbericht der Bundesregierung 2021

- ▶ Umweltmonitor des Umweltbundesamtes, Fläche & Landökosysteme, Landwirtschaft Daten zur Umwelt – Umweltmonitor 2020³⁴
- ▶ Umweltziele im Alpenraum und Ansätze zu einem Monitoring durch Indikatoren – Abschlussbericht der Arbeitsgruppe „Bergspezifische Umweltqualitätsziele“ der Alpenkonvention von 2002³⁵
- ▶ Waldstrategie 2050 des BMEL
- ▶ Nationale Moorschutzstrategie des BMUV, 2022

Projekte, Literatur, Positionspapiere, behördeninterne Dokumente

- ▶ Berichte des European Soil Observatory/„Soil Health Dashboard“
- ▶ Bodendaten in Deutschland (UBA-Texte 52/2020)
- ▶ Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds – Bodenbiologie/Organische Bodensubstanz (UBA-Texte 41/2020)
- ▶ Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds – Bodenwasserhaushalt/Bodenerosion (UBA-Texte 67/2022)
- ▶ Kunststoffe in Böden (UBA-Texte 128/2021)
- ▶ Moorbodenmonitoring MoMoK des Thünen-Instituts (Thünen: Moorbodenmonitoring (MoMoK), thuenen.de)
- ▶ Moorschutz in Deutschland – Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen (BfN-Skripten 462)³⁶
- ▶ Plastik und andere persistente „neue“ Stoffe im Boden – Position der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU)
- ▶ UBA FuE-Projekt „Flächenverbrauch und Freiflächenverlust im Jahr 2030 – Quantitative Abschätzung von Änderungen in der Flächennutzung“ (in Bearbeitung)
- ▶ UBA FuE-Projekt „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“ (in Bearbeitung)
- ▶ Erarbeitung einer bundesweiten, länderübergreifenden kleinmaßstäbigen Bodenfunktionsbewertung (Vortrag in LABO-BOVA 2/2023 von O. Düwel, E. Hangen, H. Helbig, A. Markert, W. Martin, K. Marx, D. Pflanz, H.P. Schrey, B. Siemer, R. Stadtmann, C. F. Stange, S. Werner)
- ▶ Vorlage von UBA, BfN und TI im Rahmen des Behördenaustauschs zum Zieleprozess zur DAS: Cluster Land, Themenfeld Boden (3/2023)

³⁴ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/daten-zur-umwelt_umweltmonitor-2020_webfassung_bf.pdf.

³⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2349.pdf>; <https://www.alpconv.org>.

³⁶ https://www.moorschutz-deutschland.de/fileadmin/moorschutz/projekt/BfN-Skript_462_Moorschutz_internet.pdf.

Noch nicht berücksichtigt:

- ▶ Ausführungen des UBA-FG II 2.6 (Altlasten)
- ▶ Nationale Wasserstrategie, März 2023

B.9 Anlage C: Informationen zu etablierten Fragen und Bearbeitungskonzepte für neue Fragestellungen des Bodenmonitoring-Netzwerks

Struktureller Entwurf mit Beispielen. Noch nicht vollständig ausgeführt.

B.9.1 Bodenwasserhaushalt

Etablierte Fragen:

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
Wie entwickeln sich die Bodenwasservorräte unter typischen landwirtschaftlichen Kulturen während der Vegetationsperiode (seit 1970) unter dem Einfluss des Klimawandels?	DAS-Indikator BO-I-1 Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel Der Indikator zeigt die langjährigen Flächenmittel des Versorgungsgrades des Bodens mit Wasser in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK) für Wintergetreide in den Monaten Mai und Juli sowie für Zuckerrübe in den Monaten Juli und September. Die Werte basieren auf dem Modell AMBAV. 4 Regionen, 0-60 cm Tiefe. Daten: Niederschlagsdaten des DWD, AMBAV2.0-Modell, 1 x 1 km-Raster mit Einheiten der BÜK1.000, jährliches Intervall (Eichung des Modells mit Lysimetermessungen und Bodenfeuchtemessungen der ZAMF und Messungen der Bodenfeuchte an vier agrarmeteorologischen Außenstellen des DWD)
Wie verändert sich die Gefahr von Trockenstress in Wäldern unter dem Einfluss des Klimawandels?	DAS-Indikator BO-I-2 (unveröff.) Bodenwasser in Waldböden Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel Der Indikator stellt die durchschnittliche Anzahl von Tagen im Jahr dar, an denen der Wassergehalt von 40 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) im Waldboden (bis 80 cm Bodentiefe) unterschritten wird und damit eine mittlere bis hohe Trockenstressgefahr besteht. Ergänzend wird die Anzahl von Tagen im Jahr abgebildet, an denen der Wassergehalt von 20 % der nFK im Waldboden unterschreitet und damit eine sehr hohe oder extreme Trockenstressgefahr besteht. Daten: Wassergehalte (TDR Sonden), umgerechnet in nFK in 0-80 cm Tiefe an fünf Level II-Messstellen in Bayern (Fallstudie)

