

TEXTE

41/2020

Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen- Bodenmonitoring- Verbunds

Abschlussbericht

TEXTE 41/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 48 203 0
FB000173

Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds

Abschlussbericht

von

Carolin Kaufmann-Boll, Stefanie Niederschmidt,
Chris Bamminger, Michael Kastler, Frank Müller
ahu GmbH, Aachen

Daniel Wurbs
GeoFlux, Halle (Saale)

Michael Steininger
Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und
Bodenschutz, Halle (Saale)

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

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ahu GmbH
Kirberichshofer Weg 6
5206 Aachen

GeoFlux
Goethestr. 31
06114 Halle (Saale)

Mitteldeutsches Institut für angewandte Standortkunde und Bodenschutz (MISB)
Ellen-Weber-Str. 98
06114 Halle (Saale)

Abschlussdatum:

August 2019 (technische Korrekturen im April 2020)

Redaktion:

Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Jeannette Mathews

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2020

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

Vorwort

Das Vorhaben wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet:

Dr. Natalja Barth, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen

Falk Böttcher, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie

Dr. Eckard Cordsen, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein

Dr. Heinrich Höper, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen

Dr. Steffi Knoblauch, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Dr. Marc Marx, Umweltbundesamt

Dr. Henning Meesenburg, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt in Göttingen

Dr. Tanja Sanders, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme

Dr. Tilmann Sauer, Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz

Dr. Nicole Wellbrock, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme

Das Umweltbundesamt und die Autorinnen und Autoren danken den Mitgliedern der Arbeitsgruppe und dem erweiterten Teilnehmerkreis eines Fachgesprächs für die konstruktive Diskussion der Forschungsergebnisse.

Eine Vielzahl von Institutionen aus Bund und Ländern haben ihr Interesse an einer Mitwirkung am Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund bekundet und umfangreiche Informationen über ihre Bodenmessprogramme und Messstandorte zur Verfügung gestellt. Die Bearbeitung des Vorhabens wäre ohne die Beiträge der jeweiligen Bearbeiter/-innen nicht möglich gewesen. Für die Bereitstellung von Programmbeschreibungen und Standortdaten sowie die Bereitschaft als Ansprechpartner für Messaktivitäten zur Verfügung zu stehen danken wir den o.g. Mitgliedern der Arbeitsgruppe sowie folgenden Personen:

Dr. Ing. Henning Andreae, Staatsbetrieb Sachsenforst, Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft, Referat 43 Standorterkundung, Bodenmonitoring, Labor

Dr. Chris Bamminger, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Dr. Heye Bogen, Forschungszentrum Jülich

Werner Borho, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Dr. Erik Borg, Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt

Dr. Christian Brümmer, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz

Ines Chmara, Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha

Dr. Thomas Däumling, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Umweltschutz

Hans-Peter Dietrich, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Katja Drescher-Larres, Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland

Dr. Nadine Eickenscheidt, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Dr. Marek Filipinski, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein

Dr. Uwe Franko, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ

Dr. Rainer Gasche, Karlsruhe Institut für Technologie

Dr. Martin Greve, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft

Dr. Meike Grosse, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.

Martin Haßdenteufel, Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland

Christian Heller, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Dr. Marcus Herbrich, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung

Prof. Dr. Wilfried Hierold, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.

Andrea Hölscher, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Dr. Anna Jacobs, Johann Heinrich von Thünen-Institut für Agrarklimaschutz

Dr. Ralf Kiese, Karlsruhe Institut für Technologie

Simon Kögler, Umweltforschungszentrum Leipzig Halle

Andrea Körner, Umweltbundesamt

Katrin Lügger, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Kirstin Marx, Umweltbundesamt

Prof. Dr. Ralph Meissner, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle

Dr. Jürgen Müller, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme

Dr. Heinz Neite, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Roland Prietz, Johann Heinrich von Thünen-Institut für Agrarklimaschutz

Dr. Thomas Pütz, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG-3)
– Agrosphäre

