DOKUMENTATION

10/2026

Repräsentativität des deutschen Messnetzes für Bodendaten am Beispiel der Probenpunkte und Deskriptoren der vorgeschlagenen EU-Bodenrichtlinie

von:

Michael Eisenhawer, Florian Lahn, Luca Kleinewillinghöfer
EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster

Carolin Kaufmann-Boll, Louisa Hain, Rona Michaelis
ahu GmbH Wasser · Boden · Geomatik, Aachen

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

DOKUMENTATION 10/2026

Projektnummer 203402

Repräsentativität des deutschen Messnetzes für Bodendaten am Beispiel der Probenpunkte und Deskriptoren der vorgeschlagenen EU-Bodenrichtlinie

von

Michael Eisenhawer, Florian Lahn, Luca Kleinewillinghöfer
EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster

Carolin Kaufmann-Boll, Louisa Hain, Rona Michaelis
ahu GmbH Wasser · Boden · Geomatik, Aachen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

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

Durchführung der Studie:
EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
Oststraße 2
48145 Münster

ahu GmbH
Kirberichshofer Weg 6
52066 Aachen

Abschlussdatum:
Mai 2026

Redaktion:
Fachgebiet II 2.7 Bodenschutz, Bodenmonitoring
Ina Krahl

DOI:
https://doi.org/10.60810/openumwelt-8528

ISSN 2199-6571

Dessau-Roßlau, November 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Repräsentativität des deutschen Messnetzes für Bodendaten am Beispiel der Probenpunkte und Deskriptoren der vorgeschlagenen EU-Bodenrichtlinie

Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, inwieweit bestehende Bodenmess- und Erhebungsprogramme in Deutschland, insbesondere die Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), die Anforderungen der EU-Richtlinie zur Bodenüberwachung und -resilienz (Soil Monitoring Law) erfüllen können. Dazu erfolgte ein systematischer Abgleich der in der Richtlinie definierten physikalischen, chemischen und biologischen Bodendeskriptoren mit den auf den BDF sowie in weiteren relevanten Erhebungsprogrammen (u.a. Bodenzustandserhebung Landwirtschaft und Wald, LUCAS Soil, ICP Forests, Umweltprobenbank, Biodiversitätsexploratorien und BioDive4Soil) erhobenen Parametern.

Ergänzend wurde ein vom Joint Research Centre bereitgestelltes R-Skript zur Ermittlung der erforderlichen Anzahl und räumlichen Verteilung von Probenpunkten weiterentwickelt und für verschiedene Stichproben- und Stratifizierungsszenarien getestet. Ziel war es, Auswertungen zur statistischen Repräsentativität bestehender Messnetze zu ermöglichen, deren Grenzen aufzuzeigen sowie die Konzeption eines bundesweit repräsentativen und EU-konformen Bodenüberwachungsrahmens zu unterstützen.

Die Ergebnisse liefern fachliche und methodische Grundlagen für die Entwicklung einer bundesweit repräsentativen Bodenüberwachung und für die Umsetzung der Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie in Deutschland.

Die Gegenüberstellung von Umfang der bestehenden Messnetze in Deutschland und Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie mit Fokus auf der Bodendauerbeobachtung zeigt, dass ein großer Teil der verpflichtenden Bodendeskriptoren durch bestehende Programme abgedeckt wird.

Hinsichtlich der räumlichen Repräsentativität bestätigt sich, dass die bestehenden Messnetze regional und nutzungsbezogen unterschiedlich dicht ausgeprägt sind. Kein bestehendes Messprogramm deckt alle Landnutzungen bundesweit homogen und statistisch vollständig ab.

Eine Einbindung vorhandener Messnetze in den Überwachungsrahmen ist technisch möglich, die ausgegebenen Ergebnisse zur Variabilität sind jedoch nur eingeschränkt belastbar, wenn Messnetze nicht ursprünglich randomisiert und einheitlich angelegt wurden.

Abstract: Representativeness of the German soil data monitoring network, using the sampling points and descriptors of the proposed EU Soil Framework Directive as an example

The project investigated the extent to which existing soil monitoring and survey programmes in Germany, in particular the Long-Term Soil Observation Plots (BDF), can meet the requirements of the EU Directive on soil monitoring and resilience (Soil Monitoring Law). For this purpose, a systematic comparison was carried out between the physical, chemical and biological soil descriptors defined in the Directive and the parameters collected in the BDFs as well as in other relevant survey programmes (including the Soil Surveys for Agriculture and Forestry, LUCAS Soil, ICP Forests, the Environmental Specimen Bank, Biodiversity Exploratories and BioDive4Soil).

In addition, an R script provided by the Joint Research Centre for determining the required number and spatial distribution of sampling points was further developed and tested for various sampling and stratification scenarios. The aim was to enable assessments of the statistical representativeness of existing monitoring networks, to explore its limitations and to support the design of a nationwide representative and EU-compliant soil monitoring framework.

The results provide technical and methodological foundations for the development of a nationwide representative soil monitoring system and for the implementation of the requirements of the EU Soil Framework Directive in Germany.

A comparison of the scope of existing monitoring networks in Germany with the requirements of the EU Soil Monitoring Law, with a focus on long-term soil monitoring, shows that a large proportion of the mandatory soil descriptors are covered by existing programmes.

With regard to spatial representativeness, it is confirmed that the density of existing monitoring networks varies by region and land use. No existing monitoring programme covers all land uses uniformly and statistically comprehensively across the country.

It is technically possible to integrate existing monitoring networks into the monitoring framework; however, the results produced regarding variability are only of limited reliability if the monitoring networks were not originally designed in a randomised and uniform manner.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 8
Abkürzungsverzeichnis 9
Zusammenfassung 11
Summary 14
1 Einführung 17
1.1 Rechtlicher Rahmen 17
1.2 Statistische Grundlagen 20
2 Eignung der Bodendauerbeobachtung und weiterer Messprogramme 22
2.1 Übersicht der Deskriptoren 22
2.2 Abdeckung der Deskriptoren durch BDF und weitere Messprogramme 25
2.2.1 Physikalische Deskriptoren 28
2.2.2 Chemische Deskriptoren 30
2.2.2.1 Versalzung, organischer Kohlenstoff, Nährstoffe, Schwermetalle und Versauerung 31
2.2.2.2 Organische Kontaminanten, PFAS und Pestizide 36
2.2.3 Biologische Deskriptoren 39
2.3 Zusammenfassende Bewertung 43
3 Etablierung eines R-Skripts zur Analyse der Anzahl national benötigter Probenpunkte 48
3.1 Tests zur Ermittlung der Anzahl benötigter Probenpunkte 50
3.2 Umgang mit Strata mit geringer Flächengröße 54
3.3 Betrachtungen zur Repräsentativität bestehender Messnetze 56
3.3.1 Allgemeine Betrachtung 56
3.3.2 Bundesweite Repräsentativität existierender Messstandorte 57
3.4 Räumliche Verteilung von Probenpunkten 59
3.4.1 Technische Integration bestehender Messnetze 59
3.4.2 Anwendungsbeispiel einer technischen Integration bestehender Messnetze 60
4 Ergebnisse und Handlungsempfehlungen 62
5 Quellenverzeichnis 64
A Anhang: Datengrundlagen 66
B Anhang: Filterfähige Liste der Bodendeskriptoren 69
C Anhang: Prüfung der Grundlagendaten zur Ermittlung der Variabilität von Bodeneigenschaften 71
D Anhang: Landnutzungskategorien 73
D.1 Zuordnung Landbedeckungskategorien 73
D.2 Zuordnung der LULUCF-Kategorien zu Landnutzungen bestehender Messnetze 74
E Anhang: Ausblick auf Möglichkeiten für die Auswahl und Festlegung von Probenpunkten nach Feststehen von Berichtseinheiten und Raumgliederung 75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) in Deutschland 26
Abbildung 2: Auf BDF erfasste Parameter für Textur, Versalzung, Bodenkohlenstoff und Dichte 35
Abbildung 3: Auf BDF erfasste Parameter für organische Kontaminanten 38
Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung von benötigten und bestehenden Probenpunkten in einer Bodenregionen* 54
Abbildung 5: Flächenproportionalität von BDF für Landnutzung 58
Abbildung 6: Flächenproportionalität von BDF für 12 Bodenregionen 58
Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der Flächenproportionalität von Messnetzen für Strata aus Bodenregion und Landnutzung Wald 59
Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der Gesamtpopulation (oben) und einer Beispiel-Stichprobe von Probenpunkten (unten) 61
Abbildung 9: Erläuterung der Einfärbung in der Liste der Bodendeskriptoren 69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodendeskriptoren des europäischen Überwachungsrahmens 24
Tabelle 2: Standorte der Bodendauerbeobachtungen innerhalb der Bundesländer 27
Tabelle 3: Erfassung bodenphysikalischer Deskriptoren auf BDF 28
Tabelle 4: Erfassung bodenphysikalischer Deskriptoren in weiteren Messprogrammen 30
Tabelle 5: Erfassung bodenchemischer Deskriptoren auf BDF 31
Tabelle 6: Erfassung bodenchemischer Deskriptoren in weiteren Messprogrammen 34
Tabelle 7: Erfassung organischer Kontaminanten, PFAS und Pestizide auf BDF 36
Tabelle 8: Erfassung organischer Kontaminanten, PFAS und Pestizide in weiteren Messprogrammen 37
Tabelle 9: Erfassung bodenbiologischer Deskriptoren auf BDF nach JSON-Datensatz 2018 39
Tabelle 10: Bodenbiologische Erhebungen auf BDF nach Jänsch et al. (2023) 41
Tabelle 11: Erfassung bodenbiologischer Deskriptoren in weiteren Messprogrammen 42
Tabelle 12: Erfassung der Bodendeskriptoren der EU-Bodenrichtlinie auf BDF 46
Tabelle 13: Erfassung der Bodendeskriptoren der EU-Bodenrichtlinie in weiteren Messprogrammen 47
Tabelle 14: Verwendungszweck von Datenquellen 49
Tabelle 15: Variabilität von Bodendeskriptoren an den LUCAS-Grid-Punkten (2 x 2 km) in den Szenarien 1 bis 3 50
Tabelle 16: Übersicht der Testszenarien 52

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AP	Arbeitspaket
BB	Brandenburg
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BDF	Bodendauerbeobachtung
BE	Berlin
BGL	Bodengroßlandschaften
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BHL	Berg- und Hügelländer
BL	Bundesland
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Bio.Ex.	Biodiversitätsexploratorien
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
BZE	Bodenzustandserhebung
BÜK	Bodenübersichtskarte
CLC	CORINE Land Cover, Landbedeckung und Landnutzungsklassen
CV	Coefficient of Variation (dt. Variationskoeffizient)
CV artificial	Artificial Coefficient of Variation (dt. Künstlicher Variationskoeffizient)
DDD/DDT	Dichlorodiphenyldichlorethan/Dichlordiphenyltrichlorethan
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EU	Europäische Union
EPA	Environmental Protection Agency
GIS	Geographisches Informationssystem
HB	Bremen
HCH	Hexaclorcyclohexan
HE	Hessen
HH	Hamburg
HM NRW	Humusmonitoring Nordrhein-Westfalen
ISO	International Organization for Standardization (Int. Organisation für Normung)
JRC	Joint Research Center der Europäischen Union
KAK	Kationenaustauschkapazität

Abkürzung	Erläuterung
LUCAS	EU-Land Use and Coverage Area frame Survey (Flächenstichprobenerhebung zur Bodennutzung und Bodenbedeckung)
MN	Messnetze
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NI	Niedersachsen
NUTS	Nomenclature des Unités territoriales statistiques (dt. Nomenklatur der statistischen Gebietseinheiten)
NUTS0	NUTS-0-Regionen repräsentieren das gesamte Staatsgebiet der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union
NUTS1	Verwaltungseinheit: Bundesländer
NUTS2	Verwaltungseinheit: überwiegend Regierungsbezirke
NRW	Nordrhein-Westfalen
OCP	Organochlorpestizide
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine/Dibenzofurane
PFAS	Per- and polyfluoroalkyl substances (Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen)
R	Programmiersprache für statistische Berechnungen und Grafiken
Richtlinie	EU-Bodenrichtlinie (Bodenüberwachungsgesetz, Soil Monioring Law)
RP	Rheinland-Pfalz
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SML	Soil Monitoring Law
SN	Sachsen
soil district	Bodenbezirk (im SML)
soil unit	Bodeneinheit (im SML)
ST	Sachsen-Anhalt
TH	Thüringen
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht untersucht, inwieweit die bestehenden Bodenmess- und Monitoringprogramme in Deutschland geeignet sind, die Anforderungen der EU-Richtlinie zur Bodenüberwachung und -resilienz (kurz: EU-Bodenrichtlinie, Soil Monitoring Law, SML) zu erfüllen. Hintergrund ist die Frage, inwieweit bestehende Bodenmess- und Monitoringprogramme, insbesondere die Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), die Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie erfüllen können. Zugleich soll die Studie die Konzeption einer bundesweit repräsentativen, EU-konformen Bodenüberwachung durch die Entwicklung einer transparenten und skalierbaren Methodik unterstützen und deren Grenzen aufzeigen**.** Die Europäische Union verfolgt mit der Richtlinie das Ziel, bis zum Jahr 2050 einen gesunden Zustand der Böden zu erreichen und diesen durch einen harmonisierten und statistisch belastbaren Bodenüberwachungsrahmen nachzuweisen.

Im Mittelpunkt der Studie stehen Programme der Bundesländer sowie weitere nationale und europäische Messprogramme. Ziel war es, die Eignung dieser Programme hinsichtlich der geforderten Bodendeskriptoren zu bewerten, bestehende Lücken zu identifizieren und Handlungsmöglichkeiten für den Aufbau eines repräsentativen Überwachungssystems aufzuzeigen. Die Grundlage der Untersuchung bilden die Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie, die insgesamt 46 Bodendeskriptoren definiert. Diese umfassen physikalische, chemische und biologische Eigenschaften des Bodens, die zur Bewertung verschiedener Formen der Bodendegradation herangezogen werden. Dazu zählen unter anderem Versalzung, Verlust an organischem Kohlenstoff, Bodenverdichtung, Nährstoffüberschüsse, Kontaminationen, Versauerung, verminderte Wasserrückhaltekapazität sowie der Verlust der biologischen Vielfalt. Im Rahmen der Studie erfolgte ein systematischer Abgleich der in der Richtlinie definierten Deskriptoren mit den Parametern, die bereits heute in deutschen und europäischen Messprogrammen erhoben werden. Neben den Bodendauerbeobachtungsflächen der Bundesländer wurden dabei unter anderem die Bodenzustandserhebungen Landwirtschaft und Wald, das europäische LUCAS-Programm, das Forstmonitoring ICP Forests, die Umweltprobenbank, die Biodiversitätsexploratorien sowie die Basiserhebung Bodenbiodiversität (BioDive4Soil) berücksichtigt.

Ein Schwerpunkt des Berichts liegt auf der Bewertung der Bodendauerbeobachtungsflächen der Länder, die mit insgesamt über 800 Standorten eine langfristige Bodenüberwachung in Deutschland gewährleisten. Die Untersuchung zeigt, dass diese Programme viele der von der EU geforderten Standardparameter bereits erfassen. Allerdings unterscheiden sich sowohl die räumliche Verteilung als auch der Umfang der erhobenen Parameter zwischen den Bundesländern. Aufgrund der föderalen Organisation wurden die Standorte ursprünglich nicht mit dem Ziel einer bundesweiten Repräsentativität im hier geforderten statistischen Sinne angelegt. Daraus ergeben sich verschiedene Verfahren zur Stichprobenermittlung, regionale Unterschiede und teilweise Lücken in bestimmten Bundesländern und Landnutzungstypen.

Bei den physikalischen Bodendeskriptoren zeigt sich insgesamt eine gute Ausgangssituation. Standardparameter wie Bodentextur sowie Trockenrohdichten im Ober- und Unterboden werden an einem Großteil der Bodendauerbeobachtungsflächen – je nach Parameter auf etwa 60 bis 80 Prozent der Standorte – erfasst und liegen zudem in bundesweiten Stichprobenerhebungen in Wald und Landwirtschaft sowie LUCAS vor. Auch weitere grundlegende Bodenkennwerte für die Bewertung von Verdichtung und Wasserspeicherung sind teilweise vorhanden. Für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Ksat), die Luftkapazität oder die Wasserspeicherkapazität bestehen jedoch nur eine mittlere bis geringe Abdeckung bzw. Datenlücken. Diese können vielfach durch Pedotransferfunktionen geschlossen werden, also durch die Berechnung der fehlenden Werte aus anderen bereits verfügbaren Bodenparametern. Zusätzlich stehen Daten aus anderen Messprogrammen zur Ergänzung zur Verfügung.

Auch im Bereich der chemischen Bodendeskriptoren fällt die Bilanz teilweise positiv aus. Organischer Bodenkohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwermetalle und der pH-Wert werden an einem gro-

ßen Teil der Bodendauerbeobachtungsflächen erfasst. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff wird zwar nicht direkt erhoben, kann jedoch aus vorhandenen Messgrößen berechnet werden. Ähnliches gilt für das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis. Bei Schwermetallen weisen die Bodendauerbeobachtungsflächen eine vergleichsweise hohe räumliche Abdeckung auf. Dagegen bestehen Einschränkungen bei einzelnen Parametern wie der elektrischen Leitfähigkeit als Indikator für Versalzung oder bei fakultativen Größen wie der Basensättigung. Insgesamt zeigen die Ergebnisse jedoch, dass wichtige chemische Anforderungen der Richtlinie bereits durch die bestehenden Programme erfüllt werden können.

Komplexer stellt sich die Situation im Bereich der organischen Schadstoffe dar. Zwar werden verschiedene Schadstoffgruppen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB), Dioxine sowie bestimmte Pestizide bereits an vielen Standorten untersucht, die Abdeckung ist jedoch regional unterschiedlich und deutlich geringer als bei den Standardparametern. Besonders große Defizite bestehen bei PFAS. Diese werden bislang weder auf den Bodendauerbeobachtungsflächen noch in den bundesweiten Bodenzustandserhebungen und LUCAS systematisch erfasst. Lediglich einzelne Forschungsprojekte sowie das Programm BioDive4Soil sehen entsprechende Untersuchungen vor. Da PFAS in der EU-Bodenrichtlinie ausdrücklich berücksichtigt werden, wird hier Handlungsbedarf festgestellt.

Weitere Defizite zeigt die Untersuchung bei den biologischen Bodendeskriptoren auf. Die EU schreibt als verpflichtenden biologischen Indikator DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien vor. Diese Methode dient der Erfassung der biologischen Vielfalt im Boden und wird derzeit auf den Bodendauerbeobachtungsflächen nicht eingesetzt. An einzelnen Standorten existieren Untersuchungen zur Bodenatmung, mikrobiellen Biomasse oder zu einzelnen Bodenorganismen wie Regenwürmern und Springschwänzen. Die erforderlichen DNA-basierten Verfahren kommen jedoch in den bundesweiten Programmen BioDive4Soil sowie der Biologischen Bodenzustandserhebung im Wald zum Einsatz.

Neben der inhaltlichen Abdeckung der Bodendeskriptoren wird die Frage der statistischen Repräsentativität betrachtet. Nach den Vorgaben der EU sollen die Probenpunkte des Bodenüberwachungsrahmens anhand einer statistisch randomisiert-stratifizierten Stichprobenverteilung so ausgewählt werden, dass sie die Variabilität der Bodeneigenschaften mit einem definierten maximalen Variationskoeffizienten abbilden. Hierfür wurde ein vom Joint Research Centre entwickeltes R-Skript zur statistischen Ermittlung der erforderlichen Anzahl und räumlichen Verteilung von Probenpunkten weiterentwickelt und in unterschiedlichen Szenarien getestet. Das Verfahren basiert, wie gefordert auf einem randomisiert stratifizierten Stichprobendesign und verwendet den Bethel-Algorithmus zur Berechnung optimaler Stichprobengrößen. Die Berechnungen zeigen, dass die Zahl der erforderlichen Probenpunkte deutlich höher liegen kann als diese vergleichsweise in den bestehenden Messnetzen vorliegen. Je nach räumlicher Gliederung, Stratifizierung und Auswahl der betrachteten Variablen werden zwischen mehreren tausend und mehreren zehntausend Probenpunkten benötigt, um die Anforderungen der Richtlinie zu erfüllen. Im Rahmen dieser Studie wurde untersucht, inwieweit die erforderliche Stichprobenverteilung eventuell durch Berücksichtigung bestehender Messnetze ergänzt oder bedient werden kann, und umgekehrt, wo hierbei Grenzen erreicht werden.

Ein wichtiges Ergebnis besteht darin, dass außer BioDive4Soil keines der heute existierenden deutschen Messnetze den Anforderungen an eine bundesweit homogene und statistisch randomisiert-stratifizierte repräsentative Abdeckung gerecht wird. Außer BioDive4Soil erfasst keine der bestehenden Erhebungsstrukturen verschiedene Landnutzungen bundesweit flächendeckend und in vergleichbarer Verteilung und Dichte. Zwar liefern die Bodendauerbeobachtungsflächen und die Bodenzustandserhebungen wertvolle Informationen, jedoch sind bestimmte Landnutzungen, Regionen oder Bodentypen über- bzw. unterrepräsentiert. Das weiterentwickelte R-Skript ermöglicht die konzeptionelle Planung und Verteilung zukünftiger Probenpunkte und zeigt, dass die technische Integration bestehender Messnetze grundsätzlich möglich ist. Da die ursprüngliche Standortwahl vieler Pro-

gramme jedoch nicht auf zufälligen Stichprobenverfahren basiert, können entsprechende Ergebnisse statistisch nur eingeschränkt beziehungsweise hypothetisch als statistisch repräsentativ interpretiert werden. Für die weitere Planung wird empfohlen, geografische Informationssysteme (GIS) ergänzend zu statistischen Werkzeugen einzusetzen. Während R insbesondere für klar definierte Berechnungs- und Planungsprozesse auf Basis festgelegter Eingangsparameter geeignet ist, ohne die Möglichkeit, die Güte oder Eignung von Eingangsdaten zu beurteilen, stellen GIS-Anwendungen das leistungsfähigere Instrument für die Verarbeitung, Visualisierung und vergleichende Analyse umfangreicher Geodatenbestände dar. Sie erlauben es, entsprechende Limitierungen zu erkennen und untersuchen.

Insgesamt zeigt die Studie, dass Deutschland bereits über Grundlagen für die Umsetzung der EU-Bodenrichtlinie verfügt. Viele der geforderten physikalischen und chemischen Bodendeskriptoren werden bereits regelmäßig erhoben, und einige Datenlücken lassen sich durch die Kombination verschiedener Überwachungs- und Erhebungsprogramme oder durch die Ableitung aus vorhandenen Parametern schließen. Gleichzeitig besteht Weiterentwicklungsbedarf in den Bereichen der biologischen Bodenindikatoren, des Monitorings organischer Schadstoffe, der methodischen Harmonisierung sowie einer ausgewogeneren räumlichen Abdeckung der Probenpunkte. Die Handlungsempfehlungen des Berichts umfassen daher eine stärkere Vereinheitlichung der Untersuchungsmethoden, die Ergänzung biologischer Untersuchungen insbesondere durch DNA-Metabarcoding, den Aufbau eines systematischen Monitorings für organische Schadstoffe einschließlich PFAS, die bessere Einbindung bestehender Programme sowie die Konzeption eines statistisch abgesicherten und bundesweit repräsentativen Messnetzes am Beispiel von BioDive4Soil. Nur durch diese Maßnahmen können die Anforderungen der derzeitigen EU-Bodenrichtlinie langfristig vollständig erfüllt und eine belastbare Bewertung der Bodengesundheit ermöglicht werden.

Summary

This report examines the extent to which existing soil measurement and monitoring programmes in Germany are suitable for meeting the requirements of the EU Directive on soil monitoring and resilience (European Soil Monitoring Law, SML). The background to this is the question to what extent existing national soil measurement and monitoring programmes, in particular the long-term soil observation sites (BDF), can meet the requirements of the Soil Monitoring Law. Additionally, the study aims to support the design of a nationwide, representative and EU-compliant soil monitoring framework through the development of a transparent and scalable methodology, while also exploring its limitations**.** With this Directive, the European Union aims to achieve a healthy state of the soil by 2050 and to demonstrate this through a harmonised and statistically robust soil monitoring framework.

The study focuses on programmes run by the federal states in Germany as well as other national and European monitoring programmes. The aim was to assess the suitability of these programmes with regard to the required soil descriptors, to identify existing gaps and to highlight possible courses of action for establishing a representative monitoring system. The study is based on the requirements of the EU Soil Monitoring Law which defines a total of 46 soil descriptors. These include the physical, chemical and biological properties of the soil, which are used to assess various forms of soil degradation. Furthermore, amongst others, salinisation, loss of organic carbon, soil compaction, nutrient excesses, contamination, acidification, reduced water retention capacity and the loss of biodiversity are included. As part of the study, a systematic comparison was carried out between the descriptors defined in the Directive and the parameters already being measured in German and European monitoring programmes. In addition to the federal states' long-term soil observation plots, the study considered, amongst others, the German soil surveys for agriculture and forestry, the European LUCAS programme, the ICP Forests forestry monitoring programme, the Environmental Specimen Bank, the biodiversity exploratories, and the baseline survey on soil biodiversity (BioDive4Soil).

A key focus of the report is the assessment of the long-term soil observation sites, which, with a current total of more than 800 locations, ensure long-term soil monitoring in Germany. The study shows that these sites already record many of the standard parameters required by the EU. However, both the spatial distribution and the scope of the parameters recorded vary between the federal states. Due to the federal structure of the country, the sites were not originally established with the aim of achieving nationwide representativeness in the above explained statistical requirements. This results in varying sampling approaches, regional differences and, in some cases, gaps in certain federal states and land-use types.

Overall, the baseline situation for physical soil descriptors appears favourable. Standard parameters such as soil texture and bulk densities in the topsoil and subsoil are recorded at the majority of long-term soil observation plots – at around 60 to 80 per cent of sites, depending on the parameter – and are also available from nationwide surveys in forest and agricultural areas, as well as from LUCAS. Other fundamental soil parameters for assessing compaction and water storage are also available in some cases. However, for saturated hydraulic conductivity (Ksat), air capacity and water storage capacity, coverage is only moderate to low, or there are data gaps. In many cases, these can be filled using pedotransfer functions, i.e. by calculating the missing values from other soil parameters that are already available. In addition, data from other monitoring programmes are available to supplement these.