Neue Fragestellungen:

Wie verändern sich die **Bodenfeuchte** sowie die **Quantität des Sickerwassers** in Waldböden, landwirtschaftlich genutzten Böden und Mooren bundesweit unter dem Einfluss des Klimawandels, verschiedener Nutzungen und Bewirtschaftungsformen sowie verschiedener Standortbedingungen? Lassen sich unterschiedliche Entwicklungen in verschiedenen Regionen oder Jahreszeiten beobachten? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?

	Bearbeitungskonzept
<p>Informationsbedarf Berücksichtigung welcher Bodengefährdungen? ... welcher Landnutzungsformen? ... welcher Standortfaktoren? ... welcher Treiber/Einflussfaktoren? ... welcher Handlungsmöglichkeiten/Maßnahmen? ... welchen räumlichen Bezugs? ... welches zeitlichen Rahmens?</p>	<p><u>Forschungsfragen (Beispiele):</u> - Wie verändert sich die Bodenfeuchte in landwirtschaftlich genutzten Böden unter dem Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsformen wie konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung? - Wie verändert sich die Sickerwassermenge unter dem Einfluss des Klimawandels an anthropogen unbeeinflussten Standorten in verschiedenen Regionen?</p> <p><u>Zu untersuchende Hypothesen (Beispiele):</u> - Die Bodenfeuchte unter konservierender Bodenbearbeitung verändert sich in geringerem Maß als unter konventioneller Bodenbearbeitung. - Die jährliche Sickerwassermenge nimmt in bestimmten Regionen unter dem Einfluss des Klimawandels ab.</p> <p><u>Bezug zu Umweltzielen:</u> - Standortangepasste Landnutzung - Klimaschutz und Anpassung an Klimawandelfolgen</p>
<p>Verantwortlich: (vgl. Fragenkatalog)</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk Koordination: Nationales Bodenmonitoringzentrum in Kooperation mit TI (Vorschlag)</p>
<p>Mögliche Kooperationspartner:</p>	<p>Betreiber der Intensiv-Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in den Ländern, insbesondere BW, NI und RP; Thünen-Institute für Waldökosysteme und für Agrarklimaschutz; Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung; Betreiber der Landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche (DFV) mit Bodenfeuchte-Messung; Forschungszentrum Jülich; DWD; ESDAC-JRC</p>
<p>Mögliche Herangehensweise, Datengrundlagen und Auswertungsmethoden: Geeignete Ziel- und Begleitgrößen Geeignete Messprogramme Auswertungsansatz, -methoden</p>	<p>a) Zielgrößen: Bodenfeuchte (Bodenwassergehalt, Wasserspannung), Sickerwasserrate (UBA-Texte 41/2020), Permanenter Welkepunkt im Oberboden (Intensiv-BDF-Programm in Sachsen³⁷); Begleitgrößen siehe UBA-Texte 41/2020; Grundwasserstand in Mooren und organischen Böden b) Bodenfeuchte: Intensiv-BDF in NI, RP, BW unter Forst, Acker, Grünland, ICOS-D Standorte unter Forst, Acker, Grünland und Biodiversitäts-Exploratorien (Eignung im Detail zu prüfen; Messung Bodenfeuchte ist im Versuchsdesign ein Begleitparameter). Ergänzend dazu DFV zum Thema Bodenfeuchte. Sickerwasserrate: TERENO-Feldlysimeter, DFV zu Sickerwasserrate, ggf. Ergänzung mit NRW-Nitrat-Monitoring. c) Auswahl geeigneter Messstandorte (Erfassung Ziel- und Begleitgrößen) und messnetzübergreifende Auswertung, z. B. mit Zeitreihenanalysen der Bodenfeuchte sowie der Sickerwasserrate unter Berücksichtigung von Landnutzungs- und Bewirtschaftungseinflüssen, Bodeneigenschaften (Standort) und Klimafaktoren</p>
<p>Sachstand Indikatoren, Bewertungssystem und Referenzwerte</p>	<p>Indikatoren und Bewertungssysteme sind bisher nur begrenzt vorhanden (siehe etablierte Fragen), Referenzwerte fehlen</p>

³⁷ Der PWP der BDF-Standorte wird an Stechzylinderproben im Labor ermittelt und anhand der Messdaten von den Boden-Dauerbeobachtungsflächen, den DWD Bodenfeuchte-Messstationen und der Lysimeterstation Brandis ausgewertet (vgl. UBA-Texte 41/2020).