Dr. Frank Renke, Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt

Dr. Holger Rupp, Umweltforschungszentrum Leipzig Halle

Dr. Inke Schauser, Umweltbundesamt

Thomas Scheuschner, Umweltbundesamt

Dr. Jens Schröder, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

Peter Spörlein, Bayerisches Landesamt für Umwelt

Dr. Hans-Jörg Vogel, Umweltforschungszentrum Leipzig Halle

Elmar Weigl, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie

Michael Weller, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt

Steffen Zacharias, Umweltforschungszentrum Leipzig Halle

Kurzbeschreibung: Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und das Umweltbundesamt (UBA) initiieren einen Klimafolgen-Boden-Monitoring-Verbund, um Auswirkungen des Klimawandels auf Böden zu ermitteln. Ziel des Verbunds ist es, die Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS), des Aktionsplans Anpassung (APA) sowie des Monitoringberichts zur DAS aus bodenfachlicher Sicht zu unterstützen, indem belastbare Aussagen über die Veränderungen des Bodenzustands, der Bodenqualität, der Bodenlebewesen und der Bodenfunktionen bereitgestellt werden.

Durch das Bündeln von Messstandorten in einem Verbund werden Bodeninformationen deutschlandweit leichter zugänglich. Messdaten bleiben dabei in der Hand der Daten erhebenden Stellen. In dem Verbund werden Messgrößen festgelegt, mit denen Veränderungen des Bodenzustands unter bekannten Klima-, Nutzungs- und Bewirtschaftungsbedingungen beobachtet und bewertet werden können.

Der Verbund wird aus bestehenden, langfristig untersuchten Messstandorten aufgebaut, deren Weiterbetrieb nach aktuellem Stand gesichert ist, und ist offen für die Aufnahme neu eingerichteter Standorte. Die Teilnahme am Verbund erfolgt auf freiwilliger Basis. Der Fokus des Messnetzverbunds liegt auf den Themen Bodenwasserhaushalt, Bodenerosion, Bodenbiologie und organische Substanz.

Das Startkonzept für die erste Betriebsphase von 2021 bis 2024 umfasst Fachanforderungen und organisatorische Handlungsempfehlungen. Berücksichtigt werden zunächst Untersuchungsstandorte, die Mess- und Modelleingangsgrößen für Bodenwasserhaushalt und Bodenerosion liefern. Bisher liegen Meldungen von rund 5.900 Messstandorten aus zehn Programmen bzw. Aktivitäten für die Teilnahme am Messnetzverbund vor. Eine Bewertung der Klimawandelfolgen mit Messungen des Bodenwasserhaushalts ist prinzipiell in einem großen Teil der Landesfläche insbesondere für forstlich genutzte Böden möglich, modellgestützt auch für landwirtschaftlich genutzte Böden. Lücken bestehen bei Messungen auf landwirtschaftlich genutzten Böden und in Feuchtgebieten sowie beim Themengebiet Bodenerosion.

Abstract: Conceptual design and implementation of a soil monitoring network to determine effects of climate change

The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) and the Federal Environment Agency (UBA) initiated a soil monitoring network to determine effects of climate change. The aim of the monitoring network is to support the implementation of the German Adaptation Strategy (DAS), the Adaptation Action Plan (APA), and the Monitoring Report on the DAS by providing authoritative information on changes in state, quality, fauna, and function of the soil.

Merging data from various measurement programs into a nation-wide monitoring network improves the accessibility of soil information, while the operators of individual sites maintain ownership of their measurements. Within the framework of the network, key parameters will be determined which can be used to monitor and evaluate changes in soil state under known climate, land use, and management conditions.

The monitoring network will be composed of existing long-term measurement sites and is also open for newly established sites. Participation is on a voluntary basis. The focus of the network will be on the topics of soil water budget, soil erosion, soil biology, and organic matter.

The concept for the first operating phase from 2021 until 2024 comprises technical requirements and recommended procedures. Initially, only sites that provide measurements and model parameters regarding soil water budget and soil erosion will be considered. To date, 5900 sites from ten different programs or actions have committed to join the monitoring network.