The situation is also partly positive with regard to chemical soil descriptors. Soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, heavy metals and pH are recorded at a large proportion of the long-term soil monitoring sites. Although soil organic carbon stocks are not measured directly, they can be calculated from existing parameters. The same applies to the carbon-to-nitrogen ratio. With regard to

heavy metals, the long-term soil monitoring sites provide comparatively high spatial coverage. By contrast, there are limitations for individual parameters such as electrical conductivity – an indicator of salinisation – or for optional parameters such as base saturation. Overall, however, the results show that important chemical requirements of the Directive can already be met by the existing programmes.

The situation is more complex when it comes to organic pollutants. Although various groups of pollutants, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), polychlorinated biphenyls (PCB), dioxins and certain pesticides, are already being investigated at many sites, coverage varies from region to region and is significantly lower than for the standard parameters. There are particularly significant shortcomings regarding PFAS. To date, these have not been systematically recorded either at long-term soil monitoring sites or in the nationwide soil surveys and LUCAS. Only individual research projects and the BioDive4Soil programme provide investigations. As PFAS are explicitly addressed in the EU Soil Directive, a need for action has been identified in this area.

The study also highlights further gaps in relation to biological soil descriptors. The EU stipulates DNA metabarcoding for fungi and bacteria as a mandatory biological indicator. This method is used to assess biological diversity in the soil and is not currently employed at the long-term soil monitoring sites. At individual sites, studies exist on soil respiration, microbial biomass or specific soil organisms such as earthworms and collembola. However, the necessary DNA-based methods are employed in the nationwide programmes BioDive4Soil and the Biological Soil Survey in Forests.

In addition to the substantive coverage of soil descriptors, the requirements for statistical representativeness are also considered. According to the EU Soil Monitoring Law, a stratified-random sampling approach is required for national soil monitoring frameworks, reflecting the variability of soil properties with a defined maximum coefficient of variation. To this end, an R script developed by the Joint Research Centre for the statistical determination of the required number and spatial distribution of sampling points was further refined and tested in various scenarios. The method is based as required on a randomised stratified sampling design and uses the Bethel algorithm to calculate optimal sample sizes. The calculations show that the number of sample-units required may be significantly higher than for instances as compared are provided by existing monitoring networks in Germany. Depending on the spatial structure, stratification and selection of the variables under consideration, between several thousand and several tens of thousands of sampling points are needed to meet the requirements of the directive. Part of this study was to explore how far existing national monitoring networks could contribute to or be integrated into the required statistical sampling, and to explore its limitations.

A key finding is that except BioDive4Soil none of the existing German monitoring networks currently in place fully meets the requirements for nationwide, homogeneous and statistically representative stratified-randomly sampled coverage. Except BioDive4Soil none of the existing survey structures covers different land uses nationwide comprehensively and at a comparable spatial distribution and density. Whilst the long-term soil observation plots and the soil surveys for agriculture and forestry provide valuable information, certain land uses, regions or soil types are either over- or under-represented. The further-developed R script enables the conceptual planning and distribution of future sampling points and demonstrates that the technical integration of existing monitoring networks is, in principle, possible. However, as the original sampling selection for many programmes is not based on random sampling procedures, the corresponding results can only be interpreted as limited statistically representative or hypothetically from a statistical point of view. It is therefore recommended that geographical information systems (GIS) be used to complement statistical tools for further planning. Whilst R is particularly suitable for clearly defined calculation and planning processes based on specified input parameters without the ability to explore quality or suitability of input data, GIS applications represent the more powerful instrument for the processing, visualisation

and comparative analysis of extensive geodata sets. They enable us to identify and examine the above mentioned limitations.

Overall, the study shows that some of the foundations for implementing the EU Soil Monitoring Law are already in place in Germany. Many of the required physical and chemical soil descriptors are already collected on a regular basis, and some data gaps can be filled by combining various monitoring and survey programmes or by deriving values from existing parameters. At the same time, there is a need for further development in the areas of biological soil indicators, the monitoring of organic pollutants, methodological harmonisation and a more balanced spatial coverage of sampling points. The report's recommendations for action therefore include greater standardisation of analytical methods, the expansion of biological analyses – in particular through DNA metabarcoding – the establishment of a systematic monitoring approach for organic pollutants, including PFAS, better integration of existing programmes, and the design of a statistically robust and nationally representative monitoring network comparable with the recently established BioDive4Soil. Only through these measures can the long-term requirements of the current EU Soil Monitoring Law be entirely fulfilled, thereby providing the basis for a robust assessment of soil health.

1 Einführung

1.1 Rechtlicher Rahmen

Die EU hat sich mit der Richtlinie zur Bodenüberwachung und für Bodenresilienz vom 12. November 2025 (Europäische Kommission 2025) zum Ziel gesetzt, die europäischen Böden bis 2050 in einen gesunden Zustand zu versetzen. Die Böden sollen in der Lage sein vielfältige Ökosystemleistungen zu erbringen, die den ökologischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedürfnissen gerecht werden, die Auswirkungen des Klimawandels und den Verlust an biologischer Vielfalt verhindern und abmildern sowie die Widerstandsfähigkeit gegen Naturkatastrophen und die Ernährungssicherheit erhöhen. Erreicht werden soll dies durch die Senkung der Bodenkontamination, die Verbesserung der Bodengesundheit, die Aufrechterhaltung eines gesunden Bodenzustands und das Verhindern von Bodendegradation (Europäische Kommission 2025, Art 1).

Das dafür benötigte Bodenmonitoring ist ein wichtiges Instrument, um den Zustand der Böden erfassen und beurteilen zu können. Es muss repräsentativ und über alle Mitgliedsstaaten hinweg harmonisiert sein. In Deutschland liegen aus den Programmen wie der Bodendauerbeobachtung und den Bodenzustandserhebungen (BZE Landwirtschaft und BZE Wald) bereits umfangreiche Messdatensätze vor. Ein wichtiger Schritt ist daher die Sichtung und Evaluation der bereits existierenden Messprogramme. Die Bodendauerbeobachtung der Bundesländer in ihrer aktuellen Form ist aufgrund der föderalistischen Organisationsstruktur nur bedingt für die nationale Repräsentativität und internationale Vergleichbarkeit ausgelegt. Gleichwohl müssen die Beprobungspunkte bestehender Programme bundesweit repräsentativ sein, wenn sie in das EU-Bodenmonitoring integriert werden sollen. Das Projekt beschäftigt sich damit, welche der von der EU geforderten Bodendeskriptoren bereits durch die bestehenden Messprogramme abgedeckt sind, wo Lücken bestehen und wie vorhandene Daten sinnvoll integriert und ergänzt werden können. Ziel ist es, eine transparente, skalierbare Methode zu entwickeln, die die Konzeption eines Bodenmonitorings in Deutschland gemäß den Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie und zur Bewertung der Repräsentativität bestehender Bodenmonitoringstandorte unterstützen kann.

Zunächst erfolgt eine strukturierte Erfassung der Bodendeskriptoren aus der EU-Bodenrichtlinie (dt. Bodenüberwachungsgesetz, engl. Soil Monitoring Law, im Folgenden auch als SML erwähnt), anschließend ein Vergleich mit Informationen zu Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) und zu weiteren relevanten Messprogrammen. Zudem wird ein R-Skript (weiter-)entwickelt, das eine Analyse der Anzahl und Lage möglicher Probenpunkte auf Grundlage unterschiedlicher Raumgliederungen unter Berücksichtigung bestehender Messnetze ermöglicht. Handlungsempfehlungen zur Anwendung der R-Skripts werden gegeben. Diese können dem Umweltbundesamt (UBA) und dem Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) als Grundlage dienen, um die Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie umsetzen und die Strategien für einen nachhaltigen Bodenschutz in Deutschland weiterentwickeln zu können.

Die Basis dieses Gutachtens bilden neben der EU-Bodenrichtlinie (Europäische Kommission 2025) größtenteils öffentlich zugängliche Datensätze für die Analyse der Eignung der bereits existierenden Messnetze in Deutschland zur Erfüllung der Bodenüberwachung im Sinne der Richtlinie (Anhang A).

Anforderungen an den Bodenüberwachungsrahmen (Europäische Kommission 2025) gemäß der deutschen Fassung der EU-Bodenrichtlinie)

Das Ziel der Bodenüberwachungsrichtlinie, am 16. Dezember 2025 in Kraft getreten, ist die Schaffung eines einheitlichen Überwachungsrahmens für alle Böden in der Europäischen Union. Die Mitgliedsstaaten sollen zum Zweck der Gestaltung der Bodenüberwachung und zur Berichterstattung zunächst ein oder mehrere Bodenbezirke (*soil districts*) festlegen, die zusammengenommen ihr gesamtes Hoheitsgebiet abdecken (Art. 4, Abs. 1). In Deutschland können dies z.B. das Bundesgebiet (NUTS0) oder die Bundesländer (NUTS1) sein. Die *soil districts* bestehen wiederum aus Bodeneinheiten (*soil units*), welche räumliche Untereinheiten bilden, die Bodentypen und Landnutzungskategorien, ausgenommen Wasserkörper, zu berücksichtigen haben (Art 4, Abs. 2). Diese bilden die Referenzeinheiten für die Bodenüberwachung. 39 Monate nach Inkrafttreten der Richtlinie sind eine Liste von Bodenbezirken und Bodeneinheiten sowie die Namen der zuständigen Behörden vorzulegen (17.03.2029).

Gemäß Art. 6 (1) sollen die Mitgliedsstaaten einen (Boden-)Überwachungsrahmen einrichten, der, wenn vorhanden, sich auf bereits bestehende Überwachungs- bzw. Monitoringnetze auf nationaler oder Unionsebene stützt und gegebenenfalls weitere Daten aus Flächenstichprobenerhebungen über die Bodennutzung/-bedeckung (LUCAS) miteinschließt. Innerhalb der *soil districts* sind die Bodenversiegelung und der Bodenabtrag und innerhalb der *soil units* die Bodengesundheit zu überwachen. Zur Bewertung von Bodengesundheit, -versiegelung und -abtrag sind die Mitgliedsstaaten angehalten, die im Anhang der Bodenrichtlinie aufgeführten Bodendeskriptoren anzuwenden. Der Ausdruck „Bodendeskriptor“ bezeichnet für den Zweck der EU-Bodenrichtlinie einen Parameter, der ein physikalisches, chemisches oder biologisches Merkmal der Bodengesundheit beschreibt (Art. 3). Bei der Wahl der Probenahmestellen (Art. 9, Abs. 1), bei den durchzuführenden Bodenmessungen (Art. 9, Abs. 3, 4), bei Fernerkundungsdaten und -produkten und daraus resultierenden Daten (Art. 6, Abs. 4) sowie den Indikatoren für Bodenversiegelung und Bodenabtrag (Art. 7, Abs. 1) soll sich auf die Vorgaben und Hinweise der Richtlinie gestützt werden (Art. 6, Abs. 3), um eine kohärente und genaue Überwachung zu gewährleisten.

Um die Anzahl und Lage der Probenahmestellen bestimmen zu können, übermittelt die Europäische Kommission den Mitgliedsstaaten Informationen, wie z.B. einschlägige Karten der Bodendeskriptoren, die im Rahmen früherer LUCAS-Bodenerhebungen erhoben wurden (Art. 9, Abs. 1). Zur Ermittlung der Werte der Bodendeskriptoren sollen Bodenmessungen, Beprobungen, Datenerhebungen und -analysen von den Mitgliedsstaaten durchgeführt werden, die in Abstimmung und je nach Bedarf auch durch die Kommission unterstützt werden. Für manche Deskriptoren ist es zulässig, die Probenahmestellen auf eine relevante Teilmenge der Gesamtzahl zu beschränken (Art. 9, Abs. 3).

Bei den durchzuführenden Bodenmessungen sind bei Beachtung der in der Richtlinie genannten Methoden auch Messungen der Mitgliedsstaaten im Einklang mit nationalen oder subnationalen Netzen oder mit dem Unions- und Völkerrecht zulässig. Alternativ sind auch Messungen privater Akteure, Forschungseinrichtungen und anderer Parteien, solange sie der entsprechenden Methodik entsprechen, für die Bodenüberwachung zulässig (Art. 9, Abs. 4).

Für die Durchführung der ersten Bodenmessungen gemäß Absatz 8 beginnt der Zyklus für die Erhebung der Daten gemäß Unterabsatz 1, soweit diese Daten verfügbar sind, am 16. Dezember 2024 (Art. 9, Abs. 4). Die Mitgliedsstaaten und die Kommission, sofern die Kommission Unterstützung gemäß Absatz 2 leistet, stellen sicher, dass die ersten Bodenmessungen bis zum 17. Dezember 2030 durchgeführt werden (Art. 9, Abs. 8).

Im Anhang I der Bodenrichtlinie sind die Bodendeskriptoren aufgelistet, die von der Kommission als Kriterien für einen gesunden Bodenzustand, als Indikatoren für Bodenversiegelung und für Bo-

denabtrag festgelegt sind. Die Richtlinie unterscheidet hier zwischen Bodendeskriptoren mit auf Unionsebene festgelegten Kriterien (Teil A), Bodendeskriptoren mit Kriterien auf Ebene der Mitgliedsstaaten (Teil B), Bodendeskriptoren ohne Kriterien (Teil C) und Indikatoren für die Bodenversiegelung und Bodenabtrag (Teil D). Eine Auflistung der Deskriptoren findet sich in Kapitel 2.1 dieses Gutachtens.

Anhang II der Richtline beinhaltet die Methoden, wobei Teil A der Festlegung der Probenahmestellen gewidmet ist und Teil B Spezifizierungen zur Bestimmung der Werte der Bodendeskriptoren beinhaltet.

In Bezug auf die Festlegung von Probenahmestellen (Stichprobenerhebung) für die Bewertung der Bodengesundheit formuliert die Richtlinie (Anhang II, Teil A):

- Die Stichprobenerhebung wird anhand einer umfassenden Stichprobengrundlage mit den besten verfügbaren Informationen über die Verteilung der Bodeneigenschaften konzipiert, etwa mit Informationen aus relevanten Messungen gemäß Artikel 9, Absätze 3 und 4.
- Die Stichproben werden mittels geschichteter (stratifizierter) Zufallsstichproben erhoben, die nach besten verfügbaren Informationen über die Variabilität der Bodendeskriptoren optimiert werden, und die Schichtung beruht auf den Bodeneinheiten gemäß Artikel 4 Absatz 2.
- Probenahmestellen in Zusammenhang mit Messungen gemäß Artikel 9 Absatz 4 können ganz oder teilweise im Probenahmeplan berücksichtigt werden, unabhängig von ihrer Konzeption.
- Anzahl und Lage der Probenahmestellen repräsentieren die Variabilität der gewählten Bodendeskriptoren innerhalb der Bodeneinheiten mit einer maximalen Abweichung (Variationskoeffizient) von 5 %.
- Räumliche Verteilung und Größe der Stichprobe werden per Anwendung geeigneter Verfahren (z. B. Bethel-Algorithmus,Bethel 1989), mit denen der maximal zulässige Schätzfehler berücksichtigt werden kann, festgelegt.
- Die von den Mitgliedsstaaten für jeden Überwachungszyklus konzipierte Stichprobenerhebung kann sich ändern oder unverändert bleiben.
- Gemäß Artikel 24 (Unterstützung der Kommission) Absatz 1 Buchstabe a sind zur Festlegung der Anzahl und Lage der Probenahmestellen weitere Einzelheiten vorzulegen.

Zur Bestimmung oder Schätzung der Werte der Bodendeskriptoren bzw. der Parameter, die damit in Verbindung stehen, sind in Anhang II, Teil B Referenzmethoden wie z.B. ISO-Normen aufgeführt und teilweise durch methodische Mindestkriterien ergänzt. Für den Fall, dass eine andere Methodik als die Referenzmethodik aus der Richtlinie verwendet wurde, ist gekennzeichnet, wenn für die Bestimmung des Werts eine validierte Transferfunktion erforderlich ist. Alternative Methoden sollten der Referenzmethode gleichwertig oder in der wissenschaftlichen Literatur verfügbar oder öffentlich zugänglich sein und es sollte eine entsprechende validierte Transferfunktion vorhanden sein.

1.2 Statistische Grundlagen

Unter Repräsentativität wird die Eigenschaft einer Stichprobe verstanden, die relevanten Merkmale der Grundgesamtheit so abzubilden, dass Aussagen aus der Stichprobe auf die gesamte Population verallgemeinert werden können. **Hierzu ist es zwingende Voraussetzung, dass jedes Individuum einer Population mit einer berechenbaren Wahrscheinlichkeit im Auswahlprozess, die nicht gleich Null ist, in die Stichprobe gelangen kann** (Cochran 1977; Lohr 2021)**.** Optional kann der Auswahlprozess durch Stratifizierung anhand geeigneter Daten gezielt gewichtet werden, sofern diese Daten die gesamte Population gleichermaßen beschreiben. Eine Stichprobe ist repräsentativ, wenn die Verteilung relevanter Merkmale in der Stichprobe – innerhalb akzeptabler statistischer Abweichungen (z.B. Variationskoeffizient von maximal 5 %) – der Verteilung dieser Merkmale in der Grundgesamtheit entspricht. Der Variationskoeffizient (Coefficient of Variation, CV) ist das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert. Repräsentativität ist abhängig von der Population (Grundgesamtheit) und den Zielvariablen und wird durch Zufallsauswahlverfahren den gegebenen Wahrscheinlichkeiten entsprechend ermöglicht. Eine Stratifizierung, d. h. die Einteilung der Grundgesamtheit in kleinere Untergruppen (sogenannte Schichten bzw. Strata) stellt sicher, dass jede Untergruppe angemessen vertreten ist, um die Fehler in den Ergebnissen innerhalb homogener Gruppen zu reduzieren, und um gewisse Teile der Grundgesamtheit nicht unter- bzw. überzurepräsentieren.

Kriterien für die Beurteilung der Repräsentativität eines Bodenmessnetzes können mehreren Bezugsebenen zugeordnet werden:

a) Räumliche Repräsentanz-Ebene, z. B. Bodenregion, Naturraum, Klimaraum, Nutzungsart, Landesfläche

b) Zeitliche Repräsentanz-Ebene, z. B. Messzeiträume, Messintervalle

c) Sachliche Repräsentanz-Ebene, z. B. Grundwasserverhältnisse, Humus (z. B. Moor/Mineralboden), Hauptbodenart, Bewirtschaftung (z. B. wendende/nichtwendende Bodenbearbeitung), Biotoptyp

d) Methodische Repräsentanz-Ebene, z. B. Verfahren zur Bestimmung einer Messgröße, Bezugstiefe im Boden

Angaben zu Repräsentanz-Kriterien, wie oben beispielhaft genannt, sind somit für die Beurteilung der Repräsentativität von Standorten und deren Messdaten erforderlich. In diesem Gutachten steht die räumliche Repräsentanz-Ebene im Vordergrund und die sachliche Repräsentanz wird, soweit dafür Datengrundlagen vorliegen, mitbetrachtet (Parameter für Bodendeskriptoren und Untersuchungsmethoden).

Das Netz der Probenahmestellen für die Bodenüberwachung sollte nach Möglichkeit mit statistischen Methoden anhand von Geodaten bestimmt werden und auf Bodeneinheiten beruhen. Die Dichte des Netzes sollte dabei so gewählt werden, dass die Fläche degradierter Böden im gesamten Hoheitsgebiet der Mitgliedsstaaten auf Bodeneinheitsebene mit einer Fehlermarge von höchstens 5 % geschätzt werden kann.

Folgende Anforderungen werden an die zu entwickelnde Methode gestellt:

1. Transparenz: verständliche und nachvollziehbare **statistisch korrekte** Methoden
2. Skalierbarkeit: anpassbar an andere Eingangsparameter und geografische Ausdehnung (z. B. einzelnes Bundesland)
3. Berechnung der kleinsten möglichen Stichprobengrößen und deren optimaler Verteilung auf die Schichten (Strata), so dass ein Variationskoeffizient von 5 % für mehrere Zielvariablen gleichzeitig eingehalten wird (unter Verwendung des Bethel-Algorithmus)
4. Automatische Ausgabe von Schätzfehlern (Variationskoeffizient, CV)

5. Soweit möglich Prüfung bestehender Bodenmonitoring-Standorte auf Repräsentativität und Auswahl möglichst repräsentativer Probenahmestellen innerhalb von Strata (theoretisch erreichbarer CV bei räumlich expliziter Einbindung vorhandener Probenahmestellen, unter der Voraussetzung einer gleichermaßen randomisierten Stichprobenverteilung)
6. Ausgabe von Koordinaten fehlender Probenahmestellen innerhalb von Strata
7. Identifizierung von überzähligen (für das Erreichen des Ziel-CV nicht notwendigen) bestehenden Bodenmonitoring-Standorten innerhalb von Strata

Das zu Projektbeginn zur Verfügung gestellte R-Skript des JRC von Februar 2024 lieferte nur eingeschränkt brauchbare Berechnungen der Anzahl und Lage der benötigten Probenpunkte, sodass zur Methodenentwicklung Korrekturen und Anpassungen erforderlich waren. Von den oben aufgelisteten Anforderungen konnten die Punkte 1 bis 3 bisher vollumfänglich erfüllt werden, während für die Punkte 4 bis 7 weitere Anpassungen geprüft oder aufgrund anderer fachlicher – und nicht statistischer - Kriterien entschieden werden müssen.

2 Eignung der Bodendauerbeobachtung und weiterer Messprogramme

Im Folgenden wird geprüft, inwieweit die in der EU-Bodenrichtlinie festgelegten Bodendeskriptoren in der Bodendauerbeobachtung und in weiteren Messprogrammen erfasst werden. Dies erfolgt in mehreren Schritten:

- Sichtung und systematische Dokumentation der Bodendeskriptoren
- Untersuchung und Darstellung der Abdeckung der Bodendeskriptoren durch die an BDF erhobenen Messparameter
- Prüfung alternativer Messparameter im Vergleich zu den Richtlinienvorgaben, falls notwendig
- Prüfung der möglichen Einbindung weiterer Messprogramme, z. B. aus dem UBA-Text 52/2020 „Bodendaten in Deutschland“ (Kaufmann-Boll et al. 2020), als ergänzende Datenquellen zur Optimierung der Parameterabdeckung
- Abschließende Visualisierung, in der sowohl die ursprünglichen als auch potenzielle Zusatzparameter kenntlich gemacht werden

Die Ergebnisse werden in Tabellen und Kartendarstellungen dokumentiert.

Zu den neben der Bodendauerbeobachtung betrachteten weiteren Messprogrammen gehören:

1. Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE LW)
2. Bodenzustandserhebung Wald (BZE Wald)
3. LUCAS Topsoil Survey 2018 (LUCAS Topsoil 2018)
4. LUCAS Topsoil Survey 2022 (LUCAS Topsoil 2022)
5. Intensives Forstliches Umweltmonitoring Level II (ICP Forest II)
6. Biodiversitätsexploratorien (Bio. Exp.)
7. Humusmonitoring NRW (HM NRW)
8. Umweltprobenbank (UPB)
9. Basiserhebung Bodenbiodiversität (BioDive4Soil)

2.1 Übersicht der Deskriptoren

Die Arten der Bodendegradation und sämtliche Bodendeskriptoren wurden aus dem deutschen -Richtlinientext extrahiert und in einer systematischen, filterfähigen Matrix (Excel-Datei „SML-Deskriptoren“ siehe Anhang B) zusammengetragen. Die Tabelle dokumentiert zudem, aus welchem Abschnitt des Richtlinien-Anhangs (Anhang I A–D bzw. Anhang II A / B) jeder Deskriptor stammt. Ergänzend sind hier die empfohlenen Referenzmethoden, die anzuwendenden Beurteilungskriterien (beispielsweise unverbindliche Maximal- und Minimalwerte) sowie Hinweise auf gegebenenfalls von der Überwachung auszunehmende Landflächen vermerkt.

Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die geforderten Bodendeskriptoren und -parameter systematisch zu erfassen und zu katalogisieren, um eine belastbare Basis für die anschließende Prüfung der Erfüllung dieser Anforderungen durch die bestehenden deutschen Monitoring-Netze zu schaffen. Hierzu wurden primär die Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) herangezogen; ergänzend wurden weitere Messnetze als Datenquellen berücksichtigt, um mögliche Lücken zu schließen.

Die Bodenrichtlinie unterscheidet folgende Formen der Bodendegradation:

1. Versalzung
2. Verlust an organischem Kohlenstoff
3. Unter- und Oberbodenverdichtung
4. Überschüssiger Nährstoffgehalt im Boden
5. Bodenerosion
6. Bodenkontamination
7. Verringerung der Wasserrückhaltung und Infiltration des Bodens
8. Versauerung
9. Verlust an Bodenbiodiversität
10. Bodenversiegelung und Bodenabtrag

Insgesamt sind diesen Degradationsarten 46 Deskriptoren zugeordnet: konkrete, messbare oder berechenbare Parameter mit definierter Einheit, die 20 physische, 24 chemische und 2 biologische Bodenmerkmale abbilden. Von diesen 46 Deskriptoren sind 12 als „fakultativ“ (optional) klassifiziert (Tabelle 1). Für die Übersichtlichkeit wurden die Deskriptoren in der Tabelle 1 und in der Liste der SML-Deskriptoren (Anhang B) durchnummeriert.

Zu den physikalischen Degradationsarten zählen Verdichtungen von Ober- und Unterboden, Erosions-, Abtrags- und Versiegelungsmerkmale sowie eine Abnahme der Wasserspeicher- und Infiltrationskapazität. Die chemischen Degradationsarten umfassen Versalzung, Versauerung, den Verlust organischen Kohlenstoffs, Nährstoffüberangebot und Bodenkontamination. Biologische Formen der Degradation werden unter dem Deskriptor „Verlust der Biodiversität“ zusammengefasst.