	Bearbeitungskonzept
Einschränkungen/Hindernisse	Lücken im Messnetz für landwirtschaftliche Nutzungen (Acker, Grünland) Defizite in der Dokumentation der Bewirtschaftung an Messstandorten

B.9.2 Bodenwärmehaushalt

Etablierte Frage:

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
Wie verändert sich die Temperatur im Oberboden unter Einfluss des Klimawandels?	DAS-Indikator BO-I-4 (unveröff.) Temperatur im Oberboden Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel Teil A: Mittlere Anzahl der Tage mit einer mittleren Temperatur von über 5 °C in 10 cm Tiefe für 15 ausgewählte Stationen Teil B: Mittlere Anzahl der Tage mit einer mittleren Temperatur von über 5 °C in 10 cm Tiefe in den Perioden 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020 für 15 ausgewählte Stationen Daten: Temperatur-Messwerte des DWD (agrarmeteorologisches Messnetz für 15 über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland verteilte DWD-Stationen, jährlich)

B.9.3 Bodenstoffhaushalt - Kohlenstoff

Etablierte Fragen:

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
Wie verändern sich Humusgehalte von landwirtschaftlich genutzten Böden als wesentlicher Faktor für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wirkungen des Klimawandels?	DAS-Indikator BO-R-1 Humusgehalte von Ackerböden Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel Teil A: Humusgehalt (organischer Kohlenstoff C_{org}) im Oberboden von ackerbaulich genutzten Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern (BDF) Teil B: Gehalt von Gesamtstickstoff (Nt) im Oberboden von ackerbaulich genutzten Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern Daten: Messdaten der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) von 91 Acker-BDF in Bayern
Wie verändern sich Humusvorräte von Waldböden als wesentlicher Faktor für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wirkungen des Klimawandels?	DAS-Indikator FW-R-3 Humusvorrat in forstlichen Böden Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel Im Waldboden gespeicherter organischer Kohlenstoff bis in 30 cm Tiefe Organische Böden sowie stark anthropogen veränderte Böden werden nicht in die Auswertung einbezogen. Daten: Modellierte Daten auf Grundlage der ersten und zweiten Bodenzustandserhebung (BZE) im Wald (1987-1993, 2006-2009)
Wie tragen Mineralböden und organische Böden aller Landnutzungsformen heute und in Zukunft zu den nationalen Treibhausgasemissionen bei?	Ermittlung der flächendeckend repräsentativen durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in Mineralböden, in Abhängigkeit von der Landnutzung sowie Modellierungen von Kohlenstoff- und Lachgas-Emissionen Berichterstattung nach UN-Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll Daten: Bundeswald- und Zwischeninventuren, Datenspeicher Waldfonds und Einschlagsrückrechnung, erste und zweite Bodenzustandserhebung (BZE) Wald (1987-1993, 2006-2009) und erste BZE Landwirtschaft (2011-2018), Annahmen für Siedlungsböden, Schätzwerte der BÜK1.000

Neue Fragestellungen:

Wie verändern sich der **Vorrat und die Qualität des organischen Bodenkohlenstoffs** in Waldböden, landwirtschaftlich genutzten Böden und Mooren bundesweit unter dem Einfluss des Klimawandels, verschiedener Nutzungen und Bewirtschaftungsformen sowie verschiedener Standortbedingungen und bodenbiologischer Faktoren? Lassen sich unterschiedliche Entwicklungen in verschiedenen Regionen beobachten? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?

