

Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen

Impressum:

Bearbeitung: LABO-Redaktionsgruppe „Boden-Dauerbeobachtung“

Autoren:

Natalja Barth
Werner Borho
Eckhard Cordsen
Christian Heller
Heinrich Höper
Bernard Ludwig
Marc Marx
Henning Meesenburg
Peter Spörlein
Michael Weller

LABO Empfehlung:

Das Methodenhandbuch „Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ wurde von der Redaktionsgruppe „Bodendauerbeobachtung“ des ständigen Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) erarbeitet. Der Bericht wurde auf der 62. LABO-Sitzung am 13./14.09.2022 zur Kenntnis genommen und den Ländern bei Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen zur Berücksichtigung empfohlen.

Stand: Juni 2022

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	7
2 Ziele, Verfahren und Anwendungsbereiche der Boden-Dauerbeobachtung	9
3 Standortauswahl	12
4 Grundsätze zu Einrichtung, Betrieb und Qualitätssicherung	13
4.1 Grundsätze zur Einrichtung von BDF	13
4.2 Betriebliche Grundsätze	14
4.2.1 Untersuchungsparameter	14
4.2.2 Untersuchungssturnus	14
4.2.3 Datendokumentation	15
4.3 Qualitätssicherung	15
5 Standortaufnahme und Erfassung der Bewirtschaftung	15
6 Bodenuntersuchungen (Feststoff)	17
6.1 Planung und Durchführung von Bodenprobenahmen	17
6.1.1 Probenahmen an Schürfgruben	17
6.1.1.1 Entnahme gestörter Bodenproben an Schürfgruben.....	18
6.1.1.2 Entnahme ungestörter Bodenproben an Schürfgruben	18
6.1.2 Probenahmen an Kernflächen zur Entnahme von Einzelproben und zur Bildung von Mischproben	18
6.1.2.1 Horizontbezogene vs. tiefenstufenbezogene Beprobung	19
6.1.2.2 Probenahmedesign auf Kernflächen mit wiederkehrender Oberbodenbearbeitung	19
6.1.2.3 Probenahmedesign auf Kernflächen ohne wiederkehrende Oberbodenbearbeitung	20
6.1.2.4 Probenahme aus tieferen Bodenhorizonten	21
6.1.3 Homogenisierung und Fraktionierung im Gelände.....	22
6.2 Physikalische Untersuchungen der Bodenfestsubstanz	22
6.2.1 Bodenphysikalische Messparameter und Zielsetzung	22
6.2.2 Praktische Hinweise zu bodenphysikalischen Untersuchungen	28
6.2.3 Praktische Hinweise zur Herstellung des Volumenbezugs und zur Ermittlung von Stoffvorräten	28
6.2.4 Hinweise zur Qualitätssicherung bei bodenphysikalischen Untersuchungen	29
6.3 Chemische Untersuchungen der Bodenfestsubstanz	30
6.3.1 Probenmengen	30
6.3.2 Probenbehälter und Transport.....	30
6.3.3 Probenaufbereitung	30
6.3.4 Analysenumfang und Methoden.....	31
6.3.5 Hinweise zur Qualitätssicherung bei der bodenchemischen Analytik	31
6.3.6 Qualitätssicherung über Referenzierung anhand von Rückstellproben	43
7 Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt	43
7.1 Aufgaben der Bodenwasser-Messplätze.....	43
7.2 Grundsätze zum Aufbau der Messplätze für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts	43
7.3 Probenahme der Bodenlösung.....	44

7.3.1	Ziele der Bodenlösungsbeobachtung	45
7.3.2	Einrichtungen zur Gewinnung von Bodenlösung	45
7.3.3	Einbau von Saugsonden zur Bodenlösungsgewinnung	46
7.3.4	Anzahl von Wiederholungen und räumliche Anordnung	47
7.3.5	Sammelzeiträume und Probentransport.....	47
7.3.6	Probenlagerung, Vorbereitung und Parameterumfang	47
7.4	Beobachtung des oberflächennahen Grundwassers	48
8	Bodenbiologische Untersuchungen	50
8.1	Bodenmikrobiologie	50
8.1.1	Probennahme Mikrobiologie.....	50
8.1.2	Probenvorbehandlung und Probenlagerung Mikrobiologie	51
8.1.3	Analytik Mikrobiologie	51
8.1.4	Untersuchungsturnus Mikrobiologie	53
8.2	Bodenzoologische Untersuchungen.....	53
8.2.1	Probennahme und Extraktion	54
8.2.2	Probennahmezeitraum und Untersuchungsturnus.....	55
8.2.3	Weitere Tiergruppen für ergänzende Untersuchungen	55
9	Bodenprobenbank für Rückstellproben	59
10	Untersuchungen zu Stoffflüssen	60
10.1	Klima und Witterung	61
10.2	Atmosphärische Deposition.....	62
10.3	Düngung	67
10.3.1	Probennahme Mineraldünger	67
10.3.2	Probennahme Wirtschaftsdünger	67
10.3.3	Sekundärrohstoffdünger	68
10.3.4	Analytik	68
10.4	Pflanzenschutzmittel und Pflanzenbehandlungsmittel	68
10.5	Ernteentzüge	68
10.5.1	Probennahme Ackerfrüchte und Grünlandaufwuchs.....	70
10.5.2	Pflanzenproben Vorbehandlung	71
10.5.3	Analytik Pflanzen	71
10.5.4	Ernteentzüge im Wald	72
10.6	Bodenerosion.....	72
10.6.1	Anwendungsbereich im Rahmen der Bodendauerbeobachtung.....	72
10.6.2	Standörtliche Quantifizierung von Bodenerosion und -akkumulation.....	73
11	Vegetationsuntersuchungen	76
11.1	Methoden.....	77
11.2	Erfassung der Vegetation auf vegetationskundlichen Dauerflächen (VDF).....	77
11.2.1	Ackerstandorte.....	77
11.2.2	Grünlandstandorte und brachliegende Flächen des Offenlandes.....	78
11.2.3	Waldstandorte.....	78
11.3	Ermittlung des Gesamtarteninventars auf der BDF und pflanzensoziologische Zuordnung	78
11.4	Umlanderfassung	79

11.5	Aufnahmezeitpunkt.....	79
11.6	Untersuchungsturnus	79
12	Datenmanagement.....	81
12.1	Grundsätze der Datendokumentation	81
12.2	Art der Daten	82
12.3	Empfehlungen zur digitalen Datenhaltung	82
12.3.1	Datenbanken und Datenbankmanagementsysteme	82
12.3.2	Datenzusammenführung und Berichtspflichten des Bundes	83
12.3.3	Technische Spezifikationen.....	84
13	Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung	86
13.1	Einleitung.....	86
13.2	Statistische Verfahren	86
13.2.1	Deskriptive Statistik	86
13.2.2	Inferentielle Statistik	86
13.2.3	Explorative Statistik	87
13.2.4	Weitere Verfahren.....	87
13.2.5	Steckbriefe ausgewählter statistischer Verfahren	87
13.2.5.1	Tests auf Normalverteilung und Varianzhomogenität	87
13.2.5.2	Bedingungen für Regressionen, Varianzanalysen und den Einsatz gemischter Modelle	88
13.2.5.3	Bedingungen für Mittelwert- und Median-Vergleiche	88
13.2.5.4	Bedingungen für Korrelationsberechnungen	88
13.2.6	Möglichkeiten und Grenzen der beschriebenen statistischen Verfahren	89
13.3	"Statistische Signifikanz" und "praktische Relevanz"	90
13.4	Vorüberlegungen zur Auswertung in der Boden-Dauerbeobachtung	90
13.4.1	Planung.....	90
13.4.2	Plausibilitätsprüfung	90
13.4.3	Weitere Hilfestellungen.....	91
13.5	Weiterführende Datenauswertungen.....	92
13.5.1	Tiefenstufenbezogene Regressionen.....	92
13.5.2	Analysen zeitlich wiederholter Messungen	93
13.5.3	Grundsätze bei der Anpassung von statistischen Modellen	93
13.5.4	Gemischtes Modell bei hierarchischem Probennahmedesign	94
13.5.5	Zeitreihenanalysen (im statistisch strengen Sinne).....	94
13.5.6	Multivariate Ansätze	95
14	Literatur	96
14.1	Allgemeines Schriftenverzeichnis.....	96
14.2	Zitierte Normen.....	104
15	Anhang	109

Vorwort

Grundlage der Boden-Dauerbeobachtung war die „Konzeption zur Einrichtung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ der Sonderarbeitsgruppe Informationsgrundlagen Bodenschutz (SAG) aus dem Jahre 1991. Das Papier „Boden-Dauerbeobachtung, Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ (BARTH ET AL. 2000) wurde von der damaligen Ad-hoc-AG „Bodendauerbeobachtung“ im Rahmen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) erarbeitet. Es stellte eine Ergänzung und Aktualisierung des SAG-Papiers dar. Die LABO hatte die Arbeitshilfe zustimmend zur Kenntnis genommen und den Ländern bei der Einrichtung und dem Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen zur Berücksichtigung empfohlen.

Viele der in dieser Arbeitshilfe enthaltenen Festlegungen und Empfehlungen sind nicht mehr auf dem aktuellen Stand. Deshalb wurde auf der 27. Sitzung des ständigen Ausschusses "Vorsorgender Bodenschutz" (BOVA) der LABO im Juni 2018 beschlossen, eine Redaktionsgruppe zur Aktualisierung und Erweiterung des Papiers einzurichten. Ziel der Überarbeitung ist dabei ein maximales Maß an Kontinuität durch weitestgehende Aufrechterhaltung der bisherigen Methoden und sinnvolle Ergänzungen.

Der Fokus dieser Überarbeitung liegt auf der Angleichung der bisherigen Methoden an den Stand der Technik, der Neuaufnahme bzw. Ergänzung von geeigneten statistischen Auswertungsmethoden und von Ausführungen zur Bodenprobenbank für Rückstellproben.

Als Mitglieder der LABO-Redaktionsgruppe zur Aktualisierung der Arbeitshilfe „Boden-Dauerbeobachtung, Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ wirkten an der Erstellung des vorgelegten Papiers „Boden-Dauerbeobachtung – Einrichtung, Betrieb und Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ mit:

Autoren 2022

N. Barth	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
W. Borho	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
E. Cordsen	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
C. Heller	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
H. Höper	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen
B. Ludwig	Universität Kassel
M. Marx	Umweltbundesamt (Vorsitz 2022)
H. Meesenburg	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
P. Spörlein	Bayerisches Landesamt für Umwelt
M. Weller	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt

Autoren 2000

N. Barth	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
W. Brandtner	Thüringer Landesanstalt für Geologie (Vorsitz 2000)
E. Cordsen	Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
T. Dann	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
K.-H. Emmerich	Hessisches Landesamt für Bodenforschung
D. Feldhaus	Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt
B. Kleefisch	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung und Geologie
B. Schilling	Bayerisches Geologisches Landesamt
J. Utermann	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

DIN/ISO-Normen und gesetzliche Regelungen können verschiedene Fassungen haben. Soweit im Folgenden solche Ausführungen mit einer bestimmten Version genannt sind und aktuellere Varianten vorliegen, sollten i. d. R. diese herangezogen werden.

Die Ad-hoc-AG Boden-Dauerbeobachtung empfiehlt nachfolgende Vorgehensweisen bei der Einrichtung, dem Betrieb und der Auswertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen.

1 Einleitung

Die Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) gehören aufgrund ihrer langen Laufzeit seit Mitte der 80er Jahre inzwischen zu den am besten untersuchten Böden in Deutschland. Die zuständigen Behörden in den Bundesländern haben über Jahrzehnte hinweg den Zustand der Böden beobachtet, bewertet und Trends in der Entwicklung der Bodeneigenschaften sowie Stoffgehalte/-vorräte und deren Veränderungen abgebildet. Diese landesspezifischen Auswertungen wurden durch länderübergreifende Auswertungen durch den Bund komplettiert.

Dabei hat sich die Boden-Dauerbeobachtung in vielerlei Hinsicht als Erfolgsmodell erwiesen. Unter anderem belegen dies folgende Beispiele:

- **Beweissicherung:**
Die Boden-Dauerbeobachtungsfläche (BDF) Burghausen des bayerischen Landesamts für Umwelt trägt essentiell dazu bei, eine großflächige, Emittenten-bezogene PFOA/ADONA-Belastung zu monitoren. Die BDF hat dabei entscheidende, v. a. retrospektive Kenntnisse zum Konzentrationsverlauf durch die Analyse von gefrorenen Rückstellproben beigetragen (SPÖRLEIN & HANGEN 2009). Darüber hinaus dient sie zur Beobachtung der aktuellen Stoffverlagerung im Boden und liefert neue Erkenntnisse zum seit 2008 eingesetzten Ersatzstoff ADONA (LFU 2019).
- **Entwicklungstrends:**
 - In einem Forschungsprojekt wurden bundesweite organische Kohlenstoff (C_{org}) Daten der Boden-Dauerbeobachtung zusammengeführt, um den Einfluss des Klimawandels auf die C_{org} -Gehalte zu untersuchen. Die Auswertungen der Daten erbrachten den Nachweis, dass wesentliche C_{org} - bzw. Humus-Veränderungen durch das Humus-Ausgangsniveau der Flächen gesteuert werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Tonanteil im Boden, der Jahresniederschlag und die Jahresmitteltemperatur die Höhe der Humus-Gehalte erklären (MARX ET AL. 2016).
 - Die Daten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft wurden mit BDF-Daten ergänzt, um die zeitliche Entwicklung von C_{org} -Vorräten zu modellieren (JACOBS ET AL. 2018).
- **Werteableitungen:**
 - Basierend auf den Daten der Boden-Dauerbeobachtung wurde eine Methode für die Ableitung von standorttypischen Gehaltsspannen von organischem Kohlenstoff auf Ackerböden Deutschlands vorgeschlagen. Die Gehaltsspannen sollen § 17 BBodSchG (Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft) mit Werten untersetzen (MARX & GAUL 2021).
 - Die Daten der BDF flossen in die Ableitung von Hintergrundwerten für anorganische und organische Schadstoffe ein (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ, LABO 2017).

Auch aktuelle Fragestellungen werden durch die Boden-Dauerbeobachtung bearbeitet, wie z. B. die Erfassung des Klimawandels und dessen mögliche Auswirkungen auf unsere Böden durch Beteiligung am sog. Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund (KAUFMANN-BOLL ET AL. 2022).

Auf urbanen Boden-Dauerbeobachtungsflächen können „dauerhaft Veränderungen von Böden beobachtet werden [...], die durch eine Nutzung für Siedlung, Erholung, Gewerbe, Industrie und/oder Verkehr geprägt sind.“ (Kaufmann-Boll & Makowsky 2019). Urbane Böden sind gegenüber Böden im ländlichen Raum deutlich inhomogener in der Fläche und in der Tiefe. Der vorherrschende bodenbildende Faktor in urbanen Böden ist der Mensch. Die systematische Beobachtung urbaner Böden ist durch deren Heterogenität erschwert. Für solche Böden trifft das in dieser Arbeitsanleitung vorgelegte Konzept nur eingeschränkt zu und muss insbesondere für die Vorgehensweisen zur Standort- und Parameterauswahl sowie zu den Methoden angepasst werden. Es wird für die Zukunft empfohlen, die konzeptionelle und methodische Weiterentwicklung urbaner Boden-Dauerbeobachtung und ergänzender gebietsbezogener Ansätze fortzusetzen.

Inzwischen sind Fragen der Boden-Dauerbeobachtung auch in der europäischen und weltweiten Bodenschutzdiskussion nicht mehr wegzudenken. Im Europäischen Raum, teilweise begleitet von der Europäischen Umweltagentur (EEA) und dem Joint Research Institut (JRC) wird dem Bodenmonitoring eine wichtige Rolle im Bodenschutz zugedacht (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2021, EUROPEAN COMMISSION 2021).

Auf Grundlage dieser Aktivitäten und unterstützt durch die Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie wird das System der Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Deutschland in seiner Rolle als nationale Referenzflächen aufgewertet.

2 Ziele, Verfahren und Anwendungsbereiche der Boden-Dauerbeobachtung

Die Ziele der Boden-Dauerbeobachtung sind:

- die Beschreibung des aktuellen Zustandes,
- die langfristige Überwachung der Veränderungen und
- die Ableitung von Prognosen zur Entwicklung von Böden.

Zum Erreichen dieser Ziele werden Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) eingerichtet, auf denen die Verfahren der Merkmals- und der Prozessdokumentation eingesetzt werden.

Die Merkmalsdokumentation umfasst i. d. R. die Grundinventur und die periodischen, nicht kontinuierlichen Wiederholungsuntersuchungen des Bodens, der Bewirtschaftung sowie die Anlage einer Bodenprobenbank.

Die Prozessdokumentation setzt die Merkmalsdokumentation voraus und beinhaltet eine quasi-kontinuierliche Beobachtung von Prozessen, die auf Böden einwirken oder in Böden stattfinden, häufig mit dem Ziel einer pfadbezogenen Erfassung von Stoffflüssen.

Die Boden-Dauerbeobachtung deckt folgende wesentliche Anwendungsbereiche ab:

- Frühwarnsystem für schädliche Bodenveränderungen,
- Kontrollinstrument für umweltpolitische Maßnahmen,
- Beweissicherung,
- Umfeld-Überwachung,
- Referenz für Bodenbelastungen (Hintergrundwerte, Bodenbelastungskataster),
- Versuchsplattform für Forschung,
- Referenz für bodenkundliche Standortaufnahme.

Die Boden-Dauerbeobachtung ist ein zentrales Instrument für den vorsorgenden Bodenschutz in Deutschland. Wegen der zentralen Steuerfunktion des Bodens im Naturhaushalt bieten sich die BDF als Basis für ein integriertes Umweltmonitoring an, wie es in Abb. 2-1 schematisch skizziert ist. In der Pedosphäre durchdringen sich Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre. Böden stellen somit das zentrale Kompartiment terrestrischer Ökosysteme dar. Im Rahmen von medien- bzw. sphärenübergreifenden Monitoring-Programmen ist die Erfassung und das Verständnis der in Böden ablaufenden Transport- und Umsetzungsprozesse folglich unabdingbar für die Interpretation von messbaren Veränderungen der belebten und unbelebten Umwelt. Die Boden-Dauerbeobachtung geht damit weit über eine rein medial orientierte Erfassung der Böden hinaus.

Die Boden-Dauerbeobachtung versteht sich als Instrument zur langfristigen Überwachung der Veränderung von Bodenzuständen und Bodenfunktionen im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998). Für die rechtzeitige Erfassung derartiger Veränderungen (Frühwarnsystem) eignen sich die Merkmals- und Prozessdokumentation je nach der im Vordergrund stehenden Bodenfunktion bzw. deren Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen in unterschiedlichem Maße.

Boden-Dauerbeobachtung

zentrales Element der Umwelt-Beobachtung

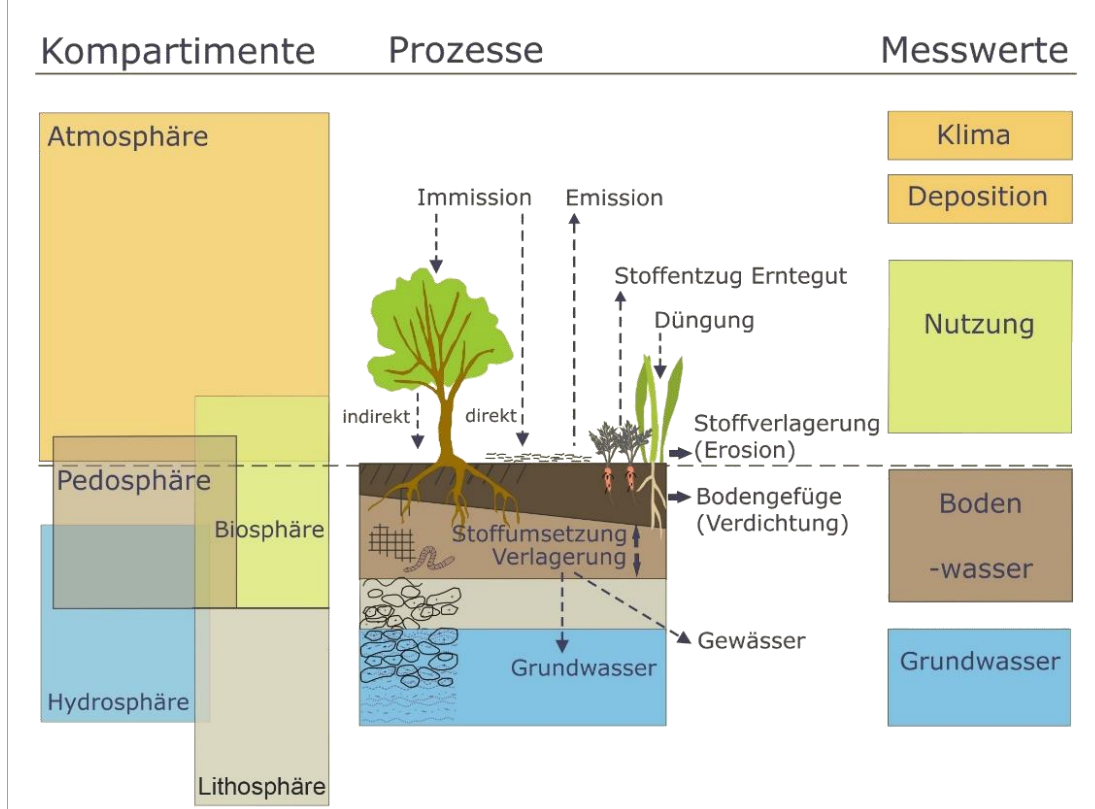


Abb. 2-1: Boden-Dauerbeobachtung als zentrales Element einer integrierten Umwelt-Beobachtung (verändert nach S. Marahrens, Umweltbundesamt).

In vielen Fällen sind schädliche Veränderungen von Bodenzuständen und -funktionen schleichende, längerfristig ablaufende Prozesse, die sich über eine zeitlich hinreichend aufgelöste Merkmalsdokumentation sicher erfassen lassen. Neben den Untersuchungen zur Erfassung des Bodenzustands (Grund- und Wiederholungsinventuren) gehören dazu auch Untersuchungen der Nutzung und Bewirtschaftung oder Erhebungen zur Beschreibung des Aufwuchses und der Vegetation. Die Einrichtung einer Bodenprobenbank ist ein unverzichtbarer Bestandteil des Bodenmonitorings, insbesondere unter dem Aspekt der Beweissicherung, der Umfeldüberwachung und der retrospektiven Detektion von „neuen“ Schadstoffen.

Für ausgewählte Fragestellungen z. B. im Zusammenhang mit der Filter- und Pufferfunktion von Böden werden erfahrungsgemäß zusätzliche Indikatoren benötigt, die deutlich über die Bestimmung von Bodenparametern und die Erfassung der Nutzung (Merkmalsdokumentation) hinausgehen. Die hier ansetzende Prozessdokumentation zielt primär auf die Erfassung von Stoffflüssen, da diese Veränderungen im Stoffhaushalt in der Regel empfindlicher und somit frühzeitiger anzeigen als die Merkmalsdokumentation. Dazu gehören kontinuierlich verlaufende Stoffeinträge durch atmosphärische Deposition und Streufall sowie Stoffausträge mit dem Sickerwasser ins Grundwasser, aber auch Stoffverlagerungen durch Wind- und Wassererosion oder Bioturbationsprozesse. Im Hinblick auf ein Klimafolgenmonitoring ist auch die kontinuierliche Erfassung der Bodentemperatur oder von Kenngrößen des Bodenwasserhaushaltes notwendig. Die Prozessdokumentation ist damit ein wichtiges Instrument für den vorsorgenden Bodenschutz, die die Merkmalsdokumentation v. a. im Hinblick auf den Anwendungsbereich als Frühwarnsystem sinnvoll ergänzt. Mit Bezug auf den vergleichsweise hohen apparativen und personellen Aufwand muss die Prozessdokumentation auf ausgewählte Standorte beschränkt werden.

In der Regel sollen Boden-Dauerbeobachtungsflächen mehrere der o. g. Funktionen gleichzeitig erfüllen. Der jeweils vorrangige Anwendungsbereich der Boden-Dauerbeobachtung bestimmt dabei das zu wählende Verfahren und somit die Intensität. Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Tab. 2-1 vereinfacht dargestellt.

In Abhängigkeit von der Intensität des Bodenmonitorings lassen sich grundsätzlich zwei Typen von Boden-Dauerbeobachtungsflächen unterscheiden:

- Basis-BDF zur Merkmalsdokumentation und darauf aufbauend
- Intensiv-BDF zur Merkmals- und Prozessdokumentation.

Tab. 2-1: Anwendungsbereiche und Verfahren der Boden-Dauerbeobachtung

Anwendungsbereiche der Boden-Dauerbeobachtung	Verfahren der Boden-Dauerbeobachtung	
	Merkmalsdokumentation	Prozessdokumentation
Frühwarnsystem	+	++
Kontrollinstrument	+	+
Beweissicherung	++	+
Umfeld-Überwachung	++	++
Referenz für Bodenbelastung	++	++
Versuchsplattform für Forschung	+	++
Referenz für Standortaufnahme	++	+

++ gut geeignet, + geeignet

Die Merkmalsdokumentation auf einer Basis-BDF erfolgt in der Regel periodisch und ohne dauerhafte Installation von Messgeräten im Bodenkörper. Im Unterschied zur Basis-BDF werden auf Intensiv-BDF zusätzlich Stoffflüsse und Prozesse direkt in Böden sowie klimatische Parameter und Immissionen erfasst (Abb. 2-2). Hierzu ist eine Instrumentierung der Intensiv-BDF erforderlich, deren technische Ausgestaltung und Messintensität aus den zu betrachtenden Prozessen resultiert.

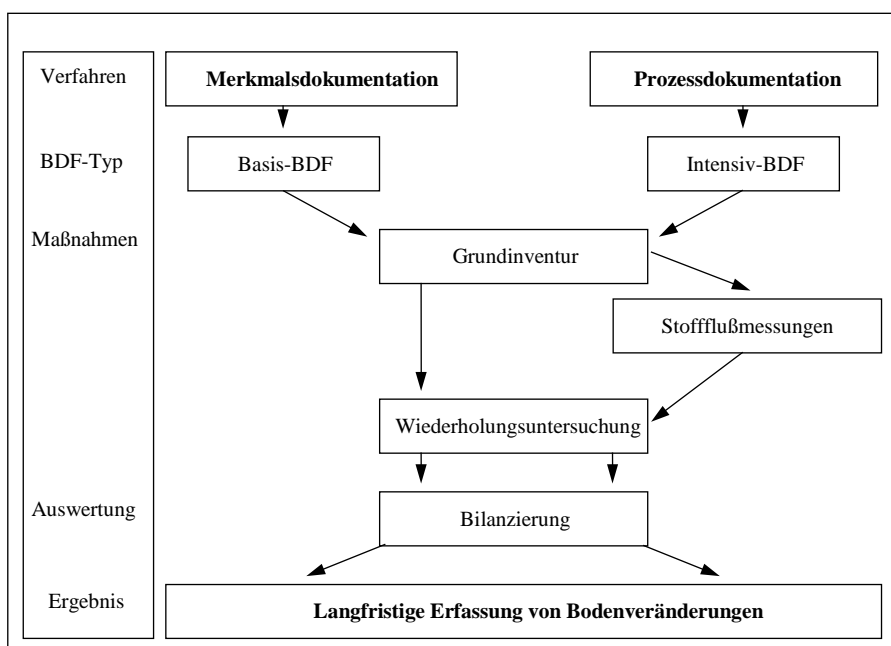


Abb. 2-2: Verfahren der Boden-Dauerbeobachtung.

3 Standortauswahl

Die Auswahl der Standorte für die Boden-Dauerbeobachtung erfolgt i. d. R. nach den folgenden Kriterien:

1. Landschaftsrepräsentanz: BDF in charakteristischen bzw. flächenhaft vorherrschenden Landschaften.
2. Bodenrepräsentanz: BDF auf Böden, die für die o. g. Landschaften bezüglich Ausgangsmaterial, Bodenbildung, Bodenwasser und -stoffhaushalt usw. als typisch anzusehen sind.
3. Nutzungsrepräsentanz: BDF
 - a) unter charakteristischer oder vorherrschender Nutzung,
 - b) unter regionalspezifisch vorherrschender Sondernutzung.
4. Belastungsrepräsentanz: BDF in
 - a) Gebieten mit geogenen Besonderheiten,
 - b) Gebieten mit anthropogenem Belastungseinfluss,
 - c) unbelasteten bzw. diffus ubiquitär belasteten Gebieten.
5. Einbindung in bestehende oder geplante (Überwachungs-)Messnetze unterschiedlichster umweltrelevanter Ausrichtung.
6. Langfristige Verfügbarkeit der BDF, Erhaltung der ausgewählten Nutzung, Sicherstellung des Betriebes sowie die Erfassung der Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Bei der Auswahl von BDF-Standorten sollten die oben genannten Repräsentanzkriterien möglichst umfassend berücksichtigt werden. Vor dem Hintergrund einer überregionalen Vergleichbarkeit der Boden-Dauerbeobachtung ist eine ausreichende Zahl von Basis-BDF nach einheitlichen Kriterien mindestens im Hinblick auf Landschafts-, Boden- und Nutzungsrepräsentanz auszuwählen. Unter Bezug auf die unterschiedlichen, mit der Boden-Dauerbeobachtung verbundenen Zielsetzungen (s. Kap. 2) wird es allerdings kaum gelingen, die Auswahlkriterien über alle BDF gleichartig anzuwenden. Vielmehr bestimmt die jeweils im Vordergrund stehende Fragestellung im Einzelfall Art, Anzahl und relative Gewichtung der zu berücksichtigenden Kriterien.

Die Vorgehensweise bei der Standortauswahl ist grundsätzlich umfassend und nachvollziehbar zu begründen und zu dokumentieren. In der Mehrzahl der Fälle werden BDF-Standorte gestützt auf Expertenwissen ausgewählt. In den Auswahlprozess fließen dabei neben der lokalen Kartierkenntnis – soweit möglich – digital in Bodeninformationssystemen vorliegende Punkt- und Flächeninformationen, Auswertungen zur Empfindlichkeit und zum Leistungsvermögen sowie zur stofflichen und nichtstofflichen Vorbelastung der Böden ein.

4 Grundsätze zu Einrichtung, Betrieb und Qualitätssicherung

4.1 Grundsätze zur Einrichtung von BDF

1. Die BDF sollte in eine besonders zu schützende Kernfläche, z. B. 30 x 30 m als eigentliches Messobjekt für Inventurzeitreihen und eine umgebende Randfläche, beispielsweise mit einem Rand von 10 m um die Kernfläche, für weitere Untersuchungen, wie z. B. Anlage von Schürfgruben oder Sickerwasser-Messfeldern unterteilt werden. Die Kern- oder Teilkernfläche einer BDF ist in der Regel quadratisch. Auf bodenkundlich heterogenen Standorten und solchen, die einen ausgeprägten Merkmalsgradienten aufweisen (hängiges Gelände, auskeilende Schichten, Entfernung zu Fließgewässern in Auenbereichen etc.), ist eine der regionalen und lokalen Variabilität der Bodenentwicklung angepasste Grundfläche zu wählen, die auch in der Größe abweichen kann. Auch die Bearbeitung besonderer Fragestellungen (z. B. auf Autobahnrandstreifen) oder lokale Besonderheiten (z. B. Gruppen, Weinbergsböden, Stadtböden) erfordern eine angepasste Grundfläche und ein individuell zu wählendes Probennahmedesign.
2. Die Größe der Kernfläche richtet sich nach der zeitlichen und räumlichen Beprobungsdichte und sollte circa 1.000 m² betragen. Statt einer zusammenhängenden Kernfläche können auch mehrere Teilkernflächen eingerichtet werden, wenn es z. B. nur schwer möglich ist, eine zusammenhängende Fläche mit geringer Bodenvariabilität entsprechender Größe auszuweisen. Die Teilkernflächen sollten zusammen ebenfalls eine Größe von ca. 1.000 m² aufweisen. Diese Flächengröße hat sich bei den in Kapitel 6.1 genannten Probennahmedesigns nach bisher 30-jähriger Erfahrung als auskömmlich erwiesen. Ein entsprechend vorausschauendes Flächenmanagement gemäß Kap. 6.1 ist erforderlich. Eine Orientierung zum Flächenbedarf einzelner Untersuchungstypen enthält Anl. 3-1:.
3. Sollen im Rahmen der Merkmalsdokumentation auch Bodenparameter untersucht werden, die einer schnellen zeitlichen Variation unterliegen (z. B. jahreszeitliche Schwankung), muss die Flächenprobennahme häufiger wiederholt werden (bodenbiologische/-mikrobiologische Parameter, pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte etc.). Die Kernfläche reicht aufgrund ihrer Größe für diese Zwecke nicht aus, so dass zusätzliche Entnahmeflächen im Randbereich der Kernfläche und unter bestmöglicher Wahrung der bodenkundlichen Übertragbarkeit einzurichten sind. Dies gilt auch für eine Untersuchung auf Parameter, die eine größere Probenmenge benötigen. Diese Anforderungen können ohne Zerstörung der Kernfläche der BDF bereits bei der Erstbeprobung - insbesondere bei den geringmächtigen Oberboden- oder Auflagehorizonten unter Wald - nicht erfüllt werden (anders bei Ackerstandorten). Entsprechendes gilt auch für die Einrichtung von Messfeldern im Rahmen der Prozessdokumentation (s. Kap.10).
4. Die Sicherstellung eines möglichst homogenen Bodenprofilaufbaus von Kern- und Randfläche hat durch eine vorhergehende bodenkundliche Erfassung in möglichst engem Raster zu erfolgen. Weitere Voraussetzung ist die einheitliche Nutzungsart auf den Flächen.
5. Nach Einmessen ist die geographische Position der Kern- und Randfläche inkl. Mittelpunkt im Dezimeterbereich mittels GPS unter Angabe des Koordinatensystems zu dokumentieren. Zur Markierung der Fläche sind langfristig wiederauffindbare Unterflurmarken (z. B. Erdmagnete) in ausreichender Bodentiefe einzubringen, die mit einem geeigneten Suchgerät, z. B. Magnetsuchgerät, genau lokalisiert werden können. Oberirdische Markierungen, die allerdings

verloren gehen können (z. B. Pflöcke, Winkelgräben), stellen eine sinnvolle Ergänzung zur Wiederfindung dar, sofern sie die Bewirtschaftung nicht behindern (z. B. im Wald).

6. Die Kernfläche der BDF soll in die betriebsübliche Bewirtschaftung der umliegenden Fläche integriert sein. Eine Absicherung durch Umzäunung ist deshalb i. d. R. nicht zielführend.
7. Sichergestellt werden muss in Absprache mit dem Eigentümer und Besitzer der jederzeitige Zugang zu den BDF. Dies kann durch Nutzungs- oder Pachtverträge, eventuell auch durch Grundbucheintragungen gewährleistet werden. Die BDF sollte auf dem Grundstück nur eines Eigentümers liegen. Die langfristige Sicherung der BDF lässt sich z. B. dadurch realisieren, dass der Eigentümer die öffentliche Hand ist.

4.2 Betriebliche Grundsätze

Beim Betrieb der Boden-Dauerbeobachtungsflächen sollen die zeitlichen Veränderungen der Bodenmerkmale und der damit zu charakterisierenden Bodenfunktionen erfasst und nach Möglichkeit statistisch abgesichert werden. Hierzu sind die im Folgenden aufgeführten Grundsätze von besonderer Bedeutung.

4.2.1 Untersuchungsparameter

Die Untersuchungsparameter werden im Folgenden in obligatorische und fakultative (ergänzend empfohlene) Parameter gegliedert. Die Festlegung der obligatorischen Parameter soll zu einem bundesweit einheitlichen und vollständigen Kerndatensatz beitragen. Ausgewählt wurden absehbar und langfristig umweltpolitisch besonders relevante Parameter. Um die länderübergreifende Auswertung zu erleichtern, sind neben den obligatorischen Parametern auch Festlegungen hinsichtlich der analytischen Methoden zu ihrer Messung getroffen.

Die fakultativen Parameter sollen das Pflichtprogramm ergänzen. Die Auswahl der Parameter ist u. a. bestimmt durch individuelle Fragestellungen, die in den Programmen der Länder je nach Situation bezogen sowohl auf die jeweilige Grundausstattung der Böden als auch auf regional unterschiedliche Belastungsursachen auszuwählen sind.

4.2.2 Untersuchungsturnus

Die Auswertbarkeit von Untersuchungsergebnissen der Boden-Dauerbeobachtung hängt entscheidend von der Festlegung zum Untersuchungsturnus ab. Dieser richtet sich nach:

- der Disposition der Böden gegenüber Veränderungen (Filter-, Puffer- und Speichervermögen, Verdichtbarkeit etc.),
- den jahreszeitlichen Schwankungen von Bodenkennwerten,
- dem exogenen Veränderungsdruck (z. B. Nutzungsart und -intensität, Immissionsniveau),
- dem zu untersuchenden Parameter.

Bei einer integrativen Bewertung verschiedener Untersuchungen sind deren Untersuchungsturnusse und die entsprechende Probenentnahme zeitlich so abzustimmen, dass diese aufeinander bezogen werden können. Erfolgt z. B. der Tierfang für bodenzoologische Untersuchungen im Herbst, so sind die entsprechenden Proben für bodenmikrobiologische Untersuchungen im Frühjahr darauf zu entnehmen.

Bei der Festlegung des Untersuchungsturnus muss einerseits darauf geachtet werden, dass eine rasche Zerstörung der BDF durch zu häufiges destruktives Beprobieren verhindert wird. Andererseits lassen sich jedoch Bodenveränderungen erst durch den Vergleich der Ergebnisse aus mehreren

Untersuchungen nachweisen. Der Untersuchungssturnus, d. h. Intervalle zwischen den Wiederholungen, kann nicht generell für Parameter und alle Fragestellungen empfohlen werden. Für die Untersuchungsintervalle sind vielmehr die zu erwartende Differenz und somit die Stabilität der Parameter von entscheidender Bedeutung.

Es kann zwischen labilen, mesostabilen und stabilen Parametern unterschieden werden. Es ist davon auszugehen, dass die Kenngrößen labiler Parameter bereits innerhalb eines Jahres Differenzen zeigen, während die Kenngrößen mesostabiler Parameter im Intervall von ein bis fünf Jahren und Kenngrößen stabiler Parameter erst nach mehr als fünf Jahren Veränderungen erwarten lassen. Die genannten Zeiträume können zur Orientierung bei der Festlegung der Intervalle zwischen den Wiederholungen herangezogen werden. Bei den hier angegebenen Untersuchungsintervallen handelt es sich um Empfehlungen, die verändert werden müssen, wenn es die jeweilige Fragestellung erfordert. Außergewöhnliche Ereignisse (z. B. Reaktorunfall Tschernobyl, Hochwasser) erfordern zeitnahe Untersuchungen. Hilfestellungen für die Wahl sinnvoller Untersuchungssturnusse für bodenbiologische Untersuchungen und für Vegetationsuntersuchungen sind in den Kapiteln 8 und 11 zu finden.

Im Gegensatz zur Merkmalsdokumentation auf Basis-BDF mit in der Regel mehrjährigen Untersuchungsintervallen werden auf Intensiv-BDF im Rahmen der Prozessdokumentation zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen der Stoffein- und -austräge (Input/Output) in Böden durchgeführt. Dazu sind die Einrichtung und der Betrieb von Messstationen (z. B. Saugkerzenanlage) erforderlich. Für den Betrieb von Messstellen ist eine entsprechende Logistik notwendig, um kontinuierliche Messreihen zu sichern. Datenlücken durch Messstellenausfall sind zu vermeiden (geschultes Fachpersonal, Parallelmessungen, Reservemesseinrichtungen).

4.2.3 Datendokumentation

Beim Betrieb von BDF, insbesondere im Rahmen der Prozessdokumentation, hat die umfassende Datenarchivierung einen besonderen Stellenwert, da die Untersuchungen von zeitvariablen Bodenmerkmalen nicht wiederholbar sind. Die Messwertgewinnung und die Datendokumentation müssen daher mit besonderer Sorgfalt erfolgen (s. Kap. 12.1).

4.3 Qualitätssicherung

Für die Boden-Dauerbeobachtung ist aufgrund ihres Langzeitcharakters eine nachhaltige Qualitätssicherung unabdingbar. Dies beginnt mit der intensiven Bodenhomogenitätsprüfung bei Einrichtung der Fläche, setzt sich in der sorgfältigen Dokumentation der Probenahmen, der Anwendung von standardisierten (Analyse-)Methoden möglichst ohne Methodenwechsel fort und endet bei der Datenhaltung und Auswertung.

So empfiehlt es sich beispielsweise, Standardarbeitsanweisungen auf Grundlage von DIN/ISO-Normen zu erstellen, Labor-Verfahrenskontrollstandards einzusetzen und leistungsfähige Datenbankanwendungen vorzuzulassen.

Bei unvermeidbaren Wechseln in den analytischen Methoden sollte die Kontinuität durch Vergleichsmessungen hergestellt werden. In Ausnahmefällen kann es sogar sinnvoll sein, alle alten Messwerte durch solche des neuen Verfahrens komplett zu ersetzen, indem alle Rückstellproben der Bodenprobenbank mit dem neuen Verfahren analysiert werden.

5 Standortaufnahme und Erfassung der Bewirtschaftung

Um die erhobenen Bodendaten im Hinblick auf eine Beurteilung des aktuellen Bodenzustandes und möglicher Entwicklungen interpretieren zu können, sind genaue Kenntnisse der jeweiligen Standort- und Nutzungseinflüsse erforderlich. Der Standort ist deshalb bei der Einrichtung der BDF ausführlich in seinem bodenkundlichen Inventar und Zustand sowie in seiner Nutzung und Nutzungsgeschichte einschließlich möglicher Belastungsfaktoren (Verkehr, Industrie etc.) aufzunehmen und zu dokumentieren. Die bodenkundliche Standortaufnahme (Bohrprofile der Standortsuche, Schürfgrube als Referenzprofil der BDF, Profile der Probenahmepunkte der Flächenprobenahme etc.) erfolgt nach Bodenkundlicher Kartieranleitung in der jeweils aktuellen Fassung. Dabei ist eine bodenkundliche

Sondierung zur räumlichen Verteilung von Boden(sub-)typen bzw. Substraten in der Fläche und ihrer unmittelbaren Umgebung vorzunehmen.

Die Darstellung der Bohrpunkte und die bodenkundliche Karte sollten im Maßstab 1:5.000 oder größer dargestellt werden. In einem Lageplan sind die Bodenprobennahmestellen und die Bodenprofilgrube (Schürfgrube) eindeutig zu verorten, um diese auch zu späteren Zeitpunkten exakt auffinden zu können.

Zur Kenntnis der Nutzungsgeschichte ist eine historische Recherche durchzuführen, die Aufschluss über frühere Nutzungen und Nutzungsänderungen (Grünlandumbruch, Brache, Meliorationsmaßnahmen, Bewässerung, Drainage, Holzeinschlag, Pflanzungen etc.) sowie mögliche Vorbelastungen/Störungen und deren Intensitäten am Standort gibt. Dabei kann auf das Formblatt zur Nutzungsgeschichte zurückgegriffen werden (s. Anl. 5-1).

Auf den land- und forstwirtschaftlich genutzten BDF sind die Bewirtschaftungsmaßnahmen fortlaufend zu erheben, um u. a. Stoffein- und -austräge sowie mechanische Belastungen bei der Bodenbearbeitung verfolgen und quantifizieren zu können. Diese Daten werden z. B. in Schlagkarteien (Acker und Grünland) bzw. dem Aufnahmeblatt Wald (s. Anl. 5-2, Anl. 5-3: und Anl. 5-4:) dokumentiert.

Ergänzend können exakte Angaben zum Stoffexport über Ertragsfeststellungen ermittelt werden. Die Führung von Schlagkarteien und die Übergabe der darin enthaltenen Daten sollte mit den Bewirtschaftenden der Flächen, auf denen die BDF eingerichtet sind, vertraglich geregelt werden, z. B. in Form von Gestattungs- oder Kooperationsverträgen.

Tab. 5-1 stellt den Minimal-Datensatz zur Beschreibung wesentlicher bodenwirksamer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen zusammen.

Tab. 5-1: Obligatorische Parameter zur Beschreibung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen (Schlagkartei)

Maßnahme	Parameter
Bearbeitung	Datum Anzahl der Arbeitsgänge Art der Bearbeitung (Pflügen, Grubbern, Striegeln etc.) Bearbeitungstiefe (cm)
Mineralische Düngung	Datum Handelsname des Düngers Hersteller (fakultativ) Düngemitteltyp (Name) Ausbringungsmenge Entwicklungsstadium des Bestandes
Organische Düngung	Datum Düngerart (Stallmist, Gülle, Klärschlamm, Kompost etc.) Tierart (bei Wirtschaftsdünger) Ausbringungsmenge Entwicklungsstadium des Bestandes
Saat	Datum Fruchtart Sorte / Ansaatmischung (bei Grünland), Arten Saat-, Pflanzstärke (Gewicht bzw. Anzahl pro ha) Beizmittel (Wirkstoff)
Pflanzenschutz	Datum Pflanzenschutz-, Pflanzenbehandlungsmittel (Wirkstoff) Handelsname BBA-Kennnummer Ausbringungsmenge (angeben, ob Präparat oder Wirkstoff) Entwicklungsstadium des Bestandes
Ernte	Datum Fruchtart/Schnittnutzung Ertrag (dt/ha) Qualität des Erntegutes (optional) Art der Ernterückstände Verbleib der Ernterückstände

Beweidung	Datum des Beweidungsbeginns Datum des Beweidungsendes Art der Weidetiere (Kategorie) ¹ Produktionsverfahren ¹ Anzahl der Weidetiere Größe der beweideten Fläche Durchschnittsgewicht der Weidetiere Durchschnittliche tägliche Weidedauer, sofern nicht ganztägig
Beregnung	Datum (von / bis) Beregnungsmenge [mm] Herkunft des Wassers

¹ Kategorie und Produktionsverfahren sollten sich an der Düngeverordnung in der jeweils gültigen Fassung orientieren, um die Nährstoffausscheidungen (Tabelle 1) und die Nährstoffaufnahme (Tabelle 2) der Weidetiere verlässlich und reproduzierbar schätzen zu können.

6 Bodenuntersuchungen (Feststoff)

6.1 Planung und Durchführung von Bodenprobennahmen

Ein erster und zentraler Schritt von Bodenuntersuchungen ist die Probennahme zur Gewinnung von repräsentativem Bodenmaterial. Da mögliche Fehler bei der Probennahme nicht mehr rückgängig gemacht werden können, kommt ihr eine besondere Bedeutung zu. Hier können insbesondere die aktuell empfohlenen Normen des FBU angewendet werden (FACHBEIRAT BODENUNTERSUCHUNGEN 2018 bzw. in der aktuellen Version).

An BDF kommen im Wesentlichen zwei Verfahren zur Probengewinnung zum Einsatz:

- Punktuelle Bodenprobennahme an Schürfgruben (Erstuntersuchung bei Einrichtung sowie ggf. an versetzter Stelle bei Wiederholungsuntersuchungen) und
- Flächenrepräsentative Bodenprobennahme der Kern- und/oder Randflächen (Erst- und Wiederholungsuntersuchung).