Am umfangreichsten sind die Regelungen zur Bodenkontamination, da hier eine Differenzierung zwischen verschiedenen Schadstoffen erfolgt und entsprechend viele Deskriptoren definiert sind. Zum Teil sind hier bislang nur übergeordnete Kategorien definiert. Für den Deskriptor „Gehalt an organischen Kontaminanten“ liegt bislang noch keine verbindliche Auflistung von konkreten Stoffen seitens der Kommission vor. Diese Festlegung muss bis Juni 2027 (18 Monate nach Inkrafttreten der Richtlinie) erfolgen. Ähnliches gilt für ausgewählte Pestizidwirkstoffe und deren Metaboliten sowie für weitere neu auftretende Kontaminanten. Aufgrund dessen ist eine Beurteilung der Eignung der deutschen Monitoring-Netze in Bezug auf die Bodenkontamination zum aktuellen Zeitpunkt nur eingeschränkt möglich. Im vorliegenden Gutachten wurde daher der Fokus auf gängige Kontaminanten-Gruppen wie PAK, PCB, PCCD/F und DDT gelegt, um einzuschätzen, inwieweit diese Deskriptoren durch die BDF und andere alternative Messnetze abgedeckt werden können.

Die Bodendegradationen „Bodenerosion“ sowie „Bodenversiegelung und Bodenabtrag“ werden im Weiteren nicht bewertet, da diese eine flächenbezogene Überwachung, beispielsweise auf Grundlage von Fernerkundungsdaten, statistischen Hochrechnungen und Modellierungen, erfordern. Eine solche Vorgehensweise ist nicht Gegenstand der hier betrachteten standortbezogenen Bodenmonitoring- und Erhebungsprogramme (daher in heller Schrift/ausgegraut in Tabelle 1 gekennzeichnet).

Tabelle 1: Bodendeskriptoren des europäischen Überwachungsrahmens

Art der Bodendegradation	Verpflichtende Bodendeskriptoren (Anhang I A-D)*, n = 34
Verschiedene	**[1] Bodentextur** (Ton-, Schluff- und Sandgehalt – für die Bestimmung anderer Deskriptoren und damit verbundener Wertebereiche erforderlich)
Versalzung	**[2] Elektrische Leitfähigkeit** (in Dezi-Siemens pro Meter)
Verlust an organischem Kohlenstoff	**[3] Gehalt an organischem Bodenkohlenstoff** (g pro kg) **[4] Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff** (t C pro ha)
Unterbodenverdichtung	**[5] Trockenrohdichte im Unterboden** (g pro cm^3) *[6] Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit – Ksat (cm pro Tag)* *[7] Luftkapazität (%)*
Oberbodenverdichtung	**[8] Trockenrohdichte im Oberboden (A-Horizont)** (in g pro cm^3) *[9] Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit – Ksat (cm pro Tag)* *[10] Luftkapazität (%)*
Überschüssiger Nährstoffgehalt im Boden	**[11] Extrahierbarer Phosphor** (mg pro kg) **[12] Gesamter Stickstoffgehalt im Boden** (mg pro g) **[13] Verhältnis Bodenkohlenstoff zu Stickstoff im Boden (C : N)**
Bodenerosion	**[14] Bodenerosionsrate** (t pro ha/Jahr)
Bodenkontamination	**[15-26] Gehalt an Schwermetallen im Boden**: As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn (mg pro kg) **[27] Gehalt ausgewählter organischer Kontaminanten** **[28] Konzentrationen von PFAS-21, PFAS-43 oder ausgewählten PFAS** **[29] Pestizide und ihre Metabolite** *[30] Neu auftretende Bodenkontaminanten*
Verringerung der Wasserrückhaltung und Infiltration des Bodens	**[31] Wasserrückhaltung: Wasserspeicherkapazität des Bodens** gemäß der Bodenprobe (% Wasser pro Gesamtboden (Volumen oder Masse)) **[32] Wasserinfiltration: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit** – Ksat (cm pro Tag) **[33] Wasserinfiltration: Luftkapazität** (%)
Versauerung	**[34] Bodensäure (pH-Wert)** *[35] Basensättigung ((Ca + Mg + K)/Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK))*
Verlust an Biodiversität	**[36] DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien** *[37] Metabarcoding für Archaea, Protisten und Tiere ODER* *Phospholipid-Fettsäure-Analyse (PLFA) ODER* *Größe und Vielfalt der Nematodenpopulationen ODER* *Größe und Vielfalt der Regenwurmpopulationen ODER* *Größe und Vielfalt der Springschwanzpopulationen ODER* *Größe und Vielfalt heimischer Ameisenpopulationen ODER* *biologische Qualität des Bodens auf der Grundlage von Arthropoden (QBS-ar) ODER* *Vorkommen invasiver gebietsfremder Arten und von Pflanzenschädlingen ODER* *Bodenbasalatmung*
Bodenversiegelung und Bodenabtrag	**[38] Versiegelte Böden und Gebiete, in denen Boden abgetragen wurde, insgesamt** (in km^2 und in % der Fläche des Mitgliedstaats) **[39] Bodenversiegelung und Bodenabtrag, Entsiegelung und Netto-Versiegelung** (jährlicher Durchschnitt — in km^2 und in % der Fläche des Mitgliedstaats) **[40] Siedlungsgebiet insgesamt** (in km^2 und in % der Fläche des Mitgliedstaats)

Art der Bodendegradation	Verpflichtende Bodendeskriptoren (Anhang I A-D)*, n = 34
	[41] Landnutzungsänderung in Siedlungsgebiet und von Siedlungsgebiet (jährlicher Durchschnitt — in km² und in % der Fläche des Mitgliedstaats) *[42] Bodendenaturierung (soil artificialisation)* *[43] Landschaftszerschneidung* *[44] Flächenrecyclingrate* *[45] Flächenverbrauch für gewerbliche Tätigkeiten, Logistik-Drehkreuze, erneuerbare Energien sowie Flächen wie Flughäfen, Straßen und Bergwerke* *[46] Auswirkungen von Bodenversiegelung und Bodenabtrad*

kursiv: fakultative Bodendeskriptoren, n = 12

grau: nicht Gegenstand der Bewertung in diesem Gutachten

* Die in eckigen Klammern wiedergegebenen Ziffern sind interne Identifikationsnummern der Bodendeskriptoren. Sie stehen nicht in Zusammenhang mit dem Richtlinientext.

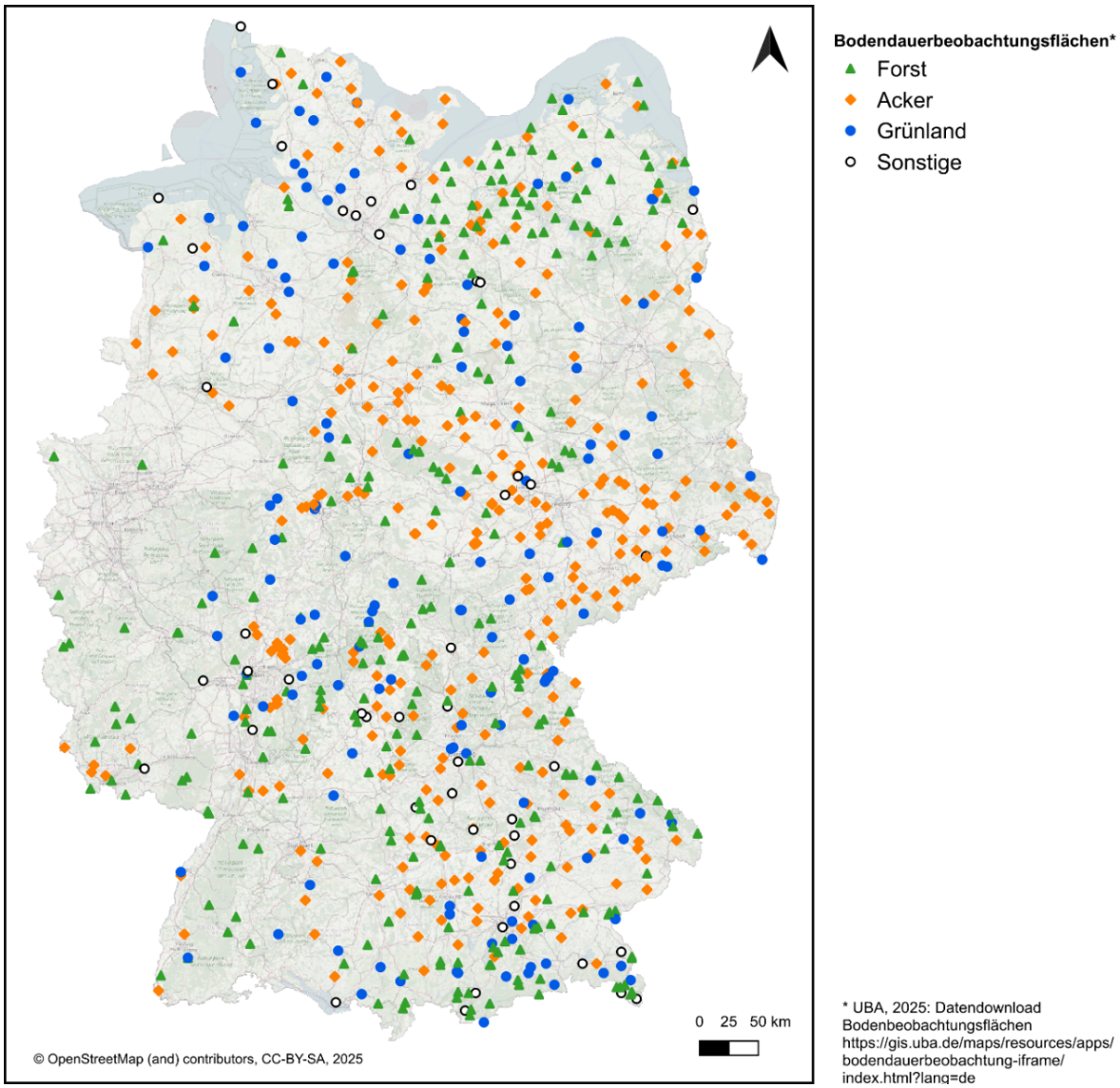
2.2 Abdeckung der Deskriptoren durch BDF und weitere Messprogramme

Nach Erstellung der in Kapitel 2.1 beschriebenen Tabelle zu den Bodendeskriptoren wurde der öffentlich verfügbare JSON-Datensatz der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) (Datenquelle siehe Anhang A), der im Rahmen der INSPIRE-Berichterstattung aufbereitet wurde, mit ebenjener Tabelle abgeglichen. Der Datensatz hat den Datenstand 2018 und beinhaltet Angaben zu den an den einzelnen Flächen erfassten Parametern. Angaben zur Messhäufigkeit sind im Datensatz nicht enthalten. Diese sind nur standortübergreifend verfügbar (vgl. Kaufmann-Boll et al. 2020). Auf über 800 Bodendauerbeobachtungsflächen (Acker, Grünland, Forst und Sondernutzungen) in allen Bundesländern, außer Berlin und Bremen, wird teilweise seit Mitte der 1980er-Jahre der Boden langfristig überwacht um den aktuellen Zustand sowie langfristige Veränderungen zu erfassen (Abbildung 1). Für die Datenerhebung sind die Länder zuständig, aber das UBA führt die Daten in einem Fachinformationssystem zusammen (Schilli et al. 2011). Seit 2001 existiert eine durch die LABO abgestimmte Handlungsanweisung zum Betrieb der Flächen (Barth et al. 2022), die eine gewisse Vereinheitlichung und Vergleichbarkeit ermöglichen soll, jedoch ist diese begrenzt aufgrund der Unverbindlichkeit bezüglich Untersuchungsmethodik, datentechnischem Austausch und Einheitlichkeit der Daten (Kaufmann-Boll et al. 2020; Schilli et al. 2011). Die Anzahl und die räumliche Verteilung der BDF variiert je nach Bundesland. Die Auswahl der Standorte erfolgte in der Regel nach Landschaftsrepräsentanz.

Die Untersuchungshäufigkeit sowie der Parameterumfang sind ebenfalls in jedem Bundesland unterschiedlich, wobei es aufgrund der methodischen Empfehlungen von Barth et al. 2022 eine Schnittmenge gibt. Nach Aussagen der Betreiberinstitutionen von 2017 variieren die Untersuchungshäufigkeit je nach Parameter zwischen einmaligen oder jährlichen Messungen, 5 – 12-jährigen Zyklen bis hin zu ereignisbedingten Messungen. Eine detaillierte Übersicht zu dieser Umfrage kann Kaufmann-Boll et al. 2020 entnommen werden.

Die Anzahl der vorliegenden Standorte variiert stark zwischen den Bundesländern. Tabelle 2 gibt einen Überblick.

Abbildung 1: Lage der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) in Deutschland



Lagekoordinaten sind verfremdet.
Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 2: Standorte der Bodendauerbeobachtungen innerhalb der Bundesländer

Bundesland	Anzahl Standorte
Baden-Württemberg	42
Bayern	277
Brandenburg	31
Hamburg	3
Hessen	64
Mecklenburg-Vorpommern	88
Niedersachsen	89
Nordrhein-Westfalen	6
Rheinland-Pfalz	16
Saarland	11
Sachsen	57
Sachsen-Anhalt	69
Schleswig-Holstein	37
Thüringen	33
Deutschland	**823**

Um zu ermitteln, inwieweit die BDF die Bodendeskriptoren des SML abdecken, wurden rund 220 Messparameter (Stand 2018) den 46 Deskriptoren für Versalzung, Verlust an organischem Kohlenstoff, Unter- und Oberbodenverdichtung, überschüssiger Nährstoffgehalt im Boden, Bodenkontamination, Verringerung der Wasserrückhaltung und Infiltration des Bodens, Versauerung und Verlust an Bodenbiodiversität zugeordnet. Circa ein Drittel der Parameter ließ sich keinem Deskriptor aus der Richtlinie zuordnen (dazu gehören bodenphysikalische und hydrologische Parameter, verschiedene bodenchemische Parameter wie radioaktive Isotope, Metalle, Schwefel oder Humusgehalt und bodenbiologische Parameter wie Bodenenzyme oder mikrobielle Biomasse). Diese können entweder als Alternativparameter gelten oder als nicht relevant für das SML eingestuft werden.

Für Hamburg liegen zwar die Stammdaten vor, jedoch sind keine Angaben zum Parameterumfang in dem Datensatz aus der Web-Applikation der BDF hinterlegt, sodass Parameterinformationen für diese BDF in diesem Gutachten nicht berücksichtigt werden können.

Angesichts der Empfehlung der LABO-Handlungsanweisung (Barth et al. 2022), horizontbezogene Bodenproben zu entnehmen, und angesichts des übergeordneten Ziels der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), das gesamte Bodenprofil zu erfassen, wird davon ausgegangen, dass Messdaten sowohl für den Ober- als auch für den Unterboden vorliegen.

Die Kapitel 2.2.1 bis 2.2.3 beschreiben die Abdeckung der SML-Deskriptoren mit Stand 2018 für die physikalischen, chemischen und biologischen Bodendeskriptoren.

2.2.1 Physikalische Deskriptoren

Jedem bodenphysikalischen Deskriptor lässt sich ein entsprechender Parameter aus dem BDF-Datensatz zuordnen; einzelne Größen, beispielsweise der kf-Wert und die Luftkapazität, sind für mehrere Arten der Bodendegradation relevant (Tabelle 3). Jeder dieser Parameter wird in mindestens acht Bundesländern erhoben; überwiegend erfolgt die Datenerfassung in zehn und vereinzelt sogar in elf bzw. zwölf Ländern. Die bundesweite Abdeckung der physikalischen Deskriptoren ist damit als relativ flächendeckend und homogen einzustufen, wenn die 13 Flächenländer ohne Bremen, Berlin und Hamburg betrachtet werden.

Tabelle 3: Erfassung bodenphysikalischer Deskriptoren auf BDF

Boden-degradation	**Bodendeskriptoren** ***(kursiv: fakultativ)***	**Parameter in JSON BDF Datensatz**	**Anzahl BDF-Standorte (823)**	**Anzahl Bundesländer (16)**
Verschiedene	Bodentextur (Korngrößenverteilung)	Korngrößenanteile S, U, T	643	**12**
Unterboden-verdichtung	Trockenrohdichte im Unterboden (g pro cm^3)	Trockenrohdichte	575	**11**
	*gesättigte hydraulische Leitfähigkeit – Ksat (cm pro Tag)**	kf-Wert	156	**8**
	*Luftkapazität (%)**	LK (pF 1,8)	410	**10**
Oberboden-verdichtung	Trockenrohdichte im Oberboden (in g cm^{-3})	Trockenrohdichte	575	**11**
	*gesättigte hydraulische Leitfähigkeit – Ksat (cm pro Tag)**	kf-Wert	156	**8**
	*Luftkapazität (%)**	LK (pF 1,8)	410	**10**
Verringerung der Wasserrückhaltung und Infiltration des Bodens	Wasserrückhaltung: Wasserspeicherkapazität (% Wasser pro Gesamtboden (Volumen oder Masse))*	nFK (pF 1,8–4,2), Totwasseranteil (pF 4.2), Wassergehalt (pF 1.5–pF 4.2)	298	**9**
	Wasserinfiltration: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit – Ksat (cm pro Tag)*	kf-Wert	156	**8**
	Wasserinfiltration: Luftkapazität (%)*	LK (pF 1,8)	410	**10**

* Der Deskriptor lässt sich aus Bodenkenngrößen abschätzen.

Der Deskriptor **Bodentextur** wird in zwölf Bundesländern durch die Erfassung der Kornfraktionen Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) an mehr als 600 BDF abgedeckt[1], wobei die Texturerfassung in NRW mit fünf BDF und in RP mit einer BDF gering ist (Abbildung 2). Die für BDF empfohlene Methodik entspricht der Referenzmethode der Richtlinie (DIN ISO 11277). Für SL wird keine Erfassung der Korngrößenverteilungen angegeben. Als Alternativparameter kann die mittels Fingerprobe ermit-

[1] In BW und an einzelnen Standorten in ST liegt für die Erfassung der Sand-Fraktion S kein Wert vor. Daher werden dort die Messstellen, an denen die Fraktionen ffS, fS, mS und gS bestimmt wurden, zusammenfassend herangezogen. Gleiches gilt für die Schluff-Fraktion U.

telte Bodenart genannt werden. Diese ist jedoch weniger genau und damit nur eingeschränkt geeignet.

Gemäß der Richtlinie ist die Überwachung der **Unter- und Oberbodenverdichtung** primär über den Parameter Trockenrohdichte vorgesehen, der an ungestörten Proben zu ermitteln ist. Dieser Parameter wird in elf Bundesländern an 575 Beprobungsstellen erfasst (Abbildung 2). Die für BDF empfohlene Methodik entspricht der Referenzmethode der Richtlinie (DIN ISO 11272). Der Parameter fehlt in BB und SL. Unter Berücksichtigung der Befunde von Barth et al. 2022 und Kaufmann-Boll et al. 2020, wonach die Dichteparameter auf BDF in der Regel einmalig erfasst wird, erweisen sich die BDF bei Beibehaltung dieser Strategie als ungeeignet zur Beobachtung kontinuierlicher Verdichtungsprozesse anhand der Trockenrohdichte, des kf-Werts oder der Luftkapazität. Als Alternativparameter können die im Feld angesprochene Lagerungsdichte bzw. Packungsdichte (nicht umrechenbar in die Trockenrohdichte), der Eindringwiderstand mittels Penetrometermessung (stark bodenfeuchteabhängig, schlecht reproduzierbar) und Bodenstrukturen nach Messung mit geophysikalischen Methoden, z. B. Bodenradar, (aufwendig, komplex) genannt werden. Diese erscheinen aufgrund ihrer vorangehend beschriebenen Eigenschaften jedoch wenig geeignet.

Zur Erfassung einer abnehmenden **Bodenwasserrückhaltung und -infiltration** werden die Bodendeskriptoren Wasserspeicherkapazität sowie Wasserinfiltration (Luftkapazität und Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) herangezogen. Die Messung der Wasserspeicherkapazität und der Luftkapazität wird auf BDF nach ISO 11274 an ungestörten Proben über die Wassergehalte bei definiertem Matrixdruck empfohlen, was der Referenzmethode der Richtlinie entspricht. Feldkapazität und Luftkapazität lassen sich alternativ nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA 6) aus Bodenart, Trockenrohdichte und Humusgehaltsstufe abschätzen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist gemäß ISO 17313 unter Verwendung eines Permeameters mit flexibler Wand an ungestörten Proben zu quantifizieren. Für BDF wird DIN 19683-9: 2012-07 zur Anwendung empfohlen (Messung von Durchfluss und Gradient an wassergesättigten Bodenproben i. d. R. an Stechzylinderproben mit geringem Grobbodenanteil mittels Permeameter). Der kf-Wert lässt sich auch nach KA 6 aus Bodenart, Trockenrohdichte, Packungsdichte bzw. Lagerungsdichte abschätzen. Messparameter für alle drei Bodendeskriptoren liegen an BDF vor. Der Wassergehalt und der kf-Wert liegen hingegen nur in neun (Wassergehalt) bzw. acht (kf-Wert) Bundesländern und die Luftkapazität (LK) in zehn Bundesländern vor. In SH und ST könnten statt des Wassergehalts die pedohydrologischen Parameter kf-Wert und LK herangezogen werden.

Auch wenn viele der in der Richtlinie geforderten physikalischen Deskriptoren auf den BDF erfasst werden, existieren nennenswerte Lücken, die durch indirekte Herleitungen oder weitere Monitoring- und Ergebungsprogramme gedeckt werden könnten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Erfassung bodenphysikalischer Deskriptoren in weiteren Messprogrammen

Bodendegradation	Deskriptor/ Parameter (Anzahl Standorte)	BZE LW	BZE Wald	LUCAS Topsoil 2018	LUCAS Topsoil 2022	ICP Forests II	Bio. Ex.	HM NRW	UPB	BioDive 4Soil
		(3.104)	(ca. 1.800)	(774)	(1.290)	(68)	(300)	(200)	(9)	(252)
Verschiedene	Korngrößen	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ober- und Unterboden-verdichtung	Trockenrohdichte	X	X	X	X	X	X	X	N/A	X
	Ksat/Kf-Wert*	N/A								
	LK*	N/A								
Verringerung der Wasserrückhaltung/Infiltration	Wassergehalte (pF)	N/A								
	Ksat*	N/A								
	LK*	N/A								

* Der Deskriptor lässt sich mittels Pedotransferfunktionen aus Bodenkenngrößen abschätzen.
N/A (not available): Aus der Literatur geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

Datenlücken bei der Korngrößenverteilung in NRW, RP und SL könnten durch Daten der BZE Landwirtschaft und BZE Wald gefüllt werden. In NRW könnte das Humusmonitoring-Programm zur Ergänzung herangezogen werden.

Datenlücken bei der verpflichtend zu beobachtenden Trockenrohdichte in Ober- und Unterboden im BDF-Datensatz ließen sich durch die BZE Wald (BB und RP), BZE LW (RP), LUCAS Topsoil (BB, RP) und in BB eventuell auch durch die Erhebungen aus den Biodiversitätsexploratorien füllen. Für die einzelnen Programme kann hier jedoch nicht belegt werden, inwieweit die Parameter in Unter- und Oberböden erhoben werden.

Bei den fakultativ zu messenden hydraulisch relevanten Parametern ksat (auch kf; gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) und Luftkapazität wäre es möglich, die fehlenden Daten aus BB, BW, NRW, NI, RP und SL über Bodenkennwerte abzuschätzen. In der Richtlinie wird auf die Möglichkeit der Herleitung durch die Anwendung von Pedotransferfunktionen mit Eingangsvariablen wie Korngrößenverteilung, Trockenrohdichte und Gehalt an organischem Bodenkohlenstoff, hingewiesen.

Ähnliches gilt für die Wasserspeicherkapazität des Bodens, für die der Abgleich mit den an BDF gemessenen Parametern Datenlücken für BB, BW, SL, ST und SH ergibt. Auch hier wäre das Heranziehen von Pedotransferfunktionen mithilfe von Bodenkennwerten geeignet.

2.2.2 Chemische Deskriptoren

Von insgesamt 220 im BDF-Datensatz erfassten Parametern entfallen rund 50 % auf bodenchemische Messgrößen. Damit bilden sie nicht nur die zahlenmäßig größte Kategorie, sondern auch die mit der feinsten Differenzierung. Aus diesem Grund erfolgt im folgenden Abschnitt eine Unterteilung in anorganische und organische Deskriptoren.

2.2.2.1 Versalzung, organischer Kohlenstoff, Nährstoffe, Schwermetalle und Versauerung

Jedem anorganischen Parameter der Richtline lässt sich ein entsprechender Parameter aus dem BDF-Datensatz zuordnen (Tabelle 5). Jeder der Parameter wird mindestens in zwei, meist in sechs oder mehr Bundesländern erhoben; nur der Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff ist nicht direkt als Parameter im BDF-Datensatz angegeben (ist jedoch aus anderen Größen ableitbar, s.u.). Die Auswahl anderer, neu auftretender Bodenkontaminanten ist nicht prüfbar. In allen Flächenländern werden der pH-Wert, die Gehalte an organischem Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sowie Gehalte von Cadmium, Chrom gesamt, Kupfer, Blei, Nickel und Zink an BDF gemessen, Arsen und Quecksilber in allen Flächenländern mit Ausnahme von MV.