	Bearbeitungskonzept
<p>Informationsbedarf</p> <p>Berücksichtigung ...</p> <p>... welcher Bodengefährdungen?</p> <p>... welcher Landnutzungsformen?</p> <p>... welcher Standortfaktoren?</p> <p>... welcher Treiber/Einflussfaktoren?</p> <p>... welcher Handlungsmöglichkeiten/Maßnahmen?</p> <p>... welchen räumlichen Bezugs?</p> <p>welches zeitlichen Rahmens?</p>	<p><u>Forschungsfragen (Beispiele):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Wie verändert sich der Vorrat des organischen Bodenkohlenstoffs (SOC) von landwirtschaftlich genutzten Böden bundesweit unter Einfluss des Klimawandels? - Wie verändert sich die Qualität des SOC von landwirtschaftlich genutzten Böden bundesweit unter dem Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsformen bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung? <p><u>Zu untersuchende Hypothesen (Beispiele):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Unter dem Einfluss des Klimawandels findet in Ackerböden eine Abnahme des Humusvorrats und eine daraus resultierende Freisetzung des SOC statt. - Unter dem Einfluss konservierender Bodenbearbeitung nimmt die Qualität des SOC zu. - Bodenfeuchte und bodenbiologische Faktoren haben einen nachweisbaren Einfluss auf die Entwicklung des SOC (Gehalt, Vorrat, Qualität). <p><u>Bezug zu Umweltzielen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Nachhaltige Sicherung der Funktionen des Bodens - Standortangepasste Landnutzung - Klimaschutz und Anpassung an Klimawandelfolgen
<p>Verantwortlich:</p> <p>(vgl. Fragenkatalog)</p>	<p>Bodenmonitoring-Netzwerk</p> <p>Koordination: Nationales Bodenmonitoringzentrum in Kooperation mit TI (Vorschlag)</p>
<p>Mögliche Kooperationspartner:</p>	<p>Betreiber der Boden-Dauerbeobachtungsflächen in den Ländern (z. T. auch in folgender Einzelaufstellung enthalten); Thünen-Institut (TI-WO, TI-AK); LUBW; LANUV NRW; LfL BY; UFZ, HU Berlin, LUFA Speyer, TLLR; Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung; ESDAC-JRC</p>
<p>Datengrundlagen und Auswertungsmethoden:</p> <p>a) Geeignete Ziel- und Begleitgrößen</p> <p>b) Geeignete Messprogramme</p> <p>c) Auswertungsansatz, -methoden</p>	<p>a) Zielgrößen: Gesamtkohlenstoffgehalt, Gehalt des SOC, Vorrat des SOC, Gesamtstickstoffgehalt, Qualität des SOC (Fraktionen, C/N-Verhältnis); Begleitgrößen s. UBA-Texte 67/2022</p> <p>b) Boden-Dauerbeobachtung (mit Erfassung des SOC-Vorrats), ICP Forests Level II, Exploratorien zur funktionellen Biodiversitätsforschung, Biologisches Messnetz LUBW, Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche (Berlin-Dahlem, Bad-Lauchstädt, Speyer, Bad Salzungen, Thyrow), Humusmonitoring NRW, Humusmonitoring Bayern, ICOS-D, BZE Wald, BZE Landwirtschaft, LUCAS Soil (fett = besonders geeignet); zukünftig: Moormonitoring unter Wald und Offenland</p> <p>c) Auswahl geeigneter Messstandorte (Erfassung Ziel- und Begleitgrößen) und messnetzübergreifende Auswertung, z. B. Zeitreihenanalysen zum SOC-Gehalt und -Vorrat sowie Verteilung von Fraktionen des SOC unter Berücksichtigung von Landnutzungs- und Bewirtschaftungseinflüssen, Bodeneigenschaften und Klimafaktoren</p>

	Bearbeitungskonzept
Sachstand Indikatoren, Bewertungssystem und Referenzwerte	Eine Indikatorenentwicklung findet 2023-24 statt im FuE-Projekt „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0. Bewertungssystem fehlt, Referenzwerte fehlen (z. B. standorttypische Humusgehalte)
Einschränkungen/Hindernisse	Qualität der Dokumentation von Ziel- und Begleitgrößen, Erfassung von SOC-Vorräten, Anpassung und Vereinheitlichung von Probenahmehäufigkeit, -zeitpunkt, Beprobungstiefe, Erhöhung der Flächenrepräsentativität; Lücken im Messnetz bei Zielgrößen für SOC-Qualität

B.9.4 Bodenstoffhaushalt – Nährstoffe, Versauerung und Schadstoffe, Eutrophierung

Etablierte Fragen:

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
Wie entwickelt sich der Flächenanteil empfindlicher Land-Ökosysteme mit Überschreitung der Belastungsgrenzen der Eutrophierung ?	UBA-Umweltindikator Eutrophierung durch Stickstoff Ansatz und Datengrundlagen noch auszuführen
Wie verändert sich der Stickstoff-Überschuss (die Stickstoff-Gesamtbilanz) landwirtschaftlicher Flächen?	UBA-Umweltindikator Eutrophierung durch Stickstoff Ansatz und Datengrundlagen noch auszuführen