Based on these sites, it is possible to evaluate effects of climate change on soil water budget for a large part of the forests on federal territory, model-based also for agricultural areas. Gaps exist in the measurement data for agricultural areas, wetlands, and for the topic of soil erosion.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung.....	15
Summary	16
1 Anlass und Ziel.....	17
2 Hintergrund	18
3 Aufgabenstellung.....	19
4 Vorgehensweise und Methoden	20
5 Ergebnisse der Messnetzuntersuchung	30
6 Bereitschaft zur Teilnahme am Verbund.....	34
7 Eignungsbewertung der Messprogramme	37
7.1 Bodenwasserhaushalt	39
7.1.1 Messgrößen und Grundlagen der Messtechnik.....	41
7.1.2 Programmbezogene Bewertung	43
7.1.3 Prüfung gemeldeter Standorte	52
7.2 Bodenerosion	55
7.3 Organische Bodensubstanz	58
7.4 Bodenbiologie	59
7.5 Betroffenheit von Klimaänderungen	61
8 Konzept für den Start des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds in Deutschland	67
8.1 Ziele und Leistungen des Verbunds	67
8.2 Aufbau des Verbunds.....	70
8.2.1 Grundkonzept	70
8.2.2 Gremien und Beteiligte	72
8.2.3 Datenaustausch	75
8.2.4 Kartenanwendung und Geodatendienst	76
8.2.5 Verbund-Thema Bodenwasserhaushalt.....	76
8.2.6 Verbund-Thema Erosion	84
8.3 Empfehlungen zur Umsetzung des Verbunds	87
9 Fazit und Ausblick.....	91
10 Quellenverzeichnis	95

A	Anhang Beschreibung der Messaktivitäten.....	99
A.1	Dokumentation der Aktualisierung von Steckbriefen für Bodendaten	99
A.2	Beschreibung der Lysimeter-Kooperation in Mittel- und Nordostdeutschland	101
B	Anhang Bodenwasserhaushalt	104
C	Anhang Bodenerosion	118
C.1	Steckbrief für Bodendaten „Erosionsmonitoring“	118
C.2	Abfrage der Standortdaten zum Themenfeld Bodenerosion (2018)	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Eignung vorhandener Messnetze für die Erfassung und Modellierung von klimabedingten Änderungen des Bodenzustands.....	38
Abbildung 2:	Bodenwassergehalte an der Waldmessstation Steiger (Thüringer Becken) in 100 cm Tiefe	45
Abbildung 3	Tensiometermessungen (Tens1, Tens2, Tens3) und modellierte Wassergehalte (Wasserhaushaltsmodell: SWAP 3.2.36) an der Level II-Fläche 1203 (Kiefer) in den Bodentiefen 70 cm und 250 cm	46
Abbildung 4:	Pflanzenverfügbares Bodenwasser bis in 1 m Tiefe in den Winter- und Sommermonaten auf der BDF Solling Buche	48
Abbildung 5:	Vergleich der in 15 cm Tiefe in drei Parallelen mit FDR-Sonden gemessenen mit den mit BROOK90 modellierten Bodenwassergehalten	48
Abbildung 6:	Normalisierte Werte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate (1961-1990) auf Kreisebene und Verbundstandorte mit Messung der Bodenfeuchte und/oder der Sickerwassermenge	62
Abbildung 7:	Verbundstandorte mit Messung des Bodenfeuchte und/oder Sickerwassermenge vor dem Hintergrund der Klimawirkung auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘.....	63
Abbildung 8:	Verbundstandorte mit Messung der Sickerwasserrate vor dem Hintergrund der Klimawirkung auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘	64
Abbildung 9:	Erosionsmonitoringflächen (Wasser) und Veränderung der Erosionsgefährdung.....	65
Abbildung 10:	Veränderung der natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind	66
Abbildung 11:	Integration verschiedener Messebenen	69
Abbildung 12:	Auswahl von Kernstandorten aus Intensiv-Monitoring und Forschung.....	71
Abbildung 13:	Struktur, Kommunikationswege und Aufgaben der Beteiligten im Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund	75
Abbildung 14:	Für die Ermittlung des Bodenwasserhaushalts gemeldete Verbundstandorte aus Extensiv-Monitoring.....	78
Abbildung 15:	Für die Ermittlung des Bodenwasserhaushalts gemeldete Verbundstandorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung	79
Abbildung 16:	Aktuelle und künftige Kernstandorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung für die Ermittlung des Bodenwasserhaushalts.....	82
Abbildung 17:	Mögliche Verbundstandorte zur Erfassung von Bodenerosion	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der beschriebenen Messprogramme und -aktivitäten.....	22
Tabelle 2:	Datenfelder für Standorte des Bodenwasserhaushalts	25
Tabelle 3:	Datenfelder für Messgrößen des Bodenwasserhaushalts an jedem Standort.....	26
Tabelle 4:	Kriterien für Kernstandorte des Bodenwasserhaushalts im Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund	27