Tabelle 5: Erfassung bodenchemischer Deskriptoren auf BDF

Bodendegradation	**Bodendeskriptoren** ***(kursiv = fakultativ)***	**Parameter in JSON BDF Datensatz**	**Anzahl BDF Standorte (823)**	**Anzahl Bundesländer (16)**
Versalzung	Elektrische Leitfähigkeit im Boden (Dezi-Siemens pro Meter)	Leitfähigkeit (EC)	43	**2**
Verlust an organischem Kohlenstoff	Gehalt an organischem Bodenkohlenstoff (g pro kg)	Corg (TOC)	662	**13**
	Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff (t C/ha)	N/A	N/A	**0**
Überschüssiger Nährstoffgehalt im Boden	Extrahierbarer Phosphor im Boden (mg/kg)	P	563	**12**
	Gesamter Stickstoffgehalt im Boden (mg/g)	N gesamt	684	**13**
	Verhältnis Bodenkohlenstoff zu Stickstoff im Boden	C_N	137	**6**
Bodenkontamination	Gehalt an Schwermetallen im Boden (mg/kg)	As	520	**12**
		Sb	338	**6**
		Cd	602	**13**
		Co	286	**9**
		Cr gesamt	625	**13**
		Cu	623	**13**
		Hg	522	**12**
		Pb	625	**13**
		Ni	625	**13**
		Tl	199	**6**
		V	211	**6**
		Zn	626	**13**
	Auswahl anderer neu auftretender Bodenkontaminanten	nicht prüfbar	-	**-**

Bodendegradation	Bodendeskriptoren *(kursiv = fakultativ)*	Parameter in JSON BDF Datensatz	Anzahl BDF Standorte (823)	Anzahl Bundesländer (16)
Versauerung	Bodensäure (pH-Wert)	pH-Wert	651	**13**
	Basensättigung (d. h. (Ca + Mg + K)/effektive Kationenaustauschkapazität)	KAKpot V-Wert	67	**3**
		KAKeff S-Wert	74	**3**

N/A (not available): Aus dem öffentlich verfügbaren JSON-Datensatz der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

Die **elektrische Leitfähigkeit**, als Deskriptor für Bodenversalzung, ist an 5 % der BDF als Messparameter angegeben; diese liegen in MV und BB (Abbildung 2). Die für BDF empfohlene Methodik entspricht der Referenzmethode der Richtlinie (DIN ISO 11265). Der Richtlinie kann entnommen werden, dass auf eine Messung der elektrischen Leitfähigkeit in Gebieten, die nicht von (unnatürlicher) Versalzung bedroht sind, verzichtet werden kann. Wenn für bestimmte Gebiete dieser Wert nicht berichtet wird, muss dies allerdings gemäß Artikel 24, Abschnitt 1d begründet werden bzw. Einzelheiten zur Methode für die Bewertung der Gebiete sollen vorgelegt werden (Europäische Kommission 2025). Weitere Messnetze, die diesen Parameter bundesweit messen, sind die BZE LW und das LUCAS Soil-Programm und könnten die Lücken schließen, falls dieser Deskriptor für mehr als MV und BB berichtet werden muss.

Gemäß der Richtlinie ist der **Verlust an organischem Kohlenstoff** im Boden durch die Messung des Gehalts an organischem Kohlenstoff und des Vorrats an organischem Bodenkohlenstoff zu überwachen. Ersterer wird als Corg (TOC) erfasst und zählt zu den geografisch auf BDF am weitesten verbreiteten Messgrößen (Abbildung 2). Die Bestimmung auf BDF wird nach DIN EN 15936 empfohlen, während die Richtlinie die zurückgezogene und bisher noch nicht überarbeitete ISO 10694 als Referenzmethode angibt. In RP und NRW ist die Zahl der BDF mit Corg-Messungen mit Blick auf die jeweilige Landesfläche gering (NRW betreibt neben den BDF ein Humusmonitoring). Corg wird in allen anderen Messnetzen, die in diesem Gutachten betrachtet wurden, ebenfalls gemessen (Tab. 6). Unter die Bodendegradation „Verlust an organischem Kohlenstoff" fällt auch der fakultative Deskriptor Vorrat an organischem Kohlenstoff. Dieser Parameter findet sich so spezifisch nicht in den BDF-Daten wieder, lässt sich aber anhand von Bodeneigenschaften berechnen, die wiederum als Messparameter in der Regel vorhanden sind (Trockenrohdichte, TOC, Grobbodenanteil).

Die **Bodennährstoffgehalte** im Boden werden an BDF umfassend erhoben. Auf welche Methode sich die an BDF gemessenen P-Gehalte beziehen, geht aus dem verwendeten Datensatz nicht hervor; Referenzmethode der Richtlinie ist die ISO 11263. Für BDF wird zur Bestimmung des Gesamt-Stickstoffgehalts die DIN EN 16168 empfohlen; die Richtlinie verweist auf ISO 11261und ISO 13878 als Referenzmethoden. Die Parameter Gesamtstickstoff- und Phosphorgehalt werden an mehr als der Hälfte der BDF-Standorte gemessen; Datenlücken bestehen hier in MV, RP, ST und SL. Gesamt-Stickstoff zählt zu den meisterfassten Parametern und wird, mit Ausnahme der UPB, auch in allen anderen betrachteten Messnetzen erhoben (Tab. 6). Phosphor wird ebenfalls in der BZE Wald sowie im ICP Forest II erfasst und auch in der BioDive4Soil-Basiserhebung berücksichtigt.

Demgegenüber wird das **C/N-Verhältnis** nur in sechs Bundesländern als Parameter angegeben und im Süden von DE vollständig. Explizit ausgewiesen wird es darüber hinaus nur im Humusmonitoring NRW. Das C/N Verhältnis lässt sich jedoch bei Vorliegen der erforderlichen Eingangsgrößen berechnen und sollte daher überall dort, wo C und N erfasst werden, ableitbar sein.

Für potenzielle **Schwermetallbelastungen** benennt die Richtlinie zwölf Deskriptoren (Tabelle 5). Diese Kategorie weist mit durchschnittlich rund 60 % der BDF, für die entsprechende Parameter angegeben werden, eine insgesamt recht hohe räumliche Abdeckung auf. Cadmium, Chrom gesamt, Kupfer, Quecksilber, Blei, Nickel und Zink werden an etwa ¾ der BDF erfasst. Im verwendeten BDF-Datensatz ist nicht angegeben, auf welche Fraktion sich die Messungen beziehen. Barth et al. (2022) empfehlen königswasserlösliche Gehalte nach DIN EN 16174 als obligatorische Messparameter (Referenzmethode der Richtlinie: ISO 54321: Königswasser) und NH_4NO_3-extrahierbare Schwermetalle und As nach DIN ISO 19730:2009-07 als ergänzende Messparameter (Referenzmethode der Richtlinie: bioverfügbare Anteile von Kontaminanten, etwa ISO 17586 unter Verwendung von verdünnter Salpetersäure). Antimon wird derzeit leidglich in vier südlichen Bundesländern bestimmt. Thallium und Vanadium werden ebenfalls überwiegend auf BDF in Süddeutschland erhoben, Vanadium zudem in MV und BB. In den jüngsten LUCAS Soil-Kampagnen wurden bundesweit nahezu alle geforderten Schwermetalle erfasst mit Ausnahme von Quecksilber und Thallium. Auch in weiteren Erhebungs- und Monitoring-Programmen (BZE Wald, ICP Forests Level II, Humusmonitoring NRW, UPB) werden die meisten geforderten Schwermetalle gemessen. Im Rahmen der BioDive4Soil-Basiserhebungen werden Schwermetalle als Begleitparameter zu den Biodiversitätsparametern ebenfalls berücksichtigt.

Als Deskriptor für **Versauerung** dient primär die Bodensäure, wiedergegeben durch den pH-Wert. Fakultativ können die Basensättigung (Ca + Mg + K) oder die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) herangezogen werden. Der pH-Wert wird an nahezu 80 % der BDF bestimmt (aktuell empfohlen nach DIN EN 15933 in $CaCl_2$, bisher nach DIN ISO 10390 $H_2O/CaCl_2$). Referenzmethode der Richtlinie ist die ISO 10390. Basensättigung und KAK_{eff} sind nur punktuell als Messparameter auf BDF angegeben (empfohlene Methode auf BDF/obligatorischer Parameter: HFA A3.2.1.6 / 3.2.1.9 mit $MgCl_2$; Referenzmethode der Richtlinie: ISO 11260 mit $BaCl_2$). Auch wenn der pH-Wert an BDF sehr flächenhaft erfasst wird, besteht Ergänzungsbedarf in den Bundesländern SL, SN, ST und RP. Da der pH-Wert auch in allen anderen betrachteten Messnetzen erhoben wird (Tabelle 6), kann durch die Hinzunahme dieser Standorte eine noch bessere Flächenabdeckung erreicht werden. Um die fakultativen Deskriptoren ergänzend hinzuzuziehen, können die Daten der ICP Forest Level II, der Biodiversitätsexploratorien und des Humusmonitoring NRW punktuell Lücken schließen. Das LUCAS Soil Monitoring kann flächendeckende Daten zur KAK liefern.

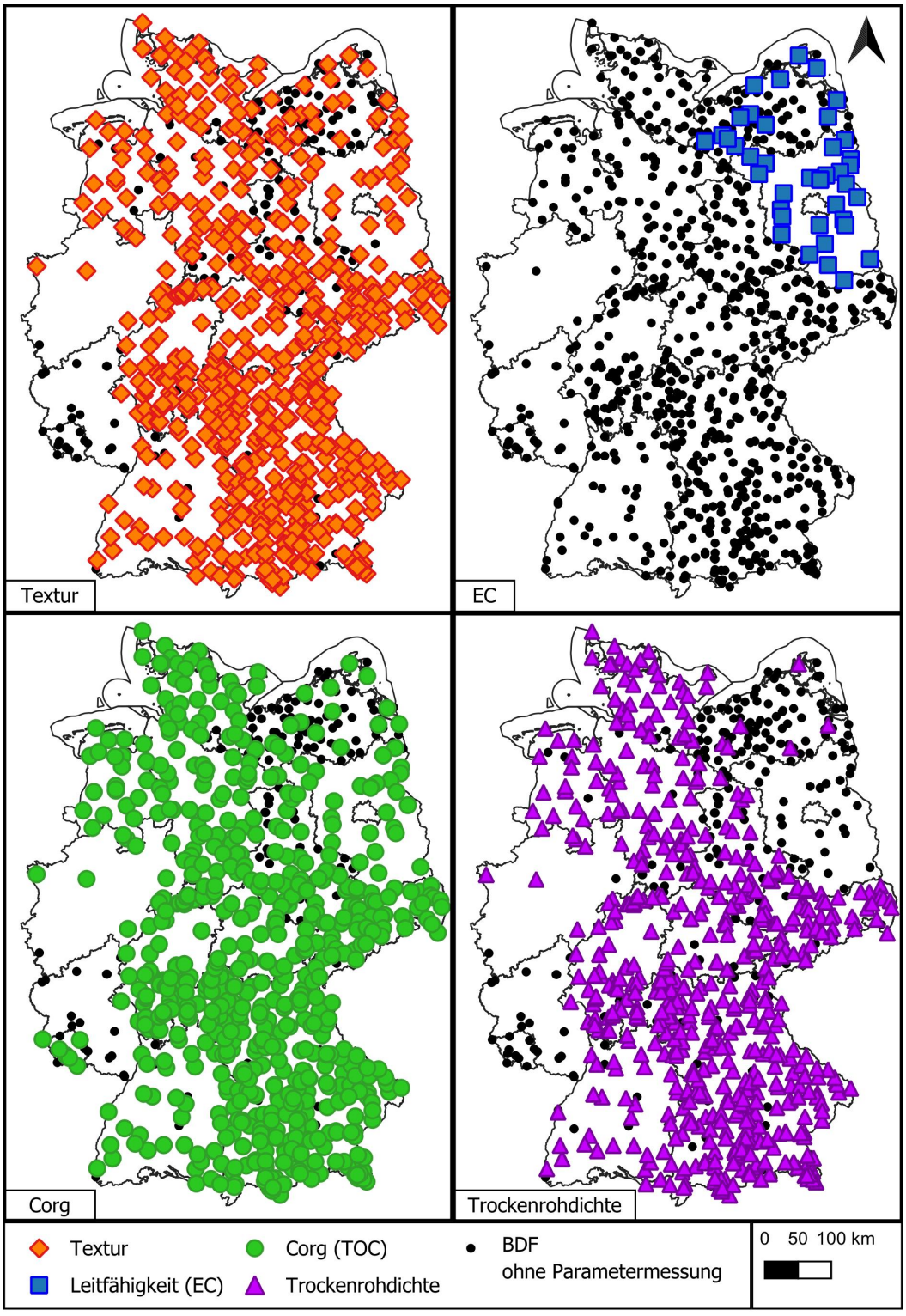
Tabelle 6: Erfassung bodenchemischer Deskriptoren in weiteren Messprogrammen

Boden-degradation	Deskriptor/ Parameter	BZE LW	BZE Wald	LUCAS Topsoil 2018	LUCAS Topsoil 2022	ICP Forests II	Bio. Ex.	HM NRW	UPB	BioDive4Soil
	(Anzahl Standorte)	**(3.104)**	**(ca. 1.800)**	**(774)**	**(1.290)**	**(68)**	**(300)**	**(200)**	**(9)**	**(252)**
Versalzung	EC	X	N/A*	X	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Verlust an org. C	TOC	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Vorrat an org. C	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Überschüssiger Nährstoffgehalt	P	N/A	X	X	X	X	N/A	N/A	N/A	X
	N gesamt	X	X	X	X	X	X	X	N/A	X
	C/N	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	N/A	N/A
Bodenkontamination	Schwermetalle	N/A	X	X	X	X	N/A	X	X	X
	Org. Kont.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X
	PFAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X
	Pestizide	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X
Versauerung	pH-Wert	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	KAK, Basensättigung	N/A	X	X	X	X	X	X	N/A	N/A

N/A (not available): Aus der Literatur geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, wird die Auswahl neu auftretender Bodenkontaminanten erst in Zukunft definiert und kann daher hier nicht geprüft werden. Hierzu können auch anorganische Parameter gehören, die ggf. zukünftig relevant werden.

Abbildung 2: Auf BDF erfasste Parameter für Textur, Versalzung, Bodenkohlenstoff und Dichte



* UBA, 2025: Datendownload Bodenbeobachtungsflächen https://gis.uba.de/maps/resources/apps/bodendauerbeobachtung-iframe/index.html?lang=de

© OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA, 2025

Quelle: eigene Darstellung

2.2.2.2 Organische Kontaminanten, PFAS und Pestizide

Bei den organischen Bodenkontaminanten besteht noch Regelungsbedarf bezüglich der geforderten, zu messenden Deskriptoren. Während die Einzelstoffe der Stoffgruppen PFAS-21 und PFAS-43 definiert sind, fehlt für die folgenden Stoffgruppen eine Definition der spezifischen Kontaminanten:

- Auswahl an organischen Kontaminanten, die von den Mitgliedsstaaten unter Berücksichtigung im Unionsrecht bestehender Konzentrationsgrenzwerte festgelegt wird, z. B. für Wasserqualität und Luftemissionen
- von den Mitgliedsstaaten ausgewählte PFAS
- Pestizide und ihre Metaboliten
- neu auftretende Bodenkontaminanten

Die in der Tabelle 7 zugeordneten Parameter polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB) und chlorierte Dibenzo-p-dioxine/furane (PCDD/F) wurden in Orientierung an die in der BBodSchV und der Methodensammlung Feststoffuntersuchung (FBU & LAGA 2023) als voraussichtlich für die Gruppe der organischen Kontaminanten relevante Parameter identifiziert. Sie sind als vorläufige Auswahl zu betrachten. Insgesamt lassen sich etwa 100 Parameter aus dem verwendeten BDF-Datensatz den Deskriptoren der organischen Bodenkontaminanten zuordnen.

Tabelle 7: Erfassung organischer Kontaminanten, PFAS und Pestizide auf BDF

Boden-degradation	**Bodendeskriptoren *(kursiv = fakultativ)***	**Parame-tergruppe**	**Passende Parameter in JSON BDF Daten-satz**	**Anzahl BDF Standorte (823)**	**Anzahl Bun-desländer (16)**
Boden-kontamination	Auswahl an organi-schen Kontaminan-ten	PAK	Benzo[a]pyren*	446	**11**
		PCB	PCB-101**	275	**9**
		PCDD/F	PCDD/F	86	**4**
	Konzentrationen von PFAS	PFAS	N/A	N/A	**0**
	Pestizide und ihre Metaboliten	OCP	b-HCH	308	**9**
			p,p-DDT	358	**10**
	neu auftretende Bodenkontaminan-ten	*nicht defi-niert*	*nicht prüfbar*	-	-

N/A (not available): Aus dem öffentlich verfügbaren JSON-Datensatz der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

* Für die Parametergruppe PAK –für den Summenparameter PAK16 – sind in der Tabelle exemplarisch jene BDF-Standorte aufgeführt, an denen Benzo[a]pyren bestimmt wurde. Weitere PAK-Verbindungen werden ebenfalls an BDF-Standorten gemessen, jedoch nicht in vergleichbarer Häufigkeit.

** Für die Stoffgruppe PCB wird PCB-101 exemplarisch herangezogen, um einen groben Überblick über die Messdichte an BDF-Standorten zu geben. In leicht abweichender Häufigkeit werden an BDF auch PCB28, 52, 101, 138, 153 und 180, seltener auch 118 als Parameter angegeben.

Die Parametergruppe der **PAK** wird an etwa der Hälfte der BDF gemessen. Sinnvoll wäre die Überwachung der nach der Liste der Environmental Protection Agency (EPA) und der BBodSchV 16 ausgewählten PAKs (Acenaphthen, Acenaphthylen, Anthracen, Benzo[a]anthracen, Benzo[a]pyren, Benzo[b]fluoranthen, Benzo[g,h,i]perylen, Benzo[k]fluoranthen, Chrysen, Dibenzo[a,h]anthracen, Fluoranthen, Fluoren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Naphthalin, Phenanthren und Pyren). PAK 16 (EPA) sind als obligatorischer Messparameter an BDF empfohlen (DIN ISO 13 877) und werden in mindestens sieben und maximal elf Bundesländern als Messparameter angegeben. In BW, RP, NRW, MV und SN sind auf den BDF PAK nicht als Messparameter angegeben (Abbildung 3). Die anderen Messnetze können diese Lücken nur bedingt füllen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Erfassung organischer Kontaminanten, PFAS und Pestizide in weiteren Messprogrammen

		Weitere Messprogramme								
Bodendegradation	**Deskriptor/ Parameter (Anzahl Standorte)**	**BZE LW (3.104)**	**BZE Wald (ca. 1.800)**	**LUCAS Topsoil 2018 (774)**	**LUCAS Topsoil 2022 (1.290)**	**ICP Forests II (68)**	**Bio.-Ex. (300)**	**HM NRW (200)**	**UPB (9)**	**BioDive4Soil (252)**
Bodenkontamination	Org. Kont.	N/A							X	X
	PFAS	N/A							X	X
	Pestizide	N/A							X	X

N/A (not available): Aus der Literatur geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

Für die Stoffgruppe der **PCB** wird die Summe aus PCB_6 und PCB-118, die in der BBodSchV geregelt ist, betrachtet. PCB_6 (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) wird als obligatorischer Messparameter an BDF empfohlen (Methode: VDLUFA 2017 Methodenbuch VII). Ergänzend werden dl-PCB empfohlen (Methode: VDLUFA Methodenbuch VII, DIN 38 414-24). PCB werden in maximal sieben Bundesländern als Messparameter auf BDF angegeben. Datenlücken bestehen in SH, MV, SN, BW, RP und NRW (Abbildung 3). Das einzige der weiteren hier betrachteten Messprogramme, das PCB erfasst, ist die Umweltprobenbank mit Standorten in BY, SL, RP, NI, ST, SN und SH.

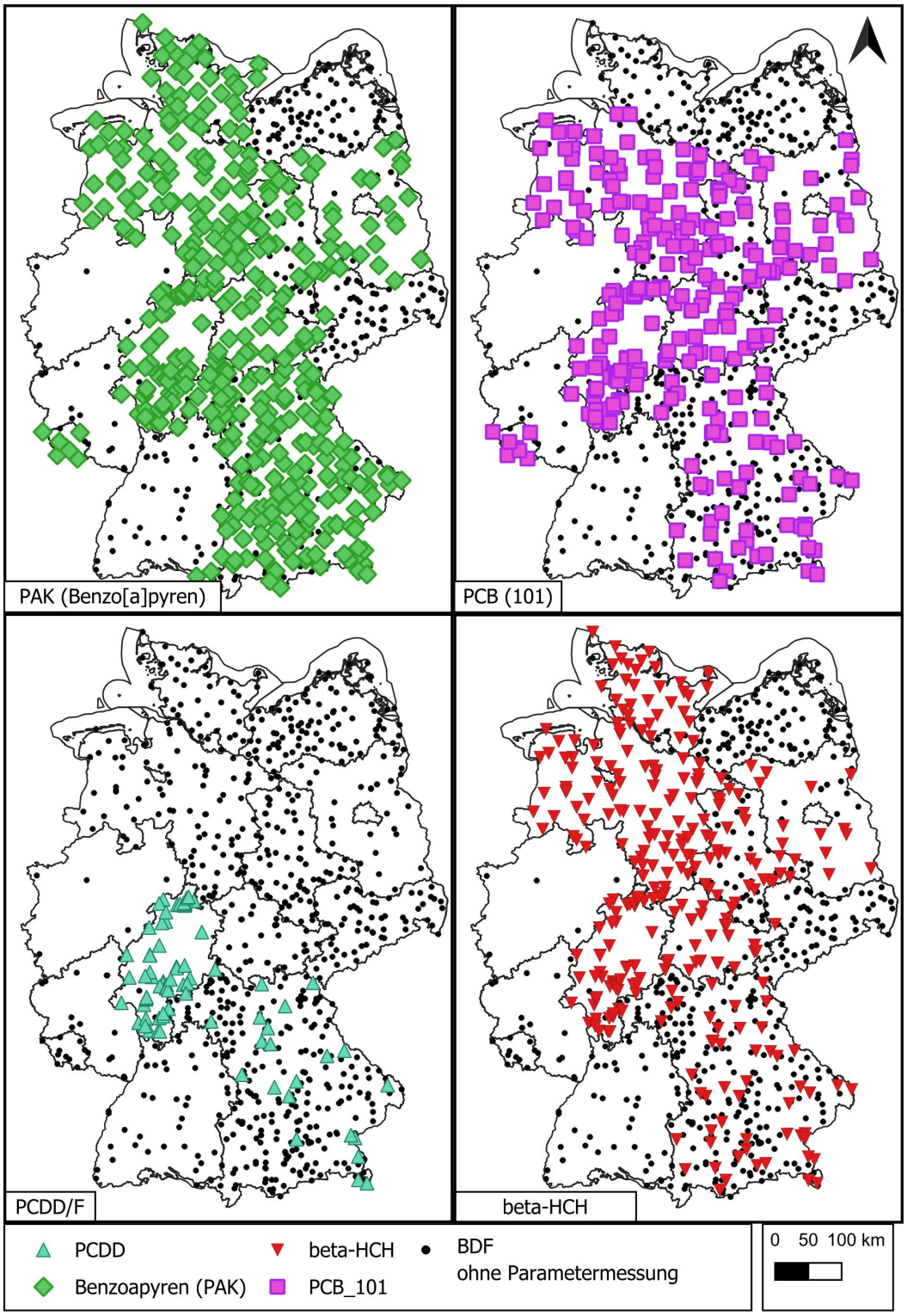
Die **PCDD/F** werden als ergänzende Messparameter auf BDF empfohlen (Methoden: AbfKlärV Anhang 1, Abschnitt 1.3.3.2, VDLUFA Methodenbuch VII, DIN 38 414-24). Im verwendeten BDF-Datensatz werden sie selten als Messparameter angegeben, nur in HE und BY sowie an einzelnen Standorten in NRW und RP (Abbildung 3). Die weiteren betrachteten Messnetze erfassen diese Stoffgruppe nicht.

Weitere Deskriptoren im Bereich der organischen Kontaminanten behandeln die polyfluorierten Alkylverbindungen (**PFAS**). Die Richtlinie gibt hierfür zwei Summenparameter PFAS-21 und PFAS-43 an, nennt aber keine Referenzmethoden. PFAS werden als ergänzende Messparameter auf BDF empfohlen (Methoden: Feststoff: DIN 38 414 14, Eluat: DIN 38 407-42). Im betrachteten BDF-Datensatz werden keine Messungen von PFAS angegeben. Die Umweltprobenbank erfasst Stoffe dieser Gruppe, ebenso die BioDive4Soil-Basiserhebung.

Für den Deskriptor **Pestizide und ihre Metaboliten** ist – ebenso wie für PFAS – von den Mitgliedsstaaten eine Liste von Kontaminanten gemäß Anhang I Teil C, die das höchste Risiko für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellen, zu erstellen. Auf BDF werden Chlorpestizide (HCB, α-, β-, γ-, δ HCH, op-, pp-DDD, op-, pp-DDT, op-, pp-DDE; sowie: Aldrin, Dieldrin, α-, β Endosulfan, Endrin, Heptachlor, Heptachlorepoxid, Hexachlorbenzo) als obligatorische Messparameter empfohlen (Methode: VDLUFA 2017: Methodenbuch VII). Etwa 40 Parameter im BDF-Datensatz fallen in diese Kate-

gorie. Für dieses Gutachten werden exemplarisch Dichlordi-phenyltrichlorethan (DDT) und Hexachlorcyclohexan (HCH) betrachtet. Diese werden in neun bzw. zehn Bundesländern und insgesamt an etwa 40 % der BDF erfasst (Abbildung 3).

Abbildung 3: Auf BDF erfasste Parameter für organische Kontaminanten



* UBA, 2025: Datendownload Bodenbeobachtungsflächen https://gis.uba.de/maps/resources/apps/bodendauerbeobachtung-iframe/index.html?lang=de

Quelle: eigene Darstellung

2.2.3 Biologische Deskriptoren

Der Verlust der Biodiversität ist gemäß Richtlinie durch den Deskriptor **DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien** zu erfassen. Die Mitgliedsstaaten können auch mindestens einen **fakultativen Bodendeskriptor** für die biologische Vielfalt wie jene in Tabelle 9 auswählen; dazu gehören Metabarcoding für Archaea, Protisten und Tiere, Phospholipid-Fettsäure-Analyse, Größe und Vielfalt der Populationen verschiedener Tiergruppen und auch die Bodenbasalatmung. Referenzmethoden sind nicht angegeben. Als Mindestkriterium gilt die Anwendung europäischer oder internationaler Normen, sofern verfügbar. Ist keine derartige Norm verfügbar, muss die gewählte Methode entweder in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben oder öffentlich zugänglich sein.