Neue Fragestellungen:

nach Abstimmung des Fragenkatalogs auszuführen

B.9.5 Bodenstruktur

Etablierte Fragen:

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
Wie entwickelt sich das potenzielle Erosionsrisiko durch erosive Niederschlagsereignisse unter dem Einfluss des Klimawandels (Regenerosität; ohne Berücksichtigung von Auswirkungen durch Bodenbewirtschaftung)?	DAS-Indikator BO-I-3 Regenerosität ³⁸ Monitoring zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel Indikator I: Teil A: Bundesdeutscher Mittelwert der jährlichen Regenerosität (R-Faktor der ABAG) aus RADKLIM (ab 2001), Teil B: Bundesdeutscher Mittelwert der jährlichen Regenerosität (R-Faktor der ABAG) aus Ombrometermessungen (bis 2016). Hinweis: Teil B wird nach 2016 nicht mehr fortgeführt. Teil C: Gleitendes 5-Jahresmittel des bundesdeutschen Mittelwerts der jährlichen Regenerosität. Indikator II (Karte): Regenerositätsfaktor deutscher Kreise im Mittel der Jahre 2017 bis 2021 Daten: DWD-RADKLIM (gemessen und modelliert)
Wie verändert sich die Fläche,	Indikator SDG_15_50 Bodenerosion durch Wasser ³⁹

³⁸ Indikator-Factsheet zum DAS-Indikator BO-I-3 Regenerosität (Entwurf Jan23).

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
die potenziell von starker Bodenerosion durch Wasser (> 10 Tonnen pro Hektar und Jahr Bodenverlust) betroffen ist?	SDG-Monitoring-Indikatoren für Nachhaltige Entwicklung Fläche (Acker und Grünland) mit Erosionsrisiko Bodenverlust > 10 t/ha*a angegeben in Quadratkilometern und als Prozentsatz der gesamten landwirtschaftlich genutzten, erodierbaren Fläche im Land Daten: modellierte Daten auf Basis der Soil Erosion Database des JRC

Neue Fragestellungen:

Nach Abstimmung des Fragenkatalogs teilweise noch auszuführen.

B.9.6 Bodenbiodiversität

Neue Fragestellungen:

In welchem Maß verändern sich die **Bodenbiodiversität** und ihre Leistungen bundesweit unter dem Einfluss des Klimawandels, verschiedener Nutzungs- und Bewirtschaftungsformen sowie verschiedener Standortbedingungen? Lassen sich unterschiedliche Entwicklungen in verschiedenen Regionen oder Jahreszeiten beobachten? Wie wirken sich Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aus?

	Bearbeitungskonzept
<p>Informationsbedarf</p> <p>Berücksichtigung ...</p> <p>... welcher Bodengefährdungen?</p> <p>... welcher Landnutzungsformen?</p> <p>... welcher Standortfaktoren?</p> <p>... welcher Treiber/Einflussfaktoren?</p> <p>... welcher Handlungsmöglichkeiten/Maßnahmen?</p> <p>... welchen räumlichen Bezugs?</p> <p>... welches zeitlichen Rahmens?</p>	<p><u>Forschungsfragen (Beispiele):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Wie verändert sich die Biomasse tiefgrabender Regenwürmer unter dem Einfluss des Klimawandels? Wie unter verschiedenen Bewirtschaftungsformen? - Wie entwickelt sich die Bodenbiodiversität in Waldböden? <p><u>Zu untersuchende Hypothesen (Beispiele):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Unter dem Einfluss des Klimawandels findet in Deutschland unter allen Landnutzungsformen ein Verlust der Biodiversität der Bodenlebensgemeinschaft statt. - Die aufgrund des Klimawandels veränderte Bodenfeuchte und organische Bodensubstanz haben einen nachweisbaren Einfluss auf die Zusammensetzung der (mikro-)biologischen Lebensgemeinschaften. <p><u>Bezug zu Umweltzielen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Nachhaltige Sicherung der Funktionen des Bodens - Anpassung an Klimawandelfolgen - Erhalt der Biodiversität
Verantwortlich: (vgl. Fragenkatalog)	Bodenmonitoring-Netzwerk Koordination: Nationales Bodenmonitoringzentrum in Kooperation mit NMZB (Vorschlag)
Mögliche Kooperationspartner:	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung; LUBW; Betreiber von Boden-Dauerbeobachtungsflächen in den Ländern, z. B. BW, BY (LfL, LfU) und SH

³⁹ https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/sdg_15_50_esmsip2.htm, mehr Hintergrund zum Indikator: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_soil_erosion#Data_sources.