Beide Verfahren stellen unterschiedliche Anforderungen an die jeweilige Planung und Durchführung. Sie werden deshalb im Folgenden getrennt dargestellt.

6.1.1 Probennahmen an Schürfgruben

Bei Einrichtung einer BDF wird eine flächenrepräsentative Schürfgrube i. d. R. in der Randfläche oder in unmittelbarer Nähe der BDF aufgedigelt, um die an der Schürfgrube gewonnenen Befunde auf die Kernfläche der BDF übertragen zu können. Dazu müssen beide Messobjekte innerhalb der gleichen, als homogen kartierten Bodeneinheit liegen (Feinkartierung durch Raster Sondierung, s. Kap. 4.1).

Das Aufgraben einer Schürfgrube ermöglicht eine detaillierte vollständige bodenkundliche Ansprache nach bodenkundlicher Kartieranleitung in der jeweils aktuellen Fassung, die fotografische Aufnahme des Bodenprofils und seiner Umgebung sowie die Entnahme von gestörten und ungestörten Bodenproben. Die Profilsprache soll auch den Unterboden und das anstehende Gestein beinhalten. Insbesondere variierende Horizontmächtigkeiten, Gefüge- oder Farbunterschiede sowie Substratinhomogenitäten geben wichtige Hinweise zur kleinräumigen Variabilität und lassen sich nur an Schürfgruben ermitteln. Die gewonnenen Befunde aus der Ansprache sind umfassend zu dokumentieren.

Eine Wiederholung der Beprobung an derselben Stelle ist nicht zulässig, da der Boden hier durch das erstmalige Aufgraben bereits irreversibel gestört ist. Die Anlage einer Schürfgrube dient deshalb in erster Linie einer einmaligen Standortcharakterisierung im Rahmen der Grundinventur, weshalb deren Flächenrepräsentativität besonders wichtig ist.

Sofern sich zu einem späteren Zeitpunkt trotzdem die Notwendigkeit ergibt, Veränderungen im Bodenprofil zu erfassen (z. B. Wiederholungsuntersuchungen bodenphysikalischer Parameter an ungestörten Proben), ist die Anlage einer neuen Schürfgrube notwendig. Diese sollte gemäß Feinkartierung innerhalb derselben Bodeneinheit wie die ursprüngliche Schürfgrube liegen, damit festgestellte Abweichungen zwischen Erst- und Wiederholungsuntersuchung nicht in einer räumlichen Variation des Bodens begründet sind.

6.1.1.1 Entnahme gestörter Bodenproben an Schürfgruben

Gestörte Bodenproben werden gleichmäßig über den gesamten Horizont bzw. die gesamte Tiefenstufe verteilt als vertikale Schlitzproben aus der Schürfgrube entnommen. Dadurch lassen sich Gradienten innerhalb der Horizonte/Tiefenstufen repräsentativ erfassen.

Ein Horizont kann zusätzlich in mehreren waagerechten Probennahmebereichen beprobt werden, falls kleinräumige Verteilungen untersucht werden sollen. Auch eine zusätzliche Entnahme von Sektionsproben aus nichttypischen Horizontelementen (z. B. Eiskeilfüllung) kann zweckmäßig sein.

6.1.1.2 Entnahme ungestörter Bodenproben an Schürfgruben

Die Entnahme ungestörter Bodenproben an Schürfgruben erfolgt in der Regel durch Stechzylinder. Für die ungestörte Bodenprobennahme kann entweder eine horizontal oder vertikal orientierte Beprobung (z. B. bei der Bestimmung von k_r -Werten) zweckmäßig sein. Es ist darauf zu achten, dass je nach angewandter Methode eine ausreichende Anzahl Proben aus der gleichen Tiefenstufe gewonnen wird.

Ungestörte Stechzylinderproben werden an Schürfgruben in der Regel ausschließlich für bodenphysikalische Untersuchungen entnommen. Es handelt sich aufgrund vielfältiger Störeinflüsse um eine anspruchsvolle Probennahmetechnik, die nur von Fachkundigen durchgeführt werden sollte. Nähere Hinweise werden in Kap. 6.2 gegeben.

6.1.2 Probennahmen an Kernflächen zur Entnahme von Einzelproben und zur Bildung von Mischproben

Um mögliche Veränderungen des Bodenzustands von BDF über die Zeit feststellen zu können, müssen Daten verschiedener Untersuchungszeitpunkte miteinander vergleichbar sein. Deshalb soll die Beprobung der Kernflächen zur Merkmalsdokumentation bei der Erstuntersuchung und allen Wiederholungsuntersuchungen möglichst nach gleichem und wiederholbarem Schema erfolgen. Dazu sind mehrere, über die gesamte Fläche verteilte Einzelproben aus unterschiedlichen Tiefenstufen bzw. Horizonten zu entnehmen, welche die räumliche vertikale und horizontale Flächenheterogenität erfassen. Die Beprobungstiefen richten sich dabei nach dem jeweiligen Bodentyp sowie Standort und sollen bis in den Unterboden reichen.

Idealerweise sind alle Einzelproben zu analysieren. Um analytische Kosten zu reduzieren oder um mehr Probenmaterial zur Analyse oder für die Einlagerung von Rückstellproben zu bekommen, können Einzelproben aus gleichen Horizonten/Tiefenstufen zu Mischproben vereinigt werden. Dadurch gehen allerdings Informationen zur Streuung verloren, die Aussagen zur Flächenheterogenität, zum Fehler bei der Probenahme und Analytik und letztendlich zur Ergebnisunsicherheit ermöglichen. Die Entscheidung, wie viele Einzelproben entnommen werden und wie viele davon zu Mischproben vereinigt und analysiert werden, hängt vor allem von den Anforderungen der statistischen Auswertung (s. Kap. 13) ab und wird limitiert durch die finanzielle Ausstattung des Untersuchungsprogramms.

Bei der Auswahl eines geeigneten Probennahmedesigns zur Festlegung einzelner Probennahmepunkte auf Kernflächen kann man grundsätzlich zwischen BDF mit wiederkehrender Bodenbearbeitung (s. Kap. 6.1.2.2) im Oberboden (Acker) und solchen ohne wiederkehrende Oberbodenbearbeitung (Grünland, Wald, einige Sonderkulturen, Parkflächen etc., s. Kap. 6.1.2.3) unterscheiden.

Um Vorratsberechnungen durchführen zu können, sollten Bodenproben volumenbezogen entnommen werden (s. Kapitel 6.2.3).

6.1.2.1 Horizontbezogene vs. tiefenstufenbezogene Beprobung

In Abhängigkeit der verfolgten Ziele kann neben einer Beprobung einzelner Horizonte auch eine tiefenstufenbezogene Probenahme oder eine Kombination von tiefenstufen- und horizontbezogener Probenahme vorgenommen werden.

Mögliche Gründe für ein solches Prozedere können beispielsweise sein:

- Differenzierung innerhalb der Bodenhorizonte (z. B. bei Grünland oder bei Minimalbodenbearbeitung unter Ackernutzung).
- Bearbeitungsmaßnahmen, wie z. B. Tiefenumbruch, Drainage, Umwandlung von Acker in Grünland oder umgekehrt und Aufforstung mit Pflugvorlauf zur Herstellung von Langbeeten.
- Große Horizontmächtigkeiten: mit Ausnahme der Ackerkrume wird eine Horizontunterteilung ab einer Mächtigkeit von 30 cm empfohlen, um Tiefengradienten erfassen zu können.
- Untersuchungen zur vertikalen Stoffbewegung bei Immissionsbetrachtungen.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, ist die gewählte Untergliederung zu dokumentieren und bei den Wiederholungsuntersuchungen beizubehalten. Zur Wahl der Tiefenstufen wird auf bestehende Programme wie etwa die Bodenzustandserhebungen (BZE-Forst, BZE-Landwirtschaft) oder das Monitoring der ICP-Forest verwiesen.

6.1.2.2 Probennahmedesign auf Kernflächen mit wiederkehrender Oberbodenbearbeitung

Auf Kernflächen, die einer wiederkehrenden Oberbodenbearbeitung unterliegen (z. B. durch regelmäßiges Pflügen von Ackerstandorten), kann davon ausgegangen werden, dass die Bodenbearbeitung zu einer Durchmischung und damit zu einer gewissen Homogenisierung der Oberböden in der Fläche im Bereich des Pflughorizontes führt. Die Entnahmepunkte der Einzelproben für die Erst- und Wiederholungsuntersuchungen sollten idealerweise über die gesamte Kernfläche verteilt werden. Für die Bildung von Mischproben können Teilflächen innerhalb der Kernfläche ausgewiesen werden (s. Abb. 6-1).

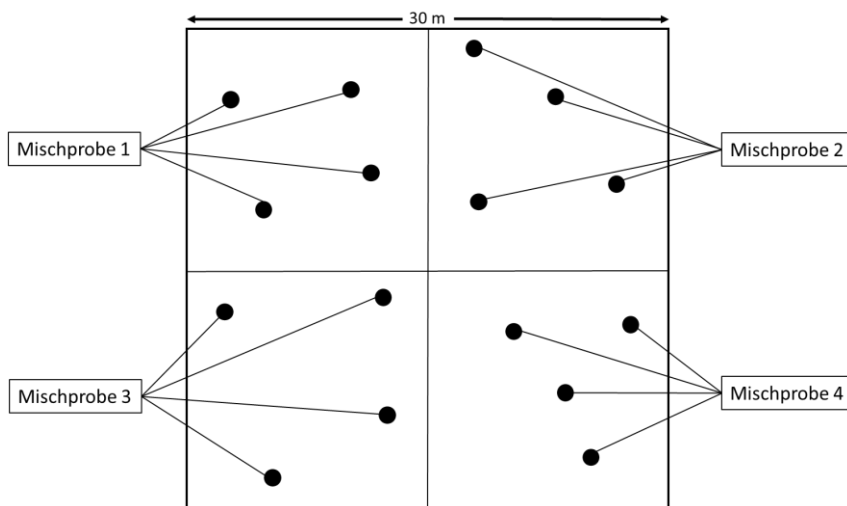


Abb. 6-1: Beispielschema für die Beprobung einer BDF mit Teilung der Kernfläche in 4 Teilflächen und Mischprobenbildung aus je 4 Einzelproben. Bei BDF mit wiederkehrender Oberbodenbearbeitung können die Teilflächen mit einem zufällig gesetzten Raster wiederholt beprobt werden.

So lässt sich eine Kernfläche beispielsweise in 4 Teilflächen untergliedern. Aus jeder dieser Teilfläche werden 4 oder mehr Einzelproben entnommen, die möglichst zufällig verteilt sein sollten. Diese 4

Einzelproben können anschließend zu einer Mischprobe vereinigt werden. Insgesamt lassen sich damit auf einer BDF 4 Mischproben aus 16 oder mehr Einzelproben je Horizont/Tiefenstufe gewinnen. Bei nachfolgenden Wiederholungsuntersuchungen können die Probennahmepunkte innerhalb der Teilflächen erneut zufällig gesetzt werden.

6.1.2.3 Probennahmedesign auf Kernflächen ohne wiederkehrende Oberbodenbearbeitung

Auf Kernflächen, die keiner wiederkehrenden Oberbodenbearbeitung unterliegen, wie etwa Grünland- oder Forststandorte oder auch Ackerstandorte ohne Pflugbearbeitung, kann eine wiederholte Entnahme von Einzelproben nicht zufällig erfolgen, da der natürliche Bodenaufbau durch die vorangegangene Beprobung bereits zerstört wurde. Um ein Langzeit-Monitoring von BDF sicherzustellen, sind flächensparende Probennahmestrategien zu entwickeln. Diese Strategien stellen einen Kompromiss zwischen bestmöglicher Erfassung der Flächenheterogenität und langfristiger Nutzbarkeit als Probennahmestandort dar.

Die Beprobung bei der Erstuntersuchung sollte mittels eines geeigneten Rasters erfolgen (s. Kap. 6.1.2.2, Abb. 6-1). Die Bildung von Mischproben erfolgt dabei zufällig.

Zur Wiederholung der flächenbezogenen Probennahme werden die Punkte der Einzelproben des Rasters gegenüber der Vorgängeruntersuchung jeweils um einen festgelegten Betrag verschoben, um eine erneute Beprobung bereits gestörter Bodenbereiche zu vermeiden (Abb. 6-2). Die Bildung von Mischproben soll dabei nach dem in der Erstuntersuchung festgelegten Schema erfolgen. Unabdingbar bei jeder Erst- und Wiederholungsbeprobung ist eine möglichst exakte Einmessung aller Probennahmepunkte im Dezimeter- oder sogar Zentimeterbereich und eine genaue Dokumentation der Mischprobenbildung.

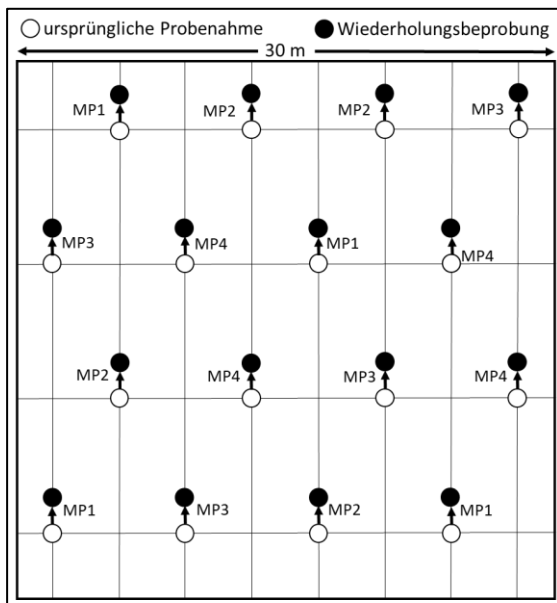


Abb. 6-2: Beispielschema für die Beprobung einer BDF ohne wiederkehrende Bodenbearbeitung mit Rasterbeprobung von 16 Einzelproben. Für die Bildung der 4 Mischproben (MP 1-4) werden jeweils 4 zufällig gewählte Einzelproben verwendet. Vor jeder Wiederholungsuntersuchung wird das Raster um einen bestimmten Betrag verschoben. Um dabei ein „Auswandern“ der Probennahmepunkte aus der Kernfläche zu verhindern, werden diese Punkte bei Bedarf an den entgegengesetzten Rand innerhalb der Kernfläche gelegt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Einzelproben entlang zweier Diagonalen durch die Kernfläche zu nehmen (Abb. 6-3). Bei jeder Wiederholungsuntersuchung werden die Probennahmepunkte auf den Diagonalen in einem bestimmten Winkel um den Mittelpunkt gedreht oder die Abstände der Punkte auf den Achsen verschoben. Allerdings kommt es dabei im Laufe der Zeit zu einer verstärkten Beprobung der zentralen Bereiche der Kernfläche im Vergleich zu den weniger stark beprobten Randbereichen.

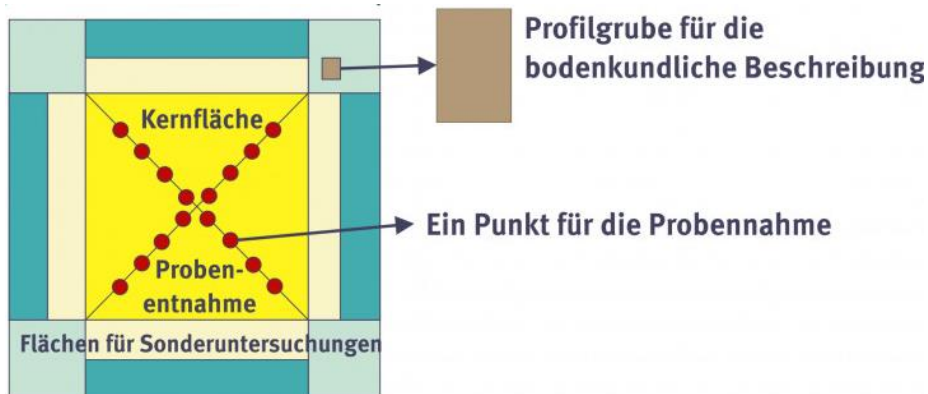


Abb. 6-3: Beispiel eines Probennahmedesigns zur Flächenprobenentnahme in Kernflächen für Böden, die keiner turnusmäßigen Oberbodenbearbeitung unterliegen. Dabei kann eine oder mehrere Mischproben aus den Einzelproben gebildet werden (verändert nach S. Marahrens, Umweltbundesamt).

In der Praxis kann es zu weiteren notwendigen Verschiebungen der vorab gewählten Probennahmepunkte kommen, z. B. durch Bäume, Wurzeln oder Rückegassen auf Waldstandorten oder Maulwurfhügeln im Grünland etc.. Deshalb wird es nicht immer möglich sein, die theoretisch maximal mögliche Anzahl an Wiederholungsuntersuchungen auf ungestörten Bereichen durchzuführen. Auch unter diesem Aspekt ist eine exakte Vermessung und Dokumentation der Probennahmepunkte sehr wichtig.

6.1.2.4 Probennahme aus tieferen Bodenhorizonten

Die Boden-Dauerbeobachtung soll den gesamten Boden im Blick haben. Deshalb wird empfohlen, auch bei den Wiederholungsuntersuchungen den Unterboden obligat zu beproben. So ist es möglich, vertikale Stoffverlagerungen zu erfassen oder Vorratsberechnungen über den gesamten Bodenkörper durchzuführen. Die flächenbezogene Probennahme aus tieferen Bodenhorizonten (> 30 cm unter Geländeoberfläche) kann innerhalb der Kernfläche als gemeinsame Beprobung von Ober- und Unterboden sowie ggf. Untergrund oder als getrennte Beprobung tieferer Bodenhorizonte außerhalb der Kernfläche erfolgen.

Die Probennahme erfolgt an Bohrkernen, die mittels großvolumiger Rammkernsonden (Durchmesser 70-80 mm) – ggf. auch einem Edelmännbohrer – gewonnen werden. Die erbohrten Kerne sind bodenkundlich zu prüfen, d. h. der angetroffene Horizont ist dem erwarteten Bodenaufbau zuzuordnen und dessen Horizontgrenzen sind zu ermitteln.

Um sicherzustellen, dass der Wasser- und Lufthaushalt und das Bodenleben der Böden bei Beprobungen tieferer Bodenhorizonte nicht irreversibel beeinträchtigt wird, müssen die Bohrlöcher verfüllt werden. Bei vorherrschend bindigen Bodenarten kann zu diesem Zweck Quellton, bei sandigen Substraten Quarzsand verwendet werden. Dieses einheitliche, allochthone Material dient bei späteren Probennahmen auch als Indikator für eine bereits erfolgte Probennahme an diesem Punkt.

Sofern die Probennahme in der Kernfläche durchgeführt wird, kann das jeweilige Probennahmedesign (z. B. Zufallsrasterbeprobung und Bildung von Mischproben in Teilbereichen oder Probennahme auf Diagonalen durch den Mittelpunkt) auch für tiefere Bodenhorizonte verwendet werden. Zu beachten ist allerdings, dass hier auch auf BDF mit wiederkehrender Bodenbearbeitung eine wiederholte Beprobung tieferer Bodenhorizonte an exakt derselben Stelle nicht mehr möglich ist, da sich die beprobten Bereiche unterhalb des Bearbeitungshorizontes befinden.

Um die Kernflächen zu schonen, kann die Probennahme aus tieferen Bodenhorizonten auch außerhalb, im Randbereich der BDF durchgeführt werden, wobei die Übertragbarkeit der Befunde gewährleistet sein muss (s. Kap. 4.1). Um ausreichend Material für verschiedene Analyseverfahren sowie für die Rückstellproben zu gewinnen, kann es sinnvoll sein, Mischproben zu bilden. Dafür können z. B. 18 Einzelproben auf einem Entnahmezirkel, der um die Fläche verläuft, entnommen werden (s. Abb. 6-4), die zu 3 Mischproben vereinigt werden können.

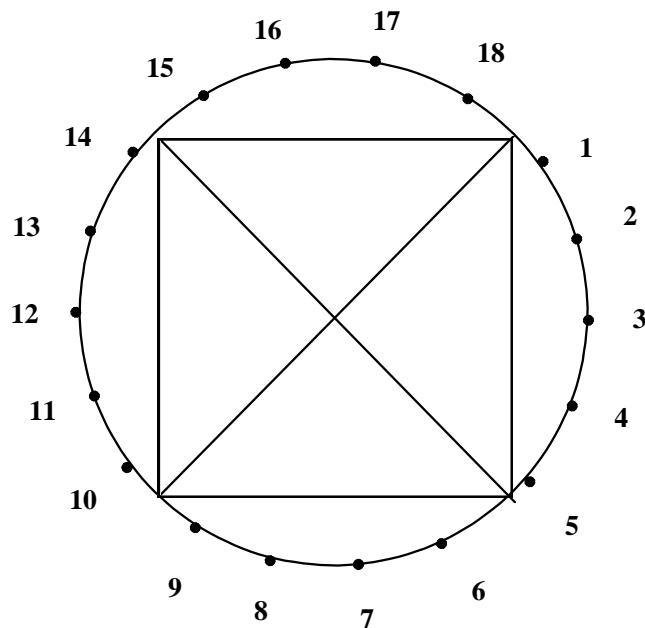


Abb. 6-4: Beispiel eines Designs für die Probennahme aus tieferen Horizonten mittels Rammkernsonde zur Schonung des Kernflächenbereichs.

Für die Wiederholung der Probennahme ist das Entnahmemuster um den Kreismittelpunkt zu drehen. Die Probennahmepunkte werden dann zwischen die Punkte der Erstuntersuchung gesetzt. Eine zu häufige Unterteilung ist wegen der gegenseitigen Beeinträchtigung nicht zu empfehlen. Sollen anschließend weitere Probennahmen durchgeführt werden, ist u. U. der Radius des Entnahmezirkels zu vergrößern.

6.1.3 Homogenisierung und Fraktionierung im Gelände

Die entnommene Bodenprobe ist bereits im Gelände soweit zu homogenisieren wie es das Material mit vertretbarem Aufwand zulässt, z. B. durch Zerkleinern von Aggregaten und Aussortieren von lebenden Wurzeln und anschließender Durchmischung. Auf kontaminations- und sorptionsfreies Gerät und Gefäße ist dabei zu achten.

Ist die Bildung von Teilproben notwendig, z. B. für eine Labor- und Rückstellprobe, sollte schon hier besonderes Augenmerk auf eine repräsentative Teilung, beispielsweise durch fraktionierendes Teilen gelegt werden. Hierzu wird die Anwendung der DIN 19 747 empfohlen.

6.2 Physikalische Untersuchungen der Bodenfests substanz

6.2.1 Bodenphysikalische Messparameter und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden Untersuchungen zur Kennzeichnung der Bodeneigenschaften an der Schürfgrube (ungestörte und gestörte Proben) und der Kernfläche (gestörte Proben) der BDF aufgeführt. Die für die Bodenbeprobung benötigten Geräte mit Hinweisen zur Probenlagerung und -aufbereitung stellt Tab. 6-1 zusammen.

Die Untersuchungen sollen punktuell:

- näherungsweise für die Fläche den Volumenbezug der ermittelten Stoffgehalte herstellen (Stoffvorräte),
- die Speicher- und Transportbedingungen von Bodenwasser charakterisieren und
- die Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf die Entwicklung und die Ausbildung der Bodenstruktur beschreiben.

Bei der bodenphysikalischen Untersuchung sind obligatorische Parameter zu nennen, die für Merkmalsdokumentation zu erheben sind (s. Tab. 6-2). Daneben gibt es ergänzende Parameter, die vorrangig der Berechnung von Stofftransportprozessen an Intensiv-BDF dienen (s. Tab. 6-3).

Bodenphysikalische Untersuchungen am Profil sind nicht wiederholbar (siehe Kap. 6.1.1) und dienen zur Standortcharakterisierung (Bodeninventur). Dabei werden Parameter bestimmt, die in der Regel keiner oder nur einer sehr geringen zeitlichen Variabilität unterliegen.

Daneben besteht die Möglichkeit bodenphysikalischer „in-situ-Messungen“, die für Stofftransport-Berechnung benötigt werden, wie z. B. die aktuelle Saugspannung oder der aktuelle Wassergehalt. Diese werden in Kap. 7 beschrieben.

Tab. 6-1: Probenahmegeräte, -lagerung und -aufbereitung bei bodenphysikalischen Untersuchungen an ungestörten oder gestörten Bodenproben

	Bodengefüge ungestört	Bodengefüge gestört
Probennahmegerät	Stechzylinder, Segebergzylinder (nur Lagerungsdichte, Ackeroberboden, Moorbohrer)	Rammkernsonde, Klappbohrer, Kelle, Spaten, Stampfvolumen (Torf)
Probenlagerung	< 3 Monate bei 4° C	< 3 Monate bei 4° C oder einfrieren
Probenaufbereitung	Nein	Homogenisieren

Tab. 6-2: Obligatorische ex-situ bodenphysikalische Messparameter an der Bodenfestsubstanz

Parameter	Aktuell empfohlenen Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Korngrößenverteilung des Feinbodens	DIN ISO 11277: 2002-08	Trockensiebung auf 2 mm, Zerstörung der organischen Substanz mit 30-Vol% H ₂ O ₂ -Lösung (Suspension 1:1) über Nacht. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Köhn: Fraktionen 0,002-0,02 mm über Sedimentationsverfahren; Fraktionen 0,02-2 mm über Nasssiebung. Für Sedimentationsverfahren kann eine automatisierte Pipettieranlage genutzt werden. Dispergierung mit Na ₄ P ₂ O ₇ bei 12-stündigem Bewegen; im Normalverfahren kein Entfernen von löslichen Salzen, Gips, Karbonat und Eisenoxiden.	Alternativ: Entfernen von löslichen Salzen und Gips bei einer elektrischen Leitfähigkeit > 0,4 dS/m, keine standardmäßige Entfernung von Carbonaten und Eisenoxiden	Proxy für Berechnung Wasser-, Luftleitfähigkeit, Porenverteilung sowie Erosionsanfälligkeit (K-Faktor der ABAG), erklärender Faktor für Stoffgehalt
Skelettanteil	DIN ISO 11277: 2002-08	Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Trockensiebung des Skelettanteils (2–63 mm) und anschließendem Auswiegen der Anteile. Angabe des Skelettanteils als Masseanteil (%) der Gesamtprobe. Bei Tongestein einweichen, mechanische Separation, sieben auf 2 mm, wiegen. Proben i. d. R. aus der Profilgrube, sonst eingeschränkte Erfassung des Grobbodens	Alternativ: Abschätzung aus bodenkundlicher Ansprache	Berechnung von Stoffvorräten, QS-Parameter für Probennahme und Aufbereitung
Rohdichte, trocken	DIN ISO 11272: 2014-06; DIN EN ISO 11272: 2017; HBU 5.1.2.2a	Volumentreue Bodenentnahme, Wiegung und Bestimmung der Trockensubstanz, i. d. R. aus 3 bis 5 Stechzylindern (100 cm ³ /250 cm ³) nach der Trocknung bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz.	Für organische Auflagen und geringmächtige Mineralbodenhorizonte unter Forst Einsatz eines Stechrahmens (20 x 20 cm); bei Flächen-(misch)proben mittels Rammkernsonde	Volumenbezug der Stoffgehalte zur Berechnung von Stoffvorräten, Nachweis von Bodenverdichtung, Proxy für Porengrößenverteilung

Parameter	Aktuell empfohlenen Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Saugspannungs- /Wassergehaltsbeziehung (pF-Kurve)	DIN EN ISO 11274: 2020-04	Einstellung verschiedener Saugspannungen und Messung des Wassergehalts bei pF 0; 1,8; 2,5; 4,2. i. d. R. an 4-5 Stechzylinderproben; Skelettgehalt max. 20 %; Bestimmung von: Weite Grobporen (> 50 µm), enge Grobporen (10-50µm), Mittelporen (0,2-10 µm), Feinporen (< 0,2 µm); Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität; Gesamtporenvolumen; Rohdichte trocken, Feststoffdichte	Nur bei Stechzylinderproben aus der Profilgrube	Berechnung Wasser-, Gas-, Stofftransport, Bodenverdichtung, Kennwerte des Wasserhaushalts, Wurzelwachstum, mikrobielle Aktivität
Leitfähigkeit, gesättigte hydraulische (k_f)	DIN 19683-9: 2012-07	Messung von Durchfluss und Gradient an wassergesättigten Bodenproben i. d. R. an Stechzylinderproben mit geringem Grobbodenanteil mittels Permeameter	Nur bei Stechzylinderproben aus der Profilgrube	Kennwert für Stoffverlagerung, Bodenverdichtung, Gefügekennzeichnung, Wasser- und Lufttransport

Tab. 6-3: Ergänzende ex-situ bodenphysikalische Messparameter

Parameter	Verwendete Methode	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Leitfähigkeit, ungesättigte hydraulische (k_u)	BECHER (1970); KRAHMER (1987) (in Anlehnung)	ungestörte Bodenproben (250 cm ³ Stechzylinder), Verdunstungsmethode nach WIND mit Kleintensiometern P80 in 3 Ebenen, kontinuierliche Wägung	Rechnerisch aus pF-Kurve, Messung mit Spezial-Apparatur (Mini-Tensiometer)	Modellierung des Wasserhaushalts
Festsubstanzdichte (Korndichte/Dichte der festen Bodensubstanz)	DIN EN ISO 11508: 2018-04	Bestimmung der Korndichte/ Reindichte/Dichte der festen Bodensubstanz mittels Pyknometer bzw. Tauchwägung	Alternativ: Methode des FIB - Forschungsinstitut für Bergbaufolge-landschaften, Finsterwalde-FIB_AV02: 2016-07	Präzisere Berechnung von Stoffvorräten aus Stoffgehalten des Feinbodens und Skelettanteilen
Eindringwiderstand	DIN 19662: 2012-07	Messung des Eindringwiderstandes mittels Penetrometer mit definierter Sondenspitze (Standard: Konustyp 1 cm ²) mit Geschwindigkeit von 5 cm/s im Gelände im Profil. Penetrologger: ein elektronisches Penetrometer in Kombination mit eingebautem Datenlogger, um eine große Anzahl von Messdaten zu speichern und zu verarbeiten.		Hinweise auf Bearbeitungstiefe und Prüfung auf Pflugsohlenverdichtung durch Messungen im Feld in Bereichen mit potentieller Bodenschadverdichtung wie Fahrspuren und Vorgewende sowie auf Referenzflächen zu Vergleichszwecken
Stampfvolumen (Torfproben)	VDLUFA 1991, Band 1, A 15.1	Stampfmethode: Definierte Verdichtung von gestörten Proben in 250 ml Messgefäß (Fallgewicht 2000 g, Fallhöhe 50 cm, Durchmesser 65 mm, 10 mal fallen lassen, dann Messgefäß auffüllen, 3-4 mal wiederholen, am Ende Boden oben planar abschneiden), Wiegung und Bestimmung der Trockensubstanz	bei allen Inventuren an allen gestörten Torfproben	Abschätzung von Vorräten auf Basis einer nicht-volumentreuen Probennahme

Parameter	Verwendete Methode	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Aggregatstabilität	DIN 19 683-16	Wiegen von Aggregaten vor und nach einer definierten Wasserbelastung		Gewinnung von Kenntnissen zur Bodenerosion (auf Ackerstandorten), Stofftransport/Makroporenfluss
Wassergehalt gravimetrisch	DIN ISO 15934: 2012-11 DIN EN 14346: 2007-03	Wägen vor und nach Trocknung		Nach der Umrechnung in volumetrischen Wassergehalt zur Kalibrierung von Wasserhaushaltsmodellen

6.2.2 Praktische Hinweise zu bodenphysikalischen Untersuchungen

Alle bodenphysikalischen Untersuchungen, bei denen die Gefügeeigenschaften, also die räumliche Anordnung der Bodenpartikel, eine Rolle spielen, lassen sich präzise nur an ungestörten Stechzylinderproben bestimmen. Das sind Trockenrohddichte, pF-Kurve und k_r -Werte. Die Trockenrohddichte ist außerdem ein entscheidender Parameter zur Herstellung des Volumenbezugs bei der Ermittlung von Stoffvorräten (s. Kap. 6.2.3).

Bei der Entnahme ungestörter Bodenproben mittels Stechzylinder (Größe skelettabhängig, i. d. R. 250 cm³) sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Leitfähigkeit von Böden ist richtungsabhängig. Die Orientierung der Einstiche sollte deshalb der vorherrschenden Richtung der Sickerung entsprechen, in der Regel also senkrecht sein.
- Bei ackerbaulich genutzten und gepflügten Standorten kann je Probennahmepunkt eine Probe aus dem Pflughorizont entnommen werden. Um Schadverdichtungen zu untersuchen, sind zusätzliche Untersuchungen des verdichteten Bereichs bzw. ober- und unterhalb durchzuführen. Die Mächtigkeiten sind zu dokumentieren.
- Zur Schonung der Kernfläche wird empfohlen, gestörtes Probenmaterial aus den Zwischenräumen der Stechzylinder-Beprobung zu nehmen. Beim Transport der Proben sind Erschütterungen durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Stechzylinderproben sind nach der Entnahme möglichst feldfrisch und zügig zu bearbeiten, Gefügeveränderungen etwa durch Trocknungsschrumpfung sind zu vermeiden.

Weitere hilfreiche Hinweise zu relevanten Störungen bei den Verfahren sowie zu Methoden-Unterschieden aus systematischen Methodenvergleichen können den jeweiligen Punkten des Handbuchs Forstliche Analytik (HFA 2022, ständig ergänzt) entnommen werden.

6.2.3 Praktische Hinweise zur Herstellung des Volumenbezugs und zur Ermittlung von Stoffvorräten

Neben der Bestimmung von Stoffgehalten ist es auch notwendig, Stoffvorräte zu ermitteln. Dies ist vor allem von Bedeutung, wenn zeitliche und räumliche (z. B. Tiefenverlagerung) Veränderungen diagnostiziert und durch Stoffein- und -austräge erklärt werden sollen, wie etwa bei der Bilanzierung von Bodenkohlenstoff oder bei der Betrachtung der Cu-Dynamik.

Zur Vorratsberechnung muss ein Volumenbezug zur Probe hergestellt werden, der idealerweise durch die Entnahme von Stechzylindern erfolgt. Alternativ (z. B. bei geringmächtigen oder tiefer gelegenen Horizonten) können andere volumentreue Probennahmeverfahren (Klappbohrer, Rammkernsondierung) oder eine gestörte Bodenentnahme und Auslitern des entnommenen Volumens durchgeführt werden. Allerdings können die so ermittelten Dichten aufgrund von Stauchung, Störung durch Skelett oder Wurzeln weniger präzise sein.

Wo eine volumenbezogene Probenahme nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist, z. B. bei skelett- und tonreichen Böden, oder weil die Kernfläche geschont werden soll, kann der Volumenbezug der Flächenproben auch mittels Übertragung der Schürfgrubenbefunde unter Berücksichtigung damit verbundener Einschränkungen (z. B. Punktbezug vs. Flächenrepräsentativität) hergestellt werden.

Proben aus Humusaufgaben und geringmächtigen Folgehorizonten (≤ 5 cm Mächtigkeit) werden nach Einschlagen eines Stechrahmens (z. B. Länge 20 cm, Breite 20 cm, Tiefe 10 cm) vollständig volumenbezogen horizontweise entnommen.

Im Folgenden werden einige grundsätzliche Hinweise zur Auswertung der bei der Merkmalsdokumentation ermittelten Stoffgehalte und deren Veränderungen gegeben, die u. a. einen bundesweiten Vergleich der Befunde ermöglichen:

- Zur Bestimmung der Stoffvorräte ist die Angabe einer räumlichen Bezugsgröße erforderlich, z. B. Gramm pro Hektar Boden bis zu einer bestimmten Tiefe. Beispielsweise können die Bodentiefen von 0-30 cm unter Acker oder 0-10 cm und 10-30 cm unter Grünland gemäß BBODSCHV (1998) gewählt werden.
- Da Stoffgehalte i. d. R. nur für den Feinboden (Korngröße < 2 mm) vorliegen, ist der Volumenbezug ebenso darauf zu beziehen. Das bedeutet, dass idealerweise die Trockenrohichte des Feinbodens verwendet werden soll. Nimmt man stattdessen das Volumen des Gesamtbodens, kann es gerade bei hohen Skelettanteilen zu einer Überschätzung der Stoffvorräte kommen (POEPLAU ET AL. 2017).
- Sollte der Skelettgehalt als Eingangsgröße zur Vorratsbestimmung herangezogen werden, kann er in der Regel nur im Rahmen der Grundinventur am Profil geschätzt bzw. bestimmt werden. Der so ermittelte Wert kann dann näherungsweise für die Fläche und durchgängig auch für die Wiederholungsinventuren verwendet werden, solange es keine Hinweise auf potenzielle Veränderungen gibt. Bei niedrigen Skelettgehalten kann, v. a. an Oberbodenproben, an einer adäquaten Menge (mehrere kg) der Skelettgehalt quantitativ bestimmt werden.

6.2.4 Hinweise zur Qualitätssicherung bei bodenphysikalischen Untersuchungen

Bodenphysikalische Eigenschaften weisen analog zu den chemischen Bodeneigenschaften eine standortspezifische räumliche Variabilität auf. Diese kann nur durch eine flächenhafte Stichprobenuntersuchung abgebildet werden. Enge Grenzen sind bei Stechzylinderbeprobungen gesetzt, da eine flächenhafte Untersuchung aufwands- und störungsbedingt kaum möglich ist. Anwendende werden hier eine Abwägung treffen müssen zwischen Wiederholbarkeit und Genauigkeit der zum Einsatz kommenden Verfahren:

- Rohdichte-Bestimmung über Rammkernsondierung mit Korrektur der Stauchung statt Stechzylinder oder Auslitern.
- pF-Kurve in-situ über Messreihen von Saugspannung und Wassergehalt statt ex-situ an Stechzylinderproben.

Die Unsicherheitsbereiche der Untersuchungsergebnisse und die Beeinflussung durch Artefakte sind zu berücksichtigen:

- Skelettanteil wird durch Probenaufbereitung im Zerkleinerungsschritt stark beeinflusst (z. B. Fehler bei der Unterscheidung zwischen Grus und Trocknungsklumpen),
- k_r -Werte können um Zehnerpotenzen durch Randeffekte oder Risse im Bodengefüge beeinflusst werden,
- Rohdichte durch das Probennahmeverfahren (Stauchung, Kernverlust wegen Skelett etc.).

Um eine Vergleichbarkeit von Wiederholungsuntersuchungen zu gewährleisten, sind sämtliche Verfahrensschritte in allen Untersuchungsterminen identisch auszuführen. Dies setzt die minutiöse Dokumentation aller Verfahrensschritte voraus, da schon kleinste Abweichungen im Verfahren Auswirkungen auf die Messergebnisse haben können. Die Angabe einer Verfahrensvorschrift bzw. Norm allein ist hierfür unzureichend. Eine Orientierung über die erforderliche Detailschärfe gibt der Methodencode des Umweltbundesamtes (KAUFMANN-BOLL ET AL. 2011).

Häufig ist die Beibehaltung sämtlicher Verfahrensschritte aber aufgrund von Methodenfortschritten oder Geräte- sowie Personalveränderungen über lange Zeiträume nicht möglich. Dann kann versucht werden, über Rückstellproben eine Referenzierung durchzuführen. Bei den Gefüge-Parametern wird hierfür allerdings die längerfristige Lagerstabilität voraussichtlich nicht gegeben sein (Lufttrocknung ebenso wie Einfrieren führen zu irreversiblen Gefügeänderungen).

6.3 Chemische Untersuchungen der Bodenfestsubstanz

Bodenchemische Parameter sind zentrale Zielgrößen zur Beschreibung des Bodenzustands und seiner Veränderungen. Sie werden an der Schürfgrube und der ersten Flächenprobennahme bei Einrichtung der BDF erhoben (Inventur). Durch wiederholte Messungen auf den Kernflächen in regelmäßigen zeitlichen Abständen kann auf mögliche Bodenveränderungen rückgeschlossen werden.

Im Folgenden werden die für die BDF-Programme bundesweit obligaten sowie die im Einzelfall als Ergänzung sinnvollen chemischen Messparameter aufgelistet. Die Parameterliste ist nicht abschließend und unterliegt künftigen Änderungen, die sich aus den konzeptionellen Anpassungen der Programme an neue Fragestellungen ergeben.

6.3.1 Probenmengen

Die jeweils zu entnehmende Bodenmenge sollte repräsentativ sein und genügend Probenmaterial für Analytik und Rückstellprobe liefern. Zur Probennahme und Bildung von Mischproben wird auf Kap. 6.1 verwiesen. Die Probenmenge für die aktuelle Analytik richtet sich nach dem Skelettanteil, nach Art und Umfang der Untersuchungen (Untersuchungsziel) sowie den angewandten Analysemethoden und muss vorab mit dem Labor abgestimmt werden.

Als grobe Orientierung kann bei umfassendem Analysenspektrum von einem Bedarf von jeweils ca. einem Liter Mineralboden oder Humusaufgabe für organische und anorganische Parameter sowie für die Radionuklidbestimmung ausgegangen werden. Um ausreichende Mengen an Rückstellproben für die Bodenprobenbank zu gewährleisten, ist ggf. die Probennahme entsprechend anzupassen.

6.3.2 Probenbehälter und Transport

Für die Untersuchungen auf anorganische Parameter und Radionuklide sind Beutel aus Polyethylen als Probengefäße ausreichend. Proben für Untersuchungen auf organische Schadstoffe müssen in kunststofffreien Transportbehältnissen, wie z. B. braunen Glasflaschen mit Schraubverschluss und zwischengelegter Aluminiumfolie transportiert werden. Die Probenbehälter müssen sauber sein. Wenn anorganische und organische Parameter an derselben Probe gemessen werden, sollten in jedem Fall Braunglasflaschen als Transportbehälter verwendet werden. Der Transport der Proben ist im gekühlten Zustand durchzuführen (z. B. mobile Kühltruhe oder zumindest Kühltaschen und umgehender Transport ins Labor). Längere Transport- und Lagerzeiten gerade bei erhöhten Temperaturen können einen unerwünschten Einfluss auf verschiedene Parameter haben (s. auch Kap. 9).

6.3.3 Probenaufbereitung

Fehler, die hier gemacht werden, sind nicht korrigierbar und haben entscheidenden Einfluss auf das analytische Messergebnis. Eine bodenkundliche Fachkraft ist für die Probenaufbereitung erforderlich. In aller Regel werden chemische Analysen nur an der Feinbodenfraktion (< 2 mm) und an Teilproben durchgeführt, was eine Probenaufbereitung z. B. durch Siebung und Teilung notwendig macht.

Kritisch ist beispielsweise beim Zerkleinerungsschritt vor der Siebung die richtige Unterscheidung zwischen Aggregaten oder Trocknungsklumpen, die zerstört werden müssen, und dem Skelettanteil zuzuordnendem Grus oder Kalk- und/oder Eisen/Mangan-Konkretionen, die nicht zerstört werden dürfen.

Hierbei ist außerdem darauf zu achten, dass die Proben nicht durch benutzte Geräte, Behältnisse oder durch gegenseitige Vermischung, z. B. infolge Luftzuges oder über die Laborluft verunreinigt werden (Querkontamination).

Darüber hinaus sollte jede generierte Teilprobe ein repräsentatives Aliquot der Gesamtprobe darstellen. Als Gemische zeigen Bodenproben aber immer eine Entmischung, deren Stärke von der

Bodenheterogenität abhängt, so dass eine identische Probenentteilung nur durch spezielle und aufwendige Maßnahmen, z. B. durch Einsatz eines Rotationsprobenteilers sichergestellt werden kann.

Weitere wichtige Hinweise für eine fehlerfreie Probenaufbereitung enthält die DIN 19 747.

6.3.4 Analysenumfang und Methoden

Um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse in einem ersten Schritt zu gewährleisten, ist in den Tab. 6-4 bis Tab. 6-7 neben der Abstimmung der zu untersuchenden Parameter auch eine Abstimmung der anzuwendenden Analyseverfahren über Nennung der Norm erfolgt.

6.3.5 Hinweise zur Qualitätssicherung bei der bodenchemischen Analytik

Analytik-Normen lassen aber in der Regel Spielräume bei der genauen Durchführung in den Details, die aber durchaus Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können. So führt jedes Labor im Detail unterschiedliche „Hausmethoden“ an, je nach vorhandenen Geräten, Gefäßen etc.. Unterschiede bestehen z. B. beim Mahlgrad bei der Königswasser (KW)-Extraktion oder z. B. beim Extraktionsverfahren ASE (beschleunigte Bodenextraktion) gegenüber Soxhlet.

Selbst bei gleichem Labor und gleichen Verfahrensschritten kann es über die Zeit zu Abweichungen bei den Messungen kommen. Neue Geräte, andere Kalibrierungen, andere Lieferanten der Standards etc. können die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen.

Eine Mindestanforderung an die analytische Qualitätssicherung ist es deshalb, jeweils alle relevanten Verfahrensschritte sehr detailliert zu dokumentieren. Der Methodencode des Umweltbundesamtes (KAUFMANN-BOLL ET AL. 2011) gibt für die erforderliche Detailtiefe einen guten Anhaltspunkt.