Tabelle 9: Erfassung bodenbiologischer Deskriptoren auf BDF nach JSON-Datensatz 2018

Boden-degradation	Bodendeskriptoren *(kursiv: fakultativ)*	Passende Parameter in JSON BDF Datensatz	Anzahl BDF Standorte (823)	Anzahl Bundesländer (16)
Verlust an Bodenbiodiversität	DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien	N/A	0	**0**
	Metabarcoding für Archaea, Protisten und Tiere	N/A	0	**0**
	Phospholipid-Fettsäure-Analyse (PLFA)	N/A	0	**0**
	Größe und Vielfalt der Nematodenpopulationen	N/A	0	**0**
	Größe und Vielfalt der Regenwurmpopulationen	N/A	0	**0**
	Größe und Vielfalt der Springschwanzpopulationen	N/A	0	**0**
	Größe und Vielfalt heimischer Ameisenpopulationen	N/A	0	**0**
	biologische Qualität des Bodens auf der Grundlage von Arthropoden (QBS-ar)	N/A	0	**0**
	Vorkommen invasiver gebietsfremder Arten und von Pflanzenschädlingen	N/A	0	**0**
	Bodenbasalatmung	mikrobielle Basalatmung	204	**6**

N/A (not available): Aus dem öffentlich verfügbaren JSON-Datensatz der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

Als obligatorische Untersuchungsparameter auf BDF empfohlen werden die mikrobielle Biomasse, die mikrobielle Basalatmung (Durchflussverfahren oder Bestimmung der O_2-Aufnahme), der metabolische und der mikrobielle Quotient (Anderson & Domsch 1990 zit. in Barth et al. 2022) sowie die Tiergruppen der Regenwürmer (Handauslese und Austreibung) und der Kleinringelwürmer (Enchytraeidae) (Nassextraktion). Ergänzende biologische Messparameter sind N-Mineralisation, Zelluloseabbau, Argininammonifikation, Arylsulfatase-, ß-Glucosidase- und Kataloseaktivität sowie die Tiergruppen der Springschwänze (Collembolen), Nematoden und Milben (Gamasinen).

Im betrachteten BDF-Datensatz ist die mikrobielle Basalatmung als bodenbiologischer Messparameter in BB, NI, NRW, ST, TH und SH angegeben (Tabelle 9), weiterhin mikrobielle Biomasse an rund 130 sowie Enzymaktivitäten (Arylsulfatase, ß -Glucosidase, Cellulase, Dehydrogenase, Phosphatase) und Argininammonifikation an ca. 35 BDF. Aus der Literatur geht hervor, dass in elf Bundesländern bodenbiologische Untersuchungen auf BDF durchgeführt werden (Tabelle 11). Aufgrund der kosten- und zeitintensiven Aufnahme und taxonomischen Bestimmung der Bodentiere erfolgt deren Einsatz jedoch nach wie vor vergleichsweise zurückhaltend (Jänsch et al. 2023; Kaufmann-Boll et al. 2020).

An allen BDF fehlen bisher Untersuchungen mit DNA-Metabarcoding. Diese Methoden werden aktuell in der Biologischen Bodenzustandserhebung im Wald (BBZE Wald) eingesetzt und sind künftig im Rahmen der BioDive4Soil-Basiserhebungen vorgesehen (Tabelle 11). Von den als fakultativ in der Richtline aufgeführten Deskriptoren werden die Tiergruppen Regenwürmer in elf, Ringelwürmer in sechs und Springschwänze in zwei Bundesländern erfasst (Tabelle 10). Die BBZE Wald bietet Ergänzungsmöglichkeiten für Regenwürmer und Springschwänze, sofern die Methoden vergleichbar sind; LUCAS Soil für Metabarcoding, Regenwürmer und Nematoden. Mit den geplanten BioDive4Soil-Basiserhebungen kommen neben dem DNA-Metabarcoding auch Erhebungen der Makrofauna (Probenahme, Extraktion, Taxonomische Bestimmung, prävalente Arten, Individuenzahl, Biomasse) hinzu. Untersucht werden hier die Tiergruppen der Regenwürmer, Enchytraeiden, Mikroarthropoden (Collembolen, Milben) und Nematoden.

Phospholipid-Fettsäure-Analysen (PLFA) werden im Programm der Biodiversitätsexploratorien an ausgewählten Standorten durchgeführt.

Ameisen sind nach derzeitigem Kenntnisstand nicht Gegenstand der Erhebungen auf BDF und in den betrachteten weiteren Messprogrammen. Inwieweit die biologische Qualität des Bodens auf der Grundlage von Arthropoden oder das Vorkommen invasiver gebietsfremder Arten und von Pflanzenschädlingen erfasst wird, ist nicht bekannt.

Tabelle 10: Bodenbiologische Erhebungen auf BDF nach Jänsch et al. (2023)

Bundesland	Springschwänze (Collembolen)	Ringelwürmer (Enchytraeidae)	Regenwürmer (Lumbricidae)	Basalatmung, Biomasse	Enzymaktivitäten
BB			X	X	
BE	Keine BDF				
BW	X		X	X	
BY			X		
HH		X	X	X	
HB	Keine BDF				
HE	Keine bodenbiologischen Erhebungen				
MV			X	X	
NI		X	X	X	
NRW		X	X	X	X
RP	X	X	X	X	
SL	Keine bodenbiologischen Erhebungen				
SN	Keine bodenbiologischen Erhebungen				
ST			X	X	X
SH		X	X	X	X
TH		X	X	X	

Tabelle 11: Erfassung bodenbiologischer Deskriptoren in weiteren Messprogrammen

Boden-degradation	Deskriptor/Parameter	BZE LW	BZE Wald	BBZE Wald	LUCAS Topsoil 2018	LUCAS Topsoil 2022	ICP Forests II	Bio. Ex	HM NRW	UPB	BioDive 4Soil
	(Anzahl Standorte)	(3.104)	(ca. 1.800)	(488)	(774)	(1.290)	(68)	(300)	(200)	(9)	(252)
Verlust der Biodiversität	DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien	N/A	N/A	X	(X)	(X)	N/A	X	N/A	N/A	X
	Metabarcoding für Archaea, Protisten und Tiere	N/A	N/A	X	N/A	X	N/A	X	N/A	N/A	X
	Phospholipid-Fettsäure-Analyse (PLFA)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	(X)	N/A	N/A	N/A
	Größe und Vielfalt der Nematoden-populationen	N/A	N/A	N/A	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X
	Größe und Vielfalt der Regenwurmpopulationen	N/A	N/A	X	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X
	Größe und Vielfalt der Springschwanz-populationen	N/A	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X
	Größe und Vielfalt heimischer Ameisenpopulationen	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	biologische Qualität des Bodens auf der Grundlage von Arthropoden (QBS-ar)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Vorkommen invasiver gebietsfremder Arten und von Pflanzenschädlingen	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Bodenbasalatmung	N/A	N/A	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

* Biologische Bodenzustandserhebung im Wald (Thünen-Institut für Waldökosysteme)
(X): an ausgewählten Standorten
N/A (not available): Aus der Literatur geht nicht hervor, ob der Deskriptor erfasst wird.

2.3 Zusammenfassende Bewertung

Der Abgleich von Parametern, die an Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) erfasst werden, mit den Bodendeskriptoren der EU-Bodenrichtlinie zeigt je nach Bodendegradation unterschiedliche Ergebnisse und Ergänzungsmöglichkeiten durch weitere Messprogramme.

- **Gute Abdeckung (60–80 % der BDF):** Die verpflichtenden Deskriptoren für den Verlust an organischem Bodenkohlenstoff, für Ober- und Unterbodenverdichtung (Trockenrohdichten), Nährstoffgehalte, Schwermetallbelastung und Versauerung werden an einem Großteil der 823 BDF abgedeckt (Tabelle 12); räumliche Lücken liegen in SL, RP, NRW, MV und ST vor. Diese Deskriptoren werden auch in den bundesweit flächenrepräsentativen Stichprobenerhebungen der BZE Landwirtschaft und BZE Wald sowie im LUCAS Topsoil-Programm erhoben; ebenso an ICP Forests Level II-Standorten, in den Biodiversitätsexploratorien, der Umweltprobenbank (außer Trockenrohdichte) und im Humusmonitoring NRW (Tabelle 13). Die Deskriptoren Corg-Vorrat und C/N-Verhältnis können aus Basisparametern berechnet werden, die i. d. R. an Erhebungs- und Monitoring-Standorten bekannt sind.

- **Mittlere Abdeckung (20–60 % der BDF):** Die Abdeckung der verpflichtenden Deskriptoren Wasserspeicherkapazität und Luftkapazität auf BDF liegt im mittleren Bereich. Weitere Messprogramme bieten Ergänzungsoptionen (Tabelle 13). Wasserspeicherkapazität und Luftkapazität können alternativ zur Messung aus Basisparametern abgeschätzt werden.
  Anhand der vorläufig angenommenen Stoffgruppen PAK, PCB und PCDD/F für organische Kontaminanten lässt sich feststellen, dass diese – wie auch Pestizide - auf BDF in mittlerem Umfang erfasst werden. Organische Kontaminanten und Pestizide werden ausschließlich in den BDF-Programmen, der Umweltprobenbank und künftig in den BioDive4Soil-Erhebungen erfasst; Ergänzungsmöglichkeiten aus flächenrepräsentativen Stichprobenerhebungen fehlen hier.

- **Geringe Abdeckung (<20 % der BDF):** In geringem Umfang an BDF erfasst werden die verpflichtenden Deskriptoren EC (nur MV, BB) und Ksat/kf-Wert (Tabelle 12). Der Deskriptor für Versalzung (EC) wird in der bundesweit flächenrepräsentativen Stichprobenerhebung der BZE Landwirtschaft sowie im LUCAS Topsoil-Programm erfasst. Gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten (Ksat/kf-Werte) gehören nach Angaben im verwendeten BDF-Datensatz von 2018 (INSPIRE) nur an wenigen BDF zum Untersuchungsumfang und sind in keinem der weiteren Messprogramme als Erfassungsparameter genannt. Diese lassen sich jedoch aus Basisparametern ableiten.

- **Fehlende Abdeckung:** PFAS-Erhebungen werden bisher weder auf BDF noch in den flächenrepräsentativen Stichprobenerhebungen der beiden BZE und LUCAS Soil erhoben. Sie sind bisher bundesweit in Forschungsprojekten (z. B. UBA-PFAS- und UBA BoBeLa[2]-Projekte) untersucht worden und ihre Untersuchung ist im Rahmen der BioDive4Soil-Basiserhebung vorgesehen. Bodenbiologische Erhebungen mit DNA-Metabarcoding fehlen auf BDF. Diese werden im Programm der BBZE Wald an 488 Standorten und künftig an 252 BioDive4Soil-Standorten erfasst (Tabelle 13).

[2] UBA-Vorhaben „Hintergrundwerte für PFAS und (Mikro) Kunststoffe – bundesweit repräsentative Beprobung von landwirtschaftlich genutzten Böden“ sowie UBA-Vorhaben „BoBeLa Chemische Belastung von Agrarflächen in Deutschland / Recording the contamination of agricultural land with biocides, pharmaceuticals and pesticides in Germany“.

Die 823 Bodendauerbeobachtungsflächen in Deutschland bieten in hoher räumlicher Abdeckung Erhebungen von Standardparametern (Textur, Corg, Stickstoff, Phosphor, Schwermetalle und pH-Wert sowie Trockenrohdichte bei wiederholter Beprobung), die für einen Großteil der Bodendeskriptoren der EU-Bodenrichtlinie zu erfassen sind. Zum einen handelt es sich bei diesen Parametern teilweise selbst um Deskriptoren, zum anderen lassen sich aus diesen Parametern andere Deskriptoren abschätzen (Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff, Wasserspeicherkapazität, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Luftkapazität und Kationenaustauschkapazität). Räumliche Lücken in der Abdeckung des Bundesgebietes mit BDF sind vorhanden, da nicht alle Bundesländer ihre Standorte nach einheitlichen Kriterien und in gleicher Dichte festgelegt haben (Abbildung 1). In RP und NRW ist die Anzahl der BDF im Hinblick auf die Landesfläche besonders gering. In NRW ergänzt z. B. das Humusmonitoring NRW die Erhebungen. Die genannten Standardparameter werden ebenfalls in den bundesweit flächenrepräsentativen Stichprobenerhebungen (BZE Landwirtschaft, BZE Wald) und im LUCAS Topsoil-Programm erhoben, sodass diese Programme für ein optimiertes Bodenmessnetz kombiniert werden könnten, sofern sie methodisch vergleichbar sind.

Im Vergleich zu anderen trockenen Weltregionen sind Böden in Deutschland insgesamt in geringem Maße von Versalzung bedroht, da Salze meist mit dem Niederschlag ausgewaschen werden und großflächige Bewässerungslandwirtschaft mit salzhaltigem Wasser fehlt. Lokale Risiken können in Küstennähe (Salz im Grundwasser), in unmittelbarer Nähe von Salz- und Kalihalden und an Straßenrändern durch Tausalz entstehen. Für Versalzung fehlen in den BDF-Programmen salzwasserbeeinflusste Küstenlagen in NI und SH. Die Relevanz dieser Bodendegradation in Küstenregionen aber auch im Binnenland, z. B. durch Beregnung oder Tausalz, wäre zu prüfen, um festzulegen, ob und in welchen Gebieten, die nicht von (unnatürlicher) Versalzung bedroht sind, auf Messungen verzichtet werden kann (Artikel 24, Abschnitt 1d in Europäische Kommission 2025). BZE Landwirtschaft und das LUCAS Soil-Programm könnten hier Lücken schließen.

Für die Deskriptoren der Bodenkontamination stellen die BDF-Programme die einzigen dar, die neben Schwermetallen auch organische Kontaminanten wie PAK, PCB und PCDD/F sowie Pestizide erfassen. PFAS werden bisher weder an BDF noch in den Bodenzustandserhebungen oder LUCAS Soil erfasst.

Die Programme Biologische Bodenzustandserhebung deutscher Wälder (BBZE Wald) und BioDive4Soil sowie LUCAS Soil bieten methodisch einheitliche Messungen des obligatorischen Deskriptors für den Verlust der Bodenbiodiversität (DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien) sowie auch für einige fakultativ mögliche Deskriptoren. An BDF werden mehrere fakultative bodenbiologische Deskriptoren erfasst, wobei die in den Ländern verwendeten Methoden als nicht vollständig vergleichbar bewertet werden (Kaufmann-Boll et al. 2025).

Die Bewertung basiert auf den zum aktuellen Zeitpunkt und im Zeitrahmen des Projekts verfügbaren Datenquellen. Der hinsichtlich erfasster Messparameter ausgewertete BDF-Stammdatenbestand aus dem Jahr 2018 gibt einen acht Jahre zurückliegenden Stand wieder. Der Datenbestand besitzt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; beispielsweise sind darin aus der Literatur bekannte bodenbiologische Erhebungen auf BDF nicht in vollem Umfang abgebildet. Wesentliche Änderungen der Messprogramme der BDF in den letzten Jahren sind uns nicht bekannt, so dass sich anhand des Datenbestands in Kombination mit Literatur ausreichend belastbar einschätzen lässt, inwieweit die europäischen Bodendeskriptoren auf BDF erfasst werden und an welchen Stellen die größten Lücken bestehen.

Für die Frage nach den auf BDF eingesetzten Untersuchungsmethoden für physikalische, chemische und biologische Parameter wurde auf die Empfehlungen für BDF nach Barth et al. (2022) zurückgegriffen. Angaben zu den an einzelnen BDF eingesetzten Methoden liegen nicht vollständig und in geeigneter Form vor. Daher ist die Vergleichbarkeit der Erhebungsmethoden jeweils für Einzelstandorte zu prüfen, sollten diese in ein bundesweites Bodenmessnetz integriert werden.

Die Bewertung der weiteren betrachteten Messprogramme hinsichtlich des Parameterumfangs basiert auf Informationen, die technischen Berichten (für die LUCAS Soil Daten), Metadaten und dem Bericht „Bodendaten in Deutschland (Kaufmann-Boll et al. 2020) entnommen wurden. Für BioDive4Soil wurden verwaltungsinterne Informationen des UBA genutzt. Auf die eingesetzten Untersuchungsmethoden wurde bei den weiteren betrachteten Messprogrammen nicht vertiefend eingegangen.

Tabelle 12: Erfassung der Bodendeskriptoren der EU-Bodenrichtlinie auf BDF

Bodendegradation	Deskriptor/ Parameter (*kursiv = fakultativ*) (Anzahl Standorte)	BB (31)	BW (42)	BY (279)	HE (64)	MV (89)	NI (89)	NRW (6)	RP (16)	SL (11)	SN (57)	ST (69)	SH (37)	TH (33)	%-Anteil BDF mit Messung
Verschiedene	Korngrößenverteilung	X	X	X	X	X	X	X	X*		X	X	X	X	78 %
Versalzung	EC					X									5 %
Verlust an organischem Bodenkohlenstoff	Corg (TOC)	X	X	X	X	X	X	X	X*	X	X	X	X	X	80 %
	Vorrat an org. C**														0 %
Ober- und Unterbodenverdichtung	Trockenrohdichte	X	X	X	X	X	X	X	X*		X	X	X	X	70 %
	Ksat/Kf-Wert**				X	X		X	X*		X	X	X	X	19 %
	LK		X	X	X		X	X	X*		X	X	X	X	50 %
Überschüssiger Nährstoffgehalt im Boden	P	X	X	X	X	X		X	X*	X	X	X	X	X	68 %
	N	X	X	X	X	X	X	X	X*	X	X	X	X	X	83 %
	Verhältnis C/N**	X			X		X	X					X	X	15 %
Bodenkontamination	Schwermetalle	X	X	X	X	X	X	X	X*	X	X	X	X	X	59 %
	Organische Kontaminanten***	X	X*	X	X		X	X*	X*	X		X	X	X	33 %
	PFAS														0 %
	Pestizide***	X	X*	X	X		X	X*	X*			X	X	X	41 %
Verringerung der Wasserrückhaltung/Infiltration des Bodens	Wasserspeicherkapazität		X	X	X	X	X	X	X*		X			X	37 %
	Ksat/Kf-Wert**				X	X		X	X*		X	X	X	X	19 %
	LK		X	X	X	X	X	X	X*		X	X	X	X	50 %
Versauerung	pH	X	X	X	X	X	X	X	X*	X	X	X	X	X	79 %
	Basensättigung	X			X						X				9 %
Verlust an Biodiversität	DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien														0 %
	Verschiedene (JSON+Literatur)	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	k. A.

*< 3 BDF mit Messung; **Der Deskriptor lässt sich aus Eingangsvariablen berechnen, die in der Regel an BDF vorhanden sind; ***Stellvertreter für Deskriptor „org. Kontaminanten“: PAK, PCB, Summe PCDD/F, für „Pestizide“: DDT, HCH

Tabelle 13: Erfassung der Bodendeskriptoren der EU-Bodenrichtlinie in weiteren Messprogrammen

Bodendegradation	Deskriptor/ Parameter (*kursiv = fakultativ)* (Anzahl Standorte)	%-Anteil BDF mit Messung (823)	Lücken in BDF	BZE LW (3.104)	BZE Wald (ca. 1.800)	LUCAS Top-soil 2018 (774)	LUCAS Topsoil 2022 (1.290)	ICP Fo-rests II (68)	Biodiv.- explora-torien (300)	Humusmon. NRW (200)	UPB (9)	BioDive4Soil (252)	BBZE Wald (448)
Textur	Korngrößenverteilung	78 %	SL, RP	X	X	N/A	X	X	X	X	X	X	X
Versalzung	EC	5 %	Alle BL (außer MV/BB)	X	N/A	X	X			N/A			
Verlust an org. C	Corg (TOC)	80 %	RP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Vorrat an org.C	0 %	Alle BL	X					N/A				
Ober- und Unterboden-verdichtung	Trockenrohdichte	70 %	BB, SL, RP	X	X	X	X	X	X	X	N/A	X	X
	*Ksat/Kf-Wert**	19 %	BB, BW, NI, RP, SL						N/A				
	LK	50 %	BB, MV, RP, SL						N/A				
Überschüssiger Nähr-stoffgehalt	P	68 %	MV, RP, ST	N/A	X	X	X	X		N/A		X	k.A.
	N	83 %	MV, RP, ST, SL	X	X	X	X	X	X	X	N/A	X	k.A.
	C/N	15 %	BW, BY, MV, NI, RP, SN, ST, SL				N/A			X		N/A	k.A.
Bodenkontamination	Schwermetalle	59 %	MV, RP, SN,	N/A	X	X	X	X	N/A	X	X	X	k.A.
	Org. Kontaminanten	33 %	BW, MV, NRW, HP, SH, SN, SH				N/A				X	X	k.A.
	PFAS	0 %	Alle BL				N/A					X	k.A.
	Pestizide	40 %	BW, MV, NRW, SN, SL				N/A				X	X	k.A.
Verringerung der Wasser-rückhaltung/ Infiltration	Wasserspeicherkapazität	36 %	BB, BW, SL, ST, SH			N/A		X	X	X	X	X	k.A.
	Ksat	19%	BB, BW, NI, RP, SL					N/A					k.A.
	LK	50 %	BB, MV, RP, SL					N/A					k.A.
Versauerung	pH-Wert	79 %	RP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Basensättigung	9 %	Alle BL (außer BB, SN, ST, TH)	N/A	X	X	X	X	X	X		N/A	k.A.
Verlust der Biodiversität	DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien	0 %	Alle BL	N/A		(X)	(X)		N/A			X	X
	Verschiedene	k.A.	HE, SL, SN	N/A		X	X	N/A	X	N/A		X	X

3 Etablierung eines R-Skripts zur Analyse der Anzahl national benötigter Probenpunkte

Die EU-Bodenrichtlinie sieht vor, dass zur Ermittlung der Anzahl der nötigen Probenpunkte für ein repräsentatives Messnetz der einzelnen MS geeignete statistische Verfahren anzuwenden sind (u. a. Bethel 1989), und sie definiert Anforderungen an eine statistisch repräsentative Erhebung (siehe Kapitel 0).

Um die Vorbereitung eines repräsentativen Messnetzes für Bodendaten zu unterstützen, wird ein vom Joint Research Centre (JRC) bereitgestelltes R-Skript (Ballabio 2024) analysiert und weiterentwickelt. Dabei wird Folgendes berücksichtigt:

- Als Berechnungsgrundlage dienen verschiedene Informationen, darunter räumlich explizite Daten zu Bodenregionen, Landnutzungsformen und NUTS-Regionen.
- Es soll geprüft werden können, wie sich verschnittene Raumgliederungen zu den Bundeslandgrenzen in Deutschland verhalten.
- Bereits existierende Bodenmonitoringprogramme sollen bevorzugt berücksichtigt werden können.
- Das Skript soll so konzipiert werden, dass es möglichst universell an verschiedene Fragestellungen und Bodendeskriptoren angepasst werden kann.
- Einige Eingangsparameter, z.B. die Zahl der Probenpunkte zum Startpunkt der Berechnungen, waren im R-Skript (Ballabio 2024) in ihrer Ausprägung nicht definiert und konnten daher willkürlich gewählt werden. Die gewählten Startbedingungen beeinflussen jedoch den Ausgang der Berechnungen.
- Bisher wurden Probenpunkte vorhandener Bodenmessnetzte aufgrund mehrerer statistischer Annahmen im Verfahren zur Optimierung der initialen Stichprobe diskriminiert.
- Anzahl, Größe und Variation innerhalb der Domänen bestimmten die Anzahl und Lage der Probepunkte – hier ist die optimale Anpassung für die Bildung der Domänen entscheidend (Aggregationsniveau NUTS-Regionen, Landnutzung nach CORINE Land Cover (CLC) und Einbeziehung verschiedener Bodeneigenschaften).
- Es stellt sich die Frage nach der Variabilität der gewählten Bodendeskriptoren innerhalb verschiedener verschnittener Raumgliederungen (z. B. mit einem maximalen Variationsko-effizient von 5 %), wenn vorhandene Monitoring- und Erhebungsprogramme sowie möglicherweise notwendige zusätzliche Probenpunkte einbezogen werden, um einen gewählten Variationskoeffizienten zu erreichen.

In enger Abstimmung mit der Fachbegleitung wurde ein verbessertes Verfahren zur Berechnung der Anzahl der Probenpunkte für die repräsentative Erfassung des Bodenzustandes vorgeschlagen, das den Anforderungen auf EU-Ebene und zugleich den existierenden Bodenmonitoringprogrammen in Deutschland gerecht wird.

Zur Vorbereitung sind die vom Umweltbundesamt bereitgestellten oder aus öffentlich zugänglichen Quellen zusammengestellten Datengrundlagen geprüft worden. Der Verwendungszweck der verschiedenen Quellen ist in Tabelle 14 dokumentiert.

Tabelle 14: Verwendungszweck von Datenquellen

Datenbedarf in Bezug auf die EU-Bodenrichtlinie	Hier verwendete Datenquellen
„Bodenbezirk“ (*soil district*) (Art. 3: Teil des Hoheitsgebiets eines Mitgliedstaats, der von diesem Mitgliedstaat gemäß dieser Richtlinie abgegrenzt wurde)	NUTS-Regionen DE NUTS0 500 m Auflösung = Bund DE NUTS1 500 m Auflösung = Bundesländer
„Bodeneinheit“ (*soil unit*)*(Art. 3: eine räumlich abgegrenzte Fläche innerhalb eines Bodenbezirks, die sich aus der Schnittmenge einer Reihe von Geodaten ergibt, die als Faktoren für die statistische Homogenität innerhalb dieses Bodenbezirks herangezogen werden)	40 Bodenregionen
	12 Bodenregionen
	Landnutzungskategorien CLC (500 m Auflösung)
Grundgesamtheit von möglichen Probenpunkten	LUCAS Grid 2x2km, LUCAS Grid 500x500m
Existierende Bodenprobepunkte	Bodenmonitoring- und Bodenerhebungsprogramme**: Bodendauerbeobachtung (BDF) Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE LW) LUCAS 2027 TOPSOIL BioDive4Soil
Ermittlung der Variabilität von Bodeneigenschaften	Bodenart / Textur Durchwurzelbarkeit Dichte pH-Wert Organischer Kohlenstoff Kationenaustauschkapazität Phosphor Stickstoff Kalkgehalt Schwermetalle Grundwasserstand

Quellen: siehe Anhang A

* Die Bodeneineit (soil unit) ist grundlegend für die Stratifizierung von Stichproben und ist im Weiteren gleichzusetzen mit dem Begriff „Stratum“.