Tabelle 5:	Von Bundesinstitutionen gemeldete Standorte des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds, Stand: Dezember 2018	35
Tabelle 6:	Von Länderinstitutionen gemeldete Standorte des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds, Stand: Dezember 2018	35
Tabelle 7:	Aus- und Bewertungsansätze für Veränderungen des Bodenwasserhaushalts...	40
Tabelle 8:	Gemeldete Standorte des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds mit Messungen für das Thema Bodenwasserhaushalt.....	53
Tabelle 9:	Anforderungen an die Datenerhebung für Bodenerosion	57
Tabelle 10:	Kriterien für Verbund-Standorte	71
Tabelle 11:	Einflussfaktoren und relevante Größen für den Bodenwasserhaushalt	77
Tabelle 12:	Standortdaten für Bodenwasserhaushalt	84
Tabelle 13:	Standortdaten für Bodenerosion	87
Tabelle 14:	Schritte und Zeitplan für den Aufbau des Verbunds	88

Abkürzungsverzeichnis

APA	Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel
Basis-BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen zur Merkmalsdokumentation
BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Boden-EMF	Boden-Erosionsmonitoringfläche
BOKLIM	Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung (Name eines Forschungsvorhabens)
BonaRes	BMBF-Förderinitiative Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie
BOVA	Ständiger Ausschuss „Vorsorgender Bodenschutz“ der LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz)
BWG	Bodenwassergehalt
BWH	Bodenwasserhaushalt
BWS	Bodenwasserspannung
BZE	Bodenzustandserhebung
BZE LW	Bodenzustandserhebung Landwirtschaft
BZE Wald	Bodenzustandserhebung Wald (I und II)
CRNS	Cosmic Ray Neutron Sensing
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DEIMS-SDR	Dynamic Ecological Information Management System - Site and dataset registry
DEZ	Dielektrizitätszahl
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFV	Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWD-RADOLAN	Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer) des Deutschen Wetterdienstes
eBIS	Elektronisches Bodeninformationssystem des Umweltbundesamtes
EEK	Erosionsereigniskataster
EIP-Agri	Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit
eLTER	Integrated European Long-Term Ecosystem & Socio-Ecological Research Infrastructure
EUROSTAT	European Statistical Office
FAIR - Prinzipien	Findable, Accessible, Interoperable and Re-usable
FDR	Frequenzy-Domain-Reflectometry

GD NRW	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
HFA	Handbuch Forstliche Analytik
ICOS-D	Integrated Carbon Observation System - Deutschland
ICP	International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects
INSA	Informationssystem Boden- und Grundwasserschutz/Altlasten
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in the European Community
Intensiv-BDF	Bodendauerbeobachtungsflächen zur Prozessdokumentation
ISMN	International Soil Moisture Network
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LABO-BOVA	Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen
LfL Bayern	Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft
LfU Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Schleswig-Holstein
LTER-D	Long Term Ecological Research in Deutschland
LUCAS	Land Use and Coverage Area frame Survey
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
PWP	Permanenter Welkepunkt
TDR	Time-Domain-Reflectometry
TERENO	Terrestrial Environmental Observatories
TI	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
UBA	Umweltbundesamt
UMK	Umweltministerkonferenz
UPB	Umweltprobenbank
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.