Tab. 6-4: Obligatorische anorganische ex-situ Messparameter an der Bodenfestsubstanz

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
pH-Wert	DIN EN 15933: 2012-11	Bestimmung des pH-Wertes des Feinbodens < 2mm, luftgetrocknet bei 40°C mit 0,01M CaCl ₂ -Lösung Suspension 1:2,5 (Moorboden, feucht, volumenbezogen), Standzeit 1h	bisher: DIN ISO 10390: 1997-5; DIN ISO 10390: 2005-12; H ₂ O/CaCl ₂ = 1:5 Suspension; Standzeit: 2 - 24h	Bewertung der Löslichkeit von Schwermetallen und Tonmineralen sowie Nährstoffzustand und damit Einfluss auf Humusbildung bzw. Humusform
Kohlenstoff C _{ges} , C _{org} , C _{anorg}	DIN EN 15936:2012-11	Bestimmung des Gesamtkohlenstoffs durch katalytische Verbrennung, Gaschromatographie und Quantifizierung mittels WLD-Detektor (GC-WLD), Einwaage 0,5-1 g trockener Boden (0,1-0,2 g Moorboden), auf <2 mm gesiebt/gemahlen, besondere Anforderungen an die Probenhomogenisierung. Bestimmung des organischen Kohlenstoffs im Differenzverfahren als C _{org} =C _{gesamt} - C _{anorg} , wobei C _{anorg} = C _{carb} . Bei pH(CaCl ₂)<6,5 gilt C _{org} =C _{gesamt} . Bei pH≥6,5 und einem Ergebnis der Carbonatbestimmung kleiner Bestimmungsgrenze, kann der angegebene C _{org} -Wert bis zu 0,05 Gew.% C _{anorg} enthalten.	alternativ Bestimmung des organischen Kohlenstoffs (C _{org}) nach VDLUFA 1991: Band I, A 4.1.3.2. - Verbrennung bei 550°C	Bewertung von Humusstatus und Humusvorrat sowie des Einflusses auf Austauschkapazität, Wasserhaushalt und Bodenbiologie
Carbonat	VDLUFA 1991, Band 1, A 5.3.1; DIN EN ISO 10693: 2014-06	Bestimmung des CaCO ₃ -Gehaltes an 2-5 mg Feinstboden (<63µm, aufgemahlen im Achatbecher) durch Versetzen der Probe mit 40%iger H ₃ PO ₄ unter Freisetzung von CO ₂ und anschließender Bestimmung des CO ₂ -Anteils im Elementaranalysator (Infrarotspektroskopie). Berechnung des Carbonatanteils.	Nur bei carbonathaltigen Böden bei pH≥6,5; alternativ Berechnung CaCO ₃ aus Differenz C _{ges} -C _{org}	Indirekt erforderliche Messgröße zur Bestimmung des C _{org} . Bewertung des Versorgungszustandes und ggf. Bodengenese

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Stickstoff-Gesamtgehalt N_{ges}	DIN EN 16168: 2012-11	Bestimmung des Gesamtstickstoffs durch katalytische Verbrennung, Gaschromatographie und Quantifizierung mittels WLD-Detektor (GC-WLD), Einwaage 0,5-1 g trockener Boden (0,1-0,2 g Moorboden), auf < 2 mm gesiebt/gemahlen, besondere Anforderungen an die Probenhomogenisierung.		Bewertung des Versorgungszustandes
KAK_{pot} (Ca, Mg, Na, K, H)	DIN ISO 13 536:1997-04	Bestimmung der potenziellen Kationenaustauschkapazität - KAK_{pot} - und der austauschbaren Kationen von Mineralböden (< 2 mm) bei pH 8,1 (nach Mehlich) in 2 Schritten 1. Schritt: Perkolation mit Bariumchlorid/Triethanolamin-Lösung pH 8,1 2. Schritt: Perkolation mit 0,1 M $MgCl_2$ -Lsg., Standzeit jeweils über Nacht. Bestimmung mit ICP-OES		Maximal mögliche Adsorptionsleistung gegenüber Schadstoffeinträgen. Bewertung der potenziellen Menge an den pflanzenverfügbaren Nährstoffen z. B. Calcium, Magnesium und Kalium. Ableitung der Gesamtfilterwirkung der Böden
KAK_{eff} (Ca, Mg, Na, K, Al, H, Mn, Fe)	HFA A3.2.1.6 / 3.2.1.9	Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität des Feinbodens (luftgetrocknet bei 40°C, < 2 mm) sowie der austauschbaren Kationen mit 0,2 n $SrCl_2$ Lösung und Rücktausch mit 0,2 n $MgCl_2$, Unabhängig vom Boden-pH Messung mittels ICP-OES; H-Wert mittels pH-Messung	Hat auf gedüngten landwirtschaftlich genutzten Flächen keine Aussagekraft	Derzeitige Adsorptionsleistung gegenüber Schadstoffeinträgen, Bewertung des derzeitigen Versorgungszustandes.

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Königswasser – extrahierbare Gehalte von Mengen- und Spurenelementen, sowie von Schwermetallen und As nach BBodSchV	DIN EN 16174: 2012-11 HBU 3.1.3.1a	Druckloser thermischer Extrakt im Rückfluss von Bodenproben (Mineralboden oder Moor- oder Anmoorboden, luftgetrocknet bei 40°C, < 2 mm, gemahlen < 63 µm) mit Königswasser; Abkühlen und Filtern. Messung mittels ICP-MS/MS. Die Extraktion kann sowohl unter Rückflussbedingungen (Verfahren B) als auch in der Mikrowelle (Verfahren A) durchgeführt werden. Die Vergleichbarkeit des Verfahrens A mit dem Verfahren B wurde nachgewiesen.	Mengenelemente: Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S Spurenelemente: Mo, Sb, Se, Ti, U, V Schwermetalle und As nach BBodSchV: As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Abschätzung langfristig maximal mobilisierbarer Elementgehalte in Böden. Entspricht der Elementfraktion, die durch menschliche Einflüsse veränderbar ist. Je nach Mineralbestand des Bodens sind zwischen 50 - 100 % des Elementgehaltes in Königswasser (KW) löslich. Ein bestimmter Anteil kann in KW-unlöslichen Mineralien enthalten sein.
Königswasser – extrahierbare Gehalte: Hg	DIN EN 16174: 2012-11	Druckloser thermischer Aufschluss von Bodenproben (z. B. Mineralboden oder Moor- oder Anmoorboden, lufttrocken, gesiebt <2mm; feingemahlen < 63 µm) mit Königswasser, Abkühlen und Filtern, Reduktion des in Ionenform vorliegenden Quecksilbers durch Zinn-Chloridlösung zu atomarem Quecksilber, Bestimmung mit Kaltdampf-AAS oder Kaltdampf-AFS	Schwermetalle und As nach BBodSchV: Hg	Abschätzung langfristig maximal mobilisierbarer Elementgehalte in Böden. Entspricht der Elementfraktion, die durch menschliche Einflüsse veränderbar ist. Je nach Mineralbestand des Bodens sind zwischen 50 - 100 % des Elementgehaltes in KW löslich. Ein bestimmter Anteil kann in KW-unlöslichen Mineralien enthalten sein.

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Langlebige Radionuklide: ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs	BMU (1997)	Trocknung und Mahlung; Abfüllung von 100 g in PP-Dose; Verdichtung mit Pressstempel, Messung der Füllhöhe; Positionierung PP-Dose mittig auf Detektorendkappe, Messzeit 200.000 sec; Messung mit Reinst-Germanium-Detektor (Firma Canberra); Ermittlung der Photonenstrahlung im Energiebereich von 30 keV bis 3 MeV.	auch ⁴⁰ K, ²³² Th, ²³⁸ U	Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt. Tracer für Erosionsprozesse.
Schwefel-Gesamtgehalt S _{ges}	DIN ISO 15178: 2001-02	Bestimmung des Gesamtschwefels an 15 mg Feinstboden (< 63µm; aufgemahlen in Achatbecher) durch Elementaranalyse (trockene Verbrennung bei 1150°C) mit CNS Elementanalysator (VarioELcube Elementar). Detektion der Analytgase mithilfe eines Wärmeleitfähigkeitsdetektors.		Bewertung des Versorgungszustandes
Glühverlust	DIN 18128: 2002-12	Bestimmung des Glühverlusts und des Glührückstandes bei 550°C	Bei den Untersuchungen von Böden, die Tone und Sesquioxide enthalten, erhält man einen zu hohen Glühverlust, da diese bei den hohen Temperaturen Kristallwasser verlieren.	Proxy für Humusanteil

Tab. 6-5: Obligatorische organische ex-situ Messparameter an der Bodenfestsubstanz

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
<p>PCB6: Polychlorierte Biphenyle: PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180</p>	<p>VDLUFA 2017 Methodenbuch VII</p>	<p>Schüttelextraktion der feldfeuchten Probe mit Gemisch aus Aceton/Wasser/Petrolether unter Zugabe von Natriumchlorid und Wiederfindungsstandard über Nacht; Trocknung der organischen Phase über Natriumsulfat, Einengung am Rotationsverdampfer bei 60°C auf ca. 2 ml; Reinigung an einer Festphase (Kieselgel 10% H₂O); Elution mit n-Hexan/Toluol [Norm-Abweichung: Hexan/Toluol statt Petrolether/Dichlormethan]; Auftrennung mittels Kapillargaschromatographie, Detektion mittels Elektroneneinfangdetektor (ECD); Quantifizierung mittels Methode des internen Standards.</p>		<p>Umweltschadstoff, POP-Konvention</p>
<p>Chlorpestizide: HCB, α-, β-, γ-, δ- HCH, op-, pp-DDD, op-, pp-DDT, op-, pp-DDE; sowie: Aldrin, Dieldrin, α-, β- Endosulfan, Endrin, Heptachlor, Heptachlorepoxyd, Hexachlorbenzol</p>	<p>VDLUFA 2017: Methodenbuch VII</p>	<p>Schüttelextraktion der feldfeuchten Probe mit Gemisch aus Aceton/Wasser/Petrolether unter Zugabe von Natriumchlorid und Wiederfindungsstandard über Nacht; Trocknung der organischen Phase über Natriumsulfat, Einengung am Rotationsverdampfer bei 60°C auf ca. 2 ml; Reinigung an einer Festphase (Kieselgel 10% H₂O); Elution mit n-Hexan/Toluol [Norm-Abweichung: Hexan/Toluol statt Petrolether/Dichlormethan]; Auftrennung mittels Kapillargaschromatographie, Detektion mittels Elektroneneinfangdetektor (ECD); Quantifizierung mittels Methode des internen Standards.</p>	<p>alternative Referenz: DIN ISO 10 382: 2003-5 - Extraktion mit Aceton/Petrolether und Schüttelextraktion</p>	<p>Umweltschadstoff, POP-Konvention</p>

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe: 16 PAK (nach EPA)	DIN ISO 13 877:2000-01	Schüttelextraktion der feldfeuchten Probe mit Aceton und Wiederfindungsstandard für 15 min, dann Zugabe von Petrolether und nochmals 15 min; nach Sedimentation Dekantierung und zweimaliges Schütteln mit Wasser; Trocknung der organischen Phase über Natriumsulfat, Einengung am Rotationsverdampfer bei 40 bis 60°C auf ca. 2 ml; Reinigung an einer Aluminiumoxid-Festphase, Auftrennung mittels HPLC, Detektion mittels FLD (Acenaphtylen mittels DAD/VWD); Quantifizierung mittels Methode des externen Standards.	-	Umweltschadstoff, POP-Konvention

Tab. 6-6: Ergänzend empfohlene anorganische ex-situ Messparameter an der Bodenfests substanz

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
KAK _{pot} (Ca, Mg, Na, K, H+) bei pH 4,5 und 7,0 für Moore und Anmoore	Hausmethode LBEG (Niedersachsen): VDLUFA Methodenbuch 1991, Band 1, A 9.1.1 (zurückgezogen), in Anlehnung an DIN 19 684-8:1977-02 (zurückgezogen)	Kationenaustauschkapazität (KAK) und austauschbare Kationen von Moor- und Anmoorböden, Perkolation mit Bariumacetat (pH 7) oder Strontiumchlorid (pH 4.5), anschließend mit Magnesiumchlorid	Moor- und Anmoorböden	Maximal mögliche Adsorptionsleistung gegenüber Schadstoffeinträgen in Moor- und Anmoorböden. Bewertung der potenziellen Menge an den pflanzenverfügbaren Nährstoffen z. B. Calcium, Magnesium und Kalium. Ableitung der Gesamtfilterwirkung der Moor- und Anmoorböden

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Amorphe Oxide Fe _{ox} , Mn _{ox} , Al _{ox}	DIN 19 684-6: 1997-12	Bestimmung des oxalatlöslichen (amorphe Oxide) Elementgehaltes im Feinboden. Extraktion mit 0,09 M- Oxalsäure und 0,11 M- Ammoniumoxalat mit NH ₃ auf pH 3,2 eingestellt, dunkel, da Extraktionslösung empfindlich gegenüber Tageslicht ist. Daher frische Lösung benutzen und in einer dunklen Flasche aufbewahren. Suspension 1:100, 2 h Schütteln, Filtration, Bestimmung mit ICP-OES	Neben den leichtlöslichen amorphen Eisenoxiden, -hydroxiden und -oxidhydraten wird auch organisch komplexiertes Eisen extrahiert. Enthält eine Probe einen sehr hohen Gehalt an organischer Substanz, kann der oxalat-extrahierbare Anteil den dithionitlöslichen Anteil übersteigen.	Beurteilung des Mobilisierungspotentials von Schwermetallen aus der Fraktion der amorphen Oxide. Rückschlüsse auf pedogenetische Prozesse; Berechnung des Aktivitätsgrades (Oxalat/Dithionit-Verhältnis); Beurteilung der Verockerungsgefahr. Siehe auch sequenzielle Extraktionsverfahren nach ZEIEN & BRÜNNER (1989)
Kristalline Oxide Fe _{dit} , Mn _{dit} , Al _{dit}	Methode nach MEHRA & JACKSON 1960	Bestimmung des dithionitlöslichen (kristalline Oxide) Elementgehaltes im Feinboden. Extraktion mit 4 Teile 0,3 M Natriumcitrat und 1 Teil 1 M Natriumhydrogencarbonat und 1g/g Boden Natriumdithionit bei 75°C, Suspension 1:50, Zentrifugieren und Dekantieren, Rückstand mit 0,05 M Magnesiumsulfat waschen, Bestimmung mit ICP-OES	Liegen die Oxide in größeren Konkretionen vor, sind Minderbefunde möglich. Erhält eine Probe einen sehr hohen Gehalt an organischer Substanz, kann der Oxalat-extrahierbare Anteil den dithionit-löslichen Anteil übersteigen	Beurteilung des Mobilisierungspotentials von Schwermetallen aus der Fraktion der amorphen Oxide. Rückschlüsse auf pedogenetische Prozesse; Berechnung des Aktivitätsgrades (Oxalat/Dithionit-Verhältnis); Beurteilung der Verockerungsgefahr. Siehe auch sequenzielle Extraktionsverfahren nach ZEIEN & BRÜNNER (1989)
Mg pflanzenverfügbar	VDLUFA 1991, Band 1, A 6.2.4.1	Bestimmung des pflanzenverfügbaren Magnesiums. Extraktion mit 0,0125 M Calciumchlorid Dihydrat, Suspension 1:10 (bei Moorboden volumenbezogen), 2 h Schütteln, Filtration, Bestimmung mit ICP-OES	Methode an Feldversuchen geprüft. Bei sandigen Böden werden ca. 80%, bei Tonböden ca. 60% des extrahierbaren Mg erfasst	Abschätzung von verfügbaren Nährstoffmengen und deren Bilanzierung für den Boden

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Mn aktiv	VDLUFA 2004, Band 1, A 6.4.1	Bestimmung des austauschbaren und leicht reduzierbaren Mangans im Feinboden nach Extraktion mit Calciumchlorid und Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA) und Messung mittels AAS		Abschätzung von verfügbaren Mikronährstoffmengen (Mangan) und deren Bilanzierung für den Boden
P und K CAL-löslich	VDLUFA 1991, Band 1, A 6.2.1.1	Extraktion mit 0,05 M Calcium-L-Lactat Pentahydrat, 0,31 M Essigsäure (96 %) und 0,05 M Calciumacetat, Suspension 1:20 (Moore volumenbezogen 1:10), Schütteln 1,5 h, Filtration, Bestimmung mit ICP-OES	Infolge höherer Ca-Konzentrationen zeigt die CAL-Methode gegenüber DL-Methode apatitische Phosphate nicht an. Der P-Versorgungszustand saurer, mit weicherdigen Rohphosphaten gedüngten Böden wird etwas unterbewertet. Die K-Konzentrationen liegen niedriger als bei DL-Methode	Abschätzung von verfügbaren Makronährstoffmengen und deren Bilanzierung für den Boden. Beziehung der P- und K-Werte zum Pflanzenwachstum (Düngerbedarf). Auch zur Bewertung möglicher Überdüngungen mit Phosphat.
P und K DL-löslich	VDLUFA 1991, Band 1, A 6.2.1.2	luftgetrocknet bei 40°C, < 2 mm, Extraktion mit 0,2 M Calciumlactat, 0,2 mol Salzsäure, 5 g auf 250 ml Lösung, 2 h geschüttelt. Messung mittels UV-VIS mit Photo-Rex	Methode ist an zahlreichen Feldversuchen zur Ermittlung des Düngerbedarfs geeicht. Die Methode führt zu Fehlinterpretationen bei Böden mit Carbonatgehalten über 5%.	Abschätzung von verfügbaren Makronährstoffmengen und deren Bilanzierung für den Boden. Beziehung der P- und K-Werte zum Pflanzenwachstum (Düngerbedarf). Auch zur Bewertung möglicher Überdüngungen mit Phosphat.
B, Mo	VDLUFA 2004, Band 1, A 6.4.1	Bestimmung von pflanzenaufnehmbarem B und Mo im Feinboden Extraktion mit Calciumchlorid und Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA) mittels ISP-OES oder photometrisch		Abschätzung von verfügbaren Mikronährstoffen und deren Monitoring vs. Bilanzierung im Boden

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
NO ₃ - und NH ₄ -Stickstoff	VDLUFA 1991, Band 1, A 6.1.4.1	Bestimmung mineralischer Stickstoffverbindungen (N _{min} = NO ₃ -N und NH ₄ -N) im Feinboden nach Extraktion mit Calciumchlorid [0,0125 mol/l] mittels Photometer		Bestimmung von leicht pflanzenverfügbaren, d. h. aktuell mineralisierter Stickstoffverbindungen im Boden
Totalgehalte: Ca, Mg, Al, Fe, K, P, Na, Cl, F	DIN EN 15309: 2007-08	Bestimmung der Totalgehalte im Feinboden mittels RFA (Presstablette); Bestimmung der Totalgehalte nach Säureaufschluss mittels ICP-MS/OES Aufschluss mittels Fluss-, Salpeter- und Salzsäure		Abschätzung der totalen Elementgehalte in Böden; Elementbestand der Böden werden zu 100 % erfasst, da auch Elemente, die in unlöslichen Silikaten und Oxiden enthalten sind, erfasst werden.
Totalgehalte: B, Cd, Cr, Cu, F, Ni, Pb, Zn, Mo, As, Hg, Tl, U, V	DIN EN 15309: 2007-08; DIN EN 13656: 2021-07	Bestimmung der Totalgehalte im Feinboden mittels RFA (Presstablette); Bestimmung der Totalgehalte im Feinboden nach Säureaufschluss und Messung mittels ICP-MS Aufschluss erfolgt mittels Fluss-, Salpeter- und Salzsäure.		Abschätzung der totalen Elementgehalte in Böden; Elementbestand der Böden werden zu 100 % erfasst, da auch Elemente, die in unlöslichen Silikaten und Oxiden enthalten sind, erfasst werden.

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
NH ₄ NO ₃ -extrahierbare Schwermetalle und As	Elution: DIN ISO 19730:2009-07	Extraktion von Bodenproben (20 g) mit 1 M Ammoniumnitrat, Suspension 1:2,5, Schütteln 2 h, Zentrifugieren und Filtern. Extraktstabilisierung mit konzentrierter HNO ₃ . Bestimmung mittels ICP-MS		Abschätzung leicht mobilisierbarer (Proxy für Pflanzenverfügbarkeit) Schwermetallgehalte in Böden. Ergebnis ist stark abhängig von Boden-pH, untergeordnet auch vom Tongehalt. Sehr geringe Löslichkeiten gegenüber KW, speziell im neutralen pH-Bereich, weshalb nur ein sehr geringer Anteil des Schwermetallbestands erfasst wird.
elektrische Leitfähigkeit	DIN ISO 11265: 1997-06	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Bodensättigungsextrakten		

Tab. 6-7: Ergänzend empfohlene organische ex-situ Messparameter an der Bodenfestsubstanz

Parameter	Aktuell empfohlene Methoden	Kurzbeschreibung des Verfahrens	Bemerkung	Zielsetzung
Polychlorierte Dibenzodioxine / Dibenzofurane (PCDD/PCDF)	AbfKlärV Anhang 1, Abschnitt 1.3.3.2 VDLUFA Methodenbuch VII DIN 38 414-24: 2000-10	Gefriertrocknung, Sieben < 2 mm, Soxhletextraktion mit Toluol und Einengung, Bestimmung: GC-MS	die zeitgemäße Extraktionsmethode ist hier die ASE	
	DIN EN 16190: 2019-10	Gefriertrocknung, Sieben < 2 mm, Soxhletextraktion mit Toluol, Bestimmung: GC-HRMS (Isotopenverdünnungsverfahren)	die zeitgemäße Extraktionsmethode ist hier die ASE	
coplonare PCB (dl-PCB)	VDLUFA Methodenbuch VII DIN 38 414-24: 2000-10	Gefriertrocknung, Sieben < 2 mm, Soxhletextraktion mit Toluol und Einengung, Bestimmung: GC-MS (Bestimmung am gleichen Extrakt wie PCDD/PCDF)	die zeitgemäße Extraktionsmethode ist hier die ASE. Empfohlene Messmethode wegen BG ist die HRGC/HRMS	
PFAS	Feststoff: DIN 38 414-14:2011-08 Eluat: DIN 38 407-42: 2011-03	Feststoff: Trocknung, Extraktion mit Methanol, Bestimmung mit HPLC-MS/MS	BG des Methanolextrakts i. d. R. höher als Hintergrundgehalte. Bei beiden Methoden uneinheitlichen Umgang mit der Bodenaufbereitung und damit der tatsächlich extrahierten Fraktion zwischen den Laboren beachten.	

6.3.6 Qualitätssicherung über Referenzierung anhand von Rückstellproben

Eine weitgehende Kompensation analytischer Messartefakte lässt sich durch das Mitmessen von Rückstellproben desselben Standorthorizonts aus der Vorgängerinventur in der gleichen Messserie erreichen. Das ist nützlich, wenn es nicht auf die absolute Richtigkeit eines Messwertes ankommt, sondern nur auf die Richtigkeit der Differenzen zwischen Werten einer Zeitreihe.

Voraussetzung hierfür ist eine identische Aufbereitung der jeweiligen Probenserien. Für die organische Analytik etwa bedeutet dies, dass immer aus luftgetrockneten Proben analysiert werden muss, falls nicht – wie bei den meisten BDF-Betreibenden – eine langfristige Tiefkühlagerung zur Verfügung steht.

Dieses Verfahren ermöglicht unter Mehraufwand die bestmögliche Neutralisierung analytischer Fehler innerhalb einer Zeitreihe und verbessert damit das Erkennen von zeitlichen Veränderungen zwischen Wiederholuntersuchungen entscheidend.

7 Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt

7.1 Aufgaben der Bodenwasser-Messplätze

Die Entwicklung von Pflanzen ist abhängig von der Bodenfeuchte am Standort. Daher werden alle Wachstumsprozesse der Vegetation durch die Verfügbarkeit von Bodenwasser gesteuert. Aber auch Abbauprozesse werden durch Bodenwasser gesteuert, beispielsweise wirkt stauwasserbedingter Sauerstoffmangel hemmend. Daneben ist ein wesentlicher Teil des Stofftransports im Boden an die jeweiligen Wasserflüsse gebunden.

Die Beobachtung des Bodenwasserhaushalts gehört zur Prozessdokumentation und wird auf Intensiv-BDF durchgeführt. Direkt messbar sind Zustandsgrößen wie Wassergehalt und Saugspannung sowie Bodenwasserkonzentrationen, die Wasserflüsse und wassergebundenen Stoffflüsse dagegen können nur mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen berechnet werden.

Weitere nützliche Hinweise finden sich im DWA-Merkblatt „Gewinnung von Bodenlösung, Beprobungssysteme und Einflussgrößen“ (DWA 2012).

7.2 Grundsätze zum Aufbau der Messplätze für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts

Zur Kalibrierung und Validierung der Wasserhaushaltsmodelle und zur Bestimmung der Bodenwasserverfügbarkeit ist die Messung des volumetrischen Wassergehalts und/oder des Matrixpotentials im Boden in hoher zeitlicher Auflösung erforderlich (PAIGE & KEEFER 2008, RASPE ET AL. 2013, DURNER ET AL. 2017).

Mindestanforderungen an die Messeinrichtungen sind:

- Sensoren zur Messung des Matrixpotentials (Wasserspannung) (Tensiometer bzw. Matrixsensoren) in mehreren Wiederholungen (mindestens drei je Tiefenstufe) in mindestens

denselben Tiefenstufen, in denen die Bodenlösungs-Probennahme mit Saugsonden erfolgt (s. Kap. 7.3, DURNER & OR 2006),

- Messung des volumetrischen Bodenwassergehalts in mehreren Wiederholungen (mindestens drei je Tiefenstufe) in mindestens denselben Tiefenstufen, in denen die Bodenlösungs-Probennahme mit Saugsonden erfolgt (s. Kap. 7.3),
- Messung der Niederschlagsmenge und -intensität mit einer Auflösung von 0,2 mm und einer zeitlichen Auflösung von < 1 Stunde,
- in Waldbeständen auch die Messung der Kronentraufe sowie des Stammablaufs (nur Buchenbestände) in gleicher Auflösung wie die Niederschlagsmenge.

Wenn möglich, sollten volumetrischer Wassergehalt und Matrixpotential in den gleichen Tiefenstufen und zu gleichen Zeitpunkten in mindestens stündlicher Auflösung gemessen werden. Dies ermöglicht die Bestimmung von Feld-Wasserspannungsfunktionen. Darüber hinaus wird empfohlen, in den Tiefenstufen der Bodenfeuchtemessungen Stechzylinderproben zu entnehmen und daran die Wasserspannungsfunktionen (Wasserspannungskurve, pF-WG-Kurve) im Labor zu bestimmen.

Die Matrixpotentialmessung erfolgt mit Tensiometern im Saugspannungsbereich zwischen 0 und ca. -900 hPa oder mit Matrixsensoren über einen weiteren pF-Bereich mindestens bis zum permanenten Welkepunkt bei -15.000 hPa. Mit Tensiometern ist nur der Saugspannungsbereich bis zur Untergrenze des leicht pflanzenverfügbaren Wassers messbar. Bei höheren Saugspannungen werden die Tensiometer durch Entleeren außer Funktion gesetzt und müssen vor einem Weiterbetrieb neu mit entlüftetem Wasser befüllt werden. Da die Messungen über längere Zeiträume zu konzipieren sind, eignen sich Tensiometer mit Befüllbarkeit im eingebauten Zustand besser als solche, die zum Frostschutz und zur Befüllung ausgebaut werden müssen. Elektronische Druckaufnehmer in unmittelbarem Kontakt mit der Messzelle ermöglichen kurze Reaktionszeiten, so dass auch schnelle Prozesse, wie z. B. der Wasservorstoß auf bevorzugten Sickerwegen, erfasst werden können.

Die Tiefenanordnung der Sensoren ist in jedem Profil sinnvoll mit der Lage der Bodenhorizonte und der Durchwurzelungstiefe abzustimmen. Die räumliche Anordnung von Wiederholungen ist von der Bodensituation und den verwendeten Sensoren abhängig. Mindestanforderungen ergeben sich aus international abgestimmten Programmen wie dem Pan-Europäischen Level II-Programm unter ICP Forests (RASPE ET AL. 2013).

Empfohlen wird die Bodenwasserstatusmessung (Wassergehalt und/oder Saugspannung) möglichst bis zur maximalen Durchwurzelungstiefe durchzuführen, um die gesamte Ausschöpfungstiefe für Wasser zu erfassen und damit den gesamten Bodenbereich, in dem eine Wasserhaushaltsdynamik stattfindet.

Saugspannungsmessungen können daneben auch zur Steuerung der Saugpumpen verwendet werden, mit denen über Saugsonden Bodenwasser gewonnen wird.

7.3 Probennahme der Bodenlösung

Über die Bodenlösung findet der Austausch zwischen der Bodenfestphase und den Wurzeln von Pflanzen sowie anderen Bodenorganismen statt. Gleichzeitig erfolgt der Transport von Nähr- und Schadstoffen zwischen den Bodenkompartmenten vorwiegend über die Bodenlösung. Dementsprechend ist die Bodenlösung ein wertvoller Indikator für zahlreiche Bodenprozesse, etwa für Stressfaktoren, die auf die beobachteten oder angrenzenden Ökosysteme einwirken können (NIEMINEN ET AL. 2013). Die Zusammensetzung der Bodenlösung wird durch vielfältige biogeochemische Prozesse gesteuert, zu denen der Eintrag atmosphärischer Depositionen, Interaktionen zwischen Bodenfest-, Bodenlösungs- und Bodengasphase sowie biologische Aktivitäten gehören. Durch die Bestimmung von Stoffkonzentrationen in der Bodenlösung in Kombination mit Wasserhaushaltsmodellen zur Berechnung der Wasserflüsse lassen sich Stofftransportraten mit dem Sickerwasser abschätzen (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER 2005). Zusammen mit anderen wichtigen Eintrags- und Austragsgrößen lassen sich Stoffbilanzen für die betreffenden BDF berechnen, die z. B. Aussagen zur Nachhaltigkeit der Landnutzung zulassen (MEESENBURG ET AL. 2016).

7.3.1 Ziele der Bodenlösungsbeprobung

Ziele der Bestimmung der Zusammensetzung der Bodenlösung sind (NIEMINEN ET AL. 2013):

- die Erfassung von langfristigen Veränderungen der Bodenlösung als Folge von natürlichen und anthropogenen Prozessen (z. B. atmosphärische Deposition, Klimawandel, Nutzungsänderung),
- Bestimmung von Stofftransportraten zwischen Bodenkompartimenten zur Abschätzung von Bodenveränderungen,
- die Ermittlung von Stoffaustragsraten aus BDF zur Abschätzung der Gefährdung angrenzender Ökosysteme (z. B. Grundwasser),
- die Bestimmung der Stoffbilanzen von BDF in Abhängigkeit von Stoffeinträgen und Bewirtschaftung,
- die Quantifizierung der zeitlichen und räumlichen Variabilität der Inhaltsstoffe zum besseren Verständnis der Dynamik und der räumlichen Muster der Bodenlösung.

7.3.2 Einrichtungen zur Gewinnung von Bodenlösung

Methoden zur Gewinnung der Bodenlösung lassen sich in destruktive und nicht-destruktive Verfahren einteilen. Bei den destruktiven Verfahren erfolgt die Gewinnung der Bodenlösung mittels Extraktion, Zentrifugation oder Osmoseverfahren aus Proben, die aus dem Boden entnommen werden. Aufgrund der regelmäßigen destruktiven Entnahme von Bodenproben eignen sich diese Verfahren nicht für die Boden-Dauerbeobachtung.

Die nicht-destruktive Gewinnung der Bodenlösung erfolgt mittels Sammlern (Lysimeter), die am gleichen Ort über einen längeren Zeitraum im Boden installiert sind. Es lassen sich Sammler unterscheiden, an die ein Unterdruck angelegt wird (Saugsonden), und frei dränende, in die die Bodenlösung ausschließlich durch die Schwerkraft gelangt (LITAOR 1988).

Saugsonden sind die am häufigsten im Bereich der Boden-Dauerbeobachtung verwendeten Kollektoren für Bodenlösung. Saugsonden können in zylindrischer Form als Saugkerzen oder als Saugplatten zum Einsatz kommen (WEIHERMÜLLER ET AL. 2007). Sie bestehen aus einem porösen Material, das mit einem Träger und über eine Schlauchleitung mit einem Sammelgefäß und dem Unterdrucksystem verbunden ist. Das poröse Material ist oberhalb eines materialspezifischen Matrixpotentials (Luftdurchtrittspunkt möglichst > -1000 hPa) wassergesättigt und deshalb für Wasser, nicht jedoch für Luft durchlässig. Als Materialien kommen verschiedene Keramiken, Kunststoffe oder gesintertes Glas, Edelstahl und Siliziumkarbid in Betracht (Tab. 7-1) (WEIHERMÜLLER ET AL. 2007). Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass das Material keine Interaktionen mit den zu bestimmenden Stoffen eingeht.

Es ist am Markt inzwischen eine große Auswahl verschiedener Produkte und Materialkombinationen erhältlich, mit jeweils eigenen produkttypischen Eigenschaften, die sich produktionstechnisch über die Zeit auch ändern können. Vor einem Einbau werden deshalb produktspezifische Eignungsprüfungen empfohlen. Der Umfang praktischer Erfahrungen nimmt kontinuierlich zu und kann bei den BDF- oder Level-II-Betreibenden in der jeweils aktuellsten Form abgefragt werden.

Die Erzeugung des Unterdrucks kann kontinuierlich oder intermittierend mit konstantem oder variabel gesteuertem Druck erfolgen (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER 2005). Empfohlen wird eine an die aktuell gemessene Saugspannung angepasste Unterdrucksteuerung mit einer Druckdifferenz von ca. -50 bis -200 hPa.

Tab. 7-1: Orientierende Eigenschaften verschiedener Saugsonden-Materialien

Saugkerze	chemische Eigenschaften	mechanische Eigenschaften	Bemerkungen
P80	hohe Austauschkapazität, für Cd, Ni, Zn, NO ₃ gut geeignet, für Cu, Pb, P und DOC problematisch	Luftdurchtrittspunkt > 1000 hPa	sehr lange Konditionierung, kostengünstig, viele Anbieter
Teflon/Glas bzw. Quarz	hydrophob, für Cd, Ni, Zn gut geeignet, für Cu, Pb problematisch	hohe mechanische Stabilität	sehr lange Konditionierung, teuer, viele Anbieter
Nylon	geringe Austauschkapazität, für alle Metalle, Anionen gut geeignet	geringe mechanische Stabilität	wenige Anbieter
Borosilikatglas	geringe Austauschkapazität, für Cd, Ni, Zn, Cu, Pb, P und DOC gut geeignet, zufriedenstellend für PAK, PCB	geringe mechanische Stabilität, Luftdurchtrittspunkt 400 hPa	teuer, viele Anbieter
Edelstahl	geringe Austauschkapazität, sehr gut geeignet für Alkali-, Erdalkalimetalle, Anionen, gut geeignet für Zn, zufriedenstellend für PAK, PCB	sehr hohe mechanische Stabilität, Luftdurchtrittspunkt 600 hPa, mittlere Porenweite der Filterschicht 1 µm	teuer, wenige Anbieter. Im Sauren Kontamination mit Cr, Ni und weiteren SM
Siliziumkarbid	Eignung wie Borsilikatglas	sehr hohe mechanische Stabilität, Luftdurchtrittspunkt 1600 hPa, mittlere Porenweite der Filterschicht 0,9 µm	Bisher nur wenige Erfahrungen vorhanden

7.3.3 Einbau von Saugsonden zur Bodenlösungsgewinnung

Die Installation der Saugsonden sollte in mindestens drei Tiefenstufen (A-, B- und C-Horizont) erfolgen. Die unterste Tiefenstufe sollte unterhalb der Hauptwurzelzone liegen, um den Sickerwasseraustrag charakterisieren zu können. In Waldböden mit einer mächtigen Humusauflage (Moder bzw. Rohhumus) sind auch unter der Humusauflage Saugsonden zu installieren. Bei BDF mit Bodenbearbeitung muss die Installation so weit unterhalb des Pflug-Horizontes erfolgen, dass die Saugsonden durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (z. B. Befahrung) nicht beschädigt werden. Eine Einbautiefe zwischen 70 und 75 cm hat sich dabei bewährt, bei Mulchverfahren erwiesen sich auch Einbautiefen von 20 cm als langzeitstabil.

Saugkerzen können horizontal von einem Installationsschacht, vertikal oder in einem Winkel (z. B. 45°) zur Bodenoberfläche eingebaut werden. Saugplatten müssen in jedem Fall horizontal installiert werden. Der horizontale Einbau ist besonders aufwändig, gewährleistet aber die geringste Störung der Bodensäule oberhalb der Saugsonde. Hier ist jedoch auf einen ausreichenden Abstand der Saugsonde von der Störung durch den Einbauschacht zu achten. Bei einem vertikalen Einbau wird die Installation einer Gummimanschette um den Schaft empfohlen, um ein bevorzugtes Fließen entlang des Schafts zu unterbinden. Bei einem schrägen Einbau sollte eine Vorrichtung zum Einhalten des vorgesehenen Winkels verwendet werden, um die geplante Einbautiefe möglichst exakt einzuhalten. Bei allen Einbauarten darf die Bodensäule oberhalb der Saugsonde nicht gestört werden (z. B. durch Betreten), damit Bodenstruktur und Bewuchs nicht verändert werden.

Saugsonden sind gemäß Herstellerangaben zu reinigen. Teilweise wird empfohlen, die Saugsonden vor dem Einbau mit der zu erwartenden Bodenlösung ins Gleichgewicht zu setzen (zu konditionieren). Allerdings ist nach der Installation von Saugsonden ohnehin eine Phase der Gleichgewichtseinstellung nach der durch den Einbau verursachten Bodenstörung zu berücksichtigen. Während dieser Phase kann sich *in situ* ein neues Gleichgewicht zwischen Bodenlösung und Saugsondenmaterial einstellen.

Ob sich neue Gleichgewichte erst einstellen müssen, hängt neben dem Saugsondenmaterial auch vom Standort und den Messparametern ab. Erkannt werden können auftretende Artefakte anhand des zeitlichen Verlaufs der Bodenwasserkonzentrationen. Adsorptionsartefakte sollten sich durch untypisch ansteigende Bodenwasserkonzentrationen bemerkbar machen. Um typische von untypischen Konzentrationsverläufen unterscheiden zu können, sind mehrjährige Messreihen erforderlich.

7.3.4 Anzahl von Wiederholungen und räumliche Anordnung

Die Anzahl der Wiederholungen und die räumliche Anordnung der Saugsonden sollte so gewählt werden, dass die BDF hinsichtlich der mittleren stofflichen Zusammensetzung der Bodenlösung einschließlich deren Streuung repräsentiert wird. Lässt sich dies im Voraus für einen neu einzurichtenden Messplatz nicht ermitteln, müssen auf Erfahrungswerte laufender Untersuchungen zurückgegriffen werden.

Als minimale Anforderung werden vier Wiederholungen pro Messtiefe festgelegt. Steht die Bestimmung von Stoffbilanzen im Fokus der Betrachtungen, werden mindestens 10 Wiederholungen empfohlen (NIEMINEN ET AL. 2016). Um die Anzahl von Wiederholungen zu reduzieren, wird die Durchführung von Vorstudien mit einer höheren Anzahl von Wiederholungen empfohlen (AHRENDTS ET AL. 2017 a, b).

Es sollten möglichst alle Proben einzeln analysiert werden. Es können jedoch auch Proben gemischt werden, wenn die Analysenanzahl reduziert werden soll oder die Probenmenge einzelner Sonden für die Analytik nicht ausreicht. In diesen Fällen sollten jeweils das gesamte Probenvolumen oder mengengewichtete Probenaliquote gemischt werden: falls angenommen werden kann, dass das Probenvolumen einer individuellen Saugflasche proportional ist zur tatsächlichen kleinräumlichen Sickerate am Ort der Saugsonde, dann muss jeweils das gesamte Probenvolumen gemischt werden, um eine flussgerechte Mischprobe zu erhalten. Hängen dagegen die Einzelvolumina einer Beprobungstiefe eher von technischen Gegebenheiten ab (Unterdruckunterschiede wegen verschiedenen Schlauchlängen, Lecks, unterschiedlicher Kontakt zur Matrix aufgrund des Einbaus), so ist von jeder Flasche jeweils nur immer die gleiche Menge zu vereinen. Dies ist mit dem Nachteil verbunden, Probenvolumen zu verlieren.

Die Ermittlung anderer Stoffflusskomponenten (z. B. atmosphärische Stoffeinträge) sollte möglichst nahe bei der Bodenlösungsbeprobung liegen, ohne dass sich die Beobachtungen gegenseitig stören. In jedem Fall sollten beide Messplots weitgehend die gleichen Standortverhältnisse hinsichtlich der Bodeneigenschaften, Nutzung und Immission aufweisen.

7.3.5 Sammelzeiträume und Probentransport

Sammelzeiträume sollten möglichst kurz sein, um mikrobielle Umsetzungen der Proben zu minimieren. Es wird ein maximal zweiwöchiger Probennahmerhythmus empfohlen. Je nach Witterung und Erreichbarkeit der BDF kann der Sammelzeitraum in Ausnahmen oder bei Proben-Kühlung auch bis zu 4 Wochen betragen. Die Probennahmetermine sollten mit denen anderer Stoffflussmessungen synchronisiert werden. Während des Sammelzeitraums müssen die Proben dunkel und kühl (möglichst Bodentemperatur) gelagert werden. Als Sammelgefäße eignen sich Flaschen aus Borosilikatglas. Die Probenmenge jedes einzelnen Sammelgefäßes sollte mittels graduierter Sammelgefäße oder Waagen bestimmt werden, das Umfüllen in Messzylinder sollte wegen der Kontaminationsgefahr vermieden werden. Der Probentransport zum Labor erfolgt dunkel und gekühlt in Gefäßen, die mit der Zielsetzung und den Materialien der Saugsondenanlage abzustimmen sind.

7.3.6 Probenlagerung, Vorbereitung und Parameterumfang

Im Labor müssen die Proben möglichst zügig weiterverarbeitet werden. Die Zwischenlagerung erfolgt im Dunkeln bei maximal 4°C über einem möglichst kurzen Zeitraum, um mikrobielle Umsetzungen zu minimieren. Der Einsatz von Konservierungsmitteln (z. B. Chloroform, Jodid etc.) wird aus Gründen des Gesundheitsschutzes und möglicher Reaktionen mit den zu bestimmenden Stoffen nicht empfohlen. Das Einfrieren der Proben kann einige Inhaltsstoffe stabilisieren, wird nach NIEMINEN ET AL. (2013) jedoch nicht empfohlen, da organische Inhaltsstoffe durch den Gefrier- und Auftauvorgang verändert

werden können und gelöster organischer Kohlenstoff sowie siliziumhaltige Komponenten koagulieren und somit zu Minderbefunden führen können.

Vor der Erwägung etwaiger Probenaufbereitungsschritte ist zu bedenken, dass hierdurch Beeinflussungen der Proben resultieren, die speziell bei den Spurenstoffen bedeutend sein können. Bei einer Porengröße von in der Regel $> 1 \mu\text{m}$ der eingesetzten Saugsonden, kann davon ausgegangen werden, dass alle Inhaltsstoffe, die in der Bodenlösung natürlicherweise mobil sind, durch die Beprobung erfasst werden, inklusive Kolloide sowie Komplexe mit organischer Substanz. In den Sammelflaschen kann es sekundär zu Flockung kommen, die in der chemischen Analyse stört. In einem solchen Fall wäre ein Aufschluss als Probenvorbereitung einer Filtration über konventionell $0,45 \mu\text{m}$ Filter vorzuziehen. Die Festlegung der geeignetsten Aufbereitung ist also von vielen Faktoren abhängig und sollte in enger Abstimmung zwischen Fachabteilung und Labor getroffen werden.

Unter Umständen ist die Filtration zur Stabilisierung der Proben direkt nach dem Eintreffen im Labor zu empfehlen (NIEMINEN ET AL. 2013). Falls filtriert werden soll und genügend Probenmenge vorhanden ist, empfiehlt es sich, einen Vorlauf von bis zu 50 ml der filtrierten Probe zu verwerfen, da Membranfilter bestimmte Stoffe abgeben oder absorbieren können.

In einem Aliquot der Probe sollte direkt nach dem Eintreffen im Labor und vor der Filtration die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert bestimmt werden. Generelle Festlegungen zum Parameterumfang der Analysen können nicht getroffen werden, da für die jeweiligen BDF unterschiedliche Zielsetzungen bestehen. Zu einem Standardprogramm sollten neben elektrischer Leitfähigkeit und pH-Wert die Kationen NH_4 , Na, K, Mg und Ca, die Anionen Cl, NO_3 , SO_4 und PO_4 , Alkalinität, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor gehören. Bei sauren Proben ($< \text{pH } 5,0$) sollten auch Al, Fe und Mn bestimmt werden. Sind Schwermetalle von Interesse, sind mindestens Pb, Cd, Zn, Cu, Cr und Ni zu analysieren. Weitere Parameter richten sich nach den jeweiligen Belastungen an den BDF. Einen Überblick über die obligatorischen und ergänzend empfohlenen Parameter zur Untersuchung des Bodenwassers geben Tab. 7-2 a) und b).

7.4 Beobachtung des oberflächennahen Grundwassers

Für großräumige und landesweite Untersuchungen steht in vielen Bundesländern ein eigenes Grundwasserüberwachungsnetz zur Verfügung. Hier besteht die Möglichkeit, Synergien zwischen Boden-Dauerbeobachtungsflächen und Grundwassermessstellen aufzubauen und zu nutzen.

Vor allem an Standorten, bei denen die Grundwasserstände regelmäßig bis in die Bodenzone ansteigen (z. B. höher als 2 m unter Gelände), kann es sinnvoll sein, auf oder in unmittelbarer Nachbarschaft der Boden-Dauerbeobachtungsflächen eigene Grundwassermessstellen einzurichten. Derartige Grundwassermessstellen, mit denen das oberflächennahe Grundwasser erfasst werden kann, bieten zwei Möglichkeiten.

Es kann die Grundwasserspende am Standort zeitlich hoch aufgelöst durch Messung des Grundwasserstandes abgeschätzt werden (in Verbindung mit der effektiven Porosität im Grundwasserschwankungsbereich). Damit kann das Wasserhaushaltsmodell durch eine zusätzliche unabhängige Beobachtung naturgetreuer kalibriert werden. Auch lässt sich der mögliche Einfluss von präferentiell fließendem Grundwasser anhand von Grundwasserspiegel-Anstiege qualitativ beurteilen. Die Messung und Aufzeichnung der Grundwasserstände sollte dazu mit Drucksensoren und Dataloggern erfolgen, um den Arbeitsaufwand gering zu halten und eine hohe zeitliche Auflösung (z. B. stündlich) zu gewährleisten. Die Grundwassermessstelle sollte ausreichend tief verfiltert werden, um auch in Trockenperioden Messungen zu ermöglichen. Schätzungen der Grundwasserschwankungsbereiche lassen sich meist hydrogeologischen Karten entnehmen.

Eine Probennahme aus dem obersten Bereich des Grundwasserleiters kann parallel zur Gewinnung von Sickerwasserproben (Kap. 7.3) erfolgen. Damit kann der Einfluss des Sickerwassers auf die Grundwasserqualität erfasst werden. Zudem wird quasi eine zusätzliche Probennahmetiefe für das Sickerwasser gewonnen, denn zumindest in Auffüllphasen entspricht die Zusammensetzung des oberflächennahen Grundwassers in etwa der der Sickerwasserspende.

Tab. 7-2: Chemische Untersuchungsparameter des Bodenwassers

a) Obligatorische Untersuchungsparameter

Parameter	Methode
pH-Wert	DIN EN ISO 10 523 C5
Leitfähigkeit	DIN EN 27 888 C8
<u>Anionen:</u> Chlorid Sulfat o-Phosphat Nitrat Nitrit Carbonat	DIN EN ISO 10 304-1 D20 DIN EN ISO 10 304-1 D20 DIN EN ISO 15681-2 D46 DIN EN ISO 10 304-1 D20 DIN EN ISO 13 395 D28 DIN 38 409-7 H7
<u>Kationen:</u> Ca, Na, K, Mg; Zusätzlich Al, Fe, Mn bei pH < 5 in Bodenlösung	DIN EN ISO 17 294-2 E29
<u>Spurenelemente:</u> As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	DIN EN ISO 17 294-2 E29 Hg: DIN EN ISO 12 846
NH ₄ -N Gesamt N	DIN EN ISO 11 732 E23 DIN EN 12 260 H34
DOC	DIN EN 1484 H3

b) Ergänzend empfohlene Untersuchungsparameter

Parameter	Methode
<u>Anionen:</u> Fluorid Silikat	DIN EN ISO 10 304-1 D20 DIN EN ISO 16 264 H57
<u>Spurenelemente:</u> Ba, B, Co, Mo, Se, Sr, Ti, U, V	DIN EN ISO 17 294-2 E29

8 Bodenbiologische Untersuchungen

Bodenorganismen spielen im Ökosystem Boden eine wichtige Schlüsselrolle und erfüllen vielfältige Funktionen. So sind sie maßgeblich am Abbau der Streu und den Stoffkreisläufen und somit der Mobilisierung von Nährstoffen beteiligt. Andererseits sind sie Bestandteil der Nahrungskette oder Symbiosepartner von Pflanzen oder tragen zur Parasitenabwehr von Nutzpflanzen bei. Darüber hinaus beeinflussen Bodenorganismen auf unterschiedlichen Skalenebenen Gefüge- und Porenbildung und beeinflussen so Wasser- und Lufthaushalt des Bodens.