** BZE Wald wurde nicht berücksichtigt, da kein Punkt-Datensatz zur Verfügung stand.

Das Ergebnis der Prüfung zur Ermittlung der notwendigen und der bestmöglichen Datenbasis zur Ermittlung der Variabilität von Bodeneigenschaften ist in Anhang C dokumentiert. Die Zuordnung der Landnutzungen des CORINE Land Cover und der Landnutzungen an existierenden Probenpunkten zu Landnutzungskategorien gemäß der Verordnung (EU) 2018/841 (Emissionen und Abbau von THG im LULUCF-Sektor [Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft]) ist Anhang D zu entnehmen.

Das R-Skript von (Ballabio 2024) schlägt ein variablenspezifisch optimiertes, stratifiziertes Stichprobendesign vor, das vorhandene Hilfsinformationen nutzt, die erforderliche Stichprobengröße mit dem Bethel-Algorithmus (Bethel 1989) bestimmt und die Stratifizierung optimiert. Das Sampling Design des ursprünglichen Skripts und die vorgenommenen Anpassungen sind in der technischen Beschreibung zum R-Skript (EFTAS GmbH 2026) dokumentiert. Die Weiterentwicklung betrifft die Software-Architektur, den Programmierstil und die verwendeten Pakete sowie das konzeptionelle Vorgehen zu Populationsrepräsentation, Stratifizierung und Auswertung.

3.1 Tests zur Ermittlung der Anzahl benötigter Probenpunkte

Um eine geeignete Stratifizierung Deutschlands zu entwickeln, die sowohl sachgerechte räumliche Differenzierungen als auch praktikable Bericht- und Handhabbarkeit gewährleistet, wurden verschiedene Anwendungsfälle und Szenarien mithilfe des weiterentwickelten JRC-Skripts getestet (siehe Übersicht in Tabelle 16).

Im ersten Berechnungsdurchlauf unterschieden sich die drei Anwendungsfälle (Use Cases 1 bis 3, Tabelle 16) zunächst ausschließlich hinsichtlich der Auswahl und Anzahl der verwendeten Bodenparameter, die als Inputdaten dienen (Hintergrunddaten des JRC und BGR). Für alle Use Cases galt die Vorgabe, dass die maximalen Variationskoeffizienten (CV) pro Stratum einen Wert von 5 % nicht überschreiten. In allen weiteren Rahmenbedingungen (NUTS0-Ebene; Verwendung eines 2x2 km-Rasters entsprechend dem EU-LUCAS-Raster; Berücksichtigung von 40 Bodenregionen entsprechend den Bodenregionen der EU und ihrer Nachbarstaaten im Maßstab 1:5.000.000 (EUSR5000); Basis Input Parameter *pH, organischer Kohlenstoff (OC)* und Textur in zwei verschiedenen Tiefen) waren die Szenarien identisch. Der Umfang der berücksichtigten Bodenparameter wurde von Anwendungsfall zu Anwendungsfall erhöht. Use Case 2 unterschied sich dabei von ersterem durch die Ergänzung der Parameter *Gründigkeit* und *Grundwasserstufe* sowie durch den Verzicht auf den Parameter *Gesamtstickstoff (N)*.

Beim Vergleich der Szenarien zeigt sich, dass die Anzahl der benötigten Probenpunkte über alle Strata stark schwankt und im Durchschnitt bei 14.000 und maximal bei knapp über 41.000 liegt.

Betrachtet man die mittleren Variationskoeffizienten (CV) der Grundgesamtheit aus rund 90.000 LUCAS-Punkten über alle Strata und Bodendeskriptoren (Tabelle 15), zeigt sich, dass pH, LD und P in den drei Use Cases durchgängig relativ geringe mittlere CVs aufwiesen (<20 %). Diese Deskriptoren sind somit innerhalb der Strata relativ homogen, sodass eine geringe Probenpunktanzahl pro Stratum ausreichen würde. Demgegenüber weisen anderen Deskriptoren (OC, Bodentextur, $CaCO_3$ und Hg) konstant hohe CVs innerhalb der Strata auf (>40 %). Für diese Variablen wären entsprechend viele Probenpunkte notwendig, um die Heterogenität innerhalb der Strata abzubilden. Weitere Bodendeskriptoren wie N, Cu, KAK, GWS und die Gründigkeit weisen mittlere CVs zwischen 20 und 40 % auf und benötigen folglich eine mittelhohe Punktanzahl.

Tabelle 15: Variabilität von Bodendeskriptoren an den LUCAS-Grid-Punkten (2 x 2 km) in den Szenarien 1 bis 3

Mittl.CV 7-<20 %	Mittl. CV 20 -<40 %	Mittl. CV >=40 – max. 95 %
pH (JRC)	N (JRC)	OC (JRC)
LD (JRC)	Cu (JRC)	S, U, T alle Tiefen (BGR)
P (JRC)	CEC (JRC)	CaCo3 (JRC)
	GWS (BGR)	Hg (JRC)
	Gründigkeit (BGR)	

Es wurden weitere Anpassungen vorgenommen, um zu prüfen, wie sich andere und weniger Variablen auf die Punktanzahl auswirken. Unter anderem wurde der zulässige CV von 5 % auf 10 % erhöht (Use Case 1, Szenario 4 und Use Case 3, Szenario 2), was eine signifikante Reduktion der Anzahl erforderlicher Punkte bewirkte. Ebenso wurde die Auswirkung eines feineren Grids (500 m statt 2 km) auf die Strata- und Punktanzahl untersucht (Use Case 1, Szenario 3). Hieraus ergab sich eine notwendige Punktanzahl von über 40.000.

Zur Vereinfachung der Eingangsdaten für die Bodentextur wurde nur für Use Case 1, in den Szenarien fünf bis acht mit zwei Datensätzen des JRC für Sand- und Tonfraktion gerechnet. Zusätzlich wurden für die Szenarien sechs und sieben eine andere Bodenregionskarte (bgl5000_lea_v40, 12 Bodenregionen) verwendet. Durch die Nutzung von 12 anstelle von 40 Bodenregionen sowie durch die Vereinfachung der Texturdaten reduziert sich die erforderliche Punktanzahl auf etwa 5.800 (Tabelle 16). Szenario 6 (Use case 1) wurde daraufhin als favorisiertes Szenario für weitere Tests herangezogen. Die letzte Anpassung bestand in der Aggregation aller Strata der LULUCF-Klasse „Settlement“ zu einem gemeinsamen Stratum unabhängig von der Bodenregion. Das Ergebnis ist das Szenario *06rmi_bgl_sand_clay* mit 41 Strata und einem Bedarf von etwa 4.800 Probepunkten (Szenario 6.2 und 6.3 in Tabelle 16). Eine Möglichkeit zur Darstellung der Anzahl benötigter Probenpunkte in Strata zeigt Abbildung 4 beispielhaft für eine Bodenregion.

Tabelle 16: Übersicht der Testszenarien

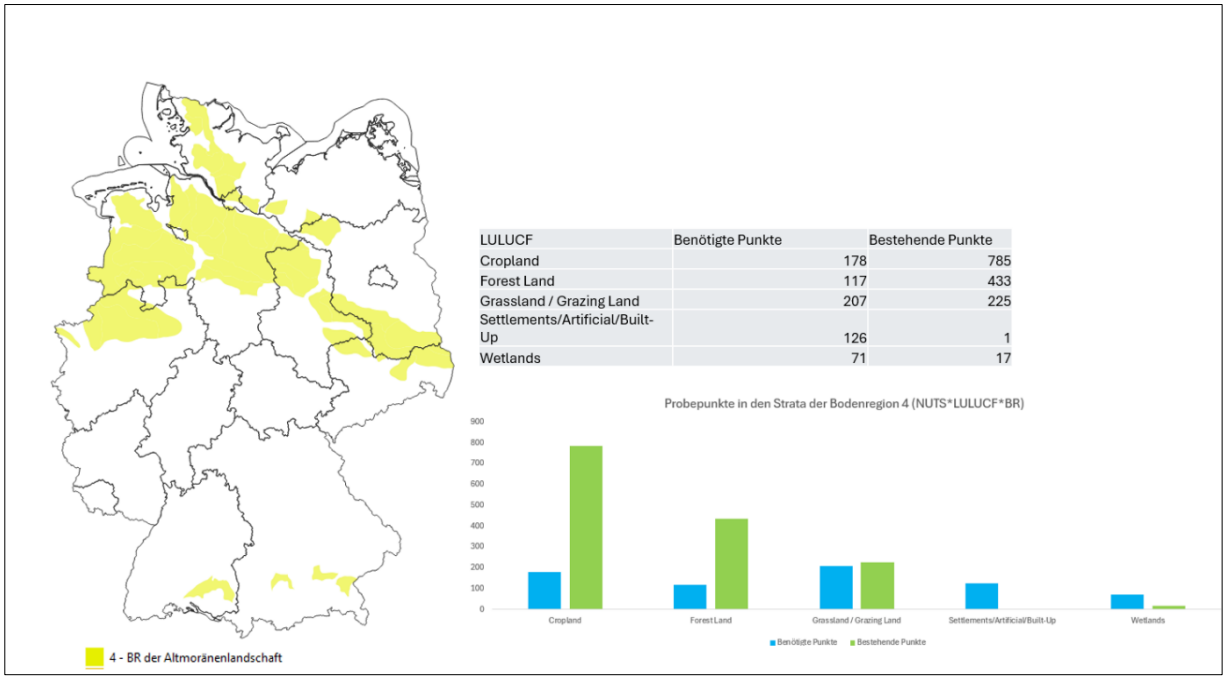
Alle Szenarien berücksichtigen dieselbe Anzahl und Auswahl an LULUCF Kategorien

Anwendungsfall (Use Case)	Eingangsparameter	Szenario	NUTS	Raster	CV (%)	Bodenregion	Population mit bestehenden Messnetzen (Z=Messnetze als Zensus)*	Populationsgröße	Anzahl benötigter Punkte/Sample	Strata-Anzahl
UC1	pH (JRC), OC (JRC), N (JRC), S 9+31cm (BGR), U 9+31cm (BGR), T 9+31cm (BGR), LD (BGR)	Szenario 1.1	0	2x2km	<5	EUSR (40)	nein	**79915**	**20778**	**146**
		Szenario 1.2	0	2x2km	<5	EUSR (40)	ja (nur MN)	**6199**	**3648**	**68**
		Szenario 1.3	0	2x2km	<5	EUSR (40)	Ja (Z)	**85468**	**20781**	**146**
		Szenario 2.1	0	2x2km	<5	EUSR (40)	nein	**79915**	**206**	**32**
		Szenario 3	0	500x 500m	<5	EUSR (40)	nein	**1279521**	**41284**	**173**
		Szenario 4	0	2x2km	<10	EUSR (40)	nein	**79915**	**7973**	**146**
	pH (JRC), OC (JRC), N (JRC), sand (JRC), clay (JRC), BD (JRC)	Szenario 5.1	0	2x2km	<5	EUSR (40)	nein	**85830**	**12870**	**154**
		Szenario 5.2	0	2x2km	<5	EUSR (40)	Ja (Z)	**91759**	**12874**	**154**
		Szenario 6.1	0	2x2km	<5	BGL (12)	nein	**85845**	**5775**	**52**
		Szenario 6.2	0	2x2km	<5	BGL (12)	nein	**85845**	**4819**	**41**
		Szenario 6.3	0	2x2km	<5	BGL (12)	ja	**91774**	**4821**	**41**
		Szenario 6.4	0	2x2km	<5	BGL (12)	Ja (Z)	**91774**	**5778**	**52**
		Szenario 6.5	0	2x2km	<5	BGL (12)	ja	**91774**	**5898**	**52**
		Szenario 7.1	1	2x2km	<5	BGL (12)	nein	**85845**	**17318**	**266**
		Szenario 8.1	1	2x2km	<5	EUSR (40)	nein	**85830**	**21057**	**356**
		Szenario 7.2	1	2x2km	<5	BGL (12)	Ja (Z)	**91774**	**17375**	**270**

Anwendungsfall (Use Case)	Eingangsparameter	Szenario	NUTS	Raster	CV (%)	Bodenregion	Population mit bestehenden Messnetzen (Z=Messnetze als Zensus)*	Populationsgröße	Anzahl benötigter Punkte/Sample	Strata-Anzahl
		Szenario 8.2	1	2x2km	<5	EUSR (40)	Ja (Z)	**91759**	**21123**	**361**
UC2	pH (JRC), OC (JRC), S 9+31cm (BGR), U 9+31cm (BGR), T 9+31cm (BGR), LD (BGR), Gründigkeit (BGR), GWS (BGR)	Szenario 1.4	0	2x2km	<5	EUSR (40)	nein	**72552**	**19071**	**141**
UC3	pH (JRC), OC (JRC), N (JRC) S 9+31cm (BGR), U 9+31cm (BGR) T 9+31cm (BGR) LD (BGR), KAK (JRC), P (JRC) CaCo3 (JRC), Cu (JRC), Hg (JRC)	Szenario 1.5	0	2x2km	<5	EUSR (40)	nein	**79427**	**27290**	**146**
		Szenario 2.2	0	2x2km	<10	EUSR (40)	nein	**79427**	**11369**	**146**

*In Szenarien mit Kennzeichnung „Z“ werden die Messnetzdaten als Zensus (vollständige Übernahme / must-include) behandelt. Das heißt, diese Punkte werden verbindlich in die Stichprobe aufgenommen und bei der Stichprobenziehung nicht ausgewählt, sondern festgesetzt. Die Bestimmung der erforderlichen Stichprobengröße erfolgt weiterhin auf Basis der definierten Population und des zugrunde liegenden Stichprobendesigns. Falls die Ziel-Stichprobengröße durch die Zensuspunkte noch nicht erreicht ist, wird die Stichprobe nachrangig durch zusätzliche Ziehungen aus der Population (gemäß Stratifizierung/Allokation) ergänzt.
In Szenarien ohne „Z“ werden die Messnetzdaten nicht als Zensus, sondern als Teil der Population behandelt; bei der Stichprobenziehung haben sie damit die gleiche Ziehungswahrscheinlichkeit wie alle übrigen Punkte (innerhalb der jeweiligen Strata).

Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung von benötigten und bestehenden Probenpunkten in einer Bodenregionen*



LULUCF	Benötigte Punkte	Bestehende Punkte
Cropland	178	785
Forest Land	117	433
Grassland / Grazing Land	207	225
Settlements/Artificial/Built-Up	126	1
Wetlands	71	17

* Use Case 1, Szenario 6: NUTS0, Gesamtpopulation ist LUCAS Grid + Messnetze, 12 Bodenregionen, CV <5%
Quelle: eigene Darstellung

Die Tests wurden mit Hilfe verfügbarer Punktkoordinaten für ausgewählte Messnetze durchgeführt, die teilweise hinsichtlich ihrer Lage verfremdet sind. Deshalb sind die hier dargestellten Ergebnisse bezogen auf die benötigten Probenpunktanzahlen in den Szenarien mit Messnetzintegration eine Annäherung mit teilweise unscharfen Zuordnungen zu den Bodenregionen. Der Fokus lag auf der Aufbereitung des R-Skripts, damit bei einer späteren Anwendung des Skripts mit lagescharfen und frei wählbaren Messnetzdaten eine belastbare Aussage erarbeitet werden kann.

3.2 Umgang mit Strata mit geringer Flächengröße

Bei der Stratifizierung entstehen durch die räumliche Verschneidung Strata mit geringer Flächengröße. Prinzipiell sind diese Einheiten aufgrund ihrer geringen Verbreitung wenig relevant für eine bundesweite Berichterstattung. Sie können bei der Skriptanwendung per Festlegung ausgeschlossen werden (z. B. n < 20 Punkte der Grundgesamtheit, bei 2 x 2 km entspricht dies einer Flächengröße von 80 km^2).

Bei exemplarischer Betrachtung eines Testszenarios sind das Stratum Äcker in der Bodenregion der Voralpen und sechs Strata mit der Nutzung Wetlands betroffen (Tabelle 17). Die hier betroffenen Moore und Feuchtgebiete kommen naturgemäß sehr kleinräumig vor. Sie besitzen aber eine besondere Relevanz beispielsweise für den Klimaschutz und die Biodiversität. Daher wäre hier zu prüfen, ob diese entfallenen Strata über die Bodenregionen hinweg zusammengeführt werden und damit in die Szenarienberechnung wieder aufgenommen werden (Vorzugsvariante) oder ob diese Strata anderen verwandten Strata zugeschlagen werden können. Hierfür bieten sich Betrachtungen der Geopackages, die das R-Skript ausgeben kann, in einem GIS an.

Tabelle 17: Strata mit geringer Flächengröße in Szenario NUTS0 / LULUCF / 12 Bodenregionen*

Strata Nr.	LULUCF	BR_Nr	BR_Name	Punkte (insges.)	Flächengröße (km^2)	Beschreibung
1*6*8	Wetlands	7	Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an nichtmetamorphen Sedimentgesteinen (mit Löss)	8	32	Kleine Moore in den Gegenden des Teutoburger Wald/Harz
1*6*9	Wetlands	8	Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an nichtmetamorphen carbonatischen Gesteinen	2	8	2 Feuchtgebiete: Zollhausried, Dürbheimer Moos (< 1 km^2)
1*6*10	Wetlands	9	Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an nichtmetamorphen Sand-, Schluff-, Ton- und Mergelsteinen	12	46	Vereinzelte Moore und Feuchtgebiete in Mittelgebirgen wie z.B. Schwenninger Moos
1*6*11	Wetlands	10	Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Magmatiten und Metamorphiten	7	28	Feuchtgebiete/Moore
1*6*12	Wetlands	11	Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Ton- und Schluffschiefern	15	60	Lammersdorfer Venn, nur etwa 0,4 km^2
1*6*13	Wetlands	12	Alpen	11	44	Kleine Moore im Alpenraum
1*1*13	Cropland	12	Alpen	1	4	1 landwirtschaftliche Fläche im Voralpenraum bei Lengrieß

*Use Case 1, Szenario 6: NUTS0, Gesamtpopulation ist LUCAS Grid + Messnetze, 12 Bodenregionen, CV <5% (UC1mi/06_bgl_sand_clay_sample)

3.3 Betrachtungen zur Repräsentativität bestehender Messnetze

3.3.1 Allgemeine Betrachtung

Beim Aufbau von notwendigen Messnetzen für die Umsetzung der EU-Bodenrichtlinie ist es aufgrund verschiedener fachlicher und föderaler Aspekte erforderlich, die umfangreich verfügbaren bestehenden Messnetze mitzuberücksichtigen. Besonders bedeutsam sind die oft weit in die Vergangenheit zurückreichenden Messreihen für Bodeneigenschaften an bestehenden Überwachungsstandorten, ihre oft langfristige Verfügbarkeit für wiederholte Probenahmen und die in der Verwaltung etablierten Strukturen für den Betrieb von Bodenerhebungen und Dauerbeobachtung. Soweit möglich, ist es geboten, diese Aspekte in die auf statistischen Methoden basierende Vorgehensweise der Messnetzkonzeption miteinzubeziehen. An der Stelle, an der statistische Konzepte nicht mehr korrekt bedient werden können, müssen dann die oben benannten fachlichen oder föderalen Aspekte als Grundlage einer planerischen Entscheidungsfindung zur Auswahl von Erhebungsflächen dienen.

In diesem Sinne bedeutet die Anforderung statistischer Repräsentativität an die bestehenden Messnetze in Deutschland, dass diese „*die relevanten Merkmale der Grundgesamtheit so abbilden, dass Aussagen aus der Stichprobe auf die gesamte Population verallgemeinert werden können*" (siehe Kapitel 1.2). Insofern können Messnetze bundesweit die Repräsentativität nur verbessern, wenn diese gleichermaßen über alle Landbedeckungsklassen und über alle Bundesländer verteilt (vollständige Abdeckung und gleiche „Ziehung" repräsentativer Stichproben) und in ganz Deutschland homogen (gleiche Messparameter und Untersuchungsmethoden) verfügbar sind. Bestehende Messnetze räumlich nur in Teilen in die Stichprobenverteilung für die zukünftige Umsetzung der EU-Bodenrichtlinie einzusetzen, ist statistisch problematisch, weil durch die fehlende räumliche Abdeckung ein systematischer Fehler (Sampling Bias) auf der Ebene der Stichprobenziehung erzeugt wird.

Vollständig und homogen für Deutschland verfügbare Messnetze können durch zwei Möglichkeiten statistisch berücksichtigt werden:

- als mögliche Ebene zur Stratifizierung einer geschichteten Stichprobe, und somit zur Steigerung der Effizienz einer Stichprobenauswahl:
  Das bedeutet, das zur Verfügung stehende Messnetze, welche alle in Deutschland vorhandenen Landbedeckungen und Bodenregionen in gleichem Maße abdecken, dafür genutzt werden können, die Stichprobenauswahl messbar und objektiv zu steuern (gewichten, stratifizieren) und einzugrenzen. Durch diese mögliche Reduktion der Stichprobenzahl bei gleichzeitig durch die Stratifizierung beibehaltener Repräsentativität steigert man die Effizienz einer Strichprobenauswahl; man kann mit einer geringeren stratifizierten Stichprobenzahl eine vergleichbare oder aussagekräftigere Repräsentativität erlangen wie mit einer nicht-stratifizierten größeren Stichprobenanzahl.

- als mögliche Grundgesamtheit, wenn diese in einem solchen Umfang verfügbar sind, sodass jedes „Individuum" der Population die entsprechende Chance erhält, in die Stichprobe zu gelangen:
  Nur unter dieser Voraussetzung ist es möglich, Schätzfehler für Bodenparameter aus verschiedenen Messnetzen im Rahmen der Stichprobenauswahl sinnvoll zu verwenden. Zu bedenken ist, dass Schätzfehler im Kontext der Beschreibung der Merkmale, durch die Ermittlung eines Mittelwertes und der Streuung der Merkmalsausprägung der gewählten Stichproben um diesen Mittelwert berechnet werden und somit abhängig vom Auswahlverfahren der Stichproben sind. Hierbei gilt es zu beachten, dass demnach die Merkmale (in diesem Fall die Bodendeskriptoren) in gleicher Weise zu erheben und die Auswahl von Stichproben in gleicher Weise durchzuführen sind.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass keines der bestehenden deutschen Mess- und Erhebungsprogramme für Bodendaten diese Bedingungen in vollem Umfang und landnutzungsübergreifend erfüllt und die Bundesrepublik vollständig und homogen abdeckt. Entweder wurden Messnetze auf Bundeslandebene etabliert und sind repräsentativ für einen jeweils spezifisch definierten Teil der Landesfläche (vgl. Kapitel 3.3.2) oder sie sind als rasterbasierte Stichprobenerhebungen mit Fokus auf bestimmte Landbedeckungen wie Landwirtschaft oder Wald angelegt (siehe Kapitel 2).

Eine räumlich vollständige und homogene Abdeckung aller Landbedeckungen von Deutschland steht mit dem 2x2 km-LUCAS Master-Grid für eine korrekte statistische Stichprobenermittlung zur Verfügung.

3.3.2 Bundesweite Repräsentativität existierender Messstandorte

Im Fokus dieser Studie stehen die Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) der Bundesländer. Die Repräsentativität auf Bundesebene von BDF-Standorten für Merkmalskombinationen aus Bodentypengesellschaft, ökologischer Raumklasse und Landnutzung ist im Ergebnis der Auswertungen von Schröder et al. (2003) regional unterschiedlich und zeigt in Süddeutschland in Teilen eine deutliche Überrepräsentanz, während in Nord- und Mitteldeutschland in weiten Teilen eine leichte Unterrepräsentanz vorliegt.

Eine bundesweite Flächenrepräsentativität hinsichtlich der Nutzungen ist nicht gegeben, da die Bundesländer diesbezüglich an ihre Situation angepasste Schwerpunkte setzen. Beispielsweise werden im waldreichen Rheinland-Pfalz (42 % der Landesfläche sind Wald) ausschließlich Forststandorte untersucht, während in Sachsen mit 55 % Landesfläche unter landwirtschaftlicher Nutzung keine Forst-BDF angelegt sind (Umweltbundesamt 2022).

Im näher betrachteten Testszenario NUTS0 / LULUCF / 12 Bodenregionen mit LULUCF-Klasse Settlements zu einem Stratum zusammengefasst (41 Strata) sind – nach Zuordnung der BDF zu Bodenregionen[3] und Nutzung[4] - in 36 Strata mindestens 1 und maximal 67 BDF vorhanden. In 17 Strata sind mindestens 20 BDF vorhanden (Acker in 8 Bodenregionen, Wald in 7, Grünland in 2); in 2 Strata sind maximal nur 2 BDF vorhanden. Für 45 der insgesamt 823 BDF fehlen allerdings Angaben zur Landnutzung.

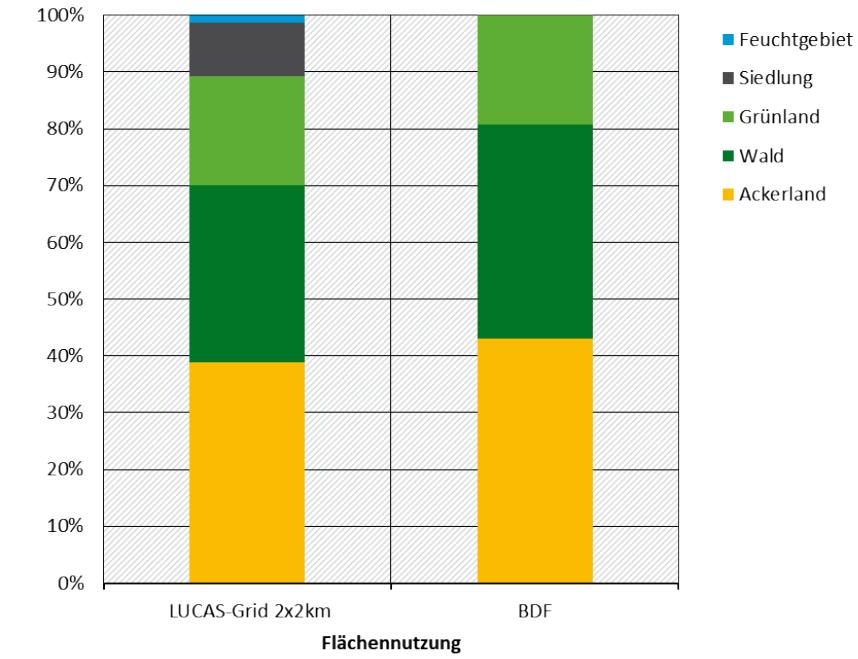
Die Verteilung der BDF entspricht für Äcker (336), Grünland (150) und Wald (293) im Wesentlichen den jeweiligen Flächenanteilen der Landnutzungen. Siedlungsbereiche sind mit 1 BDF deutlich unterrepräsentiert.