	Bearbeitungskonzept
<p>Mögliche Herangehensweise, Datengrundlagen und Auswertungsmethoden:</p> <p>a) Geeignete Ziel- und Begleitgrößen b) Geeignete Messprogramme c) Auswertungsansatz, -methoden</p>	<p>a) Zielgrößen für Zoologie und Bodenmikrobiologie: Individuenzahlen untersuchter Tiergruppen, Artenzahlen und -zusammensetzung, Biomasse der Lumbricidae, mikrobielle Biomasse, mikrobielle Funktionen, molekularbiologische Parameter; Begleitgrößen s. UBA-Texte 67/2022</p> <p>b) Biodiversitäts-Exploratorien: drei Regionen Deutschlands bodenmikrobielle Untersuchungen; BioMessnetz BW: Bodenzoologie in regionalen Naturräumen im Forst und Grünland; BDF verschiedener Länder, z. B. BW, BY, SH, s. UBA-Texte 67/2022</p> <p>c) Zeitreihenanalysen bzw. multivariate Analysen oder Korrelationsanalysen von Ziel- und Begleitgrößen und Standortcharakteristika unter Berücksichtigung der Autökologie (Zu- bzw. Abnahme klimasensibler Arten)</p>
<p>Sachstand Indikatoren, Bewertungssystem und Referenzwerte</p>	<p>Eine Indikatorentwicklung findet 2023-24 statt im FuE-Projekt „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“, FKZ 3722 74 201 0. Bewertungssystem fehlt, Referenzwerte fehlen. Aufbau und Etablierung eines bundesweiten Messnetzes zur Bodenbiodiversität (Maßnahme 6.5 im Aktionsprogramm natürlicher Klimaschutz): bis Ende 2023: Erstellung von Methodenstandards und Vorbereitung der Basiserhebung, Anfang 2024 bis Mitte 2025: Basiserhebung, Herbst 2025 bis Ende 2026: Beurteilung und Definition eines guten ökologischen Bodenzustands und Ableitung geeigneter Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen</p>
<p>Einschränkungen/Hindernisse</p>	<p>Mit bestehenden Programmen können nur regionale Aussagen innerhalb ausgewählter Landnutzungsformen getroffen werden. Lückenhafte Erkenntnisse zu klimasensiblen Arten.</p>

B.9.7 Landnutzung

Etablierte Fragen:

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
<p>Wie entwickelt sich die Siedlungs- und Verkehrsfläche?</p>	<p>UBA-Umweltindikator Siedlungs- und Verkehrsfläche DAS-Indikator RO-R-5 Siedlungs- und Verkehrsfläche DNS-Indikator 11.1.a Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche Ansatz und Datengrundlagen sind noch auszuführen.</p>
<p>Wie verändert sich die Gesamtfläche von Dauergrünland? Wie entwickelt sich der Anteil der Dauergrünlandfläche an der gesamten landwirtschaftlichen Fläche?</p>	<p>DAS-Indikator BO-R-2 Dauergrünlandfläche UBA-Umweltindikator Grünlandfläche Ansatz und Datengrundlagen sind noch auszuführen.</p>
<p>Wie entwickelt sich der Anteil des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlich genutzten Fläche?</p>	<p>UBA-Umweltindikator Ökologischer Landbau NBS-Indikator Ökologischer Landbau Ansatz und Datengrundlagen sind noch auszuführen.</p>

	Ansatz (Titel, System, Kurzbeschreibung, Datenquelle)
Wie verändern sich die Gesamtfläche der durch Agrarumweltmaßnahmen geförderten Flächen und die Höhe der dafür gewährten Finanzmittel?	NBS-Indikator Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen Ansatz und Datengrundlagen sind noch auszuführen.
Wie verändert sich der Anteil der Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert (High Nature Value Farmland) an der gesamten Landwirtschaftsfläche?	NBS-Indikator Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert Ansatz und Datengrundlagen sind noch auszuführen.
Wie verändert sich der Anteil der nach PEFC beziehungsweise FSC zertifizierten Waldflächen (nachhaltige Forstwirtschaft) an der gesamten Waldfläche?	NBS-Indikator Nachhaltige Forstwirtschaft Ansatz und Datengrundlagen noch auszuführen

Neue Fragestellungen:

nach Abstimmung des Fragenkatalogs auszuführen