Mit der höchsten funktionellen und Arten-Vielfalt spielen dabei die kleinsten Organismen, die Mikroorganismen eine entscheidende Rolle. Ohne Bakterien und Archaeen kann der Boden viele seiner Funktionen nicht erfüllen. Da die Abundanz und Aktivität von Bodenmikroorganismen, im Vergleich z. B. zum Humusgehalt, schneller auf Veränderungen der ökologischen Bedingungen im Boden reagieren, ist es möglich, frühzeitig Hinweise auf nachteilige Bodenveränderungen zu bekommen.

Die Bodenfauna ist nicht nur außerordentlich artenreich, sondern auch durch eine hohe biologische und ökologische Diversität gekennzeichnet. Sie übt einerseits direkten und indirekten Einfluss auf alle Bodenprozesse aus, wird andererseits aber auch direkt oder indirekt von ihnen beeinflusst. Hierbei sind Stellung im trophischen Gefüge, Lebensdauer und spezielle Lebensraumansprüche von Bedeutung und bestimmen damit die jeweils spezifische Indikator-Eignung innerhalb des Monitoring-Systems.

Die z. T. für bodenbiologische Untersuchungen notwendige intensive Probennahme kann BDF – außer bei ackerbaulicher Nutzung – sehr schnell zerstören. Es wird vorgeschlagen, unter Berücksichtigung der Bodenvariabilität, die Probenahmen im Randbereich oder in unmittelbarer Nachbarschaft der Kernflächen vorzunehmen (s. Kap. 4.1).

8.1 Bodenmikrobiologie

Ziel der mikrobiologischen Bodenanalyse ist die Feststellung der im Boden ablaufenden Umsatzleistungen als eine der Komponenten der Bodenfruchtbarkeit und Selbstreinigungskraft von Böden sowie als Ausdruck der Funktion des Bodens als Lebensgrundlage und Lebensraum für Bodenorganismen. Hier ist die Untersuchung von Funktions-Summenparametern vorzunehmen. Die derzeit eingesetzten und im folgenden aufgeführten Analyseverfahren sind nicht geeignet, Diversitätsparameter für Bodenmikroorganismen zu ermitteln.

8.1.1 Probennahme Mikrobiologie

Für eine repräsentative mikrobiologische Charakterisierung ist eine flächenbezogene Probennahme erforderlich. Von jeder räumlichen Wiederholung (mindestens vier) werden mindestens 16 Proben mit einem Probenstecher oder Bohrstock gezogen und zu einer Mischprobe vereinigt.

Die Entnahmetiefe soll bei Brach-, Grün- oder Ackerland ohne wendende Bodenbearbeitung¹ 0 bis 10 cm und 10 bis 20 cm (alternativ auch 10 bis 30 cm oder ergänzend 20 bis 30 cm) und bei regelmäßig wendend bearbeitetem Ackerland den Pflughorizont von 0 bis 20 bzw. 30 cm, solange sichergestellt ist, dass bei jedem Einstich ausschließlich Material aus dem Pflughorizont gewonnen wird. Eine Abstimmung der Beprobungstiefen mit den bodenzoologischen Untersuchungen ist sinnvoll. Die Bearbeitungstiefe ist bei jeder Probennahme aufzunehmen.

An Waldstandorten wird die L-Lage mit einem Stechrahmen beprobt (15 cm Seitenlänge, Mischprobe aus drei Proben). Der Of- und Oh-Horizont werden gemeinsam als Mischprobe aus drei Einzelproben beprobt. Die Beprobung des Mineralbodens erfolgt schichtenbezogen in den Tiefenstufen 0 bis 5, 5 bis 10 und 10 bis 15 cm.

¹Als „ohne wendende Bodenbearbeitung“ werden Anbausysteme angesprochen, die seit mindestens 3 Jahren pfluglos bearbeitet worden sind und in absehbarer Zukunft weiterhin pfluglos bearbeitet werden. Wird alle drei Jahre oder häufiger eine wendende Bodenbearbeitung eingesetzt, gilt das System als „regelmäßig wendend bearbeitet“.

Die Proben sind in Polyethylenbeutel oder -schalen zu verfüllen und in Kühltaschen zu transportieren.

Auf landwirtschaftlich genutzten Böden sollten die Proben bis spätestens Ende März bei nicht mehr vollständig gefrorenem Boden gezogen werden. Zu diesem Zeitpunkt sind die Ernterückstände aus dem Vorjahr schon weitgehend mineralisiert und die Wurzelausscheidungen der aktuell angebauten Frucht noch gering. Die Probennahme sollte vor der Ausbringung von organischen Düngern und vor der Frühjahrsbearbeitung erfolgen. Eine Beprobung mit Wasser überstauter Böden ist zu vermeiden und sollte erst zwei Wochen nach Ende des Überstaus vorgenommen werden. Auch auf Waldflächen ist der beste Probennahmetermin im Frühjahr (Ende Februar bis Ende April) vor Entwicklung der Krautschicht (ANDERSON & DOMSCH 1991).

Bei der Beprobung sollte ein Probennahmeprotokoll aufgenommen werden, in dem u. a. der Name des Probennehmenden, Witterungsdaten, der Bewuchs, der Zustand des Bodens und erkennbare Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie ggf. weitere Besonderheiten festgehalten werden (s. Anl. 8-1:).

8.1.2 Probenvorbehandlung und Probenlagerung Mikrobiologie

Aus der Mischprobe werden Pflanzenmaterial, Bodentiere und Skelett entfernt. Für die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse nach dem Verfahren der Substratinduzierten Atmung (SIR) und für die Bestimmung der Basalatmung werden, die Proben bei Labortemperatur bis max. 25°C bis zur Siebfähigkeit angetrocknet. Dabei sollte eine Minimalfeuchte von 40 % der maximalen Wasserkapazität, bei Böden mit mehr als 30 % Tongehalt von 30 % der maximalen Wasserkapazität, nicht unterschritten werden. Die Proben werden beim Trocknen regelmäßig gewendet und die Aggregate zerkleinert, um ein einseitiges Abtrocknen der Aggregate zu verhindern. Anschließend werden die Bodenproben auf 2 mm gesiebt. Es ist darauf zu achten, dass die Probe gut homogenisiert wird. Zwischen Probenvorbehandlung und Analyse sollte ein Zeitraum von einer Woche eingehalten werden, wenn die Proben nicht gelagert werden können.

Die Lagerung erfolgt in Polyethylenbeuteln oder -schalen. Die Lagerungsbedingungen sind von den zu untersuchenden Parametern abhängig. Für die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse und der Basalatmung ist eine Lagerung der Proben im Kühlschrank bei 4°C bis zu 4 Wochen möglich. Die Beutel sollten nicht gestapelt gelagert werden. Wenn eine Bearbeitung der Proben innerhalb von 4 Wochen nicht möglich ist, sollten die Proben bei -18°C eingefroren werden. Das Auftauen sollte dann zwei Tage vor der Messung bei +4°C erfolgen.

Vor der Bestimmung der mikrobiellen Biomasse mit der Methode der Substrat-induzierten Respiration und der Basalatmung sollten die Bodenproben bei 20-22°C vorinkubiert werden, um leicht verfügbare organische Substanz abzubauen und die Mikroorganismen an die Messtemperatur anzupassen. Die Dauer der Vorinkubation sollte mindestens fünf Tage und höchstens zehn Tage betragen, wobei die Dauer der Probenvorbehandlung bei Labortemperatur (Trocknen, Sieben) hier einbezogen werden kann. Bei Vorinkubation ist darauf zu achten, dass die Proben nicht austrocknen (wassergesättigte Atmosphäre) und dass kein CO₂ akkumuliert (Aufrechterhaltung aerober Bedingungen).

8.1.3 Analytik Mikrobiologie

Die Bestimmung der Gesamtanzahl toter und aktiver Mikroorganismen sollte aus Gründen der nationalen und internationalen Vergleichbarkeit über die Chloroform-Fumigations-Extraktions (CFE)-Methode erfolgen (BROOKS ET AL. 1985; VANCE ET AL. 1987; DIN EN ISO 14240-2:2011-09). Nach einer Abtötung der Organismen mit Chloroform und der Extraktion der organischen Komponenten werden der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) und der gelöste organische Stickstoff (DON) gemessen und somit indirekt die mikrobielle Gesamtbiomasse als mikrobieller Kohlenstoff (C_{mik}) und Stickstoff (N_{mik}) bestimmt.

Alternativ oder ergänzend kann das Verfahren der Substratinduzierten Atmung (SIR) eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren wird die mikrobielle Biomasse indirekt aus der Atmungsaktivität der Bodenprobe nach Substratzugabe und somit aus dem O₂-Verbrauch oder der CO₂-Bildung bestimmt (DIN EN ISO 14240-1:2011-09 nach ANDERSON & DOMSCH 1978; DIN ISO 17155:2013-12). Der Gasverbrauch bzw.

die Gasbildung kann mit unterschiedlichen Geräten wie z. B. dem Respirometer oder Infrarot-Gasanalysator, z. B. mit der Heinemeyeranlage (HEINEMEYER ET AL. 1989), gemessen werden. Sinnvoll ist es dabei, die Substratzugabe z. B. als Glucose-Talkumgemisch mit z. B. 1 % der Probeneinwaage in Bezug auf die Trockenmasse konstant einzusetzen und die Wasserhaltekapazität der Bodenproben auf 40-60 % einzustellen (DIN EN ISO 14 238:2014-03). Nach Auffassung mancher Wissenschaftler wird mit der SIR-Methode die aktive mikrobielle Biomasse bestimmt, obwohl die Validierung des Verfahrens an Organismenzellen nach ANDERSON & DOMSCH (1978) bzw. durch Abgleich mit der CFE-Methode bei KAISER ET AL. (1992) auf die Bestimmung der Gesamtbiomasse ausgelegt ist.

Sowohl bei CFE als auch bei SIR sollte auf die Verwendung einheitlicher Konversionsfaktoren geachtet werden, z. B. aus der DIN. Da tendenziell die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der mikrobiellen Biomasse unterschiedliche Ergebnisse liefern, sollten Auswertungen für verschiedene Verfahren getrennt erfolgen.

Die Aktivität der Mikroorganismen sollte über die Bestimmung der mikrobiellen Basalatmung ohne Substratzugabe, also der aeroben heterotrophen Atmung der Organismen erfolgen. Die Atmung kann wie oben beschrieben ebenfalls über das Respirometer oder die Heinemeyeranlage gemessen werden (DOMSCH 1962; HEINEMEYER ET AL. 1989; DIN 19 737:2001-04; DIN EN ISO 16 072:2011-09; DIN ISO 17155:2013-12). Als weiterer Aktivitätsparameter kann die potenzielle N-Mineralisationsaktivität der Organismen über die Arginin-Ammonifikation (ARG) bestimmt werden (ALEF & KLEINER 1987). Dabei wird, nach Zugabe der Aminosäure Arginin als leicht abbaubarem N-Substrat, die Bildung von Ammonium gemessen.

Je Probe sollten mindestens 3 Messwiederholungen untersucht werden.

Infolge von Geräte-, Personal- oder Laborwechsel kann es beim Einsatz bodenmikrobiologischer Verfahren zu systematisch abweichenden Ergebnissen kommen. Um diese systematischen Abweichungen erkennen und bei der Auswertung in Abhängigkeit von der Zeit berücksichtigen zu können, sollte Referenzbodenmaterial eingesetzt werden. Dazu sollte Oberbodenmaterial mindestens eines gut homogenisierbaren und analytisch bekannten Bodens, z. B. Schluff- oder Sandboden, verwendet werden. Hierzu sind große Mengen (z. B. 50 kg) dieses Bodens aufzuarbeiten und zu sieben, auf die o. a. Feuchte bei 40-60 % der maximalen Wasserkapazität einzustellen, gut zu homogenisieren und portionsweise einzufrieren. Das Referenzprobenmaterial wird regelmäßig in den laufenden Analyseprozess eingespeist, z. B. wöchentlich beim SIR-Verfahren. So können schleichende oder abrupte Veränderungen bei der Analytik erkannt werden. Hierbei gilt es auch, die typische Variation zwischen wiederholten Untersuchungen des Referenzbodens zu berücksichtigen. Derselbe Referenzboden muss jahres- oder laborübergreifend zum Einsatz kommen, um systematische Unterschiede erkennen zu können. Nach Aufbrauchen eines Bodens muss durch ein Parallelmessen mit dem neuen Referenzbodenmaterial an mindestens 10 Terminen der Anschluss sichergestellt werden.

Die mikrobiellen Parameter sollten sowohl gewichts- als auch volumenbezogen angegeben werden. Aus den gemessenen Parametern der mikrobiellen Biomasse und der Atmungsaktivität sollten unter Einbeziehung des Gehalts an organischem Kohlenstoff der Böden verschiedene mikrobielle Indikatoren berechnet werden. Der mikrobielle Quotient (Q_{mik} , auch $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$), der Anteil des mikrobiellen Kohlenstoffs am gesamten organischen Kohlenstoff, gilt als Indikator für die relative Verfügbarkeit von Nährstoffen und somit für die Qualität der organischen Substanz (ANDERSON & JOERGENSEN 1997; HÖPER & KLEEFISCH 2001; ANDERSON 2003). Dieser Quotient reagiert auf Veränderungen der Kohlenstoffzufuhr möglicherweise schneller als der Humusgehalt. Hohe Werte zeigen eine erhöhte Zufuhr frischer, leicht verwertbarer organischer Substanz, niedrige Werte deuten dagegen auf Störungen im Kohlenstoffhaushalt, etwa durch Wasserstau oder Bodenbearbeitung, hin (OTTOW 2011). Der metabolische Quotient (Q_{met} oder $q\text{CO}_2$), berechnet aus der Basalatmung pro Einheit mikrobieller Biomasse, gibt Auskunft über die Menge des veratmeten Kohlenstoffes pro Biomasse und somit über die Effizienz der Substratnutzung der Bodenmikroorganismen. Je kleiner der Quotient, desto weniger Substrat wird für die Energieerzeugung veratmet und desto mehr Substrat wird in die mikrobielle Biomasse eingebaut (JÖRGENSEN 1995). Der Q_{met} ist zunächst boden- bzw. standortabhängig. Der Q_{met} kann als Indikator für den Einfluss von Stressoren, wie z. B. Bodenbelastungen durch Schadstoffe, herangezogen werden. Bei Schadstoffbelastungen nimmt der Energiebedarf, z. B. für Reparaturprozesse, zu, dieses führt bei sonst gleichen Bedingungen zu einer Zunahme des Q_{met} . Die Einstellung eines stabilen Bodenökosystems führt dagegen zur Abnahme des Q_{met} .

8.1.4 Untersuchungsturnus Mikrobiologie

Da bei bodenmikrobiologischen Untersuchungen nur Ergebnisse von Proben vergleichbar sind, die bei ähnlicher Witterung und Jahreszeit sowie bei gleicher Fruchtart gezogen wurden, wird empfohlen, die Untersuchungen auf Ackerflächen jährlich durchzuführen.

Bei der Auswertung ist der Einfluss von Fruchtfolge und Bewirtschaftungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Auf landwirtschaftlich genutzten Standorten unter Dauerkultur (v. a. Grünland) wird ein mindestens dreijähriger Turnus empfohlen. Bei Boden-Dauerbeobachtungsflächen unter forstlicher Nutzung sollten mikrobiologische Untersuchungen mindestens im zweijährigen Turnus durchgeführt werden.

8.2 Bodenzoologische Untersuchungen

Ziel der bodenzoologischen Untersuchungen auf BDF ist es, Informationen über die potenziellen Auswirkungen von Umwelt- und Bewirtschaftungseinflüssen (Immissionen, Klima, Pflanzenschutzmittel, Bodenbearbeitung etc.) auf Bodenlebensgemeinschaften und ihre Leistungen zu gewinnen. Ferner tragen die Untersuchungen dazu bei, Veränderungen der Bodenbiodiversität als wesentlichem Bestandteil der Gesamtbiodiversität von Ökosystemen zu erfassen. Bei der Vielfalt der Bodenorganismen ist eine Auswahl der zu berücksichtigenden Tiergruppen unumgänglich (s. Tab. 8-1).

Die VDI-Richtlinie 4331-1 liefert zu grundsätzlich geeigneten Tiergruppen steckbriefartige Informationen, die für die Auswahl herangezogen werden können. Folgende Tiergruppen eignen sich besonders für regelmäßige Untersuchungen:

- Annelida (Enchytraeidae + Lumbricidae)
- Nematoda
- Gamasina (Acari)
- Collembola (Insecta)

Eine Indikatorgruppe, die der Fragestellung im besonderen Maße gerecht wird, ist die Taxozönose der Anneliden (Ringelwürmer) (BEYLICH & GRAEFE 2010, FRÜND ET AL. 2011, PELOSI & RÖMBKE 2018, UBA 2007, WALTER & BURMEISTER 2011). Dafür liegen folgende Gründe vor:

- Anneliden haben wegen ihrer Steuerfunktion in den Prozessen des Streuabbaus und der Bodenbildung für Böden eine hohe ökologische Bedeutung (Didden et al. 1997, Ehrmann 2015). Mit den Regenwürmern als Vertreter der Makrofauna stellen sie den größten Massenanteil an Bodentieren. Kleinringelwürmer (Enchyträen u. a.) als Vertreter der Mesofauna treten antagonistisch dort stärker in Erscheinung, wo die Umsatzleistung der Regenwürmer gering ist. Beide Gruppen bilden ökosystemtypische Siedlungsdichten, deren relativer Anteil mit dem Verhältnis von bakterieller zu pilzlicher Zersetzung korreliert.
- Als feuchthäutige Tiere gehören Kleinringelwürmer zur "Bodenlösungs-Fauna". Die chemische Beschaffenheit der Bodenlösung beeinflusst die Artenzusammensetzung und die Mikroverteilung der Anneliden im Bodenprofil. Veränderungen des chemischen Bodenzustandes sind an der Struktur der Annelidenzönose frühzeitig ablesbar. Mit einem Enchyträen-Test lassen sich toxische Bereiche im Mineralboden (Aluminium-Toxizität) lokalisieren (GRAEFE 1991). Aus ökotoxikologischen Untersuchungen liegen eine Reihe von Ergebnissen zu Kleinringelwürmern und Regenwürmern vor, die sich zur Interpretation der Daten von BDF im Hinblick auf chemische Belastungen heranziehen lassen (RÖMBKE ET AL. 2017).
- Anneliden bilden charakteristische, von standörtlichen Bedingungen abhängige Gesellschaften, die zur Typisierung der Zersetzerlebensgemeinschaften verwendbar sind

("Zersetzergesellschaften"; GRAEFE 1993, GRAEFE 1995). Damit lässt sich ein wichtiges naturhaushaltliches Potential bewerten und über alle Nutzungsformen von Böden hinweg vergleichen. Weitere Vergleichsmöglichkeiten bieten die Ökologischen Zeigerwerte der Annelidenarten, aus denen auf die Beobachtungsfläche bezogene mittlere Zeigerzahlen berechnet werden können (GRAEFE & SCHMELZ 1999).

- Parameter, die auf der Artstruktur aufbauen, können mit fast identischen Ergebnissen zu beinahe jeder Jahreszeit erhoben werden, wenn extreme Frost- und Trockenperioden mit ihren Nachwirkzeiten gemieden werden.

Die Erfassung der Anneliden beinhaltet folgende flächenbezogene Parameter: Arteninventar und Gesamtabundanz der Regenwürmer und Kleinringelwürmer, Abundanz, Dominanz und Frequenz der Arten, Biomasse (Regenwürmer) und Vertikalverteilung (Kleinringelwürmer) sowie Verteilung der Kleinringelwürmer zwischen Auflagehumus und Mineralboden (Wald). Die Berechnung mittlerer Reaktions- und Feuchtezeigerwerte der Anneliden sowie die soziologische Einordnung der Artengemeinschaft im System der Zersetzergesellschaften erfolgt nach GRAEFE (1993) und GRAEFE & SCHMELZ (1999).

8.2.1 Probennahme und Extraktion

Für die Aufnahme der Annelidenzönose wird die Probennahme an 10 Beprobungsstellen (Wiederholungen) im Randbereich der Kernfläche(n) empfohlen.

Die Erfassung der Regenwürmer erfolgt standardmäßig durch Kombination zweier Methoden (DIN EN ISO 23611-1: 2007, DIN EN ISO 23611-1: 2018). Empfohlen wird:

- Austreibung mit einer Reizlösung (Formalin oder AITC) zur effektiven Erfassung der tiefgrabenden Regenwürmer (Probefläche $\frac{1}{8}$ bis $\frac{1}{2}$ m²) und
- Handauslese zur effektiven Erfassung der epigäischen und endogäischen Regenwürmer (Probefläche $\frac{1}{16}$ bis $\frac{1}{4}$ m²; empfohlene Probentiefe 20 cm).

Für die Austreibung wird in der älteren Version der Norm von 2007 Formalin empfohlen. In der aktuellen Version der Norm von 2018 ist u. a. aus Gründen des Arbeitsschutzes Formalin durch AITC (Senföl) ersetzt, welches in seiner konzentrierten Form allerdings auch erhebliche Sicherheitsvorkehrungen hinsichtlich Lagerung und Handhabung erfordert. Aus Gründen der Kontinuität wird zumindest für die Fortsetzung bestehender Untersuchungsreihen die Beibehaltung von Formalin als Extraktionsmittel empfohlen.

Die Variabilität der Probeflächengröße ($\frac{1}{16}$ bis $\frac{1}{4}$ m²) ergibt sich im Wesentlichen aus Praktikabilitätsgründen: an Standorten, wo wenige tiefgrabende Regenwürmer zu erwarten sind, sollte die Fläche für die Formalinextraktion relativ groß sein ($\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ m²), um diese Arten überhaupt zu finden. Dieselbe, große Fläche per Handauslese zu bearbeiten, stellt einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand dar, ist aber für den quantitativen Nachweis der kleineren endogäischen und epigäischen Arten eigentlich nicht nötig. Hier würde eine kleinere Fläche ausreichen.

Die Durchführung beider Methoden sollte auf derselben Fläche nacheinander stattfinden. Sie kann jedoch auch direkt benachbart erfolgen, z. B. wenn für beide Methoden nicht dieselbe Probefläche sinnvoll ist.

Die Handauslese kann ergänzt werden durch eine Extraktion des ausgelesenen Bodenmaterials in einer Kempson-Apparatur. Dies erhöht die Effektivität der Erfassung bei Vorliegen erschwerender Bedingungen für die Handauslese (z. B. dichter Wurzelfilz). Ungünstige Standortbedingungen, wie starke Hangneigung und / oder hoher Skelettanteil im Boden können die Effektivität der Reizextraktion negativ beeinflussen. Die Extraktion mit elektrischem Strom kann, ebenfalls in Kombination mit der Handauslese, eine Alternative darstellen (THIELEMANN 1986). Wenn bei der Erstuntersuchung keine tiefgrabenden Regenwürmer gefunden wurden und die Ursache dafür bekannt sowie dauerhaft

gegeben ist (z. B. pH(CaCl₂)-Wert < 4,0), kann bei den Wiederholungsuntersuchungen auf die Austreibung mittels Reizlösung verzichtet werden.

Bei der Beprobung sollte ein Probennahmeprotokoll aufgenommen werden, in dem u. a. der Name des Probennehmenden, Witterungsdaten, der Bewuchs, der Zustand des Bodens und erkennbare Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie ggf. weitere Besonderheiten festgehalten werden (s. Anl. 8-1:).

Die Erfassung der Kleinringelwürmer (Enchytraeiden u. a.) erfolgt durch Entnahme von Bodenproben mit einem Bodenstecher / Stechzylindern (Durchmesser 4-5 cm). Die Probennahmetiefe beträgt 24 cm bei Ackerflächen bzw. 10 cm bei allen anderen Nutzungstypen, jeweils ab Geländeoberfläche, also ggf. inklusive aller organischer Auflagehorizonte. Die Proben werden jeweils in vier vertikale Subproben unterteilt. Die Tiere werden durch Nassextraktion aus den Subproben gewonnen (GRAEFE in DUNGER & FIEDLER 1998, DIN EN ISO 23611-3). Die Unterteilung in vertikale Subproben ist einerseits extraktionstechnisch bedingt, andererseits aber auch gewollt, um die Vertikalverteilung der Kleinringelwürmer zu erfassen und mit vertikalen Gradienten anderer Parameter in Beziehung setzen zu können.

8.2.2 Probennahmezeitraum und Untersuchungsturnus

Regenwürmer und Kleinringelwürmer sollten zum gleichen Zeitpunkt erfasst werden. Die Probennahme muss während der Aktivitätszeit der Regenwürmer (Frühjahr und Herbst) durchgeführt werden, sollte allerdings im langjährigen Vergleich einer Fläche immer zur gleichen Jahreszeit erfolgen. Vor der Probennahme ist im Zweifel mittels Spaten zu prüfen, ob Ruhestadien der Regenwürmer vorkommen (Diapause). Bei Diapause auch nur einer Art arbeiten die Methoden qualitativ und quantitativ nur unzureichend. Auf landwirtschaftlich genutzten BDF sollte die Probennahme erst etwa vier Wochen nach der Bodenbearbeitung (Stabilisierung der Hohlräume, Regeneration der Populationen) durchgeführt werden. Auf ackerbaulich genutzten Flächen ist bei der Auswertung der Daten der Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Diese sind daher kontinuierlich zu erfassen und zu dokumentieren.

Für die bodenzoologischen Untersuchungen hat sich ein 6-10-jähriger Untersuchungsturnus bewährt. Im Zuge klimatischer Veränderungen werden die für eine Probenahme geeigneten Zeitfenster zunehmend kürzer und/oder unberechenbarer, insbesondere auf Landwirtschaftsflächen, so dass die Häufigkeit suboptimaler Probennahmebedingungen steigt. Eine Verkürzung des Untersuchungsturnus auf 3-5 Jahre ist vor diesem Hintergrund in Erwägung zu ziehen. Je länger der Turnus ist, desto länger wird der Zeitraum bis zum Vorliegen aussagekräftiger Zeitreihen.

8.2.3 Weitere Tiergruppen für ergänzende Untersuchungen

Um spezielle Belastungstypen in ihrer Wirkung auf das Bodenleben abbilden zu können, wird die Untersuchung weiterer Tierartengruppen ergänzend empfohlen (RUTGERS ET AL. 2009, VDI 4331-1). Hierdurch lassen sich z. B. weitere Ernährungsstrategien und damit weitere Bestandteile des Nahrungsnetzes im Boden abdecken. Für Mikroarthropoden u. a. Springschwänze (Collembolen), Raubmilben (Gamasinen) und Nematoden (Fadenwürmer) liegen ebenfalls internationale Standards für die Erfassung vor (s. Tab. 8-1).

Tab. 8-1: Bodenbiologische Untersuchungsparameter
 Obligatorische Untersuchungsparameter

- Bodenmikrobiologische Parameter -

Parameter	Methode	Bemerkung	Intervall
Mikrobielle Biomasse	Alternativ zu CFE: Substrat-induzierte Respiration (SIR) (n. ANDERSON & DOMSCH 1978 und HEINEMEYER et al. 1989), DIN ISO 17155:2013-12	Aktivitätsparameter Methodische Stabilität und Kontinuität mittels Standardböden dokumentieren.	≥ 1 Jahr
Mikrobielle Biomasse	Alternativ zu SIR Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode (CFE) n. VANCE ET AL. 1987), DIN EN ISO 14240-2:2011-09	Aktivitätsparameter Methodische Stabilität und Kontinuität mittels Standardböden dokumentieren.	≥ 1 Jahr
Mikrobielle Basalatmung	Durchflußverfahren (DOMSCH 1962) beschrieben bei HEINEMEYER ET AL. (1989) oder Bestimmung der O ₂ -Aufnahme nach SCHINNER ET AL. (1993), DIN 19 737:2001-04; DIN EN ISO16072:2011-09; DIN ISO 17155:2013-12	Aktivitätsparameter Methodische Stabilität und Kontinuität mittels Standardböden dokumentieren.	≥ 1 Jahr
Metabolischer Quotient (Q _{met} , qCO ₂)	ANDERSON & DOMSCH (1990)	Aktivitätsparameter	≥ 1 Jahr
Mikrobieller Quotient (Q _{mik} , C _{mik} /C _{org})	ANDERSON & DOMSCH (1990)	Aktivitätsparameter	≥ 1 Jahr

- Bodenzoologische Parameter -

Parameter	Methode	Bemerkung	Intervall
Lumbriciden	Handauslese und Austreibung mittels Reizlösung (Formalin oder AITC) oder Strom DIN EN ISO 23611-1: 2007, DIN EN ISO 23611-1: 2018	Biodiversitätsparameter	≥ 3 Jahre
Kleinanneliden	Nassextraktion nach GRAEFE 1991 bzw. GRAEFE in DUNGER & FIEDLER 1998, DIN EN ISO 23611-3	Biodiversitätsparameter	≥ 3 Jahre

Ergänzend empfohlene Untersuchungsparameter

- Bodenmikrobiologische Parameter -

Parameter	Methode	Bemerkung	Intervall
N-Mineralisation	Anaerober Brutversuch (SCHINNER et al. 1993)	Aktivitätsparameter, Diversität im Hinblick auf Ausprägung der Aktivitäten Methodische Stabilität und Kontinuität mittels Standardböden dokumentieren.	1 Jahr
Zelluloseabbau	div. Methoden		1 Jahr
Argininammonifikation	ALEF & KLEINER 1987		1 Jahr
Arylsulfataseaktivität	TABATABAI & BREMNER 1970a & b		1 Jahr
β-Glucosidaseaktivität	HOFFMANN & DEDEKEN 1965		1 Jahr
Katalaseaktivität	BECK 1997		1 Jahr

- Bodenzologische Parameter -

Parameter	Methode	Bermerkung	Intervall
Collembolen	Extraktion n. KEMPSON oder MACFAYDEN (DUNGER & FIEDLER 1998), DIN EN ISO 23 611-2	Biodiversitätsparameter	Nach Fragestellung
Nematoden	Extraktion n. OOSTENBRINK (DUNGER & FIEDLER 1998), DIN EN ISO 23 611-4	Biodiversitätsparameter	Nach Fragestellung
Gamasinen	Extraktion n. KEMPSON oder MACFAYDEN (DUNGER & FIEDLER 1998), DIN EN ISO 23 611-2	Biodiversitätsparameter	Nach Fragestellung

9 Bodenprobenbank für Rückstellproben

Die von den Boden-Dauerbeobachtungsflächen entnommenen Bodenproben können hinsichtlich des Parameterumfangs jeweils nur nach den aktuellen Erfordernissen und nach den derzeitigen analytischen Möglichkeiten untersucht werden. Daher ist es essentiell, zusätzliches Probenmaterial aus den Erst- und Wiederholungsbeprobungen zu entnehmen und dieses in geeigneter Weise in Form von Rückstellproben in eine Bodenprobenbank einzulagern. Die Bodenprobenbank erfüllt dabei vornehmlich folgende Zwecke:

- Nachuntersuchungen auf neu hinzugekommene relevante Stoffe bzw. Parameter (z. B. Mikroplastik oder PFAS),
- Vergleichsuntersuchungen an Rückstellproben als Referenz bei Einsatz von aktualisierten Analyseverfahren oder Laborwechseln,
- Beweissicherung,
- Nachweis von zeitlichen Entwicklungen,
- Nachweis der Auswirkungen von Störfällen (z. B. Tschernobyl).

Die Einlagerung in Bodenprobenbanken betrifft meist gestörte Bodenproben und ist für Parameter geeignet, die sich durch eine Langzeitlagerung nur wenig oder gar nicht verändern.

Hinweise zur Haltbarkeit von Parametern in Bodenproben liefern DIN ISO 18 512 und DIN 19 747. Aus fachlicher Sicht sind v. a. die Angaben der DIN ISO 18 512 in Frage zu stellen, da diese häufig nicht auf belastbaren Studien, sondern allein auf Sachverständigenurteilen beruhen.

Derzeit existieren nur wenige Untersuchungen zum Einfluss der Lagerung auf Bodenproben. FALKENGREN-GRERUP (1995) stellte pH-Wert-Absenkungen in bis zu 40 Jahren gelagerten luftgetrockneten Proben aus Forststandorten fest. BLAKE ET AL. (2000) konnten zeigen, dass der C- und N-Gehalt in luftgetrockneten und bis zu 69 Jahre gelagerten Proben keine signifikanten Änderungen aufwies, wohingegen Gehalte an austauschbaren Kationen, wohl aufgrund gesunkener pH-Werte, leicht anstiegen.

Aktuelle Studien belegen ebenfalls, dass der gesamte organische Kohlenstoff in luftgetrockneten und bei Raumtemperatur gelagerten Bodenproben auch nach 15 Jahren keinem messbaren Abbau unterliegt (LFU 2020). Allerdings scheint sich der labilere, kalt- und heißwasserextrahierbare Anteil der organischen Bodensubstanz durch Luft- und Gefriertrocknung zu verändern (SUN ET AL. 2015). Dies konnte auch für die mikrobielle Biomasse, für bestimmte Enzyme und die Bodenatmung gezeigt werden. Eine Langzeitlagerung für die Nachuntersuchung auf boden(mikro-)biologische Parameter (Basalatmung etc.) ist deshalb bei getrockneten Proben nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich.

Die Lagerungsbedingungen müssen so gewählt werden, dass eine physikalische, chemische oder biologische Veränderung des Probenmaterials möglichst ausgeschlossen werden kann.

Grundsätzlich sollten Bodenproben für die Untersuchung auf anorganische und bodenphysikalische Parameter in stabilen Kunststoffgefäßen und für die Analytik organischer Schadstoffe in Braunglasbehältnissen und möglichst unter Lichtabschluss gelagert werden.

Vor der Einlagerung ist sicherzustellen, dass das im Feld entnommene Bodenmaterial unter Anwendung einer geeigneten Methode homogenisiert wird und dass durch sachgerechte Probenteilung, z. B. fraktionierendes Teilen eine repräsentative Teilprobe zur Einlagerung bzw. zur Analytik gelangt (s. Kap. 6.1).

In Abhängigkeit der vorliegenden Korngrößen kommt es bei nicht gefrorenen, trockenen Bodenproben in den Probengefäßen zu Entmischungsvorgängen, bei denen leichte und große Teile an der Oberfläche angereichert werden. Grundsätzlich gilt hier: Je ungleichförmiger eine Bodenprobe, desto größer die Möglichkeit einer Entmischung.

Entnahmen für spätere Analysen sollten deshalb immer repräsentativ erfolgen, weshalb vor Entnahme der Einsatz eines Rotationsprobenteilers zur Bildung von Aliquots empfohlen wird. Eine vorherige Homogenisierung in einem geeigneten Probenmischer ist ebenfalls empfehlenswert.

Bei der eigentlichen Probenlagerung kann zwischen Lagerung bei Raumtemperatur und Gefrierlagerung unterschieden werden. Die Raumtemperlagerung setzt voraus, dass die Bodenproben luftgetrocknet wurden. Idealerweise werden die luftgetrockneten Proben gleichmäßig kühl (ca. 15°C) und dunkel eingelagert. Diese Lagerungsart lässt eine spätere Untersuchung auf die meisten anorganischen nicht flüchtigen Bodeninhaltsstoffe zu. Erste Untersuchungen an BDF-Rückstellproben lassen außerdem darauf schließen, dass persistente organische Schadstoffe durch eine Lagerung bei Raumtemperatur nicht wesentlich verändert werden.

Auf eine vorherige Vermahlung der Proben sollte verzichtet werden, da sich bei zukünftigen Analysevorschriften der geforderte Vermahlungsgrad ändern könnte, und somit bei einer zu feinen Vermahlung die Vergleichbarkeit besonders bei Extraktionsverfahren nicht zu gewährleisten ist. Für eine Langzeitlagerung von getrocknetem Bodenmaterial bei Raumtemperatur sollte mindestens ein Liter nicht gemahlenes Feinbodenmaterial in geeigneten Gefäßen, z. B. aus PE oder aus Braunglas eingelagert werden. Schon bei der Entnahme der Proben muss der zusätzliche Mengenbedarf für die Bodenprobenbank berücksichtigt werden (zu den empfohlenen Probenmengen s. Kap. 6.3). Der Skelettanteil könnte für künftige Fragestellungen interessant werden. Deshalb empfiehlt sich nach Absiebung des Feinbodens auch die Einlagerung einer reinen Skelettfraktion in einem geeigneten Gefäß.

Für eine spätere Untersuchung auf flüchtige anorganische Parameter und für zahlreiche organische Verbindungen müssen feldfrisch entnommene Proben (mind. 1,0 l) tiefgefroren (mind. -18°C) und unter Lichtabschluss eingelagert werden. Es empfiehlt sich, diese Tiefkühlproben auf geeignete Mengen aufzuteilen, um bei einer späteren Nachuntersuchung nicht das gesamte Material auftauen zu müssen. Die Behältnisse zur Tiefkühl Lagerung sollten aus Braunglas oder Aluminium bestehen und über eine möglichst große Öffnung verfügen, z. B. Braunglasweithalsflaschen. Dabei ist besonders auf einen luft- und feuchtigkeitsdichten Verschluss zu achten. Außerdem sollte das verwendete Verschluss- und Dichtungsmaterial keine chemischen Weichmacher enthalten, die u. U. in das Probenmaterial diffundieren könnten. Bewährt haben sich z. B. Braunglasweithalsflaschen mit Schliffverschluss.

Vor allem bei der Tiefkühl Lagerung ist darauf zu achten, dass langlebige und gut haftende Etiketten Verwendung finden. Ggf. empfiehlt sich sogar ein Lackieren, Prägen oder Gravieren einer eindeutigen Probenkennung.

Um eine mögliche chemische Veränderung beobachten zu können, sollten mehrere 10er kg an Langzeitreferenzmaterialien sowohl bei Raumtemperatur, als auch bei -18°C gelagert vorgehalten werden. Die Gesamtmenge sollte unter Zuhilfenahme geeigneter Teilungstechniken (z. B. Cross riffing, Rotationsprobenteiler) bereits auf geeignete Mengen aufgeteilt sein und in geeigneten Gefäßen vorliegen. Diese Langzeitreferenzmaterialien können zum Monitoring von möglichen lagerungsbedingten Veränderungen oder auch als Labor-Verfahrenskontrollstandard herangezogen werden.

Zur Langzeitlagerung und Nachuntersuchung von DNA-Proben ist es unter entsprechendem Aufwand auch möglich, diese bei -80°C mit flüssigem Stickstoff einzulagern.

10 Untersuchungen zu Stoffflüssen

Die Pedosphäre bildet die Schnittstelle von Atmosphäre, Biosphäre, Lithosphäre und Hydrosphäre (s. auch Abb. 2-1). In dieser zentralen Stellung erfüllt der Boden im Naturhaushalt entscheidende Funktionen als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium im Stoffhaushalt.

Stoffflüsse zwischen den Sphären erfolgen oft über den Boden und können nur mit Kenntnis der Umsetzungsprozesse im Boden interpretiert werden. Die Untersuchung der Stoffflüsse gibt Auskunft darüber, ob der Boden seine Funktionen im Naturhaushalt erfüllt.

Da bei der Untersuchung der Stoffein- und -austräge stets auch die liefernden und empfangenden Umweltkompartimente mitbeobachtet werden, sollten die Standorte der prozessbezogenen Boden-Dauerbeobachtung zukünftig verstärkt als Fundamente eines integrierten Umweltmonitorings

verstanden werden. In den folgenden Abschnitten werden die im Rahmen einer Prozessdokumentation empfohlenen Untersuchungen zu relevanten Ein- und Austragspfaden einschließlich der für ihre Interpretation erforderlichen klimatischen Parameter erläutert.

Der Untersuchungsumfang wie auch der Umfang und die Art der Instrumentierung einer Intensiv-BDF hängt entscheidend von den zu untersuchenden Prozessen ab. So erfordert z. B. die vollständige Erfassung von Stoffbilanzen einen wesentlich höheren apparativen und personellen Aufwand als die qualitative Erfassung der im Bodenwasser gelösten, pflanzenverfügbaren Nähr- oder Schadstoffe. Die hierzu erforderliche Instrumentierung unterscheidet sich wiederum von einer Ausstattung z. B. zur Erfassung von Austrägen durch Erosion. Allgemein verbindliche Anforderungen für alle Intensiv-BDF können daher nicht formuliert werden. Im folgenden Kapitel werden vielmehr Hinweise zu derzeit empfohlenen Verfahren für die Erfassung einzelner Pfade bzw. Prozesse gegeben.

Die obligatorischen Untersuchungsparameter können pfadbezogen voneinander abweichen, sofern sich ihre Auswahl primär an den bestehenden Gesetzen (z. B. BImSchG und WHG) und Regelwerken orientiert. Zur durchgängigen Erfassung von Stoffkreisläufen wird dagegen dringend empfohlen, die einzelnen ein- und austragsbezogenen Parameterlisten aufeinander abzustimmen.

Andererseits sollten für die jeweiligen Ein- und Austragspfade primär solche Stoffe untersucht werden, die für den betrachteten Prozess quantitative Bedeutung haben. So ist z. B. der Eintrag von Aluminium als versauerungsrelevantes Element über den Luftpfad mengenmäßig in der Regel unbedeutend und daher im Rahmen von Depositionsmessungen nicht obligatorisch zu erfassen. Im Zusammenhang mit der Bodenversauerung stellt hingegen der Aluminiumaustrag mit dem Sickerwasser eine entscheidende und somit obligatorisch zu erfassende Messgröße dar.

10.1 Klima und Witterung

Das Klima steuert wesentlich die langfristige Bodenentwicklung. Sofern die Interpretation des Stoffbestandes auf Basis-BDF die Kenntnis des Witterungsverlaufs erfordert (z.B. Temperatur oder Niederschlag als Proxy für C-Vorräte), kann dieser mit hinreichender Genauigkeit aus den Daten benachbarter Stationen der amtlichen meteorologischen Messnetze übertragen werden. Der Deutsche Wetterdienst bietet flächendeckend regionalisierte Klimadaten an, wobei ein Abgleich mit lokal gemessenen Werten durchaus sinnvoll sein kann. Dagegen hat der aktuelle Witterungsverlauf bestimmenden Einfluss auf die Transport- und Umsetzungsprozesse in Böden.

Die auf Intensiv-BDF zu beobachtenden Prozesse, vor allem des Wasserhaushaltes und des Stofftransportes, erfordern Informationen zum Witterungsverlauf mit engem räumlichem Bezug in hoher zeitlicher Auflösung. Steht die Stoffverlagerung mit dem Sickerwasser im Vordergrund, sollten nach Möglichkeit laterale Wasserbewegungen durch eine entsprechende Standortwahl ausgeschlossen werden. Andernfalls ist sicherzustellen, dass diese Wasserflüsse (v. a. oberirdischer und unterirdischer lateraler Zu- und Abfluss) ermittelt werden können. Folgende Klimaparameter sollten zum Zweck der Stoffflussberechnung mittels Wasserhaushaltsmodellen an den BDF gemessen werden:

- Niederschlag (ggf. Freiland und Bestand)
- Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer
- Lufttemperatur (in 2 m Höhe)
- relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit

Die Messung der Niederschlagsmenge und -intensität sollte mit einer Auflösung von < 0,2 mm und einer zeitlichen Auflösung von < 1 Stunde erfolgen, damit kurzfristige Prozesse im Wasserhaushaltsmodell berücksichtigt werden können (Oberflächenabfluss, Makroporenfluss, Interflow).

Zur Berechnung der Verdunstungsterme werden Daten zum Standort und zur Vegetation benötigt:

- nutzbare Feldkapazität, bzw. nutzbare Feuchteäquivalente der Horizonte
- effektive Durchwurzelungstiefe
- Bewuchs, Kulturart, Bodenbearbeitungs- und Erntetermine, Baumbestand, Entwicklungsstand des Pflanzenbestandes usw. (für die Ableitung vegetationspezifischer Faktoren zur Ermittlung der aktuellen Verdunstung aus der potenziellen Evapotranspiration, sowie der Interzeption).

Aus der Modellierung des Wasserhaushalts ergeben sich folgende abgeleiteten Wasserflüsse, aus denen schließlich in Verbindung mit Gehaltsmessungen Stoffflüsse berechnet werden können. Sie können aber auch als klimatische hydrologische Kennwerte für Boden und Standort verwendet werden:

- Potenzielle und tatsächliche Evapotranspiration (z. B. DWA 2018),
- Interzeptionsverdunstung (z. B. DWA 2018),
- Bodenwasservorrat pro Schicht und Gesamtprofil,
- Sickerwasserraten im Boden sowie Tiefensickerung bzw. Grundwasserneubildung.

10.2 Atmosphärische Deposition

Die atmosphärische Deposition ist der über den Luftpfad in ein Landschaftskompartiment eingetragene Stofffluss. Für Böden ist sie ein wichtiger Eintragspfad neben den Einträgen durch Bewirtschaftungsmaßnahmen. In der Regel ist unter Wald für viele Stoffe die atmosphärische Deposition der quantitativ dominierende Eintragspfad, unter Acker und Grünland der Eintrag über die Bewirtschaftung (Düngung, Pflanzenschutz usw.).

Die gesamte atmosphärische Deposition setzt sich aus mehreren Teilflüssen zusammen, denen unterschiedliche Prozesse zugrunde liegen:

- nasse Deposition über Regen und Schneefall
- trockene Deposition über gravitative Sedimentation von Partikeln
- Interzeptions-Deposition über Auskämmeffekt von Tröpfchen, Partikeln oder Gasen an feuchten und/oder trockenen Oberflächen (am häufigsten sind dies Pflanzenoberflächen, inklusive direkter stomatärer Aufnahme).

Für bodenbezogene Fragestellungen ist die Gesamtdosition von Interesse. Zu beachten ist dabei, dass diese mit Depositionssammlern nur annähernd erfasst werden kann, da die standorttypische Akzeptoroberfläche durch die Sammler nicht nachgebildet werden kann.

Dadurch lassen die Sammler die Interzeption unberücksichtigt. Dieser ist abhängig von der Größe der wirksamen Oberfläche und ihrer Sorptionseigenschaften (trocken oder nass, Wachsgehalt der Cuticula), aber auch von den meteorologischen Verhältnissen sowie der Immissionsituation. So fördern beispielsweise häufige Nebellagen den Auskämmeffekt beträchtlich.