Bei der Verteilung auf Bodenregionen sind die Alpen und das Alpenvorland, die Berg- und Hügelländer (BHL) mit Sand-, Schluff- und Mergelsteinen sowie die Flusslandschaften mit BDF überrepräsentiert, während in BHL mit Ton- und Schluffschiefern, mit carbonatischen Gesteinen und in der Altmoränenlandschaft zu wenige BDF liegen. In den anderen Bodenregionen verteilen sich die BDF weitgehend flächenproportional (Abbildung 6).

[3] Anhand verfremdeter Lagekoordinaten, d.h. mit Unsicherheiten behaftet.

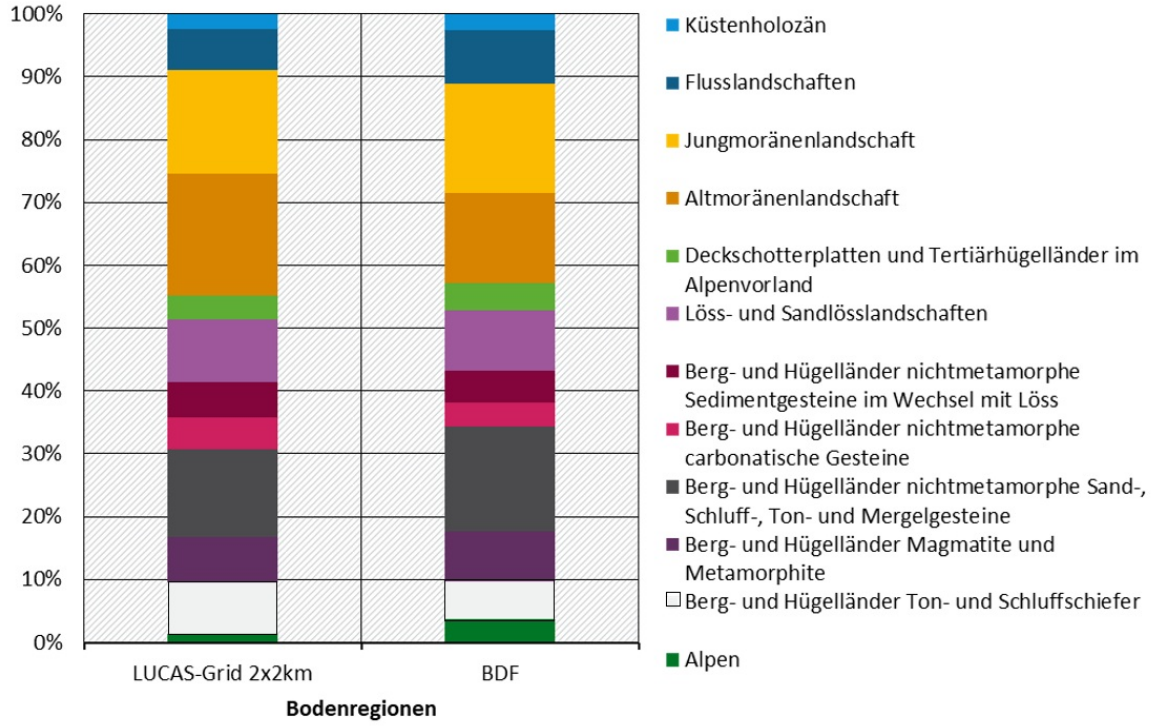
[4] Anhand von Angaben der Betreibenden.

Abbildung 5: Flächenproportionalität von BDF für Landnutzung



Quelle: eigene Darstellung

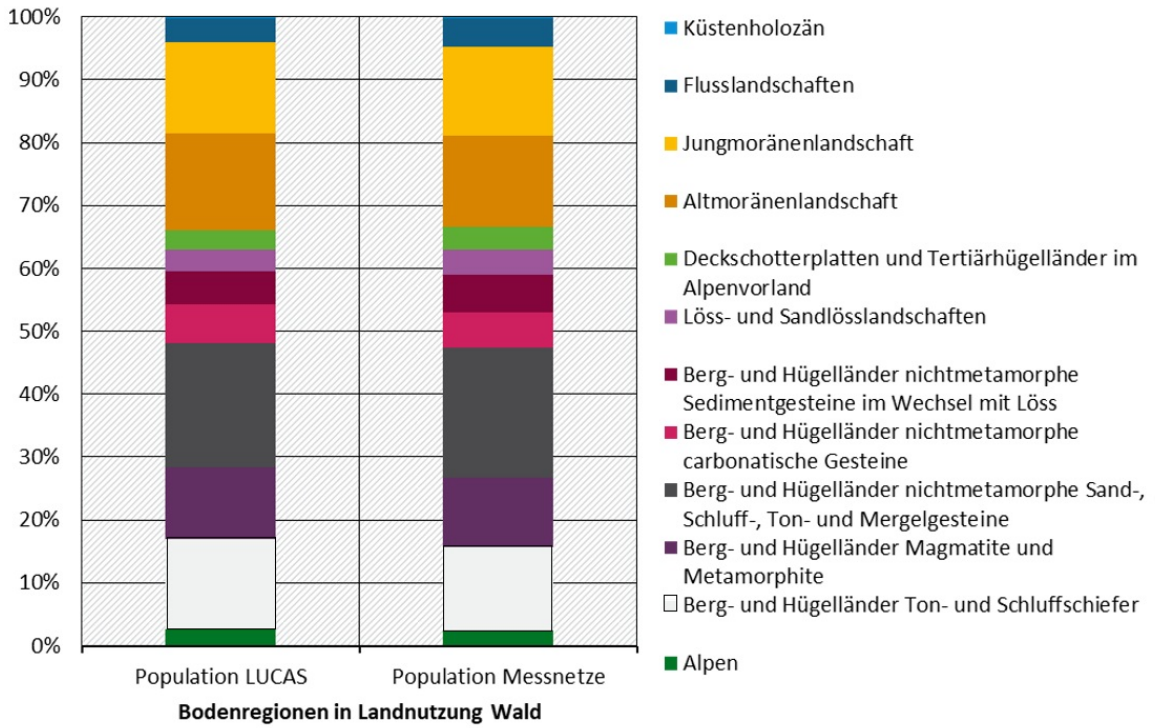
Abbildung 6: Flächenproportionalität von BDF für 12 Bodenregionen



Quelle: eigene Darstellung

Mit Hilfe der Ausgabedaten des R-Skripts lässt sich die Flächenproportionalität bestehender Messnetze betrachten, indem die Anzahl der in Strata vorhandenen Messpunkte den Flächenanteilen der Strata in Deutschland gegenübergestellt werden. Ein Darstellungsbeispiel gibt Abbildung 7.

Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der Flächenproportionalität von Messnetzen für Strata aus Bodenregion und Landnutzung Wald



Quelle: eigene Darstellung

3.4 Räumliche Verteilung von Probenpunkten

3.4.1 Technische Integration bestehender Messnetze

Neben rein statistischen Betrachtungen zur räumlichen Verteilung von Probenpunkten können weitere Vorgehensweisen in Betracht gezogen werden, um vor allem die Fragestellung der technischen Integration bestehender Messnetze in eine zukünftige Umsetzung der EU-Bodenrichtlinie zu adressieren. Ausgehend von der Vorgehensweise einer randomisiert stratifizierten Strichprobenverteilung, können in einem weiteren Schritt bestehende Messnetze auf **technisch-planerische Weise** in die Verteilung der erforderlichen Anzahl an Proben je Stratum rechnerisch einbezogen werden. Diese Ergänzung kann aufgrund der fehlenden statistischen Voraussetzungen (Kapitel 3.3.1) hypothetisch zur Planung beitragen, wenn man an dieser Stelle **artifiziell** eine gleichermaßen randomisierte Stichprobenverteilung dieser Messnetze annimmt.

- Zu beachten ist, dass die Verteilung und Bewertung einer solchen hypothetischen Vorgehensweise stets als solche behandelt und kenntlich gemacht werden sollte.
- Es besteht die Gefahr möglicher Verwechslungen mit tatsächlich randomisiert stratifizierten Stichprobenziehungen und möglicher Fehlinterpretationen der erhaltenen Schätzungen.

Tabelle 16 (siehe oben) beschreibt entsprechende Anwendungsfälle mit verschiedenen Szenarien unter Berücksichtigung bestehender Messnetze anhand einer beispielhaften Auswahl. Die Grundlage bildet das LUCAS Master Grid in Deutschland, welches mit rund 90.000 Punkten im Abstand von 2 km alle Landbedeckungen in homogener Weise gleichermaßen abdeckt. Das LUCAS Master Grid steht in einem solchen Umfang zur Verfügung, der die statistisch vertretbare Annahme ermöglicht, dass dieses als Grundpopulation gesehen werden kann (Kleinewillinghöfer et al. 2022) auch wenn Deutschland hierdurch nicht vollflächig erfasst wird. Die zweite Ebene bilden die bestehenden Messnetze, die nach Möglichkeit bevorzugt berücksichtigt werden sollen (Synergieeffekte, Nachhaltigkeit vgl. Kapitel 3.3.1).

Die Umsetzung im R-Skript wurde mit den vorliegenden Daten nach Absprache mit der Fachbegleitung wie folgt durchgeführt:

a) Wahl des LUCAS Master Grid als Gesamtpopulation

b) Ermittlung der benötigten Probenpunkte je Stratum nach Bethel (1989)

c) Integration vorhandener Messnetzpunkte durch bevorzugte Auswahl dieser je Strata

d) Anpassung der verfügbaren bestehenden Messnetzpunkte mit der ermittelten Stichprobengröße je Stratum:

   Falls mehr vorhandene Messnetzpunkte im Stratum vorhanden sind, als für die Erfüllung eines artifiziellen Schätzfehlers (artificial CV) benötigt werden, findet eine zufällige Auswahl aus den vorhandenen Messnetzpunkten statt.

   Falls weniger vorhandene Messnetzpunkte im Stratum vorhanden sind, als für die ermittelte Stichprobengröße benötigt werden, findet eine Ergänzung durch eine zufällige Auswahl aus den im Stratum befindlichen LUCAS Master Grid Punkten statt.

e) Die Lage der hierdurch ermittelten technischen Verteilung von Probenahmepunkten wird in Form von geografischen Koordinaten in einer CSV-Datei ausgegeben.

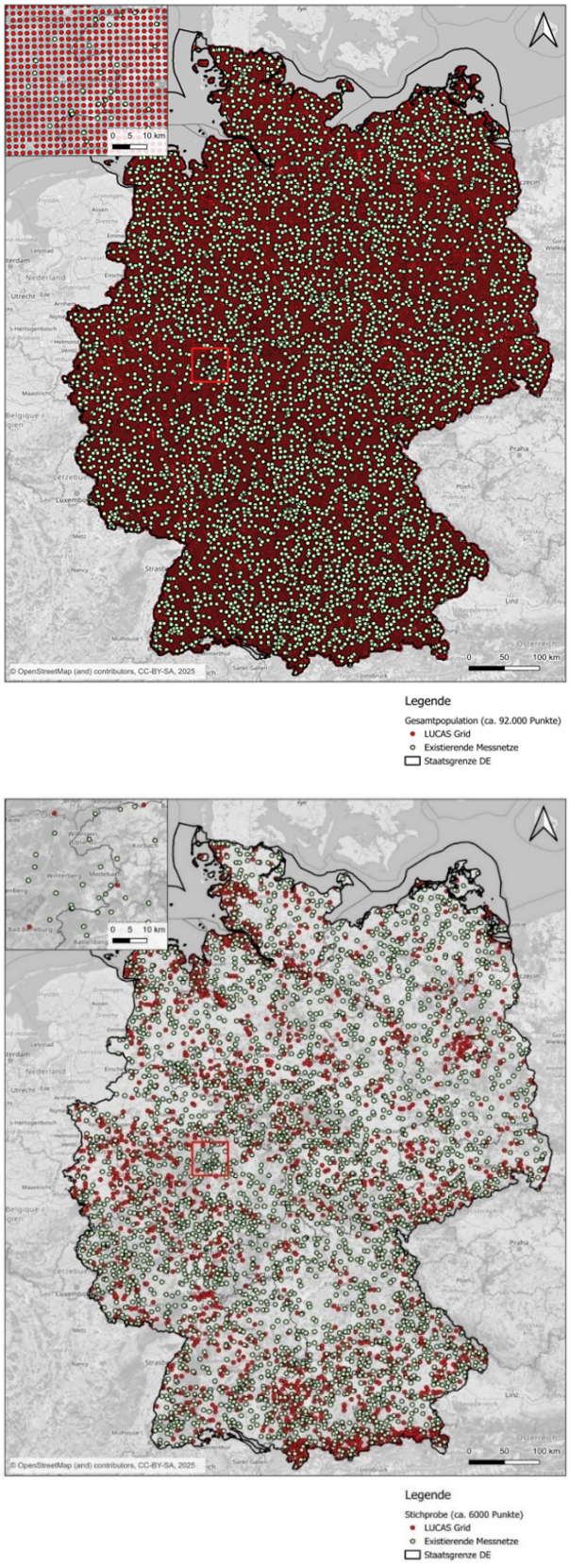
f) Die CSV-Datei kann als GeoPackage in ein GIS übergeben, dort analysiert und in Form von Karten visualisiert werden.

3.4.2 Anwendungsbeispiel einer technischen Integration bestehender Messnetze

Im Rahmen dieser Studie wurde das im R-Skript integrierte oben beschriebene Verfahren anhand von Anwendungsbeispielen getestet und die Ergebnisse wurden zusätzlich als GeoPackage ausgegeben. Ein Beispiel ist in Abbildung 8 kartographisch dargestellt. Bei einer weiteren Ziehung würde aufgrund der Zufallsauswahl ein anderes Ergebnis generiert. Dies gilt sowohl für bestehende Messnetze in denjenigen Strata, in denen bereits eine Übererfüllung durch bestehende Messnetze vorliegt, als auch für die LUCAS Master Grid Punkte in den Strata, in denen die Abdeckung durch bestehende Messnetzpunkte noch nicht zur Erreichung des artificial CV (siehe Kapitel 3.4.1) ausreichend ist. Es ist zu beachten, dass die Funktionalität des R-Skripts erlaubt, Messnetze in verschiedenen Kombinationen und unterschiedlicher Auswahl durch den Prozess laufen zu lassen. Die räumlichen Analysen und fachlichen Prüfungen, inwieweit die erzeugte Verteilung von Probennahmeflächen für eine Erhebung im Gelände geeignet sind, sind hiernach in einem GIS fortzuführen. GIS eignen sich für die hier notwendigen räumlichen Überlagerungen von Datenquellen und Analysen und Weiterbearbeitung von Geodaten.

Bestehende Messnetze können als technische Eingangsdaten eingebunden werden (hier wurde anhand einer Auswahl von verfügbaren Punktdaten getestet). Um eine Aussage für ausgewählte Messnetze wie oben beschrieben zu treffen, kann der bestehende Datensatz, z. B. BDF, für eine Neuberechnung im Skript ausgeführt werden.

Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der Gesamtpopulation (oben) und einer Beispiel-Stichprobe von Probenpunkten (unten)



Quelle: eigene Darstellung

4 Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Der Abgleich des Umfangs der bestehenden Messnetze in Deutschland mit den Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie mit Fokus auf der Bodendauerbeobachtung zeigt, dass ein großer Teil der verpflichtenden Bodendeskriptoren durch bestehende Programme abgedeckt wird. Insbesondere Standardparameter wie Bodentextur, organischer Bodenkohlenstoff, Nährstoffgehalte, Schwermetalle, pH-Wert sowie Trockenrohdichten in Ober- und Unterboden werden an den meisten Bodendauerbeobachtungsflächen (60–80 % der BDF) sowie auch in anderen bundesweit angelegten Erhebungen erfasst. Für einige Deskriptoren besteht hingegen nur eine mittlere oder geringe Abdeckung (< 60 % bzw. < 20 % der BDF), etwa für Wasserspeicherkapazität, Luftkapazität oder die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Diese lassen sich jedoch aus anderen Standardparametern abschätzen. Weitere Deskriptoren, insbesondere PFAS sowie der obligatorische biologische Deskriptor „DNA-Metabarcoding für Pilze und Bakterien“, werden in den Bodendauerbeobachtungen nach den vorliegenden Erkenntnissen und Datengrundlagen bislang nicht erfasst und sind nur in speziellen Programmen oder künftigen Erhebungen vorgesehen.

Hinsichtlich der räumlichen Repräsentativität bestätigt sich, dass die bestehenden Messnetze regional und nutzungsbezogen unterschiedlich dicht ausgeprägt sind. Kein bestehendes Messprogramm deckt alle Landnutzungen bundesweit homogen und statistisch vollständig ab. Die Tests mit dem weiterentwickelten R-Skript verdeutlichen, dass – je nach gewähltem Raumbezug und Variablenauswahl – mehrere tausend bis 10-Tausende Probenpunkte (siehe Kapitel 3.1) erforderlich wären, um die statistischen Anforderungen der EU-Bodenrichtlinie bundesweit zu erfüllen. Eine Einbindung vorhandener Messnetze ist technisch möglich, die ausgegebenen Ergebnisse zur Variabilität sind jedoch nur eingeschränkt belastbar, wenn Messnetze nicht ursprünglich randomisiert und einheitlich angelegt wurden.

Insgesamt ist festzustellen, dass Deutschland über eine umfassende Datengrundlage für eine zukünftige EU-konforme Bodenüberwachung verfügt, dass jedoch für einzelne Bodendeskriptoren, biologische Parameter und für die bundesweit gleichmäßige räumliche Abdeckung weitergehende Ergänzungen, Harmonisierung und methodische Weiterentwicklungen notwendig sind. Die räumliche Verteilung von Probenpunkten kann durch Anwendung des weiterentwickelten R-Skripts konzeptionell ausgestaltet werden.

Im Rahmen dieser Studie wurden die gegebenen statistischen Voraussetzungen zur Integration bestehender Messnetze in eine Stichprobenverteilung zur zukünftigen Umsetzung der EU-Bodenrichtline in Deutschland geprüft. Aus den Untersuchungen ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- Die Integration bestehender Messnetze ist technisch in der Auswahl von Probenpunkten möglich, statistisch sind die Ergebnisse jedoch nur hypothetisch zu verwenden (siehe Kapitel 3.4.1). Zur Verwendung dieser technischen Integration ist stets darauf zu achten, an welcher Stelle mit artifiziellen Werten gearbeitet wurde und dass diese nicht ohne entsprechenden Hinweis für weitergehende Analysen genutzt werden.

- Die Datensätze der bestehenden Messnetze wurden in den zur Verfügung gestellten Versionen untersucht und technisch geprüft. Eventuelle Inkonsistenzen in Datenformat oder Inhalt, die zum Abbruch in der Prozessierung des R-Skripts führen, wurden bereinigt. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass teilweise Lagekoordinaten verfremdet oder als größere Fläche angegeben wurden und von der tatsächlichen Position der Erhebungsfläche abweichen können. Für eine finale Festlegung der Probenahmeflächen ist eine Abstimmung mit den Messnetzbetreibenden nötig. Neu zur Verfügung gestellte oder präzisere Versionen der Messnetz-Geodatensätze sind jeweils er-

neut zu prüfen und eventuell, den Anforderungen des R-Skripts entsprechend, zu bereinigen (siehe EFTAS GmbH 2026).

- Das weiterentwickelte R-Skript wurde geprüft, die Lauffähigkeit gewünschter Funktionalitäten getestet und hergestellt sowie um neue Funktionalitäten ergänzt. Für die weitergehende Begutachtung und Verteilung von Probenahmepunkten bietet das R-Skript jedoch nur begrenzt Möglichkeiten. Für eine adäquate weitere Bearbeitung stellen GIS-Werkzeuge wie zum Beispiel QGIS die empfohlenen Instrumente dar.
- Zum weiteren Vergleich empfiehlt es sich, die im Rahmen dieser Studie verwendeten und geprüften Messnetzdatensätze entsprechend den gewünschten Fragestellungen der Fachbegleitung auszuwählen, ggf. durch Datensätze mit nicht verfremdeten Lagekoordinaten zu ersetzen und in jeweils separaten Prozessschleifen anhand des R-Skripts zu testen und deren Ergebnisse in einem GIS zu vergleichen.

Eine Möglichkeit, um die Fragestellungen weiter zu bearbeiten, wäre eventuell die Verwendung einer zweistufigen Ermittlung der Stichprobenverteilung (siehe Anhang E).

5 Quellenverzeichnis

Ballabio, C. (2024): SHL sampling strategy BE.

Barth, N., W. Borho, E. Cordsen, C. Heller, H. Höper, B. Ludwig, M. Marx, H. Meesenburg, P. Spörlein und M. Weller (2022): Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. LABO Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/Methodenhandbuch_BDF.pdf.

Bethel, J. (1989): Sample Allocation in Multivariate Surveys. Survey Methodology 15 (1): 47–57.

Cochran, W. G. (1977): Sampling Techniques. Dritte Auflage. Auflage. John Wiley & Sons. New York.

EFTAS GmbH (2026): Technische Beschreibung R-Skript AP2 zum Projekt „Repräsentativität des deutschen Messnetzes für Bodendaten am Beispiel der Probenpunkte und Deskriptoren der vorgeschlagenen EU-Bodenrichtlinie“ Projektnr 203402, 91 002-2/00031.

Richtlinie (EU) 2025/2360 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. November 2025 zur Bodenüberwachung und für Bodenresilienz (Bodenüberwachungsgesetz). (2025). *Amstblatt*, L 2360, ELI: **http://data.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj**[legislation]FBU & LAGA (2023): Methodensammlung Feststoffuntersuchung. Version 3.0.

Jänsch, S., Scheffczyk, A., & Römbke, J. (2023). *Bewertung der Biologischen Vielfalt mittels DNA-Extraktion aus Bodenproben von Dauerbeobachtungsflächen (BDF)* (Deutschland. Umweltbundesamt, ed.). Umweltbundesamt. https://doi.org/10.60810/openumwelt-6214

Jones, A., A. Origiazzi, P. Panagos, S. Scarpa, C. Havenga und E. Van Eynde (2024): LUCAS 2022 Soil Module. JRC Technical Reports. Joint Research Centre (Europäische Kommission). Luxembourg.

Kaufmann-Boll, C., M. Kern, M. Kastler, F. Müller, A. Toschki, J. Oellers, M. Steffens, M. Wiesmeier, K. Schönthaler, M. Wolf, C. Schönfelder, C. Ristok und K. Paschke (2025): Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz. UBATEXTE 75/2025. Umweltbundesamt. Dessau. https://doi.org/10.60810/openumwelt-7921

Kaufmann-Boll, C., Kern, M., Kastler, M., & Mathews, J. (2022). Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für Bodenbiologie und organische Bodensubstanz (Deutschland. Umweltbundesamt, ed.). Umweltbundesamt. https://doi.org/10.60810/openumwelt-6826

Kaufmann-Boll, C., Kern, M., & Niederschmidt, S. (2020). *Bodendaten in Deutschland* (Deutschland. Umweltbundesamt, ed.). https://doi.org/10.60810/openumwelt-5769

Kleinewillinghöfer, L., P. Olofsson, E. Pebesma, H. Meyer, O. Buck, C. Haub und B. Eiselt (2022): Unbiased Area Estimation Using Copernicus High Resolution Layers and Reference Data. Remote Sensing 14 (19): 4903.

Lohr, S. L. (2021): Sampling - Design and Analysis. Dritte Auflage. Auflage. Chapman and Hall/CRC. New York.

Schilli, C., Prof. Dr. J. Rinklebe, Prof. Dr. G. Lischeid, C. Kaufmann-Boll und Dr. S. Lazar (2011): Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden- Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze - Teil B: Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings. UBA Texte 90/2011 Forschungskennzahl 3707 71 203. Studie. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. https://openumwelt.de/handle/123456789/9367

Schröder, W., G. Schmidt und R. Pesch (2003): Repräsentanz und Vergleichbarkeit von Daten und Flächen der Bodendauerbebachtung. J. Plan Nutr. Soil Sci. 166: 649–659.

Umweltbundesamt (2022): Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für Bodenbiologie und organische Bodensubstanz. 67. Abschlussbericht. Dessau-Rosslau.