Zusammenfassung

Für das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels werden Daten benötigt, die über einen langen Zeitraum die Veränderungen des Bodenzustands, der Bodenqualität, der Bodenlebewesen und der Bodenfunktionen dokumentieren. Vor diesem Hintergrund haben das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und das Umweltbundesamt (UBA) im Jahr 2017 das Forschungsvorhaben „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ initiiert. In Deutschland werden von vielen Einrichtungen in Verwaltung und Forschung dauerhaft bodenbezogene Messungen durchgeführt. Diese Messungen sind in verschiedene Überwachungs- oder Forschungsprogramme integriert und zum Teil länderspezifisch. Nur wenn eine Vergleichbarkeit von Methoden, Messhäufigkeit und Zeiträumen gegeben ist, sind Aussagen über Veränderungen für Deutschland oder für Regionen möglich.

Durch das Bündeln von Messstandorten in einem Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund werden Bodeninformationen deutschlandweit leichter zugänglich. Messdaten bleiben dabei in der Hand der Daten erhebenden Stellen. In dem Verbund werden Messgrößen festgelegt, mit denen Veränderungen des Bodenzustands unter bekannten Klima-, Nutzungs- und Bewirtschaftungsbedingungen beobachtet und bewertet werden können. Berücksichtigt werden Untersuchungsstandorte, die Mess- und Modelleingangsgrößen für Bodenwasserhaushalt und Bodenerosion, später auch für organische Substanz und Bodenbiologie liefern. Die Teilnahme am Verbund erfolgt auf freiwilliger Basis. Der Verbund wird aus bestehenden, langfristig untersuchten Messstandorten aufgebaut, deren Weiterbetrieb nach aktuellem Stand gesichert ist, und ist offen für die Aufnahme neu eingerichteter Langzeit-Überwachungsstandorte.

Ein Kriterienkatalog für die teilnehmenden Messstandorte umfasst Ziel-Messgrößen, Einflussfaktoren und Wirkungsmessgrößen sowie Anforderungen an Kernstandorte mit besonderer Eignung und an Kernattribute für die Standorte. Fachliche Grundlagen für die Formulierung von Verbundstandards werden in Bezug auf Bodenwasserhaushalt und Bodenerosion vorgelegt. Methodische Standards für Bodenwasserhaushalt leiten sich aus den Standards bestehender Messprogramme ab. Für Bodenerosion liegen keine Standards vor. Standortdaten der Verbundmessstellen sollen künftig in einer Kartenanwendung im Internet veröffentlicht werden. Das Startkonzept für die erste Betriebsphase des Verbunds von 2021 bis 2024 umfasst Fachanforderungen und organisatorische Handlungsempfehlungen.

Bisher liegen Meldungen von rund 5.900 Messstandorten aus zehn Programmen bzw. Aktivitäten für die Teilnahme am Messnetzverbund vor. Der Großteil der Standorte gehört zu Bodenzustandserhebungen, die für flächenhafte Betrachtungen von Klimawirkungen auf Böden mittels Modellen geeignet sind. Um bei den gemeldeten Monitoring- und Forschungsstandorten eine gemeinsame Schnittmenge zu identifizieren, wurde die Messmethodik an den Standorten untersucht. Eine Bewertung der Klimawandelfolgen mit Messungen des Bodenwasserhaushalts ist prinzipiell in einem großen Teil der Landesfläche insbesondere für forstlich genutzte Böden möglich, modellgestützt auch für landwirtschaftlich genutzte Böden. Lücken bestehen bei Messungen auf landwirtschaftlich genutzten Böden und in Feuchtgebieten sowie für Bodenerosion.

In einem UBA-Fachgespräch im Oktober 2018 wurden die im Projekt erarbeiteten konkreten Vorschläge zur praktischen Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds mit Vertretern von Bund- und Länderinstitutionen sowie Forschungseinrichtungen, die mit dauerhaften bodenbezogenen Messungen befasst sind, diskutiert und weiterentwickelt. Die aus dem Gespräch resultierenden Anregungen und Hinweise flossen in das vorliegende Verbundkonzept (siehe Kapitel 8 des Berichts) ein.

Das Konzept für den Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund soll künftig um die Themen organische Substanz und Bodenbiologie erweitert werden.

Summary

Understanding the effects of climate change requires data which document changes in soil condition, soil quality, soil organisms and soil function over an extended period of time. Against this background, back in 2017 the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) and the Federal Environment Agency (UBA) initiated the "Design and implementation of a climate impact soil monitoring network" research project. Ongoing soil