Ist die Pflanzendecke hoch genug, um Sammler unterhalb der maßgeblichen Akzeptoroberfläche zu platzieren, kann deren Interzeption unter den realen Standortbedingungen messtechnisch erfasst werden. In der Regel ist dies an Waldstandorten unterhalb des Kronendaches durch Messung der sogenannten Bestandsdeposition möglich. Diese gliedert sich auf in die messbaren Teilflüsse:

1. Kronendurchlass
2. Stammabfluss
3. Streufall (anhaftender Anteil).

Allerdings ist die Bestandsdeposition nicht bei allen Stoffen mit der atmosphärischen Gesamtdeposition gleichzusetzen, aufgrund von folgenden Störeffekten:

- Stoffe, die über die Wurzeln von Pflanzen aus dem Boden aufgenommen werden, können über das Kronendach abgegeben werden (Leaching). Dadurch wird die Bestandsdeposition gegenüber der tatsächlichen atmosphärischen Gesamtdeposition erhöht. Dies betrifft alle Nährelemente und essentiellen Spurenstoffe.
- Stoffe können im Kronenraum direkt von den Pflanzen aufgenommen und dadurch der Bestandsdeposition entzogen werden (gesichert bei Nitrat und Ammonium bzw. Ammoniak).

Zur Abschätzung dieser Effekte sind schon in den 1980er Jahren Lösungsansätze entwickelt worden, die sich im Wesentlichen auf die Messung eines Tracerstoffes stützen, der nur in einem geringen Maße den oben genannten Störeffekten unterliegt, in der Regel Natrium oder auch Chlorid (Kronenraumbilanzmethode, z. B. ULRICH 1983, ULRICH 1994). Aus dem Verhältnis beispielsweise der Natrium-Deposition im Freiland zu der im Bestand kann die Interzeption für partikuläre Stoffe abgeschätzt und auf andere Stoffe übertragen werden. Es sind damit aber nur Näherungen möglich, da sich die Deposition verursachenden Prozesse stoffspezifisch gegenüber dem Tracer mehr oder weniger unterscheiden.

Ein weiterer Lösungsansatz besteht in der Abschätzung der atmosphärischen Gesamtdeposition mit Hilfe von Inferentialmodellen, in denen die Teilprozesse getrennt modelliert und parametrisiert werden (LAI 2012, SCHAAP ET AL. 2017). Die Kalibrierung bzw. Validierung solcher Modelle kann über den Vergleich mit Kronenraumbilanzen an einzelnen Standorten erfolgen (z. B. MEESENBURG ET AL. 2005, STICKSTOFFBW 2017, AHRENDT ET AL. 2020). Diese Modelle werden hier nicht weiter ausgeführt.

In der Praxis lassen sich damit zwei Typen von Depositionsmessstellen unterscheiden (s. LAWA 1996):

- Freilandmessstelle
- Messstelle der Bestandsdeposition.

Freilandmessstellen erfassen annähernd die akzeptorunabhängige Deposition, während die im Bestand erfasste Deposition akzeptorabhängig ist. Als Bestandsdeposition wird der Kronendurchlass (Bestandsniederschlag) sowie ggf. der Stammabfluss gesammelt. Der Bestandsdeposition hinzugerechnet werden muss für spezifische Stoffe der Streufall, an dem Teile der Interzeptionsdeposition anhaften. Bei Schwermetallen und organischen Spurenstoffen liegt der Beitrag durch Streufall im Bereich des Bestandsniederschlags.

An BDF kommen zur Messung der Freilanddeposition und des Kronendurchlasses typischerweise Bulk-Sammler (Totalisatoren) zum Einsatz. Das sind permanent offene Sammler in Form von Trichter-Flasche-Sammlern (Verdunstungsschutz) oder einfachen Topf-Sammlern.

Der Stammablauf spielt nur bei Laubbäumen mit glatter Rinde (z. B. Buche) eine quantitativ bedeutsame Rolle. Er wird durch am Stamm angebrachte Ableitrinnen in Sammelgefäße geleitet. Bei der Sammlung des Streufalls kommen vorwiegend gelochte Kübel oder Auffangnetze zum Einsatz (UKONMAANAHO ET AL. 2020).

Aufgrund der Heterogenität der Stoffflüsse unter Wald sind die Messungen jeweils in ausreichender Wiederholungsanzahl durchzuführen, wobei die erforderliche Sammleranzahl standort- und bestandsabhängig ist (CLARKE ET AL. 2020).

Wet-Only-Sammler erfassen die nasse Deposition auf Freiflächen. Wet/Dry-Sammler ermöglichen die getrennte Erfassung der trockenen und nassen Deposition. Beide Sammlertypen sind für die Kalibrierung von Depositionsmodellen von Bedeutung, spielen aber an den meisten BDF keine Rolle.

Fachgerechte Depositionsmessungen müssen neben den verschiedenen Eintragspfaden bzw. -prozessen auch die zu beobachtende Stoffgruppe berücksichtigen. In der Richtlinien-Serie VDI 4320 „Messung atmosphärischer Depositionen“ gibt es deshalb für verschiedene Stoffgruppen jeweils eine eigene Richtlinie, mit teilweise auch stoffgruppeneigenen Sammeleinrichtungen. Diese Richtlinien dienen primär dem Zweck der Luftreinhaltung und setzen deshalb zum Teil andere Schwerpunkte als Verfahren zur Ermittlung des atmosphärischen Gesamteintrags in Böden.

Bei einem Teil der deponierten Partikel handelt es sich um mineralische Stäube (Bodenpartikel, technogener Abrieb, Asche) sowie um biogene Partikel (Humuspartikel, Pollen usw.). Der Gehalt einer Bulk-Probe hängt damit vom Extraktionsverfahren ab. Der wasserlösliche Anteil wird also stoffspezifisch eine Unterschätzung der Gesamtdeposition liefern. Hier sind gemäß dem Untersuchungsziel die Verfahren zu wählen. Detaillierte Hinweise zur Einrichtung und zum Betrieb von Depositionsmessstellen im Freiland bzw. im Bestand zur forstlichen Dauerbeobachtung finden sich im ICP Forests-Manual (CLARKE ET AL. 2020).

Stoffspezifisch ist in vielen Fällen die Analyse von wässrigen Proben ausreichend. Für bestimmte Stoffe oder unter spezifischen Belastungssituationen sollten auch Extraktions- oder Aufschlussverfahren eingesetzt werden, um Gesamtdepositionsraten bestimmen zu können. Im Falle von wässrigen Lösungen müssen die Proben im Labor möglichst zügig weiterverarbeitet werden. Die Zwischenlagerung erfolgt im Dunkeln bei maximal 4°C über einem möglichst kurzen Zeitraum, um mikrobielle Umsetzungen zu minimieren. Der Einsatz von Konservierungsmitteln (z. B. Chloroform, Jodid, etc.) wird aus Gründen des Gesundheitsschutzes und möglicher Reaktionen mit den zu bestimmenden Stoffen nicht empfohlen. Das Einfrieren der Proben kann einige Inhaltsstoffe stabilisieren, wird nach CLARKE ET AL. (2020) jedoch nicht empfohlen, da organische Inhaltsstoffe durch den Gefrier- und Auftauvorgang verändert werden können und gelöster organischer Kohlenstoff sowie siliziumhaltige Komponenten koagulieren und somit zu Minderbefunden führen können.

Unter Umständen ist die Filtration zur Stabilisierung der Proben direkt nach dem Eintreffen im Labor zu empfehlen. Falls filtriert werden soll und genügend Probenmenge vorhanden ist, empfiehlt es sich, einen Vorlauf von bis zu 50 ml der filtrierten Probe zu verwerfen, da Membranfilter bestimmte Stoffe abgeben oder absorbieren können.

In einem Aliquot der Probe sollte direkt nach dem Eintreffen im Labor und vor der Filtration die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert bestimmt werden. Generelle Festlegungen zum Parameterumfang der Analysen können nicht getroffen werden, da für die jeweiligen BDF unterschiedliche Zielsetzungen bestehen. Zu einem Standardprogramm sollten neben elektrischer Leitfähigkeit und pH-Wert die Kationen NH₄, Na, K, Mg, Ca, Al, Fe und Mn, die Anionen Cl, NO₃, SO₄ und PO₄, Alkalinität, gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor gehören. Sind Schwermetalle von Interesse, sind mindestens Pb, Cd, Zn, Cu, Cr und Ni zu analysieren. Weitere Parameter richten sich nach den jeweiligen Belastungen an den BDF. Einen Überblick über die obligatorischen und ergänzend empfohlenen Parameter zur Untersuchung des Bodenwassers geben Tab. 10-1 a) und b).

Tab. 10-1: Untersuchungsparameter im Rahmen von Depositionsmessungen
a) Obligatorische Untersuchungsparameter

Parameter	Methode
pH-Wert	DIN EN ISO 10 523 C5 HFA 2022 D76.1
Leitfähigkeit	DIN EN 27 888 C8 HFA 2022 D77.1
<u>Anionen:</u>	
Chlorid	DIN EN ISO 10 304-1 D20 HFA 2022 D13.2
Sulfat	DIN EN ISO 10 304-1 D20 HFA 2022 D54.2
o-Phosphat	DIN EN ISO 15681-2 D46 HFA 2022 D44.2
Nitrat	

Parameter	Methode
Nitrit Carbonat	DIN EN ISO 10 304-1 D20 HFA 2022 D58.4 DIN EN ISO 13 395 D28 HFA 2022 D58.5 DIN 38 409-7 H7
<u>Kationen:</u> Ca, Na, K, Mg; Zusätzlich Al, Fe, Mn bei pH < 5 in Bodenlösung	DIN EN ISO 17 294-2 E29 HFA 2022 D11.1, D39.1, D30.1, D36.1 D1.1, D17.1, D37.1
<u>Spurenelemente:</u> As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	DIN EN ISO 17 294-2 E29 Hg: DIN EN ISO 12 846 HFA 2022 D3.1, D9.1, D14.1, D32.1, D47.1, D42.1, D6.1, D73.1
NH ₄ -N Gesamt N	DIN EN ISO 11 732 E23 HFA 2022 D58.3 DIN EN 12 260 H34 HFA 2022 D58.1
DOC	DIN EN 1484 H3 HFA 2022 D31.2

b) Ergänzend empfohlene Untersuchungsparameter

Parameter	Methode
<u>Anionen:</u> Fluorid Silikat	DIN EN ISO 10 304-1 D20 HFA 2022 D20.2 DIN EN ISO 16 264 H57 HFA 2022 D57.2
<u>Spurenelemente:</u> Ba, B, Co, Mo, Se, Sr, Ti, U, V	DIN EN ISO 17 294-2 E29 HFA 2022 D4.1, D7.1, D15.1, D38.1, D59.1, D64.1

Weitere wichtige Richtlinien bzw. Normen zur Messung der atmosphärischen Deposition werden von der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss herausgegeben:

- VDI 4320 Blatt 1: Probenahme mit Bulk- und Wet-only-Sammlern – Grundlagen,
- VDI 4320 Blatt 2: Bestimmung des Staubniederschlags nach der Bergerhoff-Methode (Inhaltsstoffe im Staubniederschlag gemäß weiteren Methoden),
- VDI 4320 Blatt 3: Bestimmung der Deposition von wasserlöslichen Anionen und Kationen - Probenahme mit Bulk- und Wet-Only-Sammlern,
- VDI 4320 Blatt 4: Bestimmung der Deposition ausgewählter polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAH) mit dem Trichter-Adsorber-Sammler,
- VDI 4320 Blatt 5: Bestimmung der Deposition von PCDD/F und PCB nach der Bergerhoff-Methode und GC-HRMS-Analyse,
- VDI 4320 Blatt 6: Bestimmung der Deposition PCDD/F und PCB nach der Trichter-Adsorber-Methode und GC/HRMS-Analyse.

Depositionsmessungen im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung sollten möglichst in landesweite Depositionsmessnetze eingebunden bzw. mit anderen Monitoring-Programmen im Sinne einer integrierten Umweltbeobachtung gekoppelt werden.

Hinsichtlich der Untersuchungsparameter und der zeitlichen Messintervalle sollte die Beobachtung der atmosphärischen Deposition soweit wie möglich mit anderen Stofffluss- und Vorratsuntersuchungen abgestimmt werden, um geschlossene Stoffbilanzen erstellen zu können.

Neben den dargestellten Untersuchungen stellen Moose und epiphytische Flechten gute Bioindikatoren hinsichtlich der weiteren Abschätzung von Stoffeinträgen aus der Atmosphäre dar (SCHRÖDER ET AL. 2019). Ein zusätzliches Monitoring kann aus diesem Grunde wertvolle ergänzende Hinweise auf die lokalen lufthygienischen Verhältnisse liefern.

10.3 Düngung

Düngung und Pflanzenschutz bewirken neben den Depositionen aus der Luft auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen den bedeutsamsten Stoffeintrag. Es ist aus diesem Grund erforderlich, die Art und Menge der ausgebrachten Dünge- und Pflanzenschutzmittel in einer Schlagkartei bzw. dem „Aufnahmeblatt Wald“ (s. Anl. 5-4:) festzuhalten (s. Kap 5). Um eine Quantifizierung des Stoffeintrages auf Element- bzw. Wirkstoffebene zu ermöglichen, sind die Stoffgehalte der aufgebrauchten Agrochemikalien, Wirtschaftsdünger und Sekundärrohstoffdünger zu ermitteln.

10.3.1 Probennahme Mineraldünger

Mineraldünger enthalten neben den für Pflanzen notwendigen Nährstoffen z. T. auch Schadstoffe wie z. B. Schwermetalle, die sich im Boden anreichern können.

Wichtig ist zunächst, den eingesetzten Mineraldünger möglichst eindeutig zu kennzeichnen, wozu der Name des Herstellers und die eindeutige Produktbezeichnung gehören. Auch müssen die vom Hersteller genannten Inhaltsstoffe erfasst werden.

Die im Handel befindlichen Mineraldünger werden kontinuierlich im Rahmen der Düngemittelverkehrskontrolle nach Düngemittelverordnung (DüMV 2012) in der jeweils aktuellen Fassung auf ihren Gehalt an ausgewählten Nähr- und Schadstoffen untersucht. Diese amtlich festgestellten Gehaltsangaben können - soweit von geringen Chargenunterschieden ausgegangen werden kann - für den Stoffeintrag durch Mineraldünger übernommen werden. Für die Bestimmung anderer relevanter Stoffe (z. B. Uran) können von den ausgebrachten Partien Proben genommen werden, um sie auf ihren Nähr- und Schadstoffgehalt zu untersuchen. Probennahme und Analytik erfolgen nach der VERORDNUNG ÜBER PROBENNAHMEVERFAHREN UND ANALYSEMETHODEN FÜR DIE AMTLICHE DÜNGEMITTELÜBERWACHUNG (DÜNGMPROBV) in der jeweils aktuellen Fassung. Zusammen mit den Angaben aus der Schlagkartei (Aufbringungsmenge, -zeitpunkt) kann so eine Quantifizierung dieser Stoffeinträge vorgenommen werden.

10.3.2 Probennahme Wirtschaftsdünger

Aufgrund der wechselnden Stoffgehalte von Wirtschaftsdüngern und Sekundärrohstoffen sind die jeweils ausgebrachten Partien zu beproben und zu untersuchen. Die besondere Herausforderung bei der Beprobung von Wirtschaftsdüngern besteht darin, möglichst die tatsächlich auf den Dauerbeobachtungsflächen ausgebrachten Chargen zu beproben und für die teilweise sehr heterogenen Wirtschaftsdünger repräsentative Proben zu gewinnen. Im Zweifel kann die Repräsentativität durch Gewinnung und Analytik mehrerer Mischproben verbessert werden.

Die Probennahme von Gülle erfolgt am besten unmittelbar aus den einzelnen Fässern vor Ausbringung des Inhaltes auf die Fläche. Bei Beprobung der Güllegruben sind „Güllestecher“ (Rohr mit Absperrschieber) einzusetzen, um die verschiedenen Gülleschichtungen repräsentativ zu erfassen. Es bietet sich an, Proben zu ziehen, wenn die/der Landwirt*in dabei ist, seine Flächen zu düngen und die Güllegruben dazu vorab intensiv durchmischt worden sind. Die Proben sind sofort zu kühlen und umgehend ins Labor zu bringen.

Aufgrund der Inhomogenität des Stallmistes (stark wechselnder Strohhanteil) empfiehlt sich die getrennte Analyse von drei Mischproben zu je 2 kg, die aus jeweils 10 Einstichen an verschiedenen Stellen des Misthaufens, am besten vom Mistwagen direkt entnommen werden.

Weitere Hinweise enthalten z. B. die „Empfehlungen zur Probenahme von flüssigen und festen Wirtschaftsdüngern“ des NIEDERSÄCHSISCHEN MINISTERIUMS FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ UND DER LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2021) oder die „Anleitung zur Beprobung von Wirtschaftsdüngern“ von MYRBECK ET AL. (2019).

Die für die Berechnung der Einträge benötigten Ausbringungsmengen werden der Schlagkartei (s. Kap 5) entnommen.

10.3.3 Sekundärrohstoffdünger

Sekundärrohstoffdünger erhalten vor dem Hintergrund des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eine zunehmende Bedeutung hinsichtlich des Stoffeintrages in landwirtschaftlich genutzte Flächen. Die diesbezügliche Entwicklung ist nicht abgeschlossen und es empfiehlt sich, auf ausgewählten BDF den Stoffeintrag durch Sekundärrohstoffdünger zu beobachten.

Die Stoffgehalte von Klärschlämmen, die zur landwirtschaftlichen Verwertung bestimmt sind, werden nach ABFKLÄRV in der jeweils aktuellen Fassung regelmäßig untersucht und können über den Bewirtschaftenden oder über die zuständigen Behörden recherchiert werden. Bei eigener Probennahme und Analytik sind die Vorgaben der ABFKLÄRV zu berücksichtigen.

Die Beprobung von Komposten erfolgt nach den gängigen Normen zur Probenahme fester, flüssiger, pastöser und schlammiger Bioabfälle, die in der Bioabfallverordnung in der jeweils aktuellen Fassung genannt werden.

Seit 2003 werden auch vermehrt Gärreste aus Biogasanlagen zur Düngung eingesetzt. Hier sind Gärreste aus reinen nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo)-Anlagen, aus Anlagen, die neben pflanzlichen Bestandteilen auch Wirtschaftsdünger vergären, sowie aus Kofermentationsanlagen zu unterscheiden und entsprechend zu kennzeichnen. Dieses kann v. a. im Hinblick auf darin enthaltende Nähr- und Schadstoffe, Arzneimittelwirkstoffe oder mikrobielle Belastungen von Bedeutung sein.

10.3.4 Analytik

Sofern nicht auf die amtlich ermittelten Stoffgehalte gem. Düngemittelverkehrskontrolle bzw. ABFKLÄRV zurückgegriffen wird, sind an den gezogenen Proben die in Tab. 10-2 zusammengestellten Untersuchungen durchzuführen.

10.4 Pflanzenschutzmittel und Pflanzenbehandlungsmittel

Bezeichnung und Menge der ausgebrachten Pflanzenschutzmittel und Pflanzenbehandlungsmittel wird in den Schlagkarteien (s. Kap. 5) festgehalten. Über die Erfassung der Handelsbezeichnungen und die Zulassungs- bzw. Kennnummern hinaus sind die Wirk- und Begleitstoffgehalte jedes ausgebrachten Mittels z. B. über die amtliche Zulassungsstelle, das BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT (BVL 2021), zu recherchieren und festzuhalten.

Darüber hinaus sind auch Pflanzenstärkungsmittel, die häufig keiner Zulassung unterliegen, zu erfassen. Informationen über Inhaltsstoffe sind allerdings teilweise nur schwer zu bekommen, da sie dem Produktschutz unterliegen können. Dazu zählen auch z. B. im Demeter-Anbau eingesetzte Präparate.

10.5 Ernteentzüge

Zur Stoffbilanzierung auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen ist der Stoffentzug über das Erntegut zu ermitteln. Hierbei werden grundsätzlich nur solche Pflanzenteile berücksichtigt, die nicht als Ernterückstände auf der Fläche verbleiben.

Tab. 10-2: Untersuchungsparameter des Düngers bei eigener Beprobung

a) Obligatorische Untersuchungsparameter

Parameter	Probenart	Umweltrelevanz
Trockensubstanz	Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Trockenmassebezug der Stoffe
organische Substanz (C _{org}), pH-Wert	Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Humusversorgung, pH-Effekte,
Elementgehalte: Gesamt-N, P, K, Ca, Mg, Na, S	Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Nährstoffversorgung, Stoffanreicherung, Auswaschung, Verlagerung
Schwermetalle: As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Schadstoffbelastung, Anreicherung, Verlagerung

b) Ergänzend empfohlene Untersuchungsparameter

Parameter	Probenart	Umweltrelevanz
Co, Mo, Se, B	Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Mikronährstoffe, Stoffanreicherung, Nahrungskette
Schwermetalle: Hg, Tl, U	Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Schadstoffanreicherung, Nahrungskette, Auswaschung
NH ₄ -N	N-Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoffe, Gärreste	Nährstoffversorgung, Anreicherung, Auswaschung, Verlagerung
Salzgehalt	Bioabfallkompost	Salzeintrag, Wirkung auf Pflanzen
Chlorierte Kohlenwasserstoffe	Sekundärrohstoffe	Schadstoffanreicherung, Nahrungskette
Organische Spurenstoffe nach ABFKLÄRV und BIOABFV	Klärschlamm bzw. Bioabfall, Gärreste aus Kofermentationsanlagen	Schadstoffanreicherung, Nahrungskette
Tierarzneimittelwirkstoffe	Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft	Eintrag von Antibiotika in Boden und Grundwasser
Salmonellen	Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft, Klärschlamm	mikrobielle Belastung mit Krankheitserregern
PFAS	Sekundärrohstoffe, Gärreste aus Kofermentation	Schadstoffanreicherung, Nahrungskette, Grundwassergefährdung

10.5.1 Probennahme Ackerfrüchte und Grünlandaufwuchs

Die quantitative Erfassung des Stoffentzuges durch Ackerfrüchte und Grünlandaufwuchs setzt eine Ermittlung des Ertrages und der Inhaltsstoffe voraus. Die Ertragsermittlung muss die Fläche repräsentativ abbilden, bei Reihenkulturen ist dabei in der Breite ein ganzes Vielfaches des Reihenabstandes zu beproben, um einen korrekten Flächenbezug herstellen zu können. Die Ernteermittlung muss zeitnah vor der Ernte des Flächenbewirtschaftenden erfolgen. An Mischproben erfolgen Analysen auf Trockensubstanzgehalt, Nährstoffe und weitere Stoffe. Die Probennahme für Radionukliduntersuchungen ist in der „Missanleitung für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt“ (BMU 1997) ausführlich beschrieben. Zukünftig werden dazu die Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität als Loseblattsammlung des Arbeitskreises Umweltüberwachung (AKU) herangezogen werden können (BUCHER ET AL. 2020).

Als Grundlage für eine exakte Ertragsermittlung und für die Gewinnung von Probenmaterial für Körnerfrüchte und Kartoffeln dient die „Technische Anleitung zur Methodik und Durchführung der Besonderen Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE)“ (BMEL 2018). Für Niedersachsen wurde dieses Verfahren auf die Kulturen Getreide als Ganzpflanzensilage, Silomais, Körnermais, Feldgemüse, Futter- und Zuckerrüben, Feldfutterbau sowie Grünland unter Wiesennutzung erweitert (BARTELS ET AL. 2018). Dagegen erfolgt bei Raps, Erbsen, Ackerbohnen, Wicken, Grassamen zum Drusch keine exakte Ertragsermittlung, da eine Probebeurteilung häufig mit viel Flurschaden verbunden sein könnte. Hier werden Ertragsangaben der/des Landwirtes*in verwendet.

Ertragsermittlung und Probengewinnung bei Getreide erfolgt nach der exakten Ernte- und Qualitätsermittlung auf 6 Entnahmeflächen je untersuchter Fläche, die parallel zu den Reihen mit 1 m Länge und als Breite einem ganzen Vielfachen des Reihenabstands von mehr als 1 m. (So wird bei einem Reihenabstand von 0,19 m eine Breite von 1,14 m (= 6 Reihen) beprobt.). Die beprobte Fläche ist zu dokumentieren. Ebenso muss notiert werden, ob die/der Landwirt*in beabsichtigt, das Stroh zu ernten oder auf der Fläche zu belassen. Im ersten Fall muss im Labor neben dem Korn auch das Stroh analysiert werden, um den Entzug durch die Abfuhr des Nebenproduktes ermitteln zu können. Das gesamte Material wird dem Labor zur Ermittlung des Frischgewichts, zum Drusch und zur Analytik zugeschickt. Je nach Verbleib des Strohs ergeben pro untersuchter Fläche eine Korn- oder die doppelte Anzahl Korn- und Stroh-Mischproben.

Vor allem bei Raps, Erbsen, Ackerbohnen, Wicken, Grassamen zum Drusch erfolgt keine Ernteermittlung, so dass es hier entscheidend darauf ankommt, verlässliche Daten zu den Frischsubstanzenerträgen vom Landwirt*in zu bekommen. Probenmaterial wird als 1- bis 2-kg-Mischproben aus 10 Teilproben am Mähdröschler entnommen und der Analytik zugeführt. Da das Material nicht räumlich abgegrenzten Flächen zugeordnet werden kann, ergibt sich eine Mischprobe je Boden-Dauerbeobachtungsfläche.

Die Probennahme von Hackfrüchten (Kartoffeln, Futter- und Zuckerrüben, Körner- und Silomais sowie Feldgemüse) erfolgt in Anlehnung an die Richtlinien der „Besonderen Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE)“, wie sie für Kartoffeln beschrieben sind. Entlang einer Kernflächendiagonalen der BDF sind je Teilkernfläche aus fünf bis sechs möglichst nicht benachbarten Reihen jeweils auf einer Länge von 2,5 bis 4,0 m Pflanzen zur Bestimmung des Frischgewichts zu ernten. Bei Rüben ist der Rübenkörper vom Blatt zu trennen und bei voraussichtlicher Abfuhr des Blattes durch den Landwirt eine Gewichtsbestimmung sowie Probenahme für das Rübenblatt vorzunehmen. Wird nicht das gesamte Pflanzenmaterial an das Labor verschickt, muss eine Bestimmung des Frischgewichtes vor Ort erfolgen, bevor daraus ein Aliquot für das Labor entnommen wird. Aus dem Pflanzenmaterial wird je untersuchter Fläche eine Mischprobe (bei Blattbeurteilung 2 Proben je untersuchter Fläche) zur Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes und ggf. der Inhaltsstoffe entnommen. Die beprobte Fläche ist zu dokumentieren.

Für die Probennahme von Grünlandaufwuchs und Feldfutter (Schnittnutzung inkl. Feldgras) wird der Frischertrag kurz vor jeder Schnittnutzung an sechs zufällig verteilten Entnahmeflächen von 1 m² je untersuchter Fläche im Gelände festgestellt. Aus dem auf 6 m² geernteten Aufwuchs wird eine Mischprobe pro untersuchter Fläche von 2 kg zur Bestimmung der Trockensubstanz und der Inhaltsstoffe gezogen.

Das Probenmaterial muss vor Verdunstung geschützt sowie möglichst kühl transportiert und gelagert sowie einer zeitnahen Analytik zugeführt werden, um eine Austrocknung und damit eine Überschätzung der Trockenmasseerträge, sowie mikrobielle Stoffumsetzungen auszuschließen.

Der Stoffentzug durch Beweidung, unter Berücksichtigung der Nährstoffausscheidungen und der Nährstoffaufnahme durch die Weidetiere, wird anhand der Angaben der Bewirtschaftungsdaten (s. Kap. 5) über Produktionsverfahren und Tierkategorie (nach DÜNGEVERORDNUNG), den Viehbesatz, die tatsächlich beweidete Fläche, die Beweidungsdauer, und das Durchschnittsgewicht der Weidetiere ermittelt. Hierbei kann es sich lediglich um grobe Schätzwerte handeln, auch ist zu hinterfragen, wie gleichmäßig die beweidete Fläche und die darin liegende Boden-Dauerbeobachtungsfläche von den Tieren beweidet worden sind.

10.5.2 Pflanzenproben Vorbehandlung

Bei der Vorbehandlung von Pflanzenproben sind einige Aspekte zu beachten, die über die reine Laborpraxis hinausgehen. Einerseits macht erst die Zusammenarbeit von Probennehmenden und Labor eine Ertragsermittlung möglich wird. Zum anderen stellt sich die Frage nach der Reinigung des Probenmaterials.

Die Vorgehensweise bei Pflanzenuntersuchungen ist beispielhaft beschrieben durch LUFANORD-WEST (2018). Zunächst ist die Bestimmung des Frischgewichtes erforderlich, wobei wichtig ist zu dokumentieren, ob es sich um die Probenmenge aus der flächenbezogenen Probenahme oder um ein Aliquot handelt. Aus der Kombination der Angaben des Probennehmenden und des Labors muss es möglich sein, den Frischertrag je Flächeneinheit zu ermitteln.

Es stellt sich die Frage nach der Reinigung des Probenmaterials. In der Regel zielt die Pflanzenanalytik auf das Inverkehrbringen ab, z. B. wird bei Getreide, Rapskörnern oder Gras, das Probenmaterial so verarbeitet wie es im Labor eingeht. Kartoffeln, Zuckerrüben sowie Wurzelgemüse werden dagegen gewaschen. Im Hinblick auf Fragen des Stoffexportes ist somit zu berücksichtigen, dass potenziell anhaftender Boden durch die Pflanzenanalytik in der Regel nicht erfasst wird. Soll dieser sogenannte Verschmutzungspfad mit untersucht werden, sind die unterschiedlichen Ernteverfahren zu berücksichtigen z. B. durch Haufwerks-Beprobung des von der Fläche abtransportierten Ernteguts.

Für Analysen auf Nährstoffe und anorganische Schadstoffe werden die Körner-, Feldfutterpflanzen-, Gras-, Blätter- und Nadelproben – soweit erforderlich – gehäckselt und bei 60°C im Trockenschrank getrocknet.

10.5.3 Analytik Pflanzen

Zur Ermittlung des Stoffentzuges durch die Ernte von Ackerfrüchten und Grünlandaufwuchs sind verschiedene obligatorische Parameter an den entnommenen Pflanzenproben zu bestimmen (Tab. 10-3 a). Zusätzlich dazu werden ergänzende Parameter empfohlen (Tab. 10-3 b).

Tab. 10-3: Untersuchungsparameter für Pflanzeninhaltsstoffe
a) Obligatorische Untersuchungsparameter

Parameter	Methode	Umweltrelevanz
Frischgewicht, Trockensubstanz, (Korngewicht)	VDLUF A (1976): Methodenbuch Band III, 3.1	Massenermittlung für Berechnung von Entzügen
Gesamtgehalte P, Ca, Mg, K	DIN ISO 11885-E22	Makronährstoffe, Nährstoffbilanzen P und K, Entzug von Basen
Gesamtstickstoff	VDLUF A (1995): Methodenbuch Band II.1, 3.5.2.7	N-Bilanz
Gesamtgehalte As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	DIN EN ISO 17 294-2 (E 29); 2005-02, DIN EN ISO 11 885 (E 22); 2009-09	Schwermetalle: Entzüge, Gehalte (Nahrungskette)

b) Ergänzend empfohlene Untersuchungsparameter

Parameter	Methode	Umweltrelevanz
Mn, Hg, Sr, Tl, V		Entzüge, Gehalte (Nahrungskette)
S, C		Bilanzen
¹³⁷ Cs	BMU (1997)	Gehalte (Nahrungskette)
PAK, PCB, CKW	VDLUFA (2014) Methodenbuch Band VII, 3.3.2	Entzüge, Gehalte (Nahrungskette)

10.5.4 Ernteentzüge im Wald

Durch die Bestimmung von Stoffgehalten in den Kompartimenten Nadeln bzw. Blättern sowie Ästen, Stammholz, Rinde und Wurzeln lassen sich zum einen Rückschlüsse auf den Ernährungszustand der Waldbäume und die Bodenfruchtbarkeit am Standort ableiten. Zum anderen können Aussagen über Stoffaufnahmen bzw. -anreicherungen in der Bestandsbiomasse gemacht werden. In Verbindung mit Daten zu den Biomassen der betreffenden Kompartimente, deren Zuwachsraten und Nutzungsmassen können Stoffvorräte im Pflanzenbestand als auch Entzüge aus dem Boden und aus dem gesamten Ökosystem berechnet werden. Wenn keine Messwerte vorliegen, können Literaturzusammenstellungen (JACOBSEN ET AL. 2003) oder Schätzmodelle (RUMPF ET AL. 2018) eingesetzt werden.

Für die Abschätzung der Trockenmassen der verbleibenden und genutzten Baumkompartimente stehen bundesweit einheitliche Ansätze zur Verfügung (VONDERACH ET AL. 2018). Vorgaben zur Probenahme, Parameterumfang und Analytik von Blättern bzw. Nadeln in Bezug auf Ernährungsfragen sind in RAUTIO ET AL. (2020) enthalten.

10.6 Bodenerosion

10.6.1 Anwendungsbereich im Rahmen der Bodendauerbeobachtung

Obwohl in den letzten Jahrzehnten große Anstrengungen zur Reduzierung des Bodenabtrags durch Wasser und Wind unternommen wurden, stellt Bodenerosion immer noch ein großes Problem dar, das ihre Berücksichtigung im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung erforderlich macht.

Hierbei können zwei grundlegende Zielsetzungen unterschieden werden:

a. Erosion und Akkumulation sind Ergebnis eines Partikeltransports, der über dessen Inhaltsstoffe mit einem Stofftransport verbunden ist. Dadurch kann es auf einer Boden-Dauerbeobachtungsfläche zu standortspezifischen Stoffaus- und -einträgen kommen. Diese Stoffflüsse können je nach Ausmaß der Bodenerosion quantitativ bedeutend sein und müssen deshalb bei Stoffbilanzen bestmöglich berücksichtigt werden. Verfahren zur Quantifizierung von Erosions- und Akkumulationsprozessen werden im Folgenden beschrieben.

b. Darüber hinaus besteht Interesse an einer repräsentativen Erfassung des Erosionsgeschehens. Hierzu ist eine Erosionskartierung in größeren Gebieten, z. B. im weiteren Umfeld einer Boden-Dauerbeobachtungsfläche oder in einem eigens für diese Zwecke ausgewählten Beobachtungsgebiet erforderlich. Diese Aufgabenstellung kann mit kleinräumlichen Boden-Dauerbeobachtungsflächen nicht zufriedenstellend bearbeitet werden und wird daher im Folgenden auch explizit nicht näher ausgeführt. Ein Beispiel für eine solche gebietsbezogene Dauerbeobachtung der Bodenerosion durch Wasser mittels wiederholter und systematischer Erosionskartierungen, welche in einigen Bundesländern durchgeführt werden, findet sich bei STEINHOFF-KNOPP (2021).

10.6.2 Standörtliche Quantifizierung von Bodenerosion und -akkumulation

Der Bodenerosion wird im Wesentlichen durch die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**Tab. 10-4 zusammengestellten Faktoren gesteuert.

Tab. 10-4: Steuernde Faktoren der Bodenerosion durch Wasser und Wind

	Wassererosion	Winderosion
“natürliche”, anthropogen nicht veränderbare Faktoren	Erosivität des Niederschlags ¹ Bodenerodierbarkeit Hangneigung	Windgeschwindigkeit Bodenerodierbarkeit Relief Windhindernisse
anthropogen veränderbare Faktoren	Hanglänge Bodenbedeckung und Bodenbearbeitung Erosionsschutzmaßnahmen	Feldlänge Bodenbedeckung Rauigkeit der Bodenoberfläche Erosionsschutzmaßnahmen

¹ Infolge des anthropogenen Klimawandels kann es allerdings zu einer Veränderung der Erosivität des Niederschlags kommen, die sich in einem geänderten Erosionsgeschehen niederschlägt.

Bodenabtrag und -akkumulation sind räumlich und zeitlich diskontinuierliche und meist schleichende Prozesse, die deshalb nur schwierig quantifiziert werden können. Allerdings bietet die standardisierte Erfassung und Beschreibung aktueller Erosionsformen (s. Tab. 10-5) die Möglichkeit, den Bodenabtrag zumindest halbquantitativ abzuschätzen.

Tab. 10-5: Verfahren zur Quantifizierung standörtlicher Erosionsprozesse

Verfahren	Methode	Vorteil	Nachteil
Kartierung aktueller Erosions- und Akkumulationsformen (Wasser)	DVWK-Merkblatt M 921 (2021) DIN 19 708:2021-11	Tatsächliche Nutzung abbildbar Hohe räumliche Auflösung Einzelereignisse quantifizierbar Abtrag + Akkumulation quantifizierbar Auf detaillierte Ursachen rückführbar	Aufwändig Personell, logistische Herausforderung
Kartierung aktueller Erosions- und Akkumulationsformen (Wind)	LABO (2018) NEEMANN (1991) UND NEEMANN ET AL. (1991)	Tatsächliche Nutzung abbildbar Hohe räumliche Auflösung Einzelereignisse quantifizierbar Abtrag + Akkumulation quantifizierbar Auf detaillierte Ursachen rückführbar	Aufwändig Personell, logistische Herausforderung
Retrospektive Kartierung von Sequenzen erodierter und akkumulierter Böden, ggf. ergänzt durch Korngrößen- und Nährstoffanalysen	Bodenkundliche Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005)	Wenig Aufwand Abtrag + Akkumulation quantifizierbar	Nur mittlere Aussagen Keine zeitliche Zuordnung Bestenfalls Schätzung Keine Ursachenanalyse
Multitemporale Feinnivellements der Geländeoberfläche	Präzisions-GPS im Raster	Mittlerer Aufwand Abtrag + Akkumulation quantifizierbar	Wie Kartierung Nur wenige Punktinformationen
Multitemporale 3-D-Vermessung der Geländeoberfläche (Laserscan oder Stereophotogrammetrie)	Terrestrisch oder Drohne	Hohe räumliche Auflösung Einzelereignisse quantifizierbar Abtrag + Akkumulation quantifizierbar Auf detaillierte Ursachen rückführbar Einzelereignisse sowie längere Zeitintervalle erfassbar	(noch) aufwändig und teuer Eingeschränkte Genauigkeit aufgrund von kurzzeitig variierender Oberflächenbeschaffenheit (Bewuchs, Bodenlockerungen usw.)
Abschätzung nach ABAG	DIN 19 708:2021-11, Methodendokumentation Bodenkunde (AD-HOC-AG BODEN 1994), Methode 3.4	Wenig Aufwand	Grobe Schätzung des Sedimenttransports mit großer Ungenauigkeit Keine Akkumulation quantifizierbar Nur mittlere Aussagen Geringe räumliche Auflösung (max. Hang)

Verfahren	Methode	Vorteil	Nachteil
Messung des aktuellen Bodenabtrags durch Wasser mittels Messfeld mit Auffangrinne	z. B. SEILER 1985, JORDAN & MÜLLER 1997	Mittlere räumliche Auflösung Einzelereignisse quantifizierbar Ursachenanalyse möglich	Hoher Aufwand („Feldversuch“) Keine Akkumulation quantifizierbar Artefakt durch Beeinflussung der Bewirtschaftung und weiterer Einflussfaktoren
Messung des äolischen Partikeltransportes mittels Sedimentfallen	z. B. DÜWEL 1995	rel. einfach umsetzbar, mittlere räumliche Auflösung, Sedimenttransport quantifizierbar über Modellrechnungen, Ursachenanalyse möglich (v.a. Bodenart, Bedeckung, Windgeschwindigkeit, Oberbodenfeuchte, Bodenbearbeitung)	Keine Akkumulation quantifizierbar Gewisser Aufwand bei Auf- und Abbau der Sedimentfallen, organisatorischer Aufwand Liefert keine direkten Ergebnisse zum Erosionsgeschehen (Modellrechnungen erforderlich)

Durch die aufgelisteten Verfahren bekommt man Informationen über den Massentransport des umgelagerten Bodens in der Regel in der Einheit Tonnen pro Hektar. Um zu stoffspezifischen Stoffflüssen zu kommen, sind darüber hinaus auch Informationen zu den Stoffgehalten im umgelagerten Bodenmaterial erforderlich. Diese lassen sich nur eingeschränkt aus der vorhandenen Bodenanalytik übertragen, da der Prozess der Bodenerosion zu einer Korngrößenfraktionierung zugunsten der Feinfraktion bzw. des Humus im transportierten Bodenanteil führt.

Eine eigenständige Bodenanalytik des transportierten Materials während Einzelereignissen wird in der Regel aufwandsbedingt nicht leistbar sein. Turnusmäßige Untersuchungen der Bodensequenzen entlang vorhandener Erosionsgradienten können aber zumindest längerfristig gemittelte Informationen liefern.

11 Vegetationsuntersuchungen

Die Artenzusammensetzung und Struktur der Vegetation sowie deren Veränderung ist ein sensibler Indikator für die Wirkung von Umweltveränderungen auf Ökosysteme. Demzufolge kann die Langzeituntersuchung der Vegetation Hinweise auf die Veränderung anderer Ökosystemvariablen liefern (CANULLO ET AL. 2016). Als Vegetation wird im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung die Gesamtheit der bodenkeimenden Gefäßpflanzen (krautige Pflanzen, Sträucher, Bäume), Moose und Flechten verstanden.

Ein bewährtes Indikatorverfahren zur standörtlichen Kennzeichnung und zur Registrierung möglicher Veränderungen besteht in der pflanzensoziologischen Einordnung und der Zuweisung von ökologischen Zeigerwerten anhand dafür geeigneter Arten. Naturnahe Ökosysteme, wie z. B. Wälder, sind, unbeachtet von anthropogenen Eingriffen, natürlichen Prozessen unterworfen, die u. a. durch die Altersstruktur bedingt sind.

Die Vegetationsuntersuchung auf BDF basiert auf einem dreistufigen Grundschema und umfasst mehrere detaillierte Vegetationsaufnahmen auf Teilflächen der BDF, sog. Vegetationskundlichen Dauerflächen (VDF), eine floristische und vegetationskundliche Inventarisierung der gesamten BDF sowie eine übersichtsmäßige Umlandkartierung. Dem dreistufigen Grundschema liegen folgende Gedanken zugrunde:

- **Vegetationsaufnahmen auf VDF:** Mit der wiederholten detaillierten Erfassung der Artenzusammensetzung und Abundanz der Vegetation auf den VDF werden Vegetationsveränderungen erfasst, die sich z. B. durch Zu- oder Abnahmen der Abundanz einzelner Arten oder dem Erscheinen bzw. dem Verschwinden einzelner Arten ausdrücken können. Damit untersuchungsbedingte Vegetationsveränderungen nicht zu Fehlinterpretationen führen, müssen die VDF so angelegt werden, dass sie von den anderen Untersuchungen innerhalb der BDF nicht berührt werden.
- **Gesamtartenbestand der BDF:** Das Arteninventar und die Vegetationszusammensetzung der gesamten BDF werden möglichst genau erfasst. Die Vegetationszusammensetzung repräsentiert die typischen Vegetationsverhältnisse des Bodens unter der gegebenen Nutzung.
- **Umlanderfassung:** Durch die Erfassung des Umlandes werden Nutzungs- und Vegetationsveränderungen dokumentiert, die sich indirekt auch auf die Vegetationsentwicklung innerhalb der BDF auswirken können. Darüber hinaus werden beispielsweise ausbreitungsfreudige Arten aus der Nachbarschaft erfasst, die potenziell in die BDF einwandern können. Für solche Arten wird somit ein Herkunftshinweis erbracht. Die Umlandkartierung erlaubt eine großräumigere Einordnung der Standortverhältnisse der BDF.

Für die Durchführung langfristiger Vegetationsuntersuchungen sind besondere Anforderungen zu berücksichtigen und müssen auf dem Prinzip des geringsten Eingriffs durch die Untersuchung basieren (MIERWALD 1998). Nicht selten werden Flächen, die in einem definierten Rhythmus möglichst exakt erfasst und dokumentiert werden sollen, schon durch die Art der Anlage und Markierung direkt oder indirekt beeinträchtigt. So können Pfosten auf Weideflächen zu einer verstärkten Trittbelastung

innerhalb der Dauerfläche führen (Scheuerpfahl für Weidevieh) oder als Ansitzwarte für Vögel dienen, die beim Aufliegen häufig nährstoffreichen Kot und keimungsfähige Samen abgeben. Bei der Anlage einer Dauerbeobachtungsfläche ist somit darauf zu achten, dass keine standortverändernden Rahmenbedingungen geschaffen werden. Darüber hinaus kommt es bei der sehr detaillierten Vegetationsaufnahme nicht selten zu einer lokal verstärkten Trittbelastung, die in empfindlichen Lebensräumen (flechtenreiche Dünen, mesotraphente Niedermoorvegetation usw.) zu Vegetationsveränderungen führen kann. In solchen Lebensräumen sind die Trittschäden der Aufnahme gelegentlich noch nach mehreren Jahren nachzuweisen.

11.1 Methoden

Für alle BDF wird das dreistufige Grundschema der vegetationskundlichen Erfassung angelegt. Hinsichtlich der einzelnen Untersuchungen (s. Tab. 11-1) bestehen jedoch z. T. Unterschiede zwischen verschiedenen Vegetationstypen oder Nutzungsformen (z. B. differenzierte Gehölzschicht-Ermittlung in Waldparzellen).

11.2 Erfassung der Vegetation auf vegetationskundlichen Dauerflächen (VDF)

An der BDF sind mindestens vier vegetationskundliche Dauerflächen (VDF) anzulegen. Die Flächengröße der VDF variiert in Abhängigkeit des Vegetationstyps zwischen 50 und 100 m². Die VDF werden eingemessen und unterirdisch vermarkt. Die Aufnahme der Vegetation auf den VDF beinhaltet die Gesamtheit der bodenkeimenden Gefäßpflanzen (krautige Pflanzen, Sträucher, Bäume), bei Wald-BDF auch bodenlebende Moose und Flechten. Alle Pflanzen müssen – soweit möglich – auf Artniveau angegeben werden. Ist eine Bestimmung auf Artniveau nicht möglich, so ist es dennoch erforderlich, klar unterscheidbare Taxa als solche anzugeben (z. B. Genus sp. 1, Genus sp. 2). Die Nomenklatur der Gefäßpflanzen sollte der vom Bundesamt für Naturschutz veröffentlichten „Liste der Gefäßpflanzen Deutschlands“ (BUTTLER ET AL. 2018; www.floraweb.de) folgen. Für die Nomenklatur der Moose wird CASPARI ET AL. (2018) herangezogen.

Für jede Art ist die Abundanz nach LONDO (1975) zu schätzen (Anl. 11-1:). Es sollte möglich sein, die Abundanzschätzung in die Angabe eines prozentualen Deckungsgrades zu überführen (VAN DER MAAREL 1979). Daneben ist auch der Gesamtdeckungsgrad der Vegetation, Teildeckungsgrade von Kulturarten, Beikräutern und Moosen sowie die Deckungsanteile von Streu und unbedecktem Boden zu schätzen. Zusätzlich wird empfohlen, die Wuchs- und Vegetationshöhe, die Homogenität des Bestandes, den phänologischen Entwicklungszustand und die Vitalität der Vegetation zum Zeitpunkt der Aufnahme sowie ggf. Soziabilität (Geselligkeit = Verteilung der Art innerhalb der Aufnahmefläche) zu erheben (DIERSCHKE 1989).