A Anhang: Datengrundlagen

Name	Datentyp	Urheber/Quelle	Erläuterung
JRC Rasterkarten für Oberböden	Geodaten (TIF, Flächendaten)	**JRC**/*Auf Anfrage:* https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets	Gemessene Parameter im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), 500 m Auflösung: *Bodenart, Grobboden, CACO3, KAK, pH, P, Schwermetalle, Bodenerosion durch Wasser, OC, N, BD)*
BGR Rasterkarten für Böden	Geodaten (TIF, Flächendaten)	**BGR**/*Öffentlich:* https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/	Gemessene Parameter im Oberboden, basierend auf BÜK250, 100 und 500 m Auflösung: *Gründigkeit, Ton, Schluff, Sand, LD, Corg)* 250 m Auflösung: *kapillarer Aufstieg, Grundwasserstufen*
BGR Hintergrundwerte in Böden in Deutschland 1:1.000.000	Geodaten (SHP, Polygone)	**BGR/***Öffentlich:* https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/datasets/portal/9950293b-938a-4192-9eb0-288de8fb32f0	Hintergrundwerte von anorganischen Stoffen im Boden (tiefengewichtete Mittelwerte) (*Antimon, Arsen, Beryllium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Uran, Vanadium, Zink*)
pH Karten TI Geonode	Geodaten (TIF, Flächendaten)	**Thünen**/*Öffentlich:* https://atlas.thuenen.de/datasets/pH_map_0_30:geonode:pH_map_0_30/metadata_detail	pH-Wert (H_2O) in Unter- und Oberboden für Rasterzellen mit überwiegend Wald oder landwirtschaftlich genutzter Fläche (nach CORINE Land Cover CLC10), BZE-basiert
BGR Grundwasserstufen	Geodaten	**BGR**/*Öffentlich:* https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de&core#/datasets/portal/33b088ba-49e9-4186-a9ef-80dee2f92586	BGR Grundwasserstufen in Deutschland BÜK1000-basiert (2014), Maßstab 1:1.000.000
Bodendauerbeobachtungsflächen	Geodaten (JSON/GPKG-Punktdaten)	**UBA**/*Öffentlich:* https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/boden-schuetzen/boden-beobachten-bewerten#undefined	Stammdaten zu Messstandorten und -parametern der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF). Die Informationen entsprechen der INSPIRE-Meldung an die EU von 2018. Lagekoordinaten sind verfremdet.
Auszug FIS Boden zu Messmethoden an BDF	Tabelle (Excel)	**UBA/***verwaltungsintern*	keine einheitlichen und vollständigen Informationen enthalten (nicht verwendbar)
Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE LW)	Geodaten (SHP, Punkte)	**Thünen**/Öffentlich*:* https://atlas.thuenen.de/catalogue/#/dataset/11	Punktdaten mit Stammdaten zu den Probenahmepunkten und wichtigsten in Labor und Feld erhobenen Daten der BZE LW (Stand 2020) Lagekoordinaten sind verfremdet.
Bodenzustandserhebung Wald (BZE Wald)	Geodaten (SHP, Punkte)	**Thünen**/ Öffentlich *https://gdi-catalog.bmel.de/srv/eng/catalog.search#/metadata/1c3507ce-6631-4175-b8dd-6444fa3e9472*	Punktdaten der Probenpunkte für die BZE I (Stand 2025). Räumliche Auflösung der Daten: 4x4 km (aggregierte Kachel des JRC-Soil-Grids: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/reference_grids/reference_grids.cfm)
LUCAS 2027 TOPSOIL	Geodaten (SHP, Punkte), Tabelle (csv)	**JRC/** *verwaltungsintern*	Standort-Daten der geplanten Probenpunkte für die 2027 Kampagne

Name	Datentyp	Urheber/Quelle	Erläuterung
LUCAS 2022 TOPSOIL	Geodaten (SHP, Punkte), PDF	**JRC/***verwaltungsintern (Technical report ist öffentlich zugänglich***:** Jones et al. 2024)	1.290 Standort-Daten der tatsächlichen Probenpunkte & geplante Analyse Parameter aus Jones et al. 2024)
LUCAS 2018 TOPSOIL	Geodaten (SHP, Punkte)	**JRC/***Auf Anfrage:* https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas-2018-topsoil-data	Standort und Analytik-Daten für 18.984 Probenpunkte (0-20, tlw. 30 cm Tiefe) der LUCAS 2018 TOPSOIL Kampagne in der ganzen EU (pH, Corg, CaCo3, N, P, K, EC, Fe, Al, Korngrößenverteilung)
Intensives Forstliches Umweltmonitoring (ICP Forests) Level II	Geodaten (SHP, Punkte)	**National Focal Centre' (NFC) /** *Auf Anfrage*	Standort-Daten
Humusmonitoring NRW (in Tabellen HM NRW)	Geodaten (SHP, Punkte)	**LANUK NRW/** *verwaltungsintern aus FKZ 3719 71 204 0*	Standort-Daten
Umweltprobenbank (UPB)	Geodaten (SHP, Punkte)	**UBA/** *verwaltungsintern aus FKZ 3719 71 204 0*	Standort-Daten
Biodiversitätsexploratorien (in Tabellen Bio. Ex.)	Geodaten (SHP, Punkte)	**BEO Koordinationsbüro- Senckenberg Gesellschaft/***Öffentlich:* https://www.biodiversity-exploratories.de/en/public-data-bexis/	Standort-Daten
BioDive4Soil	Geodaten (SHP, Punkte)	**UBA**/*verwaltungsintern*	Standort-Daten der randomisiert-stratifiziert ausgewählten Untersuchungsflächen für die Basiserhebung Bodenbiodiversität 2025-2029 (Punktlage ist noch nicht abschließend festgelegt)
eursr5000 (40 Bodenregionen in der EU im Maßstab 1:5.000.000)	Geodaten (GPKG, Polygone)	**BGR/JRC***/Öffentlich:* http://data.europa.eu/88u/dataset/ae71ffee-1ae9-4624-ae3f-f49513fe9dcb	BGR / JRC 2005: Soil Regions of the European Union and Adjacent Countries1:5.000.000 (EUSR5000)
bgl5000_lea_v40 (12 Bodenregionen von Deutschland im Maßstab 1:5.000.000)	Geodaten (GPKG, Polygone)	**BGR***/Öffentlich* https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/datasets/portal/57399937-858F-4065-AC1E-62C1788AFCEE	BGR 2023: Bodengroßlandschaften von Deutschland 1:5.000.000 (Darin sind 12 Bodenregionen [BR] enthalten. Die Bodengroßlandschaften (BGL) untergliedern jede der 12 Bodenregionen in Untereinheiten (insgesamt 36)).
NUTS-Regionen NUTS 2, NUTS 1	Geodaten (Raster)	**Destatis***/Öffentlich* https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets	DE NUTS0 500 m Auflösung = Bund DE NUTS1 500 m Auflösung = Bundesländer DE NUTS2 500 m Auflösung = Regierungsbezirke / Regionen
EEA Copernicus Land Monitoring Service: CORINE Land Cover	Landnutzungskategorien (Raster)	**JRC***/Öffentlich* https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets	CLC 500 m Auflösung (44 Klassen) CLC 100 m Auflösung Auswahl von 10 Klasssen Übersetzt in Landnutzungskategorien, ausgenommen Wasserkörper, gemäß der Verordnung (EU) 2018/841. [Emissionen und Abbau von THG im LULUCF-Sektor (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft)]

Name	Datentyp	Urheber/Quelle	Erläuterung
LUCAS Master Grid	Excel-Tabelle (mit Koordinaten, umwandelbar in Geodaten)	***EUROSTAT/***Öffentlich https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas/database/primary-data	2x2km (4km^2) Punktgitter mit über 1.000.000 Punkten über der gesamten EU, die mit den CLC Landnutzungskategorien und anderen Informationen angereichert sind.

B Anhang: Filterfähige Liste der Bodendeskriptoren

Ergänzend zum vorliegenden Gutachten wird eine Liste der SML-Deskriptoren im Excel-Format bereitgestellt. Die Deskriptoren sind in Abhängigkeit ihrer Zuordnung zur Art der Bodendegradation eingefärbt (Abbildung 9).

Abbildung 9: Erläuterung der Einfärbung in der Liste der Bodendeskriptoren

Einfärbung	Zellbereich	Bedeutung
	Spalten C & D	Deskriptoren der Bodendegradationsart *Versalzung*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Verlust an organischem Bodenkohlenstoff*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Unterbodenverdichtung*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Oberbodenverdichtung*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Überschüssiger Nährstoffgehalt im Boden*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Bodenerosion / Bodenversiegelung und Bodenabtrag*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Bodenkontamination (Schwermetalle)*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Bodenkontamination (organische Kontaminanten)*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Bodenkontamination (PFAS, Pestizide, Andere Kont.)*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Verringerung der Wasserrückhaltung und Infiltration des Bodens*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Versauerung*
		Deskriptoren der Bodendegradationsart *Verlust an Bodenbiodiversität*
Lorem Ipsum...	Zellen C2:R2	Inhalte aus der deutschen Fassung der Bodenrichtlinie
Lorem Ipsum...	Zellen S2:V2	Ergänzende Informationen aus Barth et al. /Methosa/BBodSchV
0	Spalte B	Deskriporen, die nicht relevenat für das Gutachten sind
X	Spalte L	Fakultative Deskriptoren

Quelle: eigene Darstellung

Folgende Felder sind in der Liste der SML-Deskriptoren enthalten:

a) Deskriptor-Nr. Gutachten

b) Relevanz für Gutachten (1 = relevant)

c) Art der Bodendegradation

d) Bodendeskriptor Anhang I und II (Bezeichnung)

e) Anhang I A Bodendeskriptoren mit auf Unionsebene festgelegten Kriterien für einen gesunden Bodenzustand (wenn zutreffend angekreuzt)

f) Anhang I B Bodendeskriptoren mit auf Ebene der Mitgliedsstaaten festgelegten Kriterien für einen gesunden Bodenzustand (wenn zutreffend angekreuzt)

g) Anhang I C Bodendeskriptoren ohne Kriterien (wenn zutreffend angekreuzt)

h) Anhang I D Indikatoren für Bodenversiegelung und Bodenabtrag (wenn zutreffend angekreuzt)

i) Anhang II A Methodik zur Bestimmung oder Schätzung der Werte von Bodendeskriptoren (wenn zutreffend angekreuzt)

j) Anhang II B Keine Methodik zur Bestimmung oder Schätzung der Werte von Bodendeskriptoren (wenn zutreffend angekreuzt)

k) Anhang II C Methodische Mindestkriterien für die Bestimmung der Werte der Indikatoren für Bodenversiegelung und Bodenentnahme (wenn zutreffend angekreuzt)

l) Fakultative Bodendeskriptoren Anhang I (wenn zutreffend angekreuzt)

m) Kriterien für einen gesunden Bodenzustand - unverbindliche nachhaltige Zielwerte Anhang I A and B

n) Von der Erfüllung des entsprechenden Kriteriums ausgenommene Landflächen Anhang I A and B

o) Referenzmethode Anhang II B Option 1

p) Referenzmethode Anhang II B Option 2

q) Methodische Mindestkriterien Anhang II B

r) Validierte Transferfunktion erforderlich (bei Anwendung einer anderen als der Referenzmethode)? Anhang II B

s) Für BDF empfohlene Methoden nach Barth et al. 2022

t) auf BDF obligatorisch oder ergänzend nach Barth et al. 2022

u) Empfohlene Methoden nach Methodensammlung (Methosa) Feststoffuntersuchung (2023)

v) Methoden BBodSchV 2021

w) Passende Parameter in JSON BDF 2018 (Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/boden-schuetzen/boden-beobachten-bewerten#undefined)

C Anhang: Prüfung der Grundlagendaten zur Ermittlung der Variabilität von Bodeneigenschaften

Bodenparameter	**Verfügbare Datenquellen für DE**	**Geeignete Datenquelle für Analysen*** *Datei*
Bodenart / Textur	• JRC USDA Texture / Bodenart Oberboden, LUCAS-basiert (2009), 500 m Auflösung • JRC Grobe Fragmente fragments Oberboden (%) Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m • BGR Ton T, Schluff U und Sand S in % (9 cm, 31 cm und 51 cm), BÜK250-basiert (2024), 100 und 500 m Auflösung	BGR Sand in % 9 cm, BÜK250 basiert, 100 m Auflösung *bueck250_100_9cm_S_Prozent* *bueck250_100_31cm_S_Prozent*
		BGR Schluff in % 9 cm, BÜK250 basiert, 100 m Auflösung *bueck250_100_9cm_U_Prozent* *bueck250_100_31cm_S_Prozent*
		BGR Ton in % 9 cm, BÜK250 basiert, 100 m Auflösung *bueck250_100_9cm_T_Prozent* *bueck250_100_31cm_S_Prozent*
		JRC Grobbodenanteil (%) *DE_CF_500* Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m
Durchwurzelbarkeit	• BGR Gründigkeit in cm; Auflösung 100 m	*bueck250_100_Gruendigkeit_cm*
Dichte	• JRC Trockenrohdichte (g cm^3) in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m • BGR Effektive Lagerungsdichte (g cm^3) (9 cm, 31 cm und 51 cm), BÜK250-basiert (2024), 100 und 500 m Auflösung	BGR Effektive Lagerungsdichte (g cm^3) in 51 cm Tiefe; Auflösung 100 m oder 500 m *bueck250_100_51cm_LD_Wert* JRC Trockenrohdichte in der Tiefe 20-30 g cm^3); Auflösung 500 m *DE_BD2030_500*
pH-Wert	• JRC pH in Calciumchlorid im Oberboden, LUCAS-basiert (Survey 2009, 1947 Punkte in DE, davon 945 LW / 410 Wald), Auflösung 500 m • Thünen Institut pH-Wert (H_2O) für Rasterzellen mit überwiegend Wald oder landwirtschaftlich genutzter Fläche (nach CORINE Land Cover CLC10), BZE-basiert (ca. 3100 Punkte LW, 1900 Punkte Wald), Oberboden – 0-30cm Tiefe, Auflösung 1 km	Thünen Institut pH-Wert (H_2O) Oberboden 0-30 cm Tiefe, Auflösung 1 km *(höhere Belastbarkeit aufgrund einer größeren Stichprobe aus BZE-Punkten gegenüber LUCAS)* *geonode__pH_map_0_30* JRC pH in Calciumchlorid im Oberboden, Auflösung 500 m *DE_pH_500*
Organischer Kohlenstoff	• JRC Organischer Kohlenstoff (g kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m • BGR Organischer Kohlenstoffgehalt (%) (9 cm, 31 cm und 51 cm), BÜK250-basiert (2024), 100 und 500 m Auflösung	BGR Organischer Kohlenstoffgehalt (%) in 9 cm Tiefe; Auflösung 100 m *bueck250_100_9cm_CorgProzent* *bueck250_500_9cm_CorgProzent* JRC Organischer Kohlenstoff (g kg^{-1}) im Oberboden, Auflösung 500 m *DE_OC_500*

Bodenparameter	**Verfügbare Datenquellen für DE**	**Geeignete Datenquelle für Analysen*** *Datei*
Kationenaustausch-kapazität	• JRC Kationenaustauschkapazität (cmol kg^{-1}) im Oberboden; LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m	*DE_CEC_500*
Phosphor	• JRC Phosphorgehalt (mg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m	*DE_P_500*
Stickstoff	• JRC Stickstoffgehalt (mg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m	*DE_N_500*
Kalkgehalt	• JRC Calciumcarbonat (mg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m	*DE_CaCO3_2_500*
Schwermetalle	• JRC Cadmiumgehalt (mg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m • JRC Kupfergehalt (mg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m • JRC Quecksilbergehalt (µg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m • JRC Zinkgehalt (mg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 250 m • BGR Hintergrundwerte von anorganischen Stoffen in Böden in Deutschland 1:1.000.000, basierend auf Profilinformationen und Messdaten (2017) (Vektorgeodaten, nicht kontinuierlich)	JRC Quecksilbergehalt (µg kg^{-1}) im Oberboden, LUCAS-basiert (2009), Auflösung 500 m *DE_Hg_500 (Hg zeigt die beste Analogie zu BGR-Hintergrundwerten)*
Grundwasserstand	• BGR Grundwasserstufen in Deutschland BÜK1000-basiert (2014)	*GWS1000_250 (Grundwasserstufen wurden in numerische Daten umgewandelt GWS1=2 dm u. GOK, GWS2=6 dm u. GOK, GWS3=10.5 dm u. GOK, GWS4=14.5 dm u. GOK, GWS5 =18 dm u. GOK, GWS6=20 dm u. GOK)*

* Die Auswahl der geeigneten Datenquellen erfolgte auf Basis des Vergleichs der verfügbaren Datensätze, die in der mittleren Spalte aufgelistet sind. Darüber hinaus stehen keine weiteren geeigneten bundesweiten Datensätze für Bodenparameter zur Verfügung.

D Anhang: Landnutzungskategorien

D.1 Zuordnung Landbedeckungskategorien

LULUCF (Leerzeichen und Groß- und Kleinschreibung beibehalten)	CLC (https://land.copernicus.eu/content/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html/) **kursiv = nicht im verwendeten Datenbestand für DE vertreten*
1 Cropland	**211 Non-irrigated arable land** *212 Permanently irrigated land** *213 Rice fields** *221 Vineyards** **222 Fruit trees and berry plantations** *223 Olive groves** *241 Annual crops associated with permanent crops** **242 Complex cultivation patterns** *224 Agro-forestry areas**
2 Forest Land	**311 Broad-leaved forest** **312 Coniferous forest** **313 Mixed forest** **324 Transitional woodland-shrub**
3 Grassland / Grazing Land	**231 Pastures** **243 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation** **321 Natural grasslands** **322 Moors and heathland** *323 Sclerophyllous vegetation** **411 Inland marshes** **421 Salt marshes**
4 Other land	**331 Beaches, dunes, sands** *332 Bare rock** *333 Sparsely vegetated areas** *334 Burnt areas** *335 Glaciers and perpetual snow**
5 Settlements/Artificial/Built-Up	**111 Continuous urban fabric** **112 Discontinuous urban fabric** **121 Industrial or commercial units** **122 Road and rail networks and associated land** **123 Port areas** **124 Airports** **131 Mineral extraction sites** **132 Dump sites** **133 Construction sites** **141 Green urban areas** **142 Sport and leisure facilities**
6 Wetlands	**412 Peatbogs** *422 Salines** *423 Intertidal flats** **511 Water courses** **512 Water bodies** *521 Coastal lagoons** **522 Estuaries**

LULUCF (Leerzeichen und Groß- und Kleinschreibung beibehalten)	**CLC (https://land.copernicus.eu/content/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html/)** **kursiv = nicht im verwendeten Datenbestand für DE vertreten*
	523 Sea and ocean

D.2 Zuordnung der LULUCF-Kategorien zu Landnutzungen bestehender Messnetze

LULUCF	**BDF-Landnutzungsklassen (2018)**	**BZE LW- Landnutzungsklassen**	**LUCAS 2018- Landnutzungsklassen (LC0)**
1 Cropland	Acker	A (Ackernutzung & Grünlandwechselwirtschaft), SO (Sonderkulturen)	Cropland
2 Forest Land	Forst	/	Woodland
3 Grassland / Grazing Land	Grünland	G (Dauergrünlandnutzung)	Grassland
4 Other land	/	/	Bare land, Shrubland
5 Settlements/Artificial/Built-Up	Urban	/	Artificial land
6 Wetlands	/	/	Wetlands
0 Keine Zuordnung möglich	Sonstige, Brache	/	/

E Anhang: Ausblick auf Möglichkeiten für die Auswahl und Festlegung von Probenpunkten nach Feststehen von Berichtseinheiten und Raumgliederung

Im Ergebnis der Anwendung des durch das JRC bereitgestellten und weiterentwickelten R-Skripts liegen Soll-Anzahlen von Probenpunkten in Bodeneinheiten (*soil units*) vor, mit denen die statistische Anforderung eines Variationskoeffizienten (CV) von 5 % für Bodeneigenschaften als voraussichtlich erreichbar berechnet wurde. Das Skript ermittelt diese Soll-Anzahlen mit geeigneten statistischen Verfahren (Bethel 1989) und berücksichtigt dabei optional existierende Probenahmestellen in den Bodeneinheiten.

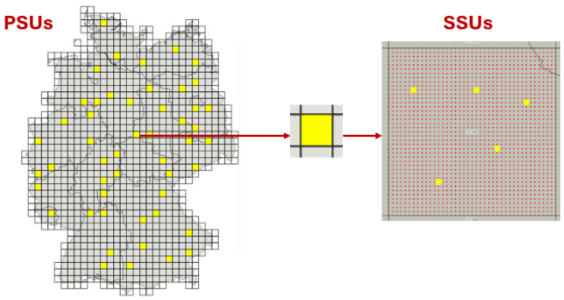
Beispielergebnis:

Bodeneinheit	Soll-Anzahl	Ist-Anzahl (exist. Probenahmestellen)	Fehlende Probenahmestellen
1*11*3	25	11	14

Existierende Probenahmestellen können in den Bodeneinheiten unterschiedlich verteilt sein, z. B. können sie geklumpt in der Fläche liegen und damit ggf. nicht repräsentativ für die gesamte Bodeneinheit sein.

Um die Repräsentativität existierender Probenahmestellen zu gewährleistet und einen Weg zur Festlegung fehlender Probenpunkte in den Bodeneinheiten aufzuzeigen, wird ein randomisiert stratifizierter Two-Stage Sampling-Ansatz vorgeschlagen, der an die Ergebnisse des R-Skripts anknüpfen kann. Dieser könnte GIS-gestützt entwickelt werden; ggf. bietet sich auch hier R als Werkzeug an.

Als Primary Sampling Units (PSU) eignen sich Zellen eines regelmäßigen Gitters über Gesamt-Deutschland (Gitterweite z. B. 10 x 10 km oder 5 x 5 km[5], z. B. anknüpfend an das Europäische LUCAS-Grid). Jede PSU wird der jeweils flächendominierenden Bodeneinheit zugeordnet. Aus der Gesamtheit der PSU für jede Bodeneinheit wird eine Zufallsstichprobe gezogen, die nach eingehenden Geodaten bezüglich ausgewählter Bodenparameter stratifiziert wird. Die Größe der Stichprobe orientiert sich an der Flächengröße der Bodeneinheit und der Anzahl benötigter Probenahmestellen. Die Stichprobe beinhaltet dann jeweils eine für die jeweilige Bodeneinheit repräsentative Auswahl von PSU.[6] Diese PSU dienen als Suchräume, in denen die für diese Bodeneinheit repräsentativen Probenahmestellen unter Berücksichtigung existierender Probenahmestellen verortet werden können.



[5] Die Vorschläge für die Gitterweite schließen an Erwägungen des UBA-Projekts BioDive4Soil an, wo rund 250 Untersuchungsflächen zu verorten sind. Für die dortige Zielstellung führten sie zu 20x20 km Gitterweite. Für SML-gesamt ist die Zielstellung anders, mit deutlich mehr als 250 Standorten und weniger Flexibilität, die bei der Suche der Flächen notwendig ist. Daher halten wir hier eine kleinere Gitterweite für sinnvoll.

[6] Es wäre möglich, Kacheln zu bevorzugen, in denen bereits existierende Beprobungspunkte enthalten sind. Damit wird die Zufallskomponente der Stichprobenerhebung jedoch stark beeinflusst und damit auch die Repräsentativität. Aus diesem Grund wurde in BioDive4Soil auf PSU-Ebene darauf verzichtet. Dort werden auf SSU-Ebene im Rahmen der Flächensuche/Verortung existierende Punkte bevorzugt. Bei einem Ansatz für SML-gesamt sollte der Einfluss getestet werden. Je mehr Kacheln ausgewählt werden, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass existierende Messpunkte in der Stichprobe landen. Durch die Bevorzugung aller Messpunkte, die es gibt, und Aufnahme dieser in die Stichprobe, wird keine Repräsentativität für Bodeneinheiten geschaffen. Damit geht der Charakter einer Stichprobenerhebung für Bodeneinheiten verloren.

Innerhalb jeder PSU werden die existierenden Probenahmestellen lagescharf identifiziert und als Teil der Grundgesamtheit der Secondary Sampling Units (SSU) definiert. Ergänzt wird die Grundgesamtheit durch ein Punktraster mit einer definierten Maschenweite (z. B. 62,5 m[7]). Die Auswahl einer Stichprobe aus der Grundgesamtheit erfolgt dann nach einem Ansatz, der existierende Probenahmestellen bevorzugt und einen Mindestabstand einhält, beispielsweise eine festgelegte Distanz von. 62,5 oder 100 m. Dies vermeidet, dass zu enge Verklumpungen von Punkten entstehen. Hier anwendbare Stratifizierungskriterien können sich auf Bodeneigenschaften beziehen, die sich mit bundesweiten Geodaten abgrenzen lassen oder auch auf die Heterogenität von in der Fläche modellierten Bodenparametern. Die Größe der SSU-Stichprobe ist durch die Soll-Anzahl für die jeweilige Bodeneinheit (Ergebnis R-Skript) vorgegeben.

Während die Lage der existierenden Probenahmestellen bereits feststeht, müssen die zufallsgestützt platzierten fehlenden Probenahmestellen im nächsten Schritt auf Zugänglichkeit geprüft werden. Diese Prüfung erfolgt im Nachgang der Anwendung des Two-Stage-Sampling-Ansatzes durch eine manuelle Auswertung von Luftbildern und weiteren Geodaten (Topografie, Schutzgebiete) sowie einer Eigentümerermittlung und der Anfrage für die Gestattung von Beprobungen (sofern erforderlich). Sind Punkte nicht zugänglich, werden diese nach definierten Regeln (z. B. Suchrichtung und -grenzen, Entscheidungshilfen, Dokumentation) innerhalb des Suchraums (PSU) verlegt. So wird die Repräsentativität der ausgewählten Punkte bestmöglich gewahrt.

Ergebnis der Anwendung dieses Ansatzes wäre ein Punkt-Geodatensatz der repräsentativen Probenpunkte für das Bodenmessnetz mit Angaben zu deren Strata, mit Angaben dazu, ob es sich um einen vorhandenen Probenahmepunkt und welchen oder ob es sich um einen zusätzlichen noch zu prüfenden Punkt handelt. Die Attributtabelle kann weitere Angaben aus bundesweiten Geodaten enthalten. Die Attributtabelle lässt sich in Excel u. a. weiterverarbeiten. Der Geodatensatz lässt sich beliebig filtern, z. B. auf Bodeneinheiten.

Im bundesweiten Erhebungsprojekt BioDive4Soil zur Bodenbiodiversität (FKZ 3724 NK 601 0) ist ein Two-Stage Sampling-Ansatz mittels GIS-gestützter Auswahlalgorithmen erfolgreich durchgeführt worden. Erfahrungen mit der Berücksichtigung existierender Probenahmestellen und mit der Prüfung und der Verlegung zufallsgestützt verorteter Probenahmestellen liegen vor.

[7] Innerhalb des Europäischen LUCAS-Grid (2 x 2 km) kann auf PSU-Ebene ein Punktraster mit 500 x 500 m Gitterweite aufgespannt werden und zur Beschreibung der PSU zu Stratifizierungszwecken genutzt werden. Die Gitterweite 62,5 m ergibt sich aus einer dreifachen Halbierung der Gitterweite der PSU-Datenpunkte. Mit der Gitterweite von 62,5 m lassen sich Flächen von 1 ha Größe erfassen. Bei größerer Maschenweite fallen diese Flächen regelmäßig durchs Raster. Bei kleinerer Maschenweite vervielfacht sich die Punktanzahl und damit der Rechenaufwand.