11.2.1 Ackerstandorte

Innerhalb jeder BDF werden vier mindestens 50 m² große VDF angelegt. Bei der pflanzensoziologischen Aufnahme sind neben der Größe und Bezeichnung der jeweiligen VDF die Abundanz der vorkommenden Arten, die Gesamtdeckung, die anteiligen Deckungsgrade von Kulturarten, Beikräutern und Moosen, ggf. die Wuchshöhe der Kulturfrucht bei starker Abweichung vom Normalzustand sowie die Artenzahl festzuhalten. Es werden die Stickstoff-, Reaktions-, Licht- und Feuchtezahlen nach ELLENBERG ET AL. (2001) angegeben.

Da die Vegetation auf Ackerstandorten stark von Störungen geprägt ist und sich je nach Nutzungszustand (z. B. Düngung, Herbizideinsatz) erheblich verändert, ist hier eine genaue pflanzensoziologische Aufnahme von Dauerquadraten nicht immer allein geeignet, die Auswirkungen der Standortbedingungen auf die Pflanzenarten zu ermitteln. Wichtig ist es dann, das natürliche Arteninventar eines Standortes wenigstens annähernd zu erfassen. Zu diesem Zweck wird im Rahmen der Kartierung der BDF wie im Folgenden beschrieben ein möglichst vollständiges Arteninventar der BDF erhoben. Nach Möglichkeit kann das Arteninventar der bewachsenen Ackerränder ergänzend erfasst werden.

11.2.2 Grünlandstandorte und brachliegende Flächen des Offenlandes

Um den Einfluss von Zufälligkeiten bei der Vegetationsentwicklung (z. B. lokal stärkere Trittschäden oder mehrere Kuhfladen innerhalb einer Dauerfläche auf einer Weide) zu reduzieren, werden innerhalb jeder BDF mindestens vier streifenförmige vegetationskundliche Dauerflächen (VDF) von mindestens 50 m² angelegt.

Bei der pflanzensoziologischen Aufnahme sind neben der Größe und Bezeichnung der jeweiligen VDF, Abundanz der vorkommenden Arten, die Gesamtdeckung und die Artenzahl festzuhalten. Nehmen Moose regelmäßig einen bedeutenden Anteil an der Vegetation ein, sollten sie ebenfalls erfasst werden, z. B. bei naturnahen Hochmooren oder brachliegenden Flächen. Eine Angabe zur Vitalität der Gesamtbestände (z. B. Wuchshöhe) sollte vor allem dann erfolgen, wenn diese deutlich von der Norm abweicht (z. B. bei kümmerformen, luxurierende Individuen). Es werden die Stickstoff-, Reaktions-, Licht- und Feuchtezahlen nach ELLENBERG ET AL. (2001) angegeben.

11.2.3 Waldstandorte

Auf jeder BDF ist auf mindestens vier quadratischen VDF mit jeweils mindestens 100 m² die Artenzusammensetzung und der Deckungsgrad aller Gefäßpflanzen, getrennt nach ein bis zwei Baumschichten, Strauchschicht (0,5 – 5 m) und Feldschicht (< 0,5 m), aufzunehmen. Falls vorhanden, sollte zusätzlich die Mooschicht aufgenommen werden. Mit Hilfe von VDF kann insbesondere die Entwicklung von Gehölzkeimlingen erfasst werden. Es wird empfohlen, innerhalb der VDF alle aufkommenden Gehölzarten quantitativ zu erfassen. Weiterhin wird empfohlen, von ausgewählten Exemplaren die Sprosslängen der Gefäßpflanzen zu messen, um die in der Bodenvegetation gespeicherte Trockensubstanz und Nährstoffvorräte abschätzen zu können (BOLTE 1999, BOLTE ET AL. 2004). Die Auswertung wird mit dem Programm PhytoCalc (BOLTE 2006) empfohlen, in dem die Schätzfunktionen für die Ermittlung der Vorräte an Trockenmasse sowie von Kohlenstoff, Stickstoff, Kalium, Magnesium und Calcium hinterlegt sind.

Auf anderen Substraten außer Mineralboden oder Humusaufgaben wachsende Pflanzen (z. B. Epiphyten, Pflanzen auf Felsblöcken, Totholz) dürfen nicht gemeinsam mit den bodenlebenden Pflanzen aufgenommen werden. Es wird jedoch empfohlen, diese gesondert mit Angabe des jeweiligen Substrats aufzunehmen.

11.3 Ermittlung des Gesamtarteninventars auf der BDF und pflanzensoziologische Zuordnung

Zusätzlich zu den Aufnahmen auf den VDF sind auf der gesamten BDF alle Gefäßpflanzen zu erfassen. Dieses kann ergänzt werden um Angaben zu ihrer Häufigkeit, z. B. mittels einer dreistufigen Skala (d = dominant, h = häufig, v = vereinzelt). Darüber hinaus werden die Stickstoff-, Reaktions-, Licht- und Feuchtezahlen nach ELLENBERG ET AL. (2001) angegeben. Für forstlich genutzte und andere naturnahe, nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen wird empfohlen, zusätzlich alle bodenbesiedelnden Moose aufzunehmen.

Die BDF sollte hinsichtlich ihrer Ausstattung mit Biotoptypen (ggf. Vegetationstypen) dokumentiert werden. Eine pflanzensoziologische Zuordnung der Vegetation dient u. a. zur standortkundlichen Interpretation der bodenkundlichen Untersuchungsergebnisse. Bei inhomogenen Vegetationsverhältnissen sollte die Ausdehnung aller eindeutig unterscheidbaren Biotoptypen (ggf. Vegetationstypen) auf der BDF kartographisch dokumentiert werden.

Für die vergleichende Interpretation der Daten wird empfohlen, Bestandesstruktur und phänologischen Entwicklungszustand der Vegetation zum Zeitpunkt der Aufnahme festzuhalten.

Auf jeder Wald-BDF sollten die Stammfußkoordinaten aller Bäume eingemessen werden. Es sind Art- und Schichtzugehörigkeit, die soziologische Klasse nach Kraft sowie der Umfang in 1,3 m Höhe zu erfassen. Zusätzlich wird von einem Teil bzw. allen Bäumen die Baumhöhe und die Kronenansatzhöhe erfasst.

11.4 Umlanderfassung

Die Umlanderfassung stellt ein eher qualitativ beschreibendes und stärker von subjektiven Aspekten geprägtes Instrument der Vegetationskartierung dar. Es kann dazu dienen, die BDF in den vegetationskundlichen Kontext einzuordnen. Auch können Besonderheiten im Umfeld erfasst werden, die zukünftig Auswirkungen auf die BDF haben können, wie das Vorkommen invasiver Arten oder von Neophyten.

Die Methodik der Umlanderfassung ist bisher nur unklar beschrieben, z. B. im Hinblick auf die Frage, welche Fläche in welcher Intensität im Umfeld bearbeitet werden soll und wie es gelingen kann, zeitliche Entwicklungen der Vegetation im Umfeld der BDF objektiv zu beschreiben.

11.5 Aufnahmezeitpunkt

Die Festlegung des optimalen Aufnahmezeitpunktes der VDF und der BDF richtet sich nach dem Entwicklungszustand des jeweiligen Vegetationstyps und kann zwischen einzelnen Jahren schwanken. Als Faustwert können beispielhaft folgende Zeiträume dienen:

- Äcker und Baumschulen: Erfassung der "sichtbaren" Begleitflora in der Regel wenige Wochen vor der Ernte (bei Raps direkt vor oder nach der Blüte, da später ein Vordringen auf die Fläche ohne Schädigung der Feldfrucht kaum möglich ist).
- Grünland und Parkflächen: Auf Mähwiesen Erfassung vor der Mahd zwischen Mitte Mai und Mitte Juni bzw. mehrere Wochen nach einer Mahd, auf Weiden Mitte Mai bis Juli.
- Heide und Trockenrasen: Zwei Aufnahmephasen innerhalb einer Vegetationsperiode: Frühjahrsaspekt zwischen Mitte April und Mai, Sommeraspekt zwischen Juli und September.
- Salzrasen: Erfassung im Zeitraum Juli bis September.
- Wälder: Zwei Aufnahmephasen innerhalb einer Vegetationsperiode: Ende April bis Mai zur Erfassung des Frühjahrspekts (nur auf BDF mit ausgeprägtem Vorkommen von Frühlingsgeophyten notwendig) und Ende Juli bis Mitte September zur Erfassung des Sommerpekts.

11.6 Untersuchungsturnus

Grundsätzlich sollten die Vegetationsuntersuchungen auf den BDF spätestens acht Jahre nach der jeweiligen Voraufnahme (Erst- oder Wiederholungsaufnahme) wiederholt werden. Die Erfassung der VDF sollte mindestens alle fünf Jahre erfolgen. Idealerweise wird der Gesamtartenbestand bei jeder zweiten Erfassung der VDF aufgenommen, z. B. VDF alle 3 Jahre, Gesamtartenbestand alle 6 Jahre.

Tab. 11-1: Vegetationsuntersuchungen auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen

a) Obligatorische Untersuchungsparameter

Untersuchung	Methode	Beobachtungsstelle	Intervall
Artenliste Gefäßpflanzen	BUTTLER et al. (2018) alternativ: ggf. <i>Flora Europaea</i> oder anerkannte Listen	Umland	bei der Flächen- einrichtung und bei Bedarf
Artenliste Gefäßpflanzen	BUTTLER et al. (2018) alternativ: <i>Flora Europaea</i> oder anerkannte Listen	BDF	≤ 8 Jahre
Artenliste Moose	CASPARI ET AL. (2018) oder anerkannte Listen	BDF – Wald	≤ 8 Jahre
Karte der Biotoptypen	Dokumentation der Ausstattung an Biotoptypen	BDF	≤ 8 Jahre
Vegetationsaufnahme (incl. Zeigerwerte)	nach LONDO (1975)	VDF	≤ 5 Jahre

b) Ergänzend empfohlene Untersuchungsparameter

Untersuchung	Methode	Beobachtungsstelle	Intervall
Karte der Biotoptypen	Dokumentation der Ausstattung an Biotoptypen	Umland	Bei Bedarf
Samenpotential	CASPARI ET AL. (2018) oder anerkannte Listen	BDF - Offenland bei besonderem Vorkommen von Moosen	≤ 8 Jahre
Vitalität	nach DIERSCHKE (1989)	BDF - Wald	bei jeder Aufnahme
Phänologie	nach DIERSCHKE (1989)	BDF - Wald	bei jeder Aufnahme

12 Datenmanagement

12.1 Grundsätze der Datendokumentation

Dem Begriff der Boden-Dauerbeobachtung ist die Langfristigkeit der Untersuchungen immanent. Damit verbunden ist die Notwendigkeit, einmal gewonnene Daten langfristig verfügbar und auswertbar zu halten. Angelehnt an das Datenmanagement in der Forschung lassen sich hinsichtlich der zu diesem Zweck notwendigen Datendokumentation folgende allgemeine Grundsätze ableiten:

Da sich die Zeit nicht zurückstellen lässt, ist die Untersuchung von zeitvariablen Bodenmerkmalen in der Regel nicht wiederholbar (sofern sie nicht an Rückstellproben möglich ist). Deshalb sind die gewonnenen Ergebnisse häufig "Unikate". Die Messwertgewinnung und Datenarchivierung müssen daher mit besonderer Sorgfalt erfolgen. Um Datenlücken durch Messstellenausfall zu vermeiden, sind soweit möglich Parallelmessungen durchzuführen bzw. Reservemesseinrichtungen bereitzuhalten. Werden Datenlücken nachträglich z. B. durch Interpolation geschlossen, muss dies entsprechend kenntlich gemacht werden. Darüber hinaus ist darzustellen, welche Interpolationsmethode angewendet wurde, um die Ergebnisse interpretieren zu können.

Die Zuverlässigkeit der Rückschlüsse, die aus den Befunden der Boden-Dauerbeobachtung gezogen werden können, hängt im hohen Maße von der Güte der vorgenommenen Datendokumentation ab. Da wichtige Randinformationen zu den Messungen, Probennahmen und Analysen nachträglich (u. U. nach mehreren Jahren und Personalwechsel), wenn überhaupt, nur unter Schwierigkeiten rekonstruiert werden können, kommt beim Betrieb von BDF der umfassenden Datendokumentation besonderer Wert zu.

Eine dauerhafte, personenunabhängige Datennutzung auf hohem Qualitätsniveau kann nur sichergestellt werden, wenn Größen, die einen Einfluss auf die Messergebnisse haben können (z. B. räumlich-zeitlicher Bezug inklusive Bodentiefe, Erhebungsmethodik, Messgeräteeigenschaften und -installationen, Wartungsereignisse, Einmessungsmethoden, einflussnehmende Umweltbedingungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen, räumlich-zeitliche Zuordnung von Laborproben, Analysenmethodik) vollständig dokumentiert werden. Diese Größen werden im Folgenden Begleitparameter genannt.

Im Verlauf der langfristigen Boden-Dauerbeobachtung werden sich, basierend auf neuen Fragestellungen und Erkenntnissen, immer wieder Änderungen und Erweiterungen ergeben. Nur bei einer umfassenden Datendokumentation ist erkennbar, wie weit die zunächst unter anderen Gesichtspunkten erhobenen Daten zur Beantwortung der neu hinzugekommenen Fragen geeignet sind.

Die langfristige Reproduzierbarkeit der Daten ist nur dann gewährleistet, wenn zu jeder Datenausprägung (Messwert, Analyseergebnis etc.) auch deren umfassende Datendokumentation gespeichert wird. Daher wird empfohlen, den UBA-Methodencode (KAUFMANN-BOLL ET AL. 2011) in die Länder- und Bundes-Datenbanken zur Verwaltung von BD-Daten zu implementieren. Der Methoden-Code ist eine Leitlinie zur einheitlichen Dokumentation für folgende Arbeitsschritte:

- Probennahme
- Transport
- Lagerung
- Probenvorbehandlung
- analytische Messverfahren.

Zu den Arbeitsschritten werden formulargestützt jeweils standardisierte Codes erstellt, die zu jedem Messwert gespeichert werden können. Mit dieser einheitlichen und vollständigen Methoden-Dokumentation ist die Vergleichbarkeit von Messwerten erleichtert, was bei der übergreifenden Datenauswertung von BDF auf verschiedenen räumlichen Skalen vorteilhaft für Länder und Bund ist. Zudem kann eine Qualitätssicherung der BDF-Daten erfolgen. Beispielsweise können Methodenwechsel erkannt werden, die sich auf die Auswertung der Messwerte und deren Ergebnisinterpretation auswirken können. Außerdem eignet sich der Methodencode, weil er Vergleichbarkeit herstellt für den Datenaustausch zwischen Bund und Ländern.

12.2 Art der Daten

Bei der Boden-Dauerbeobachtung wird eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Daten gewonnen. Dazu zählen Zustandsdaten, die der Charakterisierung des Bodens dienen. Sie resultieren aus:

- Bodenbeschreibungen,
- bodenkundlichen Laborergebnissen sowie
- bodenkundlichen Feldmesswerten und Kartierergebnissen.

Um die Anforderungen der umfassenden Datendokumentation zu erfüllen (Kap. 12.1), tritt zu den zustandsbeschreibenden Daten, mit denen die Eigenschaften oder der Zustand des Bodens beschrieben werden, die Gruppe der Begleitdaten. Letztere sind erforderlich, um Ereignisse und Maßnahmen zu dokumentieren, die Einfluss auf das Untersuchungsobjekt selbst haben können (z. B. landwirtschaftliche Bodenbearbeitung, katastrophale Umweltereignisse etc.) oder die u. U. die Gewinnung der Messwerte beeinträchtigen (z. B. Installations-, Wartungs- und Reparaturmaßnahmen an den Messstellen). Auch die Feststellung der Ein- und Austräge von Stoffen aus der Bewirtschaftung und der Deposition aus der Luft gehören dazu. Begleitdaten dienen dazu, die auftretenden Veränderungen der Messwerte zu interpretieren.

Hierzu zählen u. a. Daten zur:

- Standortbeschreibung,
- Witterung und zum Klima (Windgeschwindigkeiten, Niederschlagsintensitäten, Verdunstung etc.) zur Modellierung des Bodenwasserhaushalts,
- Landbewirtschaftung (Bodenbearbeitung, Stoffeintrag und Stoffaustrag),
- Deposition (Menge und Inhaltsstoffe) und
- Vegetation (Gesamtartenlisten, Deckungsgrade, Zeigerwerte etc.).

Zudem fallen noch Informationen an, die für eine Qualitätssicherung der Daten wichtig sind, wie Labor- oder Analysemethodenwechsel.

Ein Teil der Boden- und Begleitdaten wird auf Intensiv-Messflächen in Form von Feldmesswerten – zum Teil unter Einsatz automatischer Messeinrichtungen – in hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Diese Daten bilden – wie im Prinzip auch die Wiederholungsuntersuchungen auf Basis-Boden-Dauerbeobachtungsflächen – bei ausreichend großem Stichprobenumfang ($n > 30$) Zeitreihen, die eine spezielle Auswertungsmethodik erforderlich machen (Kap. 13.5.5).

12.3 Empfehlungen zur digitalen Datenhaltung

12.3.1 Datenbanken und Datenbankmanagementsysteme

Die folgenden allgemeinen Beschreibungen und Anforderungen an Datenbanken und Datenbankmanagementsysteme (DBMS) sind angelehnt an „Fundamentals of Database Systems“ (ELMASRI & NAVATHE 2016), sind im Besonderen natürlich auch für die Daten der Boden-Dauerbeobachtung und deren Begleitdaten gültig und sollen bei der Datenhaltung in den Bundesländern angewendet werden.

Eine Datenbank ist eine Sammlung von zusammenhängenden zentral verwalteten Daten mit einer inhärenten Bedeutung, d. h. hier, dass sich die Daten auf die Boden-Dauerbeobachtung beziehen. Eine Datenbank wird für einen bestimmten Zweck entwickelt, hat eine bestimmte Benutzergruppe und einige vorgefasste Anwendungen, an denen diese Nutzenden interessiert sind. In einer Datenbank wird ein Ausschnitt aus der realen Welt (BDF) repräsentiert - auftretende Änderungen in dieser Welt spiegeln

sich in der Datenbank. Die Beziehungen zwischen den (Zustands- und Begleit-)Daten müssen demnach so definiert sein, dass die Zusammenhänge der Realität in der Datenbank abgebildet werden können (Funktionale Integration).

Die Vermeidung von Redundanz ist eine Anforderung an eine Datenbank. Es ist die Voraussetzung für die Datenpflege, und um Konsistenz (semantische Korrektheit der gespeicherten Daten, Eindeutigkeit in den Tabellenbeziehungen) zu wahren. Redundanz bedeutet, dass Daten in einer Datenbank mehrfach gespeichert sind. Jedes Datenelement sollte aber nur einmal in der Datenbank vorhanden sein. Mehrfache Speicherung sollte nur auf strukturell unverzichtbare Ausnahmen beschränkt werden. So sollen beispielsweise keine doppelten Messwerte in der Datenbank vorkommen. Bei der Vermeidung von Redundanz hilft die sogenannte Normalisierung als ein mehrstufiges Verfahren schon bei der Planung der Datenbank.

Ein DBMS ist ein Mehrzweck-Software-System, das die Prozesse der Definition (i), Erstellung (ii), Bearbeitung (iii), Pflege (iv) und gemeinsamen Nutzung (v) von Datenbanken durch verschiedene BenutzerInnen und Anwendungen ermöglicht.

(i) Das Definieren einer Datenbank beinhaltet die Festlegung der Datentypen, Strukturen und Beschränkungen der Daten, die in der Datenbank gespeichert werden sollen.

(ii) Die Datenbankdefinition (beschreibende Information oder Metadaten) wird vom DBMS in Form eines Datenbankkatalogs oder -wörterbuchs gespeichert. Sie bietet eine Orientierungshilfe über die gespeicherten Daten in der Datenbank und soll in geeigneter Form mit allen nötigen Sicherheitsvorkehrungen allen Nutzenden zur Verfügung stehen. Ein Datenmodell beschreibt Daten und deren logische Beziehungen untereinander in graphischer Form. Das Datenmodell dient als Vorlage für das Design der Datenbank. Mit der referentiellen Integrität wird automatisch sichergestellt, dass Tabellen so aufeinander verweisen, dass eindeutige Zuordnungen aller Datensätze untereinander existieren.

(iii) Das Bearbeiten einer Datenbank umfasst Funktionen wie die Datenabfrage, um gewünschte Daten abzurufen, das Aktualisieren, um Änderungen in der realen Welt einzupflegen (z. B. um neue Werte nach Probenahme und Analyse zu integrieren).

Eine Abfrage bewirkt, dass einige Daten abgerufen werden. Eine Transaktion kann dazu führen, dass einige Daten gelesen und einige Daten in die Datenbank geschrieben werden. Die Bedienungssprache ANSI Structured Query Language (SQL) ermöglicht die Grundfunktionen Einfügen, Ändern, Löschen und Suchen in Bezug auf die gespeicherten Daten. Die Reaktionszeit bei Abfragen soll möglichst kurz sein. Zudem sollen für die Abfrageergebnisse Exportmöglichkeiten, z. B. in das csv- oder xlsx-Format gegeben sein.

(iv) Eine weitere Funktion des DBMS ist die langfristige Pflege der Datenbank, um das System mit den sich ändernden äußeren Bedingungen weiterzuentwickeln. Als Voraussetzung für eine Weiterentwicklung müssen die Strukturen eines DBMS veränderbar sein.

(v) Durch Datenunabhängigkeit wird die gemeinsame Nutzung einer Datenbank ermöglicht, d. h. mehrere Nutzende und Programme können gleichzeitig auf die gewünschten Datenformate zugreifen.

Mit einem DBMS soll der Schutz des Systems gegen Hardware- oder Software-Fehlfunktionen gewährleistet werden. In diesem Zusammenhang können Änderungsprotokolle und Wiederherstellungsverfahren zur Datenrekonstruktion bei der Fehlerbehebung und bei Systemabstürzen hilfreich sein. Eine regelmäßige Datensicherung ist ebenfalls wichtig.

Außerdem soll das DBMS Schutz gegen unbefugte oder böswillige Zugriffe über eine effektive Zugangskontrolle zu DBMS und Datenbank bieten. Diese Zugangssicherung kann in Abhängigkeit vom Nutzerkreis mit unterschiedlichen Zugriffsrechten gewährt werden. Bei geschützten, personenbeziehbaren Daten ist auch eine Datenverschlüsselung nötig.

12.3.2 Datenzusammenführung und Berichtspflichten des Bundes

Im Bodenschutz sind verschiedene Ressorts, Bundes- und Landesbehörden sowie Forschungseinrichtungen tätig, so dass sich nicht nur die Zuständigkeitsbereiche unterschiedlich gestalten, sondern auch die entsprechenden Datengrundlagen verteilt vorliegen. Eine quellenübergreifende Datenzusammenführung speziell von der Boden-Dauerbeobachtung ist entscheidend, um den Bodenzustand Deutschlands zu dokumentieren sowie eine Erfolgskontrolle der

bisher durchgeführten Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung für das Handlungsfeld Boden auf Grundlage belastbarer Daten zu ermöglichen. Dies erfordert effiziente technische Standards. Der Bedarf zur Datensammlung und -haltung ergibt sich darüber hinaus aus nationalen und internationalen Fachaufgaben, beispielsweise die Beratung der Bundesregierung durch Definition von Werten und Anforderungen gemäß BBodSchG sowie Erarbeitung und Fortschreibung der BBodSchV.

Eine rechtsverbindliche Berichtspflicht im elektronischen Berichtswesen auf EU-Ebene ist die INSPIRE Richtlinie sowie die Dienste-basierte Bereitstellung von INSPIRE-relevanten Daten. Die Bereitstellung der Daten und Metadaten muss interoperabel (plattformübergreifend, harmonisiert, nahtlos) und nach den darin fest definierten Standards erfolgen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollen abgestimmte und automatisierte Import- und Exportschnittstellen in den DBMS der datenhaltenden Stellen zur Verfügung stehen. Diese können über INSPIRE hinaus auch für zukünftig auftretende Berichtspflichten genutzt werden. Das Vorgehen zum Datenaustausch zwischen Bund und Bundesländern ist bislang in einer von der Umweltministerkonferenz verabschiedeten Verwaltungsvereinbarung zwischen Bund und Ländern über den Datenaustausch im Umweltbereich im Anhang II 4, Annex 3 „Daten von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ beschrieben.

12.3.3 Technische Spezifikationen

In der ARCHITEKTURRICHTLINIE FÜR DIE IT DES BUNDES (2020) haben Bund, Länder und Kommunen sich zum Ziel gesetzt, die Digitale Souveränität der Öffentlichen Verwaltung u. a. durch Verwendung von offenen Standards und Schnittstellen gemeinsam und kontinuierlich zu stärken. Die Architekturrichtlinie für die IT des Bundes und deren technische Spezifikationen (ARCHITEKTURRICHTLINIE FÜR DIE IT DES BUNDES - TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN ZUR ARCHITEKTURRICHTLINIE 2020) geben verbindliche Standards und Komponenten für die Datenverarbeitung vor, die auch in der Boden-Dauerbeobachtung genutzt werden sollen. Die Nutzung der empfohlenen Standards verhindert eine starre Insellösung. Damit können neue Anforderungen in der Datenhaltung und -Weitergabe erfüllt werden. Im Folgenden sind Architekturvorgaben mit der Bezeichnung der Spezifikation in Klammern aufgelistet:

- (ÜBAV-10) Gewährleistung der Interoperabilität von Diensten.
- (ÜBAV-11) Gewährleistung der Interoperabilität von IT-Lösungen.
- (DAAV-11) Sicherstellung einer vollständigen Zugriffssteuerung.
- (TIAV-03) Betrieb standardisierter Datenbanksysteme.
- (IDAV-01) Nutzung von einheitlichen und quelloffenen Formaten für den Austausch von Daten und Informationen.
- (IDAV-03) Nutzung einheitlicher Standards zur Beschreibung der Metadaten.
- (IDAV-04) Einsatz von Standards bei Geodaten und Geodiensten.
- (IDAS-03) Darstellung von strukturierten Daten zum Zweck des Datenaustausches.
- (TIAS-21) Nutzung einheitlicher Sprachen für die Bearbeitung und Abfrage von relationalen Datenbanksystemen.
- (TIAS-22) Nutzung einheitlicher Schnittstellen zur Kommunikation mit SQL-Datenbanken.
- (TNAS-05) Nutzung von einheitlichen Kommunikationsschnittstellen (für den Datenaustausch).

Als Empfehlung für ein existierendes Datenhaltungssystem, mit dem alle in Tab. 12-1 aufgeführten Datenarten gemeinsam in integraler und effektiver Form archiviert werden könnten, kann das elektronische Bodeninformationssystem (eBIS) des Umweltbundesamtes genannt werden. Die Dokumentation des Raumbezugs ist darin bereits strukturell verankert.

Tab. 12-1: Bodenzustands- und Begleitdaten der Boden-Dauerbeobachtung

Zustandsbeschreibende Daten
<p>Bodenbeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bodenkartierung / Profilsprache mit genauer Lagedokumentation - Bodenkundliche Beschreibung (darunter unter anderem Bodentyp, Horizonte, Ausgangsgestein, Humusgehalt, Grundwasserstand etc.) - Fotodokumentation und Fernerkundungsdaten <p>Bodenbeprobung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Probennahme-Methodik und -Muster - Lage der Probennahme-Stellen: Georeferenzierung (Koordinaten, Höhe über NN) <p>Laboranalyseergebnisse (an Proben gewonnen)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Boden - Pflanzen - Wasser (Oberflächen-, Drän-, Boden- und Grundwasser) <p>Feldmesswerte</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bodenfeuchte, -temperatur etc. - Wasserstände einschl. Grundwasser und Dränwassermengen - Witterung (Niederschlag, Wind, Lufttemperatur etc.) - Klima - Deposition - Erosionsbeträge
Begleitdaten
<ul style="list-style-type: none"> - Landnutzung - Land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen, Behandlungen und Erträge - Nutzungsvorgeschichte / Landnutzungserhebung mit jetziger und früherer Bodennutzung und Zeitangaben - Messstellen-Betriebstagebücher - Vegetationsaufnahmen - Zuwachs (Forst) - Kronenzustand: Vergilbung, Blattverlust - Erosionsgefährdung - Dokumentation anthropogener Einflüsse (Lage relativ zu Schadstoffquellen und Belastungsdauer, Siedlungsstruktur) - Ein- und Austräge von Stoffen <ul style="list-style-type: none"> - Deposition (Zusammensetzung) - Stoffgehalte im Bodenwasser einschließlich pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit - Stoffgehalte in Pflanzen und Pflanzenteilen - Stoffgehalte in Dünger, Pflanzenschutz- und Pflanzenbehandlungsmitteln - Sekundärrohstoffe - Erosionsereignisse und Bodenabtrag - Sonstige relevante Ereignisse

13 Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung

13.1 Einleitung

Die Boden-Dauerbeobachtung hat die komplexe Aufgabe, über lange Zeiträume Entwicklungen in Böden zu monitoren, ohne im Voraus absehen zu können, welche Messparameter und Einflussgrößen in Zukunft zu den bereits bestehenden hinzukommen bzw. welche neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse Nachbesserungen bei den derzeit schon durchgeführten Erhebungen nach sich ziehen könnten.

Dadurch stellen sich besondere Anforderungen an die Datenauswertung, um z. B. eindeutige Kausaleffekte beispielsweise zur Stoff-Dynamik zu identifizieren und eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse erzielen zu können. So können u. a. vielfältige Wechselwirkungen zwischen Einflussfaktoren auftreten, wodurch Kausaleffekte vermischt oder überlagert werden. Zudem werden über längere Zeiträume nicht nur eindimensionale und lineare Zusammenhänge, sondern wesentlich komplexere (multivariate) Dynamiken immer wahrscheinlicher.

Die sich ändernden Rahmenbedingungen innerhalb der Boden-Dauerbeobachtung bringen es mit sich, dass die Auswertungen fortlaufend überprüft und angepasst werden müssen. Schon allein deshalb kann im Folgenden keine abschließende Methodensammlung vorgelegt werden.

Für die bislang durchgeführten Auswertungen genügen über weite Strecken deskriptive statistische Methoden (Kap. 13.2.1). Im Bereich der Modellbildung liegen bislang nur wenige Fallbeispiele vor. Hier sind zwischen den Polen der rein statistischen und der rein deterministischen Modelle die zu den Daten und Fragestellungen geeigneten Methoden auszuwählen. Hierzu wird im Folgenden eine grundsätzliche Hilfestellung gegeben.

13.2 Statistische Verfahren

13.2.1 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik behandelt die Themen der Datenvisualisierung (z. B. Boxplots, Streudiagramme und Histogramme) und die Berechnung wichtiger Kenngrößen wie Lage- und Streuungsmaße sowie Zusammenhangsmaße für die Korrelation zweier Variablen (z. B. Pearson-Korrelation oder Rangkorrelation nach Spearman).

13.2.2 Inferentielle Statistik

Die inferentielle Statistik behandelt Zusammenhänge zwischen Stichproben und jeweiliger Grundgesamtheit und umfasst die Schätztheorie. In diesem Gebiet wird ein Schwerpunkt auf gegebene Hypothesen gelegt. Wichtige Themen hierbei sind u. a. Mittelwert- oder Medianvergleiche. Beispiele für wichtige Werkzeuge sind:

- Schätzung des Mittelwerts einer Grundgesamtheit aus einer Stichprobe, Vertrauensintervall dieser Schätzung
- parametrische und nicht-parametrische Einstichproben- und Zweistichproben-Tests
- Schätzverfahren der kleinsten Quadrate und der Maximum-Likelihood-Methode
- Regressionen, die die genannten Schätzverfahren verwenden, werden zur optimalen Beschreibung der Antwortvariable(n) durch unabhängige Variablen (quantitative Prädiktoren oder nominal- oder ordinalskalierte Faktoren mit den jeweiligen Faktorstufen) eingesetzt.
- Gemischte Modelle, die kontrollierte, also durch Messung gestützte sowie unkontrollierte (zufällige wie z. B. Messfehler usw.) Variablen berücksichtigen.

13.2.3 Explorative Statistik

Die explorative Statistik beinhaltet Analysen von Daten, von denen nur ein geringes Wissen über Zusammenhänge vorliegt. Ziel ist u. a., Hypothesen über die Ursache und den Grund der beobachteten Daten zu bilden. Daher sind neben der deskriptiven Statistik die explorativen Methoden ein gutes Mittel bei der Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung. Eingesetzte Werkzeuge sind teilweise die gleichen, die auch in der inferentiellen Statistik eingesetzt werden:

- Modelltypen (gesättigtes, maximales, minimal adäquates und Nullmodell)
- Modellvereinfachungen (Prinzip der Datensparsamkeit)
- Dimensionsreduktion zur Mustererkennung mit dem Ziel, latente Informationen aufzudecken (u. a. durch Hauptkomponentenanalyse (PCA), Hauptkomponentenregression (PCR), Regression der partiellen kleinsten Quadrate (PLSR)).

13.2.4 Weitere Verfahren

Nicht streng hierarchisch abgetrennt von den obigen Gebieten ist die multivariate Statistik mit

- strukturentdeckendem Fokus: u. a. PCA, Clusteranalysen, Faktoranalysen
- strukturprüfendem Fokus: u. a. Varianzanalyse, Strukturgleichungsmodelle, künstliche neuronale Netzwerke (KNN)
- Data-Mining, maschinelles Lernen mit Fokus auf Mustererkennung und Training und Validierungen von Algorithmen: u. a. Regressionsbäume, KNN, Support Vector Machine Regression).
- geostatistische Verfahren: z. B. Regression-Kriging
- Zeitreihenanalysen: z. B. ARMA (Auto-Regressive Moving Average)- und ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average)-Modelle (CRAWLEY 2012, LANTZ 2019, WELHAM ET AL. 2014, WEHRENS 2020); auch das Pooling ist hier anwendbar.

13.2.5 Steckbriefe ausgewählter statistischer Verfahren

13.2.5.1 Tests auf Normalverteilung und Varianzhomogenität

Die Voraussetzungen für den Shapiro-Wilk-Test, ein Test auf Normalverteilung, sind: Die Beobachtungen der Stichprobe müssen unabhängig voneinander sein. Die Stichprobe darf nicht kleiner sein als $n = 3$ und nicht größer als $n = 5000$. Es muss ein metrisches Skalenniveau der Untersuchungseinheit der Stichprobe vorliegen.

Der F-Test zum Vergleich von Varianzen zweier Stichproben besitzt als Voraussetzung Normalverteilung in beiden Stichproben.

13.2.5.2 *Bedingungen für Regressionen, Varianzanalysen und den Einsatz gemischter Modelle*

Für Regressionen, Varianzanalysen und den Einsatz gemischter Modelle sind Residuenüberprüfungen jeweils sehr wichtig.

Für diese Überprüfungen (Residuen erfüllen strenggenommen nicht die Unabhängigkeitsannahme) sind diagnostische Plots (z. B. Q-Q-Plots und Plots der Residuen gegen die modellierten Werte) sehr bedeutsam. In einem gemischten Modell können heterogene Varianzen zugelassen werden. Residuen sollten zudem hinsichtlich einflussreicher Datenpunkte untersucht werden. Bei fehlender Normalverteilung und/oder bei Varianzhomogenität können Datentransformationen durchgeführt oder generalisierte lineare Modelle verwendet werden. Zudem ist die Annahme vieler einfacher Ansätze wie Regressionen und Varianzanalysen die Unabhängigkeit der Beobachtungen. Ist diese Annahme verletzt, so können gemischte Modelle bzw. generalisierte lineare gemischte Modelle eingesetzt werden.

Grundsätzlich von großer Bedeutung ist die adäquate Berücksichtigung des Versuchs- bzw. Probenentnahmedesigns und gegebenenfalls ein Vorliegen von wiederholten Messungen. Gemischte Modelle mit festen und zufälligen Effekten können dabei das geeignete statistische Werkzeug sein.

13.2.5.3 *Bedingungen für Mittelwert- und Median-Vergleiche*

Der Einstichproben-t-Test hat als Voraussetzungen das Vorliegen metrischer Daten, Normalverteilung und das Vorhandensein einer unabhängig, zufällig gezogenen Stichprobe.

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest für eine Stichprobe benötigt metrische oder ordinalskalierte Daten, das Vorhandensein einer unabhängigen, zufällig gezogenen Stichprobe und Normalverteilung der Differenzen. Zudem ist die empfohlene erforderliche Anzahl von Daten $n = 6$. Ansonsten kann mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest für eine Stichprobe kein signifikanter Unterschied auf einem Signifikanzniveau von 5 % gefunden werden.

Der Zweistichproben-t-Test für verbundene Stichproben benötigt metrische Daten, eine Normalverteilung der Differenzen und unabhängige, zufällig gezogene Stichproben mit zugeordneten Paaren oder eine unabhängige, zufällig gezogene Stichprobe mit wiederholten Messungen.

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest für verbundene Stichproben besitzt die gleichen Bedingungen wie für eine Stichprobe mit Ausnahme der Bedingung der Normalverteilung der Differenzen. Zudem muss bei Rangtests mit kleinen Stichproben ($n \leq 25$) der exakte Test verwendet werden und nicht der asymptotische.

Der Zweistichproben-t-Test für unabhängige Stichproben benötigt metrische Daten, Normalverteilung und das Vorhandensein von unabhängigen, zufällig gezogenen Stichproben. Bei Vorliegen von Varianzhomogenität kann der klassische t-Test durchgeführt werden. Liegt keine Varianzhomogenität vor, kann der t-Test bei fehlender Varianzhomogenität (auch Welch-Test genannt) eingesetzt werden.

Der Wilcoxon-Rangsummentest hat als Voraussetzungen das Vorliegen metrischer oder ordinalskalierter Daten, Varianzhomogenität und ebenfalls das Vorhandensein von unabhängigen, zufällig gezogenen Stichproben.

13.2.5.4 *Bedingungen für Korrelationsberechnungen*

Die Berechnungen von Pearson-Korrelationen (Korrelationskoeffizient r) setzen voraus, dass die zu korrelierenden Variablen metrisch sind, beide Variablen normalverteilt sind, unabhängige Beobachtungspaare vorliegen und der untersuchte Zusammenhang linear ist. Weiterhin ist zu beachten, dass Korrelationskoeffizienten, die auf einer Stichprobengröße $n < 25-30$ basieren, dazu neigen, instabil

zu sein, d. h., die Größenordnungen der Korrelationen können von Stichprobe zu Stichprobe erheblich variieren. Zudem können die Bereiche der zu korrelierenden Variablen r erheblich beeinflussen und Ausreißer können einen großen Einfluss haben. Falls keine Normalverteilung(en) und/oder kein linearer Zusammenhang vorliegen, kann stattdessen die Rangkorrelation nach Spearman berechnet werden.

13.2.6 Möglichkeiten und Grenzen der beschriebenen statistischen Verfahren

Die oben beschriebenen Voraussetzungen gelten sowohl für die Auswertung von Einzel- als auch von Mischproben. Ein Vorteil der Untersuchung von Mischproben ist, dass diese das Finden des wahren Mittelwerts der Grundgesamtheit erleichtert, indem Analysenzeit und -kosten eingespart werden. Ein Nachteil ist, dass detailliertere Informationen zur Flächenvariabilität fehlen. In Toxizitätsstudien etwa (z. B. Nitratauswaschung oder Schwermetallbelastung) sind vielfach die Maxima zu berücksichtigen, nicht die Mittelwerte.

Vor Datenanalysen ist die Inspektion der Rohdaten von entscheidender Bedeutung: sind die Daten aus bodenkundlicher (bzw. land- oder forstwirtschaftlicher) Sicht plausibel oder nicht (s. Kap. 13.4.2)?

Voraussetzungen für die unterschiedlichen Datenanalysen sind neben den Bedingungen (bestimmte Verteilungsvoraussetzungen und sonstige Modellannahmen), die erfüllt sein müssen, auch das Versuchs- bzw. Probenentnahmedesign (CRAWLEY 2012, FIELD ET AL. 2012, TOMPKINS 1992, WELHAM ET AL. 2014; s. Kap. 6.1).

Alle o. g. statistischen Testverfahren weisen Unsicherheiten auf, da Rückschlüsse von Stichproben auf die jeweils zugrundeliegende Grundgesamtheit immer mit Unsicherheiten verbunden sind (Fehler 1. und 2. Art, Kumulierungen des Fehlers 1. Art bei multiplen Mittelwertvergleichen; CRAWLEY 2012), und da Abschätzungen von z. B. Regressionskoeffizienten unter Verwendung von Messwerten erfolgen, die mit Unsicherheiten verbunden sind.

Die Möglichkeiten und Grenzen der beschriebenen statistischen Verfahren hängen jeweils von den zugrundeliegenden Variationsursachen ab. In den jeweiligen Datenanalysen ist daher nach Plausibilisierung eine intensive fachliche Auseinandersetzung mit den zugrundeliegenden Variationsursachen erforderlich. Zu beantwortende Fragen können hierbei sein: welche Effekte (z. B. aufgrund erhöhter Stoff-Einträge) werden für eine spezifische BDF (z. B. mit sandigem Boden, der einen niedrigen pH und einen kleinen C_{org} -Gehalt aufweist) erwartet? Wie groß sind die Unsicherheiten der Eintragsabschätzung?

Es können u. a. Vorexperimente zum Abschätzen der Größe der Variationen, der Einflussfaktoren und der benötigten Stichprobengrößen sehr bedeutsam sein. Bei der Boden-Dauerbeobachtung können bisher erzielte Ergebnisse genutzt werden, um spezifisch für die unterschiedlichen Messvariablen im Laufe des Monitorings Datenerhebungen hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Auflösungen und hinsichtlich der wichtigen Eintrags- und Austragspfade in regelmäßigen Abständen weiter zu optimieren.

Die Qualität der Laboranalytik beeinflusst die Daten. Etwaige Laborwechsel und weitere Fehlerquellen (Aufbereitungs- und analytischer Fehler) sind zu berücksichtigen. Beispielsweise diskutiert LUBW (2019) die Bedeutung analytischer Offsets, Probenahmeartefakte/Bodenstörungen sowie Wiederholpräzision der Analytik und schlägt zur Minimierung ein System von Referenzmessungen anhand von Rückstellproben der Probenbanken vor.

Erschwert werden Auswertungen, wenn Stoff-Einträge nicht oder nur teilweise bekannt sind, wenn zeitliche Lücken der Eintragsinformation vorliegen, der Stoff-Eintrag gering ist und dadurch Unterscheidungen zwischen Eintragswirkungen und kleinskaliger Heterogenität erschwert sind. Auch laterale Verlagerungen, z. B. mit dem Grundwasserstrom, sind möglich. Solche Fälle benötigen einen deutlich höheren Stichprobenumfang als die einfacheren obigen Fälle. Grundsätzlich gilt für Regressionen, Varianzanalysen und den Einsatz gemischter Modelle, dass der benötigte Stichprobenumfang von der Varianz und von der nachzuweisenden Effektgröße abhängt. FIELD ET AL. (2012) geben z. B. für aussagekräftige Regressionen Faustzahlen von 10-15 Beobachtungen pro Prädiktor (die unabhängige Variable in einer Regression) an. Die nachweisbare Effektgröße lässt sich um die Wurzel der Stichprobenerhöhung verringern (4-faches n , halbierte Effektgröße).

13.3 "Statistische Signifikanz" und "praktische Relevanz"

In der Boden-Dauerbeobachtung ist nicht in erster Linie entscheidend, ob eine Änderung als „signifikant“ aus einem statistischen Test hervorgeht. Es ist vielmehr wichtig, ob die Änderung im Stoffgehalt oder -vorrat eine praktische umweltrelevante, bodenkundliche oder z. B. pflanzenbauliche Bedeutung hat.

Deshalb ist es sinnvoll, gerade bei einfachen Vergleichen Vertrauensintervalle für Differenzen, statt nur p-Werte, zu betrachten. Diese Differenzen sind aussagekräftiger als vermeintlich eindeutige Signifikanztests, weil sie die realen Verteilungen, Streuungen und Größenordnungen visualisieren. Ob eine Stoffveränderung in Abhängigkeit von der Zeit relevant ist, kann v. a. anhand des Vertrauensintervalls beurteilt werden.

Bei multiplen Vergleichen (Vergleiche mehrerer Termine) können viele "Fehlalarme" aufgrund von Kumulationen des Fehlers 1. Art entstehen (Nullhypothese wird zurückgewiesen, obwohl sie richtig ist).

Die hier vorgestellte Vorgehensweise über Vergleiche via Vertrauensintervalle ist sinnvoll, solange Zeitreihen noch kurz sind, Auswertungen sich selektiv auf bestimmte Parameter konzentrieren und die Frage im Vordergrund steht, ob überhaupt Veränderungen auftreten. Mit zunehmender Dauer des Programms ergeben sich erweiterte Auswertungsmöglichkeiten (s. Kap. 13.5).

13.4 Vorüberlegungen zur Auswertung in der Boden-Dauerbeobachtung

13.4.1 Planung

Für die Auswertungen ist die grundsätzliche Planung von sehr großer Bedeutung. Denn schon dabei wird ein großer Anteil dessen festgelegt, was später überhaupt ausgewertet werden kann. Insbesondere sollten alle Einflussfaktoren erfasst werden, die nach dem aktuellen fachlichen Kenntnisstand als erklärende Variablen eine Bedeutung für die untersuchte Fragestellung haben.

13.4.2 Plausibilitätsprüfung

Datenanalysen sollten in einem mehrstufigen Prozess durchgeführt werden. Denn unplausible Rohdaten können meist erst durch einen Auswertungsschritt erkannt werden. Zur Plausibilitätsprüfung sollte bodenkundliches Vorwissen genutzt werden. Beispielsweise sind für Kupfer, einem essenziellen Spurenelement für Pflanzen, die relevanten Eintragspfade, Interaktionen zwischen Pflanzenwurzeln, Transportgeschwindigkeiten in Böden usw. unterschiedlich z. B. gegenüber dem gering löslichen Blei.

Ansätze zur Plausibilitätsprüfung liefert folgende Aufzählung:

- Bei bekannten Eintragsquellen, die von oben, z. B. über den Luftpfad oder die Düngung einwirken, sind zuerst und in größerem Maße Effekte in den oberen Horizonten zu erwarten.
- Scheinbar signifikante Änderungen in tieferen Bodenschichten helfen Unplausibilitäten aufgrund von Störeinflüssen wie z. B. räumliche Variabilität, Labor- und Aufbereitungsfehler für den jeweiligen Stoff kritisch einzuschätzen (z. B. HLNUG 2016).
- Wichtige Plausibilitätskontrollen sind u. a. Abgleich mit Ergebnissen von Stoffflussmessungen (Bilanzierungen), Nachmessungen und Laborringversuche (LBEG 2015, HLNUG 2016, LUBW 2019).
- Jeweils überraschende, ausreißerverdächtige Werte sollten, soweit noch möglich, nachgemessen werden.
- Unplausible Werte sollten immer nach der Natur des untersuchten Prozesses festgelegt werden. „Blinde“, d. h. rein verteilungsbasierte Definitionen für einen ausreißerverdächtigen Wert sollten nur die letzte Möglichkeit darstellen, wenn keine wissensbasierten Regeln vorhanden sind. Eine

mögliche Definition eines verteilungsbasierten Ausreißers ist z. B., wenn ein Wert kleiner bzw. größer als das Eineinhalbfache des Interquartilsabstands, d. h. zwischen dem 1. Quartil mit 25 % der Daten und dem 3. Quartil mit 75 % der Daten der sortierten Stichprobe vorliegt (u. a. LABO 2017).

- Wichtige Vorauswertungen zur Plausibilitätskontrolle können mit Boxplots und Histogrammen durchgeführt werden. Streudiagramme, Korrelationen und partielle Korrelationen geben erste Hinweise über mögliche Beziehungen der Messvariablen zueinander, wobei aber berücksichtigt werden sollte, dass selbst in Datensätzen mit Zufallszahlen enge Korrelationen – ohne bodenkundliche Bedeutungen – gefunden werden können. Eine partielle Korrelation ist die Korrelation von zwei Variablen unter Ausschluss einer oder mehrerer anderer Variablen (z. B. LUDWIG ET AL. 2015).
- Die bei wiederholt durchgeführten Inventuren gemessenen Gehalte lassen sich anhand der zugehörigen Stoffbilanzen elementspezifisch plausibilisieren. Das funktioniert auch in die andere Richtung, weil zwischen Stoffbilanz und Inventur der Zustandsgrößen eine Redundanz im Informationsgehalt besteht.
- LUBW (2019) enthält zahlreiche Beispiele, wie bodenkundliches Prozesswissen zur Datenplausibilisierung eingesetzt werden kann. Werden etwa gleichhohe Konzentrations-Änderungen unabhängig von der Bodentiefe festgestellt, ist das ein starkes Indiz für das Vorliegen von Artefakten (meist Probenaufbereitung plus Analytik). Die Größenordnung von Änderungsraten lässt sich durch überschlägige Salden-Abschätzung gut eingrenzen. Werden die Maxima der Salden-Abschätzung überschritten, muss auf mögliche Artefakte geprüft werden.

13.4.3 Weitere Hilfestellungen

Für erste Auswertungen bieten folgende Ausführungen hilfreiche Hinweise.

- Zur Flächenhomogenitätsprüfung: Intensive initiale Gehalts- und Vorratskartierungen der Flächen, z. B. durch XRF-Spektroskopie.
- Zur bodenkundlichen Charakterisierung des Profils: Erstellung von Tiefenprofilen inkl. der bodenkundlichen Standortparameter und mineralogischer Zusammensetzungen.
- Zur Nachverfolgung von eingetragenen Stoffen an Intensiv-BDF: Vergleich Stoff-Eintragsdaten mit Stoff-Vorräten, d. h. Stoffbilanzierung (z. B. LBEG 2015, für Cu); dazu sind Wasserhaushaltsgrößen von Bedeutung (z. B. HLNUG 2016) sowie Sickerwasseranalysen.
- Einfluss der Verwitterung auf die Elementverteilung zwischen Ober- und Unterboden: Nutzung eines konservativen Tracers, z. B. Titan als immobiles Element, dessen Eigenschaften und Verhalten bei der Untersuchung der An- oder Abreicherung eines Zielelements (z. B. Uran) herangezogen werden kann, sofern bestimmte Voraussetzungen gelten (z. B. BIGALKE ET AL. 2016).
- Anpassung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Bodenprobennahmen an die Einträge und den Stofftransport: Da initial unbekannt, können Schätzungen aus der Literatur hilfreich sein.
- Ergänzung der Festphasen-Analytik (z. B. an ausgewählten Terminen): Neben z. B. königswasser-extrahierbaren Gehalten auch Untersuchung auf Vollaufschlussgehalte, Bodenfraktionen und unterschiedliche mobile und pflanzenverfügbare Fraktionen.
- Aufschlüsseln in gering (z. B. Einträge nur über Deposition) und hoch belastete Standorte (standortübergreifender Ansatz A): Untersuchung mittels Regressionen, welche Einflussfaktoren/Variablen die Stoff-Gehalte/-Vorräte in gering belasteten Böden im Unterschied zu

höher belasteten Böden beschreiben. Auch hier ist Vorwissen zur Planung des erforderlichen Stichprobenumfangs nützlich, z. B. wieder über Schätzungen der mutmaßlichen Stoffdynamik anhand der Literatur. Bodenkundliche Expertise hilft, die BDF sinnvoll zu gruppieren. Die zeitliche und räumliche Intensität der Messungen an einzelnen BDF kann anhand der Stoffdynamik-Abschätzung optimiert werden (Rückkopplung auf Planung). In einem Folgeschritt könnte neben diesem Kalibrierungsschritt überprüft werden, ob eine Gruppierung der BDF in einen Kalibrierungs- und einen Validierungsdatensatz dann ebenfalls erfolgreiche Regressionsmodelle ergibt.

- Nutzungseinflüsse detektieren durch Vergleich mit anderen Nutzungen (standortübergreifender Ansatz B): Einen Hinweis auf die schleichende Anreicherung von Uran in Oberböden als Folge der Phosphatdüngung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen identifizierten UTERMANN & FUCHS (2008) anhand von Bodenuntersuchungen an ca. 1.000 land- und forstwirtschaftlich genutzten Standorten in Deutschland, an denen die Gehalte an königswasserextrahierbarem Uran in Ober- und Unterböden erfasst wurden. Im Vergleich zu Forstböden, für die ein langjähriger Uraneintrag über Phosphatdünger ausgeschlossen werden kann, wiesen ackerbaulich genutzte Böden eine mittlere Anreicherung von 0,15 mg Uran/kg auf.
- Nachverfolgung des Sickerwasserpfad und weiterer Pfade: z. B. Beobachtung des Austrags über Erosion und Biomasseexport.
- Nachweis von Anreicherungen im Oberboden über die Zeit: Günstig ist, wenn z. B. hohe (deutlich oberhalb der Nachweisgrenze) kumulative Einträge eines Elements für einen Zeitraum vorliegen, die zu einer Anreicherung im Oberboden führen, die höher ist, als die räumliche Variabilität der Elementverteilung innerhalb der BDF. In diesem Fall kann der kumulative Element-Eintrag als Prädiktor für Regressionen mit dem Elementgehalt bzw. -vorrat im Boden als Antwortvariable verwendet werden. Auch könnte man einen starken Element-Pulseintrag oder einen gestoppten Eintrag betrachten. Beispielsweise wurden in LFU (2011) u. a. solche Stoffbelastungen diskutiert und modelliert, bei denen ein Pulseintrag an u. a. radioaktivem ^{134}Cs (Halbwertszeit 2.06 a) und ^{137}Cs (Halbwertszeit 30.2 a) in die Böden aufgrund der Tschernobyl-Katastrophe auftrat. Als gestoppten Eintrag lässt sich z. B. die deutliche Abnahme der Pb-Einträge in die Böden aufgrund des Verbots von bleihaltigem Benzin in Deutschland auffassen. In all diesen Beispielen liegt eine klar definierte Eintragsdynamik vor.
- Erkenntnisgewinn zu Beziehungen zwischen Bodenparametern ohne Vorliegen einer zeitlichen Veränderung: Wenn die Variable Zeit keine ursächliche Bedeutung hat, weil die zeitlichen Änderungen geringer als die kleinskalige räumliche Heterogenität z. B. eines Unterbodenhorizontes sind, können Messergebnisse verschiedener Termine gepoolt ausgewertet werden, um bei höherer Stichprobenzahl Korrelationen zwischen den Boden-Messvariablen (z. B. Cu_{KW} , pH, C_{org} , Tongehalt, etc.) zu untersuchen (LUDWIG ET AL. 2022). Diese Untersuchung kann dann auch für die Interpretation einer doch vorliegenden zeitlichen Dynamik an anderen Standorten, wie im vorherigen Fall beschrieben, hilfreich sein.

13.5 Weiterführende Datenauswertungen

13.5.1 Tiefenstufenbezogene Regressionen

In einem Folgeschritt der Datenauswertung können bodenkundlich begründete mathematische Beziehungen zwischen den verschiedenen Messvariablen aufgestellt werden. Dazu können zunächst explorativ Regressionsbeziehungen zwischen z. B. königswasserextrahierbaren, mobilen und pflanzenverfügbaren Stoff-Fractionen und unterschiedlichen Einflussfaktoren/Variablen (z. B. pH-Wert, C_{org} - und Ton-Gehalte) für einzelne BDF in den jeweiligen Tiefenstufen aufgestellt werden. In diesem

Folgeschritt steht zunächst die Frage im Vordergrund, ob es für die betrachtete Tiefenstufe überhaupt Beziehungen mit gewissem Erklärungsgrad (z. B. Bestimmtheitsmaß $R^2 \geq 0.5$) gibt.

13.5.2 Analysen zeitlich wiederholter Messungen

Sollen wiederholte Messungen analysiert werden (also Messungen zu verschiedenen Terminen), für die gegebenenfalls hierarchische Probenentnahmedesigns (z. B. gepoolte Auswertung von sechs BDF mit sandigem Oberboden für vier Termine, für die jeweils pro Termin vier Beprobungen pro BDF durchgeführt wurden) vorliegen, so ist eine korrekte Berücksichtigung wiederholter Messungen und des hierarchischen Probenentnahmedesigns in gemischten Modellen bedeutsam (WELHAM ET AL. 2014). Bevor solch eine Auswertung durchgeführt wird, ist eine zentrale bodenkundliche Frage, was die wiederholte Messung inhaltlich bedeutet, also ob überhaupt eine kausale zeitliche Dynamik vorliegt oder ob zu verschiedenen Terminen lediglich die kleinskalige Heterogenität erfasst wird, so dass eine scheinbare zeitliche Dynamik lediglich ein Hintergrundrauschen widerspiegelt. Diese Frage kann z. B. über abgeschätzte Stoffbilanzen geklärt werden.

13.5.3 Grundsätze bei der Anpassung von statistischen Modellen

Ein wichtiges Werkzeug für die Modellvereinfachung ist der Grundsatz der Sparsamkeit („Occam's razor“: sich auf das Wesentliche beschränken). Ein Prädiktor (also eine quantitative unabhängige Variable) soll nur dann in einem Regressionsmodell mit z. B. einem Stoff-Gehalt als abhängige Variable berücksichtigt werden, wenn er die Modellanpassung substantiell verbessert. Dies bedeutet, solange die Anpassung zweier Modelle (ein Modell mit allen Prädiktoren und ein Modell, welches einen Prädiktor weniger enthält) ähnlich ist, bevorzugt man ein Modell mit $p-1$ Prädiktoren statt mit p Prädiktoren, ein lineares Modell statt einem Modell mit gekrümmtem Verlauf, ein Modell ohne Interaktionen (Interaktionen sind Produkte zweier unabhängiger Variablen, beispielsweise der Ton-Gehalt multipliziert mit dem C_{org} -Gehalt) statt mit Interaktionen zwischen den Variablen und ein Modell mit leicht zu messenden anstatt schwer zu ermittelnden Prädiktoren (CRAWLEY 2012). Der Grundsatz der Sparsamkeit ist nicht nur in der statistischen Modellierung bedeutsam, sondern auch beim Einsatz prozessorientierter Modelle. Hier gilt, dass ein Modell bevorzugt ist, welches mechanistische Prozesse anstatt empirischer Funktionen beinhaltet, solange die Anpassung beider Modelle ähnlich ist (CRAWLEY 2012).

Modellvereinfachungsprozeduren z. B. nach dem Akaike-Informationskriterium (AIC, Akaike Information Criterion) sind in allen wichtigen Statistikprogrammen etabliert. Ein Modell, welches unter Verwendung des AIC vereinfacht wurde, muss gegebenenfalls noch weiter vereinfacht werden. Diese weitere Vereinfachung erfolgt schrittweise (sequentiell): zunächst erfolgen Entfernungen nicht-signifikanter Interaktionen der Prädiktoren, gefolgt von Entfernungen nicht-signifikanter Beiträge der Prädiktoren, sofern diese nicht zu signifikanten Interaktionen beitragen. Das finale Regressionsmodell soll nur noch signifikante Beiträge der Prädiktoren enthalten. Dies bedeutet, dass dann nur noch Prädiktoren im Modell verblieben sind, für die signifikant ($p \leq 0.05$) gefunden wurde, dass die wahre Steigung ungleich Null ist.

Ein „Lack-of-fit-Test“ (Test auf Fehlen der Anpassung) überprüft, ob quadratische und kubische Beiträge der Prädiktoren die Modellanpassung verbessern. Abschließend sind Residuenüberprüfungen (Überprüfungen der Differenzen aus gemessenen und modellierten Werten der Antwortvariablen) auf Normalverteilung und Varianzhomogenität erforderlich. Bei Abweichungen von Normalverteilungen und/oder von Varianzhomogenität können gegebenenfalls Transformationen der Antwortvariablen (gefolgt von den genannten Modellvereinfachungsschritten) zu Modellen führen, die die Bedingungen erfüllen. Eine Überprüfung auf einflussreiche Datenpunkte kann mit Berechnungen der Cooks-Distanz und der Hebelwirkung (leverage) durchgeführt werden.

Der oben genannte Punkt von CRAWLEY (2012) zeigen, dass bei ähnlicher Anpassung zweier Modelle ein Modell mit mechanistischen Prozessen statt empirischen Funktionen zu bevorzugen ist. Zudem unterstreicht das, dass im Programm Boden-Dauerbeobachtung auch Datenanalysen vielversprechend sein können, die nicht auf empirischen Regressionsgleichungen beruhen, sondern z. B. eine Kopplung von geochemischen Prozessen und Transportprozessen wie im PHREEQC-Modell (PARKHURST & APPELO 2013) implementieren.

13.5.4 Gemischtes Modell bei hierarchischem Probenahmedesign

Auswertungen können analog zu hierarchischen randomisierten kontrollierten Experimenten durchgeführt werden, z. B. unter der Voraussetzung, dass eine hierarchische Probenahme vorliegt (mehrere Probenentnahmepunkte pro BDF und Auswertungen für mehrere BDF). Ein Muster für den Einsatz eines gemischten Modells bei einem bodenkundlichen Experiment, bei dem ein hierarchisches Probenentnahmedesign vorlag (drei Standorte beprobt, mit pro Standort randomisiert drei Probenentnahmepunkten) ist detailliert in LUDWIG ET AL. (2021) beschrieben. Es wurden zwei Prädiktoren (Gülle- und Pflanzenkohle-Gaben) und deren Interaktion als feste Effekte berücksichtigt. Als zufällige Effekte wurden berücksichtigt: Blöcke (die jeweiligen Probenentnahmepunkte), die im Standort genestet sind (also der Haupteffekt Standort und der Effekt Block:Standort) sowie die Interaktionen Behandlung:Standort (Pflanzenkohle:Standort, Gülle:Standort und Pflanzenkohle:Gülle:Standort). Eine Auswertung für Oberböden im BDF-Programm könnte annähernd analog erfolgen, da hier ebenfalls eine hierarchische Struktur vorliegt. Ein fester Effekt kann beispielsweise ein kumulativer Element-Eintrag sein. Zufällige Effekte können die Probenentnahmepunkte genestet in der jeweiligen BDF und die Interaktion(en) Behandlung:BDF sein (im Beispiel ist die Behandlung der kumulative Element-Eintrag pro BDF).

13.5.5 Zeitreihenanalysen (im statistisch strengen Sinne)

Zeitreihenanalysen im statistisch strengen Sinne mit ARMA- oder ARIMA-Modellen können bei Vorliegen von wenigen Daten in einer Zeitreihe, z. B. bei den Ergebnissen von Bodenuntersuchungen im Rahmen der Hauptinventuren (z. B. weniger als 30 wiederholte Messtermine; METZ 2010) nicht durchgeführt werden.

An den Intensiv-BDF werden allerdings auch zeitlich höher aufgelöste Daten gewonnen (z. B. Bodentemperaturen, Sickerwasserkonzentrationen, Depositionsraten), und mit zunehmender Laufzeit der Programme können auch für Bodenfeststoff die Kriterien für Zeitreihenanalysen erfüllt sein.

Grundsätzlich können die – wenn weniger als die o. g. 30 wiederholten Beobachtungen vorliegen – alternativ mit gemischten Modellen ausgewertet werden. Gemischte Modelle sind wichtige Werkzeuge für die Durchführung von Regressionen, wobei die Antwortvariable(n) durch unabhängige Variablen (quantitative Prädiktoren oder nominal- oder ordinalskalierte Faktoren mit den jeweiligen Faktorstufen) beschrieben wird. Neben den quantitativen Prädiktoren muss bei den Auswertungen zudem das jeweilige Probenentnahmedesign berücksichtigt werden. Viele Probenentnahmedesigns sind hierarchisch. Beispielsweise kann eine BDF so beprobt werden, dass wiederholte Ergebnisse von vier Quadranten vorliegen. Ein weiteres Beispiel für ein hierarchisches Probenentnahmedesign ist, wenn mehrere BDF, für die jeweils wiederholte Messungen vorliegen, in der Auswertung berücksichtigt werden. Werden z. B. fünf BDF in einer Auswertung berücksichtigt, für die jeweils sechs Datenpunkte erhoben wurden (z. B. durch Mehrfachbeprobung jeder BDF an einem Termin oder z. B. über verschiedene Termine), so liegen nicht $6 * 5 = 30$ unabhängige Datenpunkte vor, sondern nur fünf. Für Auswertungen bei Vorliegen wiederholter Messungen gibt es unterschiedliche Auswertungsansätze (z. B. EVERITT & HOTHORN 2011, CRAWLEY 2012, WELHAM ET AL. 2014, LANTZ 2019). Im Folgenden wird ein schrittweises Vorgehen vorgeschlagen.

Zentrales Thema für die Auswertungen ist – unabhängig von der betrachteten Skala – was die Variable Zeit bedeutet. Die Aussagekraft einer Regression kann z. B. erhöht werden, wenn die Variable Zeit unter Zuhilfenahme der Eintragsinformationen in einen kumulativen Element-Eintrag umgerechnet werden kann. Ein erster Vorauswertungsschritt könnte sich auf rein mathematische Beziehungen zwischen der Antwortvariablen und unterschiedlichen Prädiktoren (kumulativem Elementeintrag und z. B. den Messvariablen C_{org} , Ton, pH, Ionenstärke und unterschiedlichen Fraktionen) fokussieren. Ziel dieses ersten Vorauswertungsschrittes ist es, grundsätzlich die Größenordnungen der Änderungen der Antwortvariablen zu verstehen.

In einem Folgeschritt können die korrekten Modelle in Abhängigkeit des möglicherweise hierarchischen Probenentnahmedesigns unter Berücksichtigung wiederholter Messungen aufgestellt werden. Ein Ansatz hierbei ist, grundsätzlich zu versuchen, Auswertungen in Analogien zu den etablierten Designs

der kontrollierten Experimente (u. a. vollständig randomisiertes Design (CRD), randomisierte vollständige Blockanlage (RCBD), hierarchisches (nested) Design) durchzuführen. Die Argumentation für eine Höherskalierung wird – in Abhängigkeit der bodenkundlich relevanten Informationen (z. B. Bodentypen, Bodenausgangsgesteine, Bodenarten, Landnutzungen, Standortbedingungen, Flächenanteile) – als entscheidendes Kriterium den Zusammenhang zwischen vorhandener Stichprobe und nun herausgearbeiteter Grundgesamtheit berücksichtigen. Für jede einzelne Auswertungsstudie sollte jeweils diskutiert werden, inwieweit konkret eine Repräsentanz vorliegt und welche Einschränkungen sich aufgrund der (typischerweise) nicht vorhandener Randomisation ergeben. Die Einzel-BDF wurden zwar randomisiert beprobt, aber die Auswahl der Flächen erfolgte aus unterschiedlichen Gründen explizit nicht randomisiert aus einer definierten Grundgesamtheit.

13.5.6 Multivariate Ansätze

Hierbei werden meist explorative Werkzeuge verwendet, um Muster in den Daten aufzuzeigen und um neue bodenkundliche Hypothesen zu generieren (z. B. SCHILLI ET AL. 2011, LANTZ 2019, WEHRENS 2020). Ergebnisse können Anhaltspunkte für weitere Forschungen bzw. vertieftes Monitoring liefern. U. a. können PCAs, partitionierende (z. B. k-Means) und agglomerative Clusteranalysen für Mustererkennungen für die BDF eingesetzt werden. Zu berücksichtigende Variablen für die Mustererkennungen können z. B. BDF-Datensätze sein, die Gehalte sämtlicher Schwermetalle enthalten (siehe auch PIEPHO (2013) für die Untersuchung der Muster der Schwermetallgehalte für verschiedene Standorte).

14 Literatur

14.1 Allgemeines Schriftenverzeichnis

- ABFKLÄRV (2017); Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.
- AD-HOC-AG BODEN (1994): Methodendokumentation Bodenkunde - Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geol. Jb. F31, 242 S.; Hannover.
- AD-HOC-AG BODEN (2005): BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG, HRSG.: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEN STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTEN, 5. AUFL., 438 S.; 41 ABB., 103 TAB., 31 LISTEN, HANNOVER 2005
- AHRENDT, B., KLINCK, U., FORTMANN, H., WAGNER, M., MEESENBURG, H. (2017a): Die repräsentative Gewinnung von Bodenlösung mittels Saugsonden: Teil I: Theorie, Methodik und Installation. In: „Waldböden: Nutzung und Schutz“, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Band 17, 1-22, DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2017-1066>.
- AHRENDT, B., KLINCK, U., FORTMANN, H., WAGNER, M., MEESENBURG, H. (2017b): Die repräsentative Gewinnung von Bodenlösung mittels Saugsonden, Teil II: Evaluierung anhand einer Messreihe in einem dreijährigen Douglasienbestand (*Pseudotsuga menziesii*). In: „Waldböden: Nutzung und Schutz“, Beitr. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Band 17, 23-45, DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2017-1066>.
- AHRENDT, B., SCHMITZ, A., PRESCHER, A.-K., WEHBERG, J., GEUPEL, M., ANDREAE, H., MEESENBURG, H. (2020): Comparison of Methods for the Estimation of Total Inorganic Nitrogen Deposition to Forests in Germany. *Frontiers in Forests and Global Change* 3 (103), DOI=10.3389/ffgc.2020.00103.
- ALEF, K. & KLEINER, D. (1987): Applicability of arginine ammonification as indicator of microbial activity in different soils. *Biol. Fertil. Soils* 5: 148-151.
- ANDERSON, T.-H. (2003): Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. *Agr. Ecosyst. Environ.* 98 (1): 285-293.
- ANDERSON, J. P. E. & DOMSCH, K. H. (1978): A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10: 215-221.
- ANDERSON, J. P. E. & DOMSCH, K. H. (1990): Application of ecophysiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.* 22: 251-255.
- ANDERSON, J. P. E. & DOMSCH, K. H. (1991): Untersuchungen von Mikroorganismengesellschaften in unterschiedlichen Wald-Ökosystemen unter Anwendung ökophysiologischer Parameter. *Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme / Waldsterben, Reihe B*, 22.
- ANDERSON, T.H. & JOERGENSEN, R.G. (1997): Relationship between SIR and FE estimates of microbial biomass C in deciduous forest soils at different pH. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 1033–1042.
- ARCHITEKTURRICHTLINIE FÜR DIE IT DES BUNDES (2020), Hrsg.: Der Beauftragte der Bundesregierung für Informationstechnik. Version: Juli 2020.
- ARCHITEKTURRICHTLINIE FÜR DIE IT DES BUNDES – TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN ZUR ARCHITEKTURRICHTLINIE (2020), Hrsg.: Der Beauftragte der Bundesregierung für Informationstechnik. Version: Juli 2020. BARTELS, R., GROH, H., KLEEFISCH, B., HÖPER H., ENGELKE, L. (2018): Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Niedersachsen - Beschreibung der anfallenden Feldarbeiten – Stand: 12.02.2018. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg, und Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover (unveröffentlicht).

- 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 Bodendauerbeobachtungsflächen. - in Rosenkranz, D., Bachmann, G., König, W. & Einsele, G. [Hrsg.]: Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser; Bd 3: 9152: 1-127; Erich Schmidt Verl., Berlin.
- BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.
- BBODSCHV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 102 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.
- BECHER, H. H. (1970): Eine Methode zur Messung der Wasserleitfähigkeit von Böden im ungesättigten Zustand. Diss. TU Hannover.
- BECK, T. (1997): Die Messung der Katalaseaktivität von Böden. Journ. Pflanzenern. und Bodenkde., 130, S. 68-81.
- BEYLICH, A., GRAEFE, U. (2010): Regenwürmer und Kleinringelwürmer als Bioindikatoren im Bodenmonitoring. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 70, Nr. 4: 119-123.
- BIGALKE, M., REHMUS, A. & KELLER, A. (2016): Belastung mineralisch gedüngter Böden mit Schadelementen (Arsen, Blei, Cadmium, Uran). Bericht im Auftrag des BLW Schweiz.
- BIMSCHG (2013): Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 24. September 2021 (BGBl. I S. 4458) geändert worden ist.
- BIOABFV (2013): Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BLAKE, L., GOULDING, K. W. T., MOTT, C. J. B., POULTON, P. R. (2000): Temporal changes in chemical properties of air-dried stored soils and their interpretation for long-term experiments. European Journal of Soil Science, 51, 345-353. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00307.x>.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2018): Technische Anleitung zur Methodik und Durchführung der Besonderen Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE). Stand: Dezember 2018. BMEL, Bonn.
- BMELF - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1997): Dauerbeobachtungsflächen zur Umweltkontrolle im Wald, Methodenleitfaden für das Level-II-Programm: 126 S., Bonn.
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (1997): Messanleitung für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt. Abschnitt F: Böden und Pflanzen, Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm.
- BOLTE, A. (1999): Abschätzung von Trockensubstanz-, Kohlenstoff- und Nährelementvorräten der Waldbodenflora - Verfahren, Anwendung und Schätztafeln. Forstwiss. Beitr. Tharandt 7.
- BOLTE, A. (2006): Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation auf Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz (BZE, EU Level II). Ber. Forschungsz. Waldökosysteme B 72.
- BOLTE, A., LAMBERTZ, B., STEINMEYER, A., KALLWEIT, R., MEESENBURG, H. (2004): Zur Funktion der Bodenvegetation im Stoffhaushalt von Wäldern - Studien auf Dauerbeobachtungsflächen des EU Level II-Programms in Norddeutschland. Forstarchiv 75 : 207–220,
- BROOKES, P.C., LANDMAN, A., PRUDEN, G. & JENKINSON, D.S. (1985): Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method for measuring microbial biomass nitrogen in soil. Soil Biology and Biochemistry 17, 837–842.
- BUCHER, B., BECHTLER, R., BEUTMANN, A., KADEN, M., LOCHTE, A., WILHELM, CHR., WISSER, S. (2020): Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität, Loseblattsammlung des Arbeitskreises Umweltüberwachung (AKU). <https://www.fs-ev.org/arbeitskreise/umweltueberwachung#c10600>.

- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ, LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. 4. überarbeitete und ergänzte Auflage. https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf.
- BUTTLER, K. P., MAY, R. & METZING, D. (2018): Liste der Gefäßpflanzen Deutschlands - Florensynopse und Synonyme". BfN-Skripten 519. 288 S.
- BVL (BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT) (2021): Verzeichnis zugelassener Pflanzenschutzmittel. <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp> (Stand 03.11.2021).
- BZE FORST- Bodenzustandserhebung im Wald. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.) (1990): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE). Arbeitsanleitung. 147 S.; Bonn.
- CANULLO, R., STARLINGER, F., GRANKE, O., FISCHER, R. & AAMLID, D. (2016): Assessment of ground vegetation. – UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (Hrsg.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institut of Forest Ecosystems, Eberswalde, 12 S., <http://www.icp.forests.org/manual.htm>.
- CASPARI, S.; DÜRHAMMER, O.; SAUER, M. & SCHMIDT, C. (2018): Rote Liste und Gesamtartenliste der Moose (Anthocerotophyta, Marchantiophyta und Bryophyta) Deutschlands. In: METZING, D.; HOFBAUER, N.; LUDWIG, G. & MATZKE-HAJEK, G. (RED.): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 7: Pflanzen. Münster (Landwirtschaftsverlag). Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (7): 361-489.
- CLARKE, N., ZLINDRA, D., ULRICH, E., MOSELLO, R., DEROME, J., DEROME, K., ET AL. (2016): "Part XIV: sampling and analysis of deposition," in Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests, ed UNECE ICP Forests Programme. Coordinating Centre (Eberswalde: Thünen Institute of Forest Ecosystems), <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>.
- CRAWLEY, M. J. (2012): The R Book. Second Edition. Wiley, West Sussex.
- DIDDEN, W.A.M, FRÜND, H.-C., GRAEFE, U. (1997): Enchytraeids. In: Benckiser, G. (ed.): Fauna in Soil Ecosystems: Recycling Processes, Nutrient Fluxes, and Agricultural Production. Chapter 5. Marcel Dekker, Inc., New York.
- DIERSCHKE, H. (1989): Symphänologischer Aufnahme- und Bestimmungsschlüssel für Blütenpflanzen und ihre Gesellschaften in Mitteleuropa. Tüxenia 9, 477 - 484.
- DOMSCH, K. H. (1962): Bodenatmung, Sammelbericht über Methoden und Ergebnisse. Zentralbl. Bakteriol. Parasitenk. Abt. II. 116: 33-78.
- DÜMV (2012): Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist
- DUNGER, W. & FIEDLER, H. J. (1998): Methoden der Bodenbiologie. 2. Auflage; Jena (Fischer).
- DÜNGEVERORDNUNG (2021). –BGBL. (26. MAI 2017) I S. 1305, ZULETZT GEÄNDERT DURCH ARTIKEL 97 DES GESETZES VOM 10. AUGUST 2021 (BGBL. I S. 3436).
- DÜNGMPROBV (2006): Düngemittel-Probenahme- und Analyseverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Juli 2006 (BGBl. I S. 1822), die durch Artikel 3 der Verordnung vom 6. Februar 2009 (BGBl. I S. 153) geändert worden ist.
- DURNER, W. & OR, D. (2006): Soil water potential measurement. Encyclopedia of Hydrological Sciences, Wiley Online Library
- DURNER, W., K. GERMER, C. JAKISCH, I. ANDRÄ ET AL. (2017): Feldstudie zur Bodenfeuchtesensorik, in: 17. Gumpensteiner Lysimetertagung, 9.-10.5.2017, HBFLA Raumberg-Gumpenstein, 227-234, ISBN: 978-3-902849-45-8.
- DÜWEL, O. (1995): Die Bedeutung der Bodenrauigkeit für die Erosion durch Wind - Ein Beitrag zur Quantifizierung der Bodenverluste. Diss. Univ. Göttingen, 135 S.
- DWA (2012): Merkblatt DWA-M 905, Gewinnung von Bodenlösung. Beprobungssysteme und Einflussgrößen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Mai 2012.).

- DWA (2018): Merkblatt DWA-M 504-1, Verdunstung von Land- und Wasserflächen - Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung, Gewässerverdunstung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Juli 2018, 142 S.
- DWA (2021): Bodenerosion durch Wasser - Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. - DWA-Merkblatt 921, 112 S. – DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- EHRMANN, O. (2015): Regenwürmer in den Böden Baden- Württembergs - Vorkommen, Gefährdung und Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau – 105: 125 - 176.
- ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W. & PAULISSEN, D. (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 3. Aufl., Skripta Geobotanica XVIII, 262 S.; Göttingen.
- ELMASRI, R. & NAVATHE, S.B. (2016): Fundamentals of Database Systems, 7th Edition. Pearson Education Limited.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2021): EU soil strategy for 2030: towards healthy soils for people and the planet. Generaldirektion Umwelt, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/02668>.
- EUROPEAN COMMISSION (2021): Concept note for the EU Soil Observatory. Joint Research Centre, Directorate D - Sustainable Resources (Ispra). https://joint-research-centre.ec.europa.eu/document/download/419f3470-ffd2-4c92-93ae-19ecd2e4953e_en?filename=concept_note_euso_final_sep2021.pdf.
- Everitt, B. & Hothorn, T. P. (2011): An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R. Springer, New York.
- FACHBEIRAT BODENUNTERSUCHUNGEN [Hrsg.] (2018): Methodensammlung Boden-/Altlastenuntersuchung. Version 1.1.
- FALKENGREN-GRERUP, U. (1995): Effects of Long-Term Storage on Some Chemical Properties of Forest Soil Samples. Ecological Bulletins, 44, 129-132. <http://www.jstor.org/stable/20113156>.
- FIELD, A., MILES, J. & FIELD, Z. (2012): Discovering Statistics using R. Sage, Los Angeles.
- FRÜND, H.-C., GRAEFE, U. & TISCHER, S. (2011): Earthworms as Bioindicators of Soil Quality. In: Karaca, A. (ed.): Biology of Earthworms, Soil Biology 24. Chapter 16. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- GRAEFE, U. (1991): Ein Enchyträentest zur Bestimmung der Säure- und Metalltoxizität im Boden. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch., 66/1: 487-490.
- GRAEFE, U. (1993): Die Gliederung von Zersetzergesellschaften für die standortsökologische Ansprache. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch., 69: 95-98.
- GRAEFE, U. (1995): Gibt es bodentypspezifische Tiergesellschaften? Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 75: 11-14.
- GRAEFE, U. & SCHMELZ, R.M. (1999): Indicator values, strategy types and life forms of terrestrial Enchytraeidae and other microannelids. Newsletter on Enchytraeidae 6: 59–67.
- HEINEMEYER, O., INSAM, H., KAISER, E. A. & WALENZIK (1989): Soil microbial biomass and respiration measurements: An automated technique based on infra-red gas analysis. Plant and Soil 116: 191-195.
- HFA (2022): Handbuch Forstliche Analytik. Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Herausgegeben vom Gutachterausschuss Forstliche Analytik, Grundwerk, Juni 2005, mit Ergänzungen 1 bis 6 (Februar 2022). <https://blumwald.thuenen.de/bze/literatur/>.
- HLNUG (2016): Stoffdynamik an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. W. Borho. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Böden und Bodenschutz in Hessen 13.
- HOFFMANN, G. & DEDEKEN, M. (1965): Eine Methode zur kolorimetrischen Bestimmung der β -Glucosidase-Aktivität der Böden. Z. Pflanzenern. Bodenkd., 108: 195-201.
- HÖPER, H. & KLEEFISCH, B. (2001): Untersuchung bodenbiologischer Parameter im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen, Bodenbiologische Referenzwerte und Zeitreihen. Arbeitshefte Boden. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.

- ICP-INTERNATIONAL COOPERATIVE PROGRAMME ON ASSESSMENT AND MONITORING OF AIR POLLUTION EFFECTS ON FORESTS (1994): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, 4th edition; Hamburg and Prag.
- INSPIRE (2007): RICHTLINIE 2007/2/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES VOM 14. MÄRZ 2007 ZUR SCHAFFUNG EINER GEODATENINFRASTRUKTUR IN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT (INSPIRE).
- JACOBS, A, FLESSA, H, DON, A, HEIDKAMP, A, PRIETZ, R, DECHOW, R, GENSIOR, A, POEPLAU, C, RIGGERS, C, SCHNEIDER, F, TIEMEYER, B, VOS, C, WITTNEBEL, M, MÜLLER, T, SÄURICH, A, FAHRION-NITSCHKE, A, GEBBERT, S, JACONI, A, KOLATA, H, LAGGNER, A, ET AL. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 64, DOI:10.3220/REP1542818391000.
- JACOBSEN, C., RADEMACHER, P., MEESENBURG, H., MEIWES, K. J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten - Literaturstudie und Datensammlung. Ber. Forsch.zent. Waldökosyst., Reihe B; 69-81.
- JORDAN, F. & MÜLLER, C. (1997): Bodenerosion und Oberflächenabfluß. – In: Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF): Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil II Stoffeinträge – Stoffausträge – Schwermetallbilanzierung verschiedener Betriebstypen. Schriftenreihe der Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 5/97: 160-179.
- JÖRGENSEN, R. G. (1995): Die quantitative Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Böden mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode. Göttinger Bodenkundliche Berichte 104: 1-229.
- KAISER, E.-A., MUELLER, T., JOERGENSEN, R.G., INSAM, H. & HEINEMEYER, O. (1992): Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. Soil Biology & Biochemistry, 24, 675-683.
- KAUFMANN-BOLL, C. ; KERN, M.; KASTLER, M.; NIEDERSCHMIDT, S.; KAPPLER, W.; MÜLLER, F.; OELLERS, J.; TOSCHKI, A.; STEFFENS, M.; WIESMEIER, M.; MATHEWS, J. (2022): Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Substanz. UBA-Text 67/2022.
- KAUFMANN-BOLL, C., MARKOWSKY, L. (2019): Bodendauerbeobachtung im urbanen Bereich für umwelt- und klimaschutz-bezogene Fragestellungen im Rahmen der Stadtentwicklung und Anpassung an den Klimawandel. Projekte B 5.18 und B 3.19 Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden und Abfall 2018/2019, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.), <http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LABO/B%203.19%20Abschlussbericht.pdf>.
- KAUFMANN-BOLL, LAZAR, S., SCHILLI, C. & RINKLEBE, J. (2011): Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) - Teil A: Methoden-Code und Umgang mit Verfahrenswechseln. UBA-Text 89/2011, 339 S.
- KRAHMER, U. (1987): EDV-gestütztes Mess- und Auswerteverfahren zur Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit nach der Verdunstungsmethode. Z. Pflanzener. Bodenkunde 150, 392-394.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (Hrsg.) (2005): Sickerwasser: Richtlinie für Beobachtung und Auswertung. Kulturbuch-Verlag GmbH, Berlin, 73 S.
- LABO - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (Hrsg.) (2018): Bodenerosion durch Wind. Anleitung zur Kartierung aktueller Erosions- und Akkumulationsformen.
- LANTZ, B. (2019): Machine Learning with R. Packt Publishing, Birmingham.
- LAWA (1996): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [Hrsg.] (1996). Atmosphärische Deposition - Richtlinie für Beobachtung und Auswertung der Niederschlagsbeschaffenheit (Gelbdruck), 79 S.
- LBEG (2015): Schwermetallein- und -austräge niedersächsischer Boden-Dauerbeobachtungsflächen. D. Kamermann, H. Groh, H. Höper. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, GeoBerichte 30, Hannover 2015.

- LFU - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (HRSG.) (2011): Den Boden fest im Blick – 25 Jahre Bodendauerbeobachtung in Bayern, UmweltSpezial, Augsburg.
- LFU - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (HRSG.) (2019): Per- und polyfluorierte Chemikalien in Bayern - Untersuchungen 2006 – 2018, UmweltSpezial, Augsburg.
- LFU - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (HRSG.) (2020): Veränderungen der Humusqualität und -quantität bayerischer Böden im Klimawandel, UmweltSpezial, Augsburg.
- LITAOR, M.J. (1988): Review of soil solution samplers. *Water Resour. Res.* 24, 727-733.
- LONDO, G. (1975): Dezimalskala für die vegetationskundliche Aufnahme von Dauerquadraten. In: TÜXEN, R. (Hrsg.): Sukzessionsforschung.- Ber. Intern. Sympos. IVV Rinteln 1973, 613-617; Vaduz.
- LUBW (2019): Inventurzeitreihen an Bodendauerbeobachtungsflächen in Baden-Württemberg. W. Borho. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- LUDWIG, B., SAWALLISCH, A., HEINZE, S., JOERGENSEN, R.G. & VOHLAND, M. (2015): Usefulness of middle infrared spectroscopy for an estimation of chemical and biological soil properties – underlying principles and comparison of different software packages. *Soil Biol. Biochem.* 86, 116-125.
- LUDWIG, B., SONG, X., GUNINA, A., GREENBERG, I., DIPPOLD, M.A. & PIEPHO, H.P. (2021): Importance of sources of variability, scales and experimental design: a case study about the effects of biochar and slurry application on soil properties in agricultural silty loam soils. *Eur. J. Soil Sci.* 72, 1954–1968, DOI: 10.1111/ejss.13120.
- LUDWIG, B., WÖLFEL, P., GREENBERG, I., PIEPHO, H.-P., SPÖRLEIN, P. (2022): Application of mixed-effects modelling and rule-based models to explain copper variation in soil profiles of southern Germany. *Eur. J. Soil Sci.* <https://doi.org/10.1111/ejss.13258>.
- LUFA-NORD-WEST (2018): Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) in Niedersachsen - Untersuchung von Pflanzenproben durch die LUFA Nord-West. LUFA Nord-West, Hameln, und Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, unveröffentlicht.
- MARX, M. & GAUL, V. (2021): Gehaltsspannen von organischem Kohlenstoff in Ackerböden Deutschlands. *Bodenschutz Heft 4*, S. 120-127.
- MARX, M., SCHILLI, C., RINKLEBE, J., KASTLER, M., MOLT, C., KAUFMANN-BOLL, C., LAZAR, S., LISCHIED, 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.
- MEESENBURG, H., MOHR, K., DÄMMGEN, U., SCHAAF, S., MEIWES, K.J., HORVATH, B. (2005): Stickstoff-Einträge und -Bilanzen in den Wäldern des ANSWER-Projektes – eine Synthese. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 279*, S. 95-108. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/zi036923.pdf
- MEESENBURG, H., AHREND, B., FLECK, S., WAGNER, M., FORTMANN, H., SCHELER, B., KLINCK, U., DAMMANN, I., EICHHORN, J., MINDRUP, M. & MEIWES, K.J. (2016): Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification or new risks due to climate change? *Ecological Indicators* 65, 103-112, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.12.013.
- MEHRA, O. P. & JACKSON, M. L. (1960): Iron Oxide Removal from Soils and Clays by a Dithionit-Citrat-System, buffered with Na-Bicarbonates. *Clay and Clay Minerals*, 7; Washington D. C.
- METZ, R. (2010): Zeitreihenanalyse. In Wolf, C., Best, H. (Hrsg.). *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- MIERWALD, U. (1998): Zur Methodik der Einrichtung und Aufnahme von Dauerflächen. - Ber. Inst. f. Landschafts- u. Pflanzenökologie, Univ. Hohenheim, Beiheft 5, 21-30; Stuttgart-Hohenheim.
- MYRBECK, Å, RODHE, L., HELLSTEDT, M., KULMALA, K., LAAKSO, J., LEHN, F., NØRREGAARD HANSEN, M. & LUOSTARINEN, S. (2019): Anleitung zur Beprobung von Wirtschaftsdüngern. Interreg Baltic Sea Region Projekt „Manure Standards. https://www.julius-kuehn.de/media/Institute/PB/Gruenland/SuMaNu/Broschueren/Anleitung_zur_Beprobung_von_Wirtschaft_sduenger.pdf
- NEEMANN, W. (1991): Bestimmung des Bodenerodierbarkeitsfaktors für winderosionsgefährdete Böden

Norddeutschlands. Geol. Jb. F25: 1-131; Hannover.

- NEEMANN, W., SCHÄFER, W. & KUNTZE, H. (1991): Bodenverluste durch Winderosion in Norddeutschland - Erste Quantifizierungen. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung, 32 (3): 180-190.
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ UND LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2021): Empfehlungen zur Probenahme von flüssigen und festen Wirtschaftsdüngern. https://www.ml.niedersachsen.de/download/150694/Empfehlungen_zur_Probenahme_von_fluessigen_und_festen_Wirtschaftsduegnern.pdf. undatiert, Download am 03.11.2021.
- NIEMINEN, T.M., DE VOS, B., COOLS, N., KÖNIG, N., FISCHER, R., IOST, S., MEESENBERG, H., NICOLAS, M., O'DEA, P., CECCHINI, G., FERRETTI, M., DE LA CRUZ, A., DEROME, K., LINDROOS, A.J. & GRAF PANNATIER, E. (2016): Part XI: Soil Solution Collection and Analysis. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed)Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 29 p. [<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>]. ISBN: 978-3-86576-162-0
- NIEMINEN, T.M., DEROME, K., MEESENBERG, H. & DE VOS, B. (2013): Soil solution: Sampling and chemical analysis. In: Ferretti, M.; Fischer, R. (Hrsg.): Forest Monitoring: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia, Developments in Environmental Science, 12, Amsterdam, Elsevier, 301-315.
- OTTOW, J. C. G. (2011): Mikrobiologie von Böden: Biodiversität, Ökophysiologie. Heidelberg, Springer.
- PAIGE, G.B. & KEEFER T.O. (2008): Comparison of field performance of multiple soil moisture sensors in a semi-arid rangeland. J. Am. Water Resour. Assoc. 44, 121-135.
- PARKHURST, D.L. & APPELO, C.A.J. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3— A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, pp. 497.
- PELOSI, C. & RÖMBKE, J. (2018): Enchytraeids as bioindicators of land use and management. Applied Soil Ecology 123, 775-779.
- PIEPHO, H.P. (2013): Biometrie. Für Studierende der Agrarbiologie und der Agrarwissenschaften (B. Sc.) an der Universität Hohenheim. Hohenheim.
- POEPLAU, C., VOS, C., & DON, A. (2017): Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. Soil, 3(1), 61-66
- RASPE, S., BASTRUP-BIRK, A., FLECK, S., WEIS, W., MAYER, H., MEESENBERG, H., WAGNER, M., SCHINDLER, D. & GARTNER, K. (2013): Meteorology. In: Ferretti, M.; Fischer, R. (Hrsg.): Forest Monitoring: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia, Developments in Environmental Science, 12, Amsterdam, Elsevier, 319-336.
- RAUTIO, P., FÜRST, A., STEFAN, K., RAITIO, H., BARTELS, U. (2020): Part XII: Sampling and Analysis of Needles and Leaves. Version 2020-3. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 16 p. + Annex [<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>].
- RÖMBKE, J., PELOSI, C. & SCHMELZ, R. (2017): Effects of Organic Pesticides on Enchytraeids (Oligochaeta) in Agroecosystems: Laboratory and Higher-Tier Tests. Frontiers in Environmental Science, Volume 5, Article 20: 1-24.
- RUMPF, S., SCHÖNFELDER, E. & AHREND, B. (2018): Biometrische Schätzmodelle für Nährelementgehalte in Baumkompartimenten. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 101, 33-73.
- RUTGERS, M., SCHOUTEN, A.J., BLOEM, J., VAN EEKEREN, N., DE GOEDE, R.G.M., JAGERS OP AKKERHUIS, G.A.J.M., VAN DER WAL, A., MULDER, C., BRUSSAARD, L., BREURE, A.M. (2009): Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. European Journal of Soil Science, 60: 820-832.
- SCHAAP, M., WICHINK KRUIT, R., HENDRIKS, C., KRANENBURG, R., SEGERS, A. & BUILTJES, P. (2017): Modelling and Assessment of Acidifying and Eutrophying Atmospheric Deposition to

Terrestrial Ecosystems (PINETI-2); Part I: Atmospheric Deposition to German Natural and Semi-Natural Ecosystems.

- SCHILLI, C., RINKLEBE, J., LISCHIED, G., KAUFMANN-BOLL, C. & LAZAR, S. (2011): Auswertung der Veränderungen des Bodenzustandes für Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze. Teil B: Datenauswertung und Weiterentwicklung. Texte Nr. 90/2011.
- SCHINNER, F., ÖHLINGER, R., KANDELER, E. & MARGESIN, R. (1993): Bodenbiologische Arbeitsmethoden, 2. Aufl., 389 S. (Springer).
- SCHRÖDER, W., NICKEL, S., VÖLKSEN, B., DREYER, A., WOSNIOK, W. (2019): Nutzung von Bioindikationsmethoden zur Bestimmung und Regionalisierung von Schadstoffeinträgen für eine Abschätzung des atmosphärischen Beitrags zu aktuellen Belastungen von Ökosystemen. UBA-Texte 91/2019., <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>.
- SEILER, W. (1985): Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt unter Einfluß der rezenten Bodenerosion zweier Einzugsgebiete im Baseler Tafeljura bei Rothenfluh und Anwil.- Baseler Beitr. z. Physiographie 5: 510 S.; Basel.
- SAG- SONDERARBEITSGRUPPE INFORMATIONSGRUNDLAGEN UMWELTSCHUTZ DER UMK (1991): Konzeption zur Einrichtung von Bodendauerbeobachtungsflächen - Bericht der UAG „Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Auftrag der SAG „Informationsgrundlagen Bodenschutz“. - Bayer. Staatministerium f. Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): Arbeitshefte Bodenschutz 1, 56 S.; München.
- SPÖRLEIN, P. & HANGEN, E. (2009): Bodendauerbeobachtung – Ein Archiv für die Zukunft! Zeitschrift Bodenschutz 03/2009, S. 77-79.
- STEINHOFF-KNOPP, B. (2021). Jährliche Variabilität und räumliche Muster der Bodenerosion - Erkenntnisse aus der niedersächsischen Bodenerosionsdauerbeobachtung. In: HÖPER, H. & MEESENBURG, H. 30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. GeoBerichte 39: 244-253.
- STICKSTOFFBW (2017): Reaktiver Stickstoff in der Atmosphäre von Baden-Württemberg. Interimskarten der Ammoniakkonzentration und der Stickstoffdeposition (Depositionsbericht 2017). Herausgeber Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/29379>.
- SUN, S. Q., CAI, H. Y., CHANG, S., BHATTI, J. S. (2015): Sample storage-induced changes in the quantity and quality of soil labile organic carbon. Sci Rep 5, 1749, <https://doi.org/10.1038/srep17496>.
- TABATABAI, M. A. & BREMNER, J. M. (1970a): Arylsulphatase activity of soils. - Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 225-229.
- TABATABAI, M. A. & BREMNER, J. M. (1970b): Factors affecting soil arylsulfatase activity. - Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 427-429.
- THIELEMANN, U. (1986): Elektrischer Regenwurmfang mit der Oktett-Methode. Pedobiologia 29: 296-302.
- UBA (2007): Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. UBA-Texte 34/07, 158 S.
- UKONMAANAHO, L., PITMAN, R., BASTRUP-BIRK, A., BREDA, N., RAUTIO, P. (2020): Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. Version 2020-1. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute for Forests Ecosystems, Eberswalde, Germany, 18 p. + Annex [<http://www.icp-forests.org/manual.htm>].
- ULRICH, B. (1983): Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO₂, alkali and earth alkali cations and chloride. In: ULRICH & PANKRATH (Eds.), Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems, Reidel, Dordrecht (1983), p. 33–45.
- ULRICH, B. (1992): Nutrient and acid/base budget of central european forest ecosystems. In: HÜTTERMANN, A., GODBOLD, D. L. (Hrsg.): Effects of acid rain on forest processes. New York, Wiley. S. 1-50.

- UTERMANN, J. & FUCHS, M. (2008): Uranium in German soils. In: DE KOK, L. & SCHNUG, E., (Hrsg.): Load and Fate of fertilizer derived Uranium, Backhuys Publishers, Leiden, 33- 47.
- VAN DER MAAREL, E. (1979): Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effects on community similarity. *Vegetatio* 39: 97-114.
- VANCE, E.D., BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- VDLUFA (Hrsg.) (1976): Methodenbuch Band III Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. 3. Auflage. Gesamtwerk einschl. 1.-8. Ergänzungslieferung. Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (1991): Methodenbuch I Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage. Gesamtwerk einschl.1. - 7. Teillieferung; Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (1995): Methodenbuch II.1: Die Untersuchung von Düngemitteln. 4. Auflage. Gesamtwerk einschl. 1. - 6. Ergänzung; Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (2004): Methodenbuch I: Die Untersuchung von Böden. 4. Teillieferung A 6.4.1 Bestimmung von Haupt- und Spurennährstoffen in Kultursubstraten in Calciumchlorid/DTPA Auszug (CAT-Methode); Darmstadt.
- VDLUFA (Hrsg.) (2014): Methodenbuch Band VII Umweltanalytik. 4. Auflage. Gesamtwerk einschl. 1. Ergänzungslieferung. Darmstadt.
- VONDERACH, C., KÄNDLER, G., DORMANN, C. F. (2018): Consistent set of additive biomass functions for eight tree species in Germany fit by nonlinear seemingly unrelated regression. *Ann. For. Sci.*, 75, 1-49.
- WALTER, R. & BURMEISTER, J. (2011): 25 Jahre Regenwurmerfassung auf landwirtschaftlich genutzten Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern. In: LfU Bayern (Hrsg.): Den Boden fest im Blick – 25 Jahre Bodendauerbeobachtung in Bayern. Tagungsband.
- WEHRENS, R. (2020): *Chemometrics with R*. Second Edition. Springer, New York.
- WEIHERMÜLLER, L., SIEMENS, J., DEURER, M., KNOBLAUCH, S., RUPP, H., GÖTTLEIN, A. & PÜTZ, T. (2007): In Situ Soil Water Extraction: A Review. *J. Environ. Qual.* 36, 1735-1748. doi:10.2134/jeq2007.0218.
- WELHAM, S.J., GEZAN, S.A., CLARK, S.J., MEAD, A. 2014. *Statistical Methods in Biology. Design and Analysis of Experiments and Regression*, CRC Press, Boca Raton.
- WHG (2009) Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3901) geändert worden ist.
- ZEIEN, H & BRÜMMER, G. W. (1989): Chemische Extraktion zur Bestimmung der Schwermetallbindungsformen in Böden; Mittlgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. Sonderh. 59/I, Kongressbd. Münster, 505–510.

14.2 Zitierte Normen

- DIN EN ISO 10523 (2012-04): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Werts.
- DIN EN ISO 15681-2 (2019-05): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Orthophosphat und Gesamtphosphor mittels Fließanalytik (FIA und CFA) - Teil 2: Verfahren mittels kontinuierlicher Durchflussanalyse.
- DIN EN ISO 17294-2 (2017-01): Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope.
- DIN EN ISO 12846 (2012-08): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Quecksilber - Verfahren mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) mit und ohne Anreicherung.
- DIN EN 12260 (2003-12): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Stickstoff - Bestimmung von gebundenem Stickstoff (TNb) nach Oxidation zu Stickstoffoxiden.
- DIN EN ISO 16264 (2004-05): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung löslicher Silicate mittels

Fließanalytik (FIA und CFA) und photometrischer Detektion.

- DIN EN ISO 14238 (2014-03): Bodenbeschaffenheit - Biologische Verfahren - Bestimmung der Stickstoffmineralisierung und -nitrifizierung in Böden und der Einflüsse von Chemikalien auf diese Prozesse.
- DIN EN ISO 16 072 (2011-09): Bodenbeschaffenheit - Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung.
- DIN EN ISO 23611-2 (2011-09): Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden - Teil 2: Probenahme und Extraktion von Mikroarthropoden (Collembolen und Milben).
- DIN EN ISO 23611-4 (2011-09): Bodenbeschaffenheit - Probenahme von Wirbellosen im Boden - Teil 4: Probenahme, Extraktion und Bestimmung von Boden bewohnenden Nematoden.
- DIN ISO 18512 (2009-03): Bodenbeschaffenheit - Anleitung für die Lang- und Kurzzeitlagerung von Bodenproben.
- DIN EN ISO 11885 (2009-09): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES).
- DIN 19708: 2021-11: Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.
- DIN EN 13656 (2021-07): Boden, behandelter Bioabfall, Schlamm und Abfall - Aufschluss mit einem Gemisch aus Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO₃) und Tetrafluorborosäure (HBF₄) oder Fluorwasserstoffsäure (HF) für die anschließende Bestimmung der Elemente
- DIN 18128 (2002-12): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes
- DIN 19662: 2012-07 Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Bestimmung des Eindringwiderstandes von Böden mit dem Handpenetrometer.
- DIN 19683: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Physikalische Laboruntersuchungen.
- DIN 19683-16 (1998-12): Bestimmung der Aggregatstabilität nach dem Siebtauchverfahren.
- DIN 19684 (1977): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Chemische Laboruntersuchungen.
- DIN 19684-6: 1997-12 Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 6: Bestimmung des Gehaltes an oxalatlöslichem Eisen.
- DIN 19684-8: Bestimmung der Austauschkapazität des Bodens und der austauschbaren Kationen.
- DIN 19737 (Norm-Entwurf) (1998): Bodenbeschaffenheit - Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung.
- DIN 19747 (2009-07): Untersuchung von Feststoffen - Probenvorbehandlung, -vorbereitung und -aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen. Berlin: Beuth 2009.
- DIN 38405: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D).
- DIN 38405-1 (1985-12): Bestimmung der Chlorid-Ionen (D1).
- DIN 38405-5 (1985-01): Bestimmung der Sulfat-Ionen (D5).
- DIN 38405-9 (1979-05): Bestimmung des Nitrat-Ions (D9).
- DIN 38405-30 (1998-06) (Normentwurf): Bestimmung von Orthophosphat-Phosphor und Gesamtposphor nach manuellen Aufschluß mit der Fließanalyse (D 30).
- DIN 38406: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E).
- DIN 38406-3 (1982-09): Bestimmung von Calcium und Magnesium (E 3).
- DIN 38406-5 (1983-10): Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs (E 5).
- DIN 38406-13 (1992-07): Bestimmung von Kalium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) in der

Luft-Acetylen-Flamme (E 13).

- DIN 38406-14 (1992-07): Bestimmung von Natrium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) in der Luft-Acetylen-Flamme (E 14).
- DIN 38406-21 (1980-09): Bestimmung von neun Schwermetallen (Ag, Bi, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn) nach Anreicherung durch Extraktion (E21).
- DIN 38407-42: 2011-03 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 42: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest- Flüssig-Extraktion (F 42)
- DIN 38409-7 (1979-05): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H). Bestimmung der Säure- und Basenkapazität (H 7).
- DIN 38414-7 (1983-01): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S). Aufschluß mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S 7).
- DIN 38414-14:2011-08 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 14: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) (S 14)
- DIN 38414-24: 2000-10 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Teil 24: Bestimmung von polychlorierten Dibenzodioxinen (PCDD) und polychlorierten Dibenzofuranen (PCDF) (S 24)
- DIN EN 16190: 2019-10 Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von Dioxinen und Furanen sowie Dioxin-vergleichbaren polychlorierten Biphenylen mittels Gaschromatographie und hochauflösender massenspektrometrischer Detektion (HR GC-MS); Deutsche Fassung EN 16190: 2018
- DIN 51527-1 (1987-05): Prüfung von Mineralölerzeugnissen; Bestimmung polychlorierter Biphenyle (PCB); Flüssigchromatographische Vortrennung und Bestimmung 6 ausgewählter PCB mittels eines Gaschromatographen mit Elektronen-Einfang-Detektor (ECD).
- DIN EN 1484 (1997-08): Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC); Deutsche Fassung EN 1484:1997.
- DIN EN 14346: 2007-03 Charakterisierung von Abfällen - Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes; Deutsche Fassung EN 14346:2006; Norm zurückgezogen
- DIN EN 15309: 2007-08 Charakterisierung von Abfällen und Böden - Bestimmung der elementaren Zusammensetzung durch Röntgenfluoreszenz-Analyse; Deutsche Fassung EN 15309:2007
- DIN EN 15933: 2012-11 Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Bestimmung des pH-Werts; Deutsche Fassung EN 15933:2012
- DIN EN 15936:2012-11 Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung; Deutsche Fassung EN 15936:2012
- DIN EN 16168: 2012-11 Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Bestimmung des Gesamt-Stickstoffgehalts mittels trockener Verbrennung; Deutsche Fassung EN 16168:2012
- DIN EN 16174: 2012-11 Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden - Aufschluss von mit Königswasser löslichen Anteilen von Elementen; Deutsche Fassung EN 16174:2012
- DIN EN 27888 (1993-11): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985); Deutsche Fassung EN 27888:1993.

- DIN EN ISO 10304-1 (1995-04): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie - Verfahren für gering belastete Wässer (ISO 10304-1:1992); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:1995.
- DIN EN ISO 10693: 2014-06 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren (ISO 10693:1995); Deutsche Fassung EN ISO 10693:2014
- DIN EN ISO 11272: 2017 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte (ISO 11272:2017); Deutsche Fassung EN ISO 11272:2017
- DIN EN ISO 11274: 2020-04 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren (ISO 11274:2019); Deutsche Fassung EN ISO 11274:2019
- DIN EN ISO 11508: 2018-04 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Kornrohddichte (ISO 11508:2017); Deutsche Fassung EN ISO 11508:2017
- DIN EN ISO 11732 (1997-09): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Ammoniumstickstoff mit der Fließanalyse (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion (ISO 11732:1997); Deutsche Fassung EN ISO 11732:1997.
- DIN EN ISO 13395 (1996-12): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Nitritstickstoff, Nitratstickstoff und der Summe von beiden mit der Fließanalytik (CFA und FIA) und spektrometrischer Detektion (ISO 13395:1996); Deutsche Fassung EN ISO 13395:1996.
- DIN EN ISO 14240-1:2011-09 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der mikrobiellen Biomasse von Böden - Teil 1: Substrat-induziertes Respirationsverfahren (ISO 14240-1:1997); Deutsche Fassung EN ISO 14240-1:2011.
- DIN EN ISO 14240-2:2011-09 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der mikrobiellen Biomasse von Böden - Teil 2: Fumigations-Extraktionsverfahren (ISO 14240-2:1997); Deutsche Fassung EN ISO 14240-2:2011.
- DIN EN ISO 23611-1 (2018-10): Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 1: Handauslese und Extraktion von Regenwürmern.
- DIN EN ISO 23611-3 (2011-09): Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 3: Probenahme und Bodenextraktion von Enchytraeen.
- DIN ISO 10 382: 2003-5 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von Organochlorpestiziden und polychlorierten Biphenylen - Gaschromatographisches Verfahren mit Elektroneneinfang-Detektor (ISO 10382:2002)
- DIN ISO 11265: 1997-06 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (ISO 11265:1994 + ISO 11265:1994/Corr.1:1996)
- DIN ISO 11277: 2002-08 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation (ISO 11277:1998 + ISO 11277:1998 Corrigendum 1:2002)
- DIN ISO 11272: 2014-06 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte (ISO 11272:1998); Deutsche Fassung EN ISO 11272:2014
- DIN ISO 13536 (1997-04): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der potentiellen Kationenaustauschkapazität und der austauschbaren Kationen unter Verwendung einer bei pH = 8,1 gepufferten Bariumchloridlösung (ISO 13536:1995).
- DIN ISO 13877 (Norm-Entwurf) (1995-06): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) - Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie-(HPLC-) Verfahren (ISO/DIS 13877).
- DIN ISO 15178: 2001-02 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Gesamtschwefels nach trockener Verbrennung (ISO 15178:2000)
- DIN ISO 15934: 2012-11 Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Berechnung des Trockenmassenanteils nach Bestimmung des Trockenrückstands oder des Wassergehalts; Deutsche Fassung EN 15934:2012
- DIN ISO 17155:2013-12 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Abundanz und Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven (ISO 17155:2012) (zurückgezogen).

- DIN ISO 19730:2009-07 Bodenbeschaffenheit - Extraktion von Spurenelementen aus Böden mit Ammoniumnitratlösung (ISO 19730:2008)
- DIN ISO 23611-1 (2007-02): Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 1: Handauslese und Formalinextraktion von Regenwürmern.
- HBU 3.1.3.1a Boden – Königswasserextraktion, Verfahren DIN ISO 11466: Ausgabe 1997-06
- HBU 5.1.2.2a Boden – Trockenrohdichte; Verfahren DIN EN ISO 11272: Ausgabe 2017-07
- VDI 2267: Stoffbestimmung an Partikeln in der Außenluft (Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure).
- VDI 2268: Stoffbestimmung an Partikeln (Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure).
- VDI 3870 Blatt 10 (1994-12): Messen von Regeninhaltsstoffen - Messen des pH-Wertes in Regenwasser (Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure).
- VDI 4331 Blatt 1 (2014-1): Monitoring der Wirkung von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Wirkung auf Bodenorganismen (Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure).

15 Anhang

Verzeichnis der Anlagen

Anl. 3-1: Flächenbedarf verschiedener Untersuchungsarten auf BDF

Anl. 5-1: Formblatt Nutzungsgeschichte

Anl. 5-2: Schlagkartei Acker

Anl. 5-3: Schlagkartei Grünland

Anl. 5-4: Aufnahmeblatt Wald

Anl. 8-1: Probennahmeprotokoll Mikrobiologie

Anl. 11-1: Schätzsкала nach Londo, Vitalitätsskala, Phänologie

Anl. 13-1: Statistikauswertungen

Anl. 3-1:Flächenbedarf verschiedener Untersuchungsarten auf BDF

Untersuchungsart	Entnahmestelle / Messort	Flächenbedarf
Bodenphysikalische Standortcharakterisierung	Schürfgrube	ca. 25 m ²
Untersuchungen zur Gefügedynamik	Messfeld/Randfläche	ca. 5.000 m ²
Bodenwasserhaushalt, Bodenwasserchemie	Messfeld Bodenwasser	ca. 50 m ²
Stabile und mesostabile bodenchemische Parameter der Bodenfestphase	Kernfläche	1.000 m ²
Labile bodenchemische Parameter der Bodenfestphase	Messfeld/Randfläche	> 300 m ²
Untersuchung der tieferen Bodenschichten (Rammkernsondierung)	Messfeld/Randfläche	> 300 m ²
Bodenluftanalytik	Messfeld Bodenluft	> 300 m ²
Bodenmikrobiologische Untersuchungen	Messfeld/Randfläche	> 300 m ²
Bodenzoologische Untersuchungen	Messfeld/Randfläche	> 300 m ²
Klima- und Witterungsparameter	Klima-Messstation	ca. 50 m ²
Depositionen Freiland	Messfeld Depositionen	ca. 50 m ²
Depositionen Forst	Messfeld Depositionen	ca. 1000 m ²
Pflanzeninhaltsstoffe	Kernfläche	1.000 m ²
Pflanzenaustrag	Kernfläche	1.000 m ²
Bodenabtrag (Wasser und Wind)	Messfelder Erosion	ca. 1.000 m ²
Vegetationsaufnahmen	4 VDF/Randfläche	ca. 50 m ² (je > 10 m ²)

<p style="text-align: center;"><u>Angaben zur Nutzungsgeschichte</u></p> <p>Befragung von: _____</p> <p>Befragung durch: _____ am: _____</p>	<p>Blatt 1/ 4</p> <p>Standort: _____</p> <p>BDF- Nr.: _____</p>
<p>I) <u>Bewirtschafter:</u></p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Tel.: _____</p> <p>Bewirtschafter ist <input type="checkbox"/> Eigentümer <input type="checkbox"/> Pächter <input type="checkbox"/> _____</p> <p>Ist eine Änderung der Besitz- oder Eigentumsverhältnisse vorgesehen ? <input type="checkbox"/> Nein</p> <p><input type="checkbox"/> Ja, bis zum _____</p> <p><input type="checkbox"/> Betriebsaufgabe <input type="checkbox"/> Sonstiges _____</p>	
<p>II) <u>Derzeitige Nutzung:</u></p> <p><input type="checkbox"/> Acker <input type="checkbox"/> Grünland <input type="checkbox"/> _____</p> <p>Fruchtfolge bzw. Häufigkeit und Art der Nutzung: _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Wird eine Nutzungsänderung in Betracht gezogen ? <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ja,</p> <p>ab _____ Nutzung als _____</p> <p>Sind Bodenverbesserungsmaßnahmen (Meliorationskalkung, Tiefenlockerung, Entwässerung, ...) geplant ?</p> <p><input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ja: _____</p> <p>_____</p> <p>Ist eine Drainung vorhanden ? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein</p> <p>Andere Entwässerung ? _____</p> <p>Zeitpunkt der Anlage: _____ Ist die Entwässerung noch in Betrieb ? _____</p> <p>Liegt ein Entwässerungsplan vor ? _____</p> <p>Wird bewässert ? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein</p> <p>Art der Bewässerung: _____</p> <p>Zu welchen Kulturen wird bewässert ? _____</p> <p>Beginn und Ende der Bewässerungsperiode: _____</p> <p>Häufigkeit und ungefähre Menge (in mm)</p>	

BDF- Nr.: _____

Standort: _____

III) Flächengeschichte:

Vorhergehende Nutzungsarten: Acker bis _____

Grünland bis _____

Wald bis _____

_____ bis _____

Brachephasen:

Art (Schwarz- oder Grünbrache): _____

Durchgeführte **Bodenverbesserungsmaßnahmen** (Tiefumbruch, Tiefenlockerung, Rigolen, Moorbeseandung, Meliorationskalkung, ...):

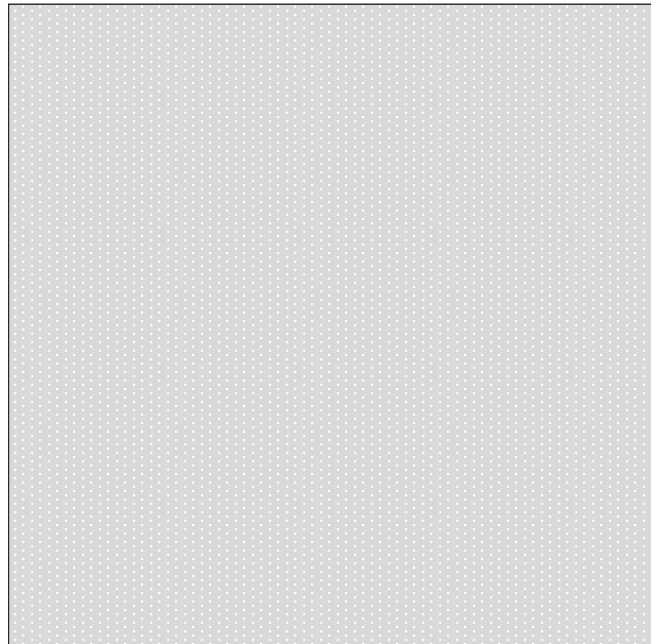
am _____

Flurbereinigung im Jahr _____

ehemalige Grenzen

alte Wege

alte Gräben



Sonstiges:

BDF- Nr.: _____

Standort: _____

IV) Störung der Nutzung:

Wurden Lagerstätten von Bodenschätzen im Gebiet erkundet ? Nein Ja: _____

Sind **Schürfrechte** auf dem Grundstück eingetragen ? Nein Ja: _____

Sind Abbauvorhaben geplant ? Nein Ja: _____

Vorgesehene **Baumaßnahmen:**

im Bebauungsplan der Gemeinde Nein Ja, _____

Straßenbau Nein Ja, _____

Öl-/ Gaspipeline Nein Ja, _____

wasserwirtschaftl. Verrohrung Nein Ja, _____

Sonstiges: _____

Erläuterung: _____

Liegt die Fläche im **Manövergebiet** ? Nein Ja

Wurden schon Manöver in diesem Gebiet durchgeführt ? Nein Ja, _____

Wurde auch diese Fläche befahren ? Nein Ja, _____

Wurde auch diese Fläche befahren ? Nein Ja,

Sonstiges :

BDF- Nr.: _____

Standort: _____

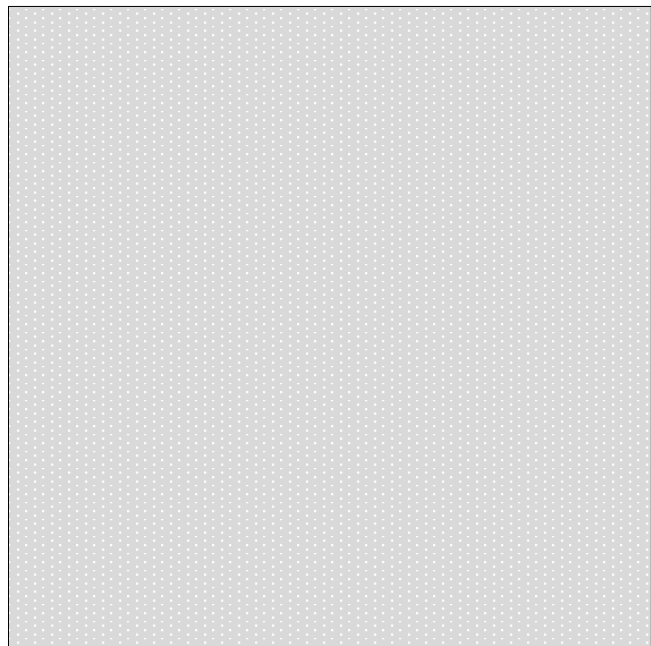
V) Andere Datenerfassungen:

Wird bereits eine Schlagkartei geführt ? Nein Ja, _____

Werden Versuche durchgeführt ? Nein Ja, _____

Andere Messprogramme:

- GÜN- Brunnen
- radiologische Untersuchungen
- Wetterstationen
- Sonstiges: _____



VI) Sonstige Angaben zur Fläche:

Beeinträchtigungen und Unfälle: _____

Anl. 5-2: Schlagkartei Acker (Vorderseite)

LfULG, Bodenmonitoring		Acker/KUP		201026-1	
Bewirtschaftungsdatenblatt			Erntejahr		
Betriebsinformationen					
BDF Nr.	Flurstücknummer:	Betriebsname:			
Ort:	Feldblocknummer:	Straße:			
Gemarkung:	Feldstücknummer:	PLZ Ort:			
	Schlagnummer:	Telefon:			
	Schlaggröße (brutto):	ha	Fax:		
	Schlagbezeichnung:	e-Mail:			
Betriebsgröße:		ha LF	Kontaktperson:		
davon Ackerland:		ha	BEFU-Nutzung: ja: <input type="radio"/>		
davon Grünland:		ha	Viehbesatz: GV/ha LF		
allgemeine Schlaginformationen					
Nutzung:		Bodenuntersuchungen (Nmin):		letzte Bodenuntersuchung:	
seit:		am:	NO3	kg/ha	0-30 cm
Ackerland	<input type="radio"/>		NH4	kg/ha	0-30 cm
KUP	<input type="radio"/>		NO3	kg/ha	30-60 cm
Grünland	<input type="radio"/>		NH4	kg/ha	30-60 cm
Brache	<input type="radio"/>	am:	NO3	kg/ha	0-30 cm
Staunäse:	ja: <input type="radio"/>		NH4	kg/ha	0-30 cm
funktionstüchtige			NO3	kg/ha	30-60 cm
Drainage:	ja: <input type="radio"/>		NH4	kg/ha	30-60 cm
					pH-Wert:
					P: mg/100g
					K: mg/100g
					Mg: mg/100g
					C-Gehalt: %
Schlaginformationen (Acker; Bestellungen und Ernte)					
Zwischenfrucht:		Hauptfrucht:		Untersaat:	
Fruchtart:		Fruchtart:		Fruchtart:	
Sorten:		Sorten:		Sorten:	
Aussaat am:		Aussaat am:		Aussaat am:	
Aussaatfläche:	ha	Aussaatfläche:	ha	Aussaatfläche:	ha
Saatmenge:	kg/ha	Saatmenge:	kg/ha	Saatmenge:	kg/ha
oder	Körner/ha	oder	Körner/ha	oder	Körner/ha
oder	Pflanzen/ha	oder	Pflanzen/ha	oder	Pflanzen/ha
oder	Einheit/ha	oder	Einheit/ha	oder	Einheit/ha
Ernte am:		Ernte am:		Ernte am:	
Ertrag:	dt/ha	Ertrag:	dt/ha	Ertrag:	dt/ha
<input type="radio"/>	gemessen statt geschätzt	<input type="radio"/>	gemessen statt geschätzt	<input type="radio"/>	gemessen statt geschätzt
Ganzpflanzenernte	ja: <input type="radio"/>	Ganzpflanzenernte	ja: <input type="radio"/>	Ganzpflanzenernte	ja: <input type="radio"/>
Kornfeuchte:	%	Kornfeuchte:	%	Kornfeuchte:	%
Verarbeitung (wenn Ganzpflanze):		Verarbeitung (wenn Ganzpflanze):		Verarbeitung (wenn Ganzpflanze):	
abgefahren:	<input type="radio"/> am:	abgefahren:	<input type="radio"/> am:	abgefahren:	<input type="radio"/> am:
abgeweidet:	<input type="radio"/> am:	abgeweidet:	<input type="radio"/> am:	abgeweidet:	<input type="radio"/> am:
eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:	eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:	eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:
verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>	verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>	verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>
Verarbeitung (wenn Korn):		Verarbeitung (wenn Korn):		Verarbeitung (wenn Korn):	
abgefahren:	<input type="radio"/> am:	abgefahren:	<input type="radio"/> am:	abgefahren:	<input type="radio"/> am:
abgeweidet:	<input type="radio"/> am:	abgeweidet:	<input type="radio"/> am:	abgeweidet:	<input type="radio"/> am:
eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:	eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:	eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:
verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>	verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>	verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>
Nebenprodukt (Restpflanze)	ja: <input type="radio"/>	Nebenprodukt (Restpflanze)	ja: <input type="radio"/>	Nebenprodukt (Restpflanze)	ja: <input type="radio"/>
Schätzmenge:	dt/ha	Schätzmenge:	dt/ha	Schätzmenge:	dt/ha
Verarbeitung (wenn Nebenprodukt):		Verarbeitung (wenn Nebenprodukt):		Verarbeitung (wenn Nebenprodukt):	
abgefahren:	<input type="radio"/> am:	abgefahren:	<input type="radio"/> am:	abgefahren:	<input type="radio"/> am:
abgeweidet:	<input type="radio"/> am:	abgeweidet:	<input type="radio"/> am:	abgeweidet:	<input type="radio"/> am:
eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:	eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:	eingearbeitet:	<input type="radio"/> am:
verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>	verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>	verbleibt auf Schlag:	<input type="radio"/>
Verwendung:		Verwendung:		Verwendung:	
Bemerkung:		Bemerkung:		Bemerkung:	

Anl. 5-2: Schlagkartei Acker (Rückseite)

LfULG, Bodenmonitoring		Acker/KUP			201026-1											
Bewirtschaftungsdatenblatt				Erntejahr												
Raum für zusätzliche Mitteilungen (Starkniederschläge, Hochwasser, Erosion usw.):																
Datum		Ereignis														
alle Arbeitsgänge (Bodenbearbeitung, Bestellung, Düngung, Pflanzenschutz, Beregnung, Ernte)																
Datum		Arbeitsgang		eingesetztes Gerät oder Gerätekombination (Typ)		Bearbeitungstiefe [cm]										
mineralische Düngung:																
Datum		behandelte Fläche [ha]		mineralische Düngemittel (ggf mit %-Angabe)		Menge [je ha]										
						dt l										
						o o										
						o o										
						o o										
						o o										
						o o										
						o o										
						o o										
organische Düngung:																
Datum		behandelte Fläche [ha]		organisches Düngemittel		RW/AW*		Menge				Nährstoffgabe [kg/ha]			TS [%]	
								[je ha] dt m ³		N P K Mg Ca						
								o o								
								o o								
								o o								
								o o								
* RW-Richtwert, AW-Analysenwert																
Pflanzenschutz:																
Datum		behandelte Fläche [ha]		Pflanzenschutzmittel (vollständiger Handelsname)				Wirkstoffbereich		Menge			Besatz/Befall			
										[je ha] l kg			kein gering mittel stark			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
										o o			o o o o			
Bewässerung:																
Datum		behandelte Fläche [ha]		Menge		Bemerkung										
				[m ³ /ha]												

Anl. 5-3: Schlagkartei Grünland (Vorderseite)

LfULG, Bodenmonitoring		Grünland/Brache/weitere Nutzung	
Bewirtschaftungsdatenblatt		Erntejahr	
Betriebsinformationen:			
BDF Nr.:	Flurstücknummer:	Betriebsname:	
Ort:	Feldblocknummer:	Straße:	
Gemarkung:	Feldstücknummer:	PLZ Ort:	
	Schlagnummer:	Telefon:	
	Schlaggröße (brutto): ha	Fax:	
	Schlagbezeichnung:	Email:	
Betriebsgröße:	ha LF	Kontaktperson:	
davon Ackerland:	ha		
davon Grünland:	ha		
Viehbesatz:	GV/ha LF		
allgemeine Schlaginformationen:			
Nutzung:	Bodenuntersuchungen (Nmin):	letzte Bodenuntersuchung:	
seit:	am:	NO3	kg/ha 0-30 cm
Grünland <input type="checkbox"/>		NH4	kg/ha 0-30 cm
Brache <input type="checkbox"/>		NO3	kg/ha 30-60 cm
andere <input type="checkbox"/>		NH4	kg/ha 30-60 cm
Nutzung	am:	NO3	kg/ha 0-30 cm
Staunässe: ja: <input type="checkbox"/>		NH4	kg/ha 0-30 cm
funktionsfähige		NO3	kg/ha 30-60 cm
Drainage: ja: <input type="checkbox"/>		NH4	kg/ha 30-60 cm
			pH-Wert:
			P: mg/100g
			K: mg/100g
			Mg: mg/100g
			C-Gehalt: %
Schlaginformationen (Grünland) Beweidung:			
von Datum:	von Datum:	von Datum:	von Datum:
bis Datum:	bis Datum:	bis Datum:	bis Datum:
Tierart: Anzahl oder GVE:	Tierart: Anzahl oder GVE:	Tierart: Anzahl oder GVE:	Tierart: Anzahl oder GVE:
Schafe	Schafe	Schafe	Schafe
Ziegen	Ziegen	Ziegen	Ziegen
Kälber bis 6 M.	Kälber bis 6 M.	Kälber bis 6 M.	Kälber bis 6 M.
Junggrind	Junggrind	Junggrind	Junggrind
Rind	Rind	Rind	Rind
Pferde bis 6 M.	Pferde bis 6 M.	Pferde bis 6 M.	Pferde bis 6 M.
Pferde > 6 M.	Pferde > 6 M.	Pferde > 6 M.	Pferde > 6 M.
beweidete Fläche: ha	beweidete Fläche: ha	beweidete Fläche: ha	beweidete Fläche: ha
Ganztagsweide: <input type="checkbox"/>	Ganztagsweide: <input type="checkbox"/>	Ganztagsweide: <input type="checkbox"/>	Ganztagsweide: <input type="checkbox"/>
Zufütterung auf der Fläche: <input type="checkbox"/>	Zufütterung auf der Fläche: <input type="checkbox"/>	Zufütterung auf der Fläche: <input type="checkbox"/>	Zufütterung auf der Fläche: <input type="checkbox"/>
Schlaginformationen (Grünland) Mahd:			
Datum Mahd:	Datum Mahd:	Datum Mahd:	Datum Mahd:
Hauptbestandsbildner	Hauptbestandsbildner	Hauptbestandsbildner	Hauptbestandsbildner
Erntemenge: dt/ha	Erntemenge: dt/ha	Erntemenge: dt/ha	Erntemenge: dt/ha
bei Wasser: %	bei Wasser: %	bei Wasser: %	bei Wasser: %
Verwendung:	Verwendung:	Verwendung:	Verwendung:
Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>	Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>	Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>	Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>
Silage <input type="checkbox"/>	Silage <input type="checkbox"/>	Silage <input type="checkbox"/>	Silage <input type="checkbox"/>
Heu <input type="checkbox"/>	Heu <input type="checkbox"/>	Heu <input type="checkbox"/>	Heu <input type="checkbox"/>
Frischfutter <input type="checkbox"/>	Frischfutter <input type="checkbox"/>	Frischfutter <input type="checkbox"/>	Frischfutter <input type="checkbox"/>
Kompost <input type="checkbox"/>	Kompost <input type="checkbox"/>	Kompost <input type="checkbox"/>	Kompost <input type="checkbox"/>
Bemerkungen:	Bemerkungen:	Bemerkungen:	Bemerkungen:
Datum Mahd:	Datum Mahd:	Datum Mahd:	Datum Mahd:
Hauptbestandsbildner	Hauptbestandsbildner	Hauptbestandsbildner	Hauptbestandsbildner
Erntemenge: dt/ha	Erntemenge: dt/ha	Erntemenge: dt/ha	Erntemenge: dt/ha
bei Wasser: %	bei Wasser: %	bei Wasser: %	bei Wasser: %
Verwendung:	Verwendung:	Verwendung:	Verwendung:
Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>	Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>	Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>	Verbleib am Ort <input type="checkbox"/>
Silage <input type="checkbox"/>	Silage <input type="checkbox"/>	Silage <input type="checkbox"/>	Silage <input type="checkbox"/>
Heu <input type="checkbox"/>	Heu <input type="checkbox"/>	Heu <input type="checkbox"/>	Heu <input type="checkbox"/>
Frischfutter <input type="checkbox"/>	Frischfutter <input type="checkbox"/>	Frischfutter <input type="checkbox"/>	Frischfutter <input type="checkbox"/>
Kompost <input type="checkbox"/>	Kompost <input type="checkbox"/>	Kompost <input type="checkbox"/>	Kompost <input type="checkbox"/>
Bemerkungen:	Bemerkungen:	Bemerkungen:	Bemerkungen:
Raum für zusätzliche Mitteilungen (Starkniederschläge, Hochwasser, Erosion usw.):			
Datum	Ereignis	Datum	Ereignis

Anl. 5-4: Aufnahmeblatt Wald

BDF.....		AUFNAHMEBLATT WALD						Zutreffendes ankreuzen				
Besitzart:		Bund <input type="checkbox"/>	Land <input type="checkbox"/>	Körperschaft <input type="checkbox"/>	Privat <input type="checkbox"/>		Datum:		Aufnehmer:			
Allgemeine Daten												
Forstamt/Waldbesitzer:.....		Straße:.....		Ort:.....			Tel.:.....					
forstl. Wuchsgebiet/Wuchsbezirk/Teilwuchsbezirk:.....												
Waldort Distrikt/Abteilung/Unterabteilung/Bestand:.....												
Schutzgebiet:		Nat.P <input type="checkbox"/>	NSG <input type="checkbox"/>	NDM <input type="checkbox"/>	LSG <input type="checkbox"/>	Naturpark <input type="checkbox"/>	NWR <input type="checkbox"/>	Sonstiges:.....				
Standörtliche Daten												
Höhenlage:.....		Relief:.....		Exposition:.....		Hangneigung:.....		Geologie:.....				
Standorteinheit/typ:.....												
Bodenart:.....		Entwicklungstiefe:.....			Bodentyp:.....							
Wasserhaushalt:		trocken <input type="checkbox"/>	mäßig trocken <input type="checkbox"/>	mäßig frisch <input type="checkbox"/>	mäßig frisch b. frisch <input type="checkbox"/>		frisch <input type="checkbox"/>	sehr frisch <input type="checkbox"/>				
		mäßig wechsell trocken <input type="checkbox"/>	wechsell trocken <input type="checkbox"/>	mäßig wechselfeucht <input type="checkbox"/>	wechselfeucht <input type="checkbox"/>		feucht <input type="checkbox"/>	naß <input type="checkbox"/>				
Bestandsdaten												
Baumart	Mischungs- anteil	form	Altersrahmen	mittleres Alter	Bonität dGZ	rel. Bon. Entr. Kl.	Beschirmungs/ Bedeckungs- grad	Schichtung	Nutzungs- form	Nutzungs- art	Begründungs- art/jahr	Sonstiges
									NW <input type="checkbox"/> MW <input type="checkbox"/> HW <input type="checkbox"/>	JP <input type="checkbox"/> JD <input type="checkbox"/> AD <input type="checkbox"/> EN <input type="checkbox"/> LB <input type="checkbox"/>		
Vorbestandsgeschichte:												
Potentielle nat. Waldgesellschaft:												
Bestockungs - oder Verjüngungsziel:												
Gesundheitszustand		Schadgrad:.....		Nadel/Laub Verlustprozent:.....			Vergilbung:.....					
		mech./bjot. Schaden:										
Düngung												
Art der Düngung:						Menge:			Zeitpunkt:			
Melloration												
Art der Melloration:						Zeitpunkt:						
Bemerkungen:												

Probennahmeprotokoll Mikrobiologie

: Schlüssellisten nach KA (akt. Auflage) verwenden

BDF-Nummer: _____

BDF-Name: _____

Witterung: _____

Vortage ohne Frost: _____ Tage, Angabe der Zeitspanne:
 geschätzt
 recherchiert

Feuchte des Oberbodens: _____

Wasserüberstau: _____

Landnutzungsform: _____

Kulturart: _____

Vorausgegangene Bodenbearbeitung: _____

Vegetationzustand: ruhend
 aktiv

Düngung vor Probennahme: _____

Beweidung bei Probennahme: _____

Bemerkungen zur Aufnahme: _____

Probennahme-Datum: _____

Probennahme-Uhrzeit: _____ Uhr

Probennehmer: _____

Lufttemperatur: _____ °C

Bodentemperatur: _____ °C

Bei Acker:

Bearbeitungstiefe: _____ cm

Anl. 11-1: Schätzskaala nach Londo (1975), Vitalitätsskala, Phänologie

LONDO	DECKUNG
.1	< 1 %
.2	> 1 < 3 %
.4	> 3 < 5 %
1	> 5 < 15 %
2	>15 < 25 %
3	> 25 < 35 %
4	> 35 < 45 %
5	> 45 < 55 %
6	> 55 < 65 %
7	> 65 < 75 %
8	> 75 < 85 %
9	> 85 < 95 %
10	> 95 %

Vitalitätsskala

°	=	letal, abgestorben
oo	=	sehr schwach, kümmernd
o	=	schwach
keine Angabe	=	normalwüchsig
*	=	üppig
**	=	sehr üppig

Entwicklungszustand (Phänologie) in Anlehnung an DIERSCHKE (1989)

a	=	austreibend
ab	=	abgeerntet, nur Stengelbasen und Grundblätter
b	=	blühend
e	=	entlaubt
f	=	fruchtend
j	=	Jungpflanze
k	=	Keimling
kn	=	knospend
s	=	nur Samen bzw. Früchte vorhanden
st	=	steril bleibend
v	=	verblüht
veg	=	vegetativ, d. h. ohne erkennbaren Blüten- und Fruchtansatz (nicht verblüht!)

Cu-Anreicherung im Oberboden

Eine vereinfachte übergreifende hypothetische BDF-Auswertung unter Einsatz des kumulativen Cu-Eintrags von jeweils ungefähr 400 g (ha a)⁻¹ über Wirtschaftsdünger und Deposition als Prädiktor auf den Cu_{KW}-Vorrat im Oberboden (0-5 cm) unter pflugloser Bewirtschaftung. Messungen des Cu-Eintrags und des Cu_{KW}-Vorrats liegen für 7 BDF als Jahreswerte über eine Dauer von 15 Jahren vor.

Statistischer Ansatz:

Beispielhaft wird ein einfaches Beispiel eines gemischten Modells, in diesem Fall ein Random-Intercept-Modell, von EVERITT & HOTHORN (2011) dargestellt (das Original-Beispiel von EVERITT & HOTHORN (2011) beschreibt ein forstliches Experiment mit der Last in einer Klemme in Abhängigkeit der Rutschung für sieben Holz-Exemplare).

Der Aufbau des Datensatzes ist als Ausschnitt für sieben BDF, an denen jeweils wiederholte 15 Messungen (also Messungen für 15 Jahre) durchgeführt wurden, in diesem hypothetischen Beispiel für den kumulativen Cu-Eintrag in g / (ha a) und Cu_{KW}-Vorrat in 0-5 cm in kg / ha:

Stichprobe	BDF_Nr	kum._Cu_Eintrag	Cu _{KW} _Vorrat
1	BDF_1	0.0	23.5
2	BDF_2	0.0	23.4
3	BDF_3	0.0	233.6
4	BDF_4	0.0	23.3
5	BDF_5	0.0	23.3
6	BDF_6	0.0	23.8
7	BDF_7	0.0	23.7
8	BDF_1	410	23.9
9	BDF_2	380	23.8
10	BDF_3	430	24.1
...			
105	BDF_7	6000	29.5

Ein geeignetes Random-Intercept-Modell berücksichtigt die folgenden Gleichungen und Annahmen:

$$Cu_{KW_Vorrat_{ij}} = (a + u_i) + b \text{ kum.}_Cu_Eintrag_j + \varepsilon_{ij}$$

ε : Fehlerterm, i: jeweilige BDF 1 bis 7, j: jeweilige zeitlich wiederholte Messung 1 bis 15 an derselben BDF, u_i : BDF-spezifische Zufallskomponente, die konstant bei dem kumulativen Cu-Eintrag ist.

Es wird angenommen, dass u_i normalverteilt mit dem Mittelwert 0 und der Varianz σ^2_u ist, und dass u_i und ε_{ij} unabhängig voneinander sind. Zudem ist eine Korrelationsstruktur für die wiederholten Messungen berücksichtigt. Die BDF-spezifischen Zufallskomponenten u_i erlauben es, dass für die Regressionsanpassung der BDF jeweils ein unterschiedlicher Achsenabschnitt pro BDF erhalten werden kann.

Die Einführung einer Korrelationsstruktur für die wiederholten Messungen ergibt: $Var(u_i + \varepsilon_{ij}) = \sigma^2_u + \sigma^2$.

Die Kovarianz zwischen den Residuen zwischen zwei kumulativen Cu-Eintragsstufen j und j' ist:

$$Cov(u_i + \varepsilon_{ij}, u_i + \varepsilon_{ij'}) = \sigma^2_u.$$

Für die Korrelation zwischen Paaren wiederholter Messungen ergibt sich daraus:

$$Cor(u_i + \varepsilon_{ij}, u_i + \varepsilon_{ij'}) = \sigma^2_u / (\sigma^2_u + \sigma^2).$$

Annahmen hierbei sind, dass die Varianz jeder wiederholten Messung gleich ist und dass die Kovarianz zwischen jedem Paar wiederholter Messungen gleich ist (Vorliegen einer "Compound Symmetry"-Struktur). Es können auch andere Kovarianzstrukturen angenommen werden.

Das Modell benötigt z. B. das Paket nlme (Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, Pinheiro et al. 2020). Der Aufruf in der Software R lautet für das Beispiel bei Annahme einer "Compound Symmetry"-Struktur und Abschätzung unter Maximierung der restricted log-likelihood-Funktion (method="REML"):

```
require(nlme)
modell <- lme(CuKW_Vorrat ~ kum._Cu_Eintrag,
             random=~1|BDF_Nr,data=dr,method="REML")
summary(modell)
```

Die Ausgabe zeigt Informationen über AIC, BIC und logLik (Akaike Information Criterion, Bayesian Information Criterion und log-likelihood bei Konvergenz). In der Ergebnisausgabe der Berechnung zeigt der Abschnitt "Random effects" die Abschätzung der Varianz, die durch den Zufallseffekt erklärt wird und der Abschnitt "Fixed effects" zeigt die Abschätzung des Achsenabschnitts und Regressionskoeffizienten.

Das Modell kann in Folgeschritten unter Berücksichtigung weiterer relevanter Prädiktoren (u. a. pH und Vorräte an C_{org} und Ton, siehe 1.2) erweitert werden. Die zu überprüfenden und das finale gemischte Modell spiegeln hierbei die zugrundeliegenden quantitativen Hypothesen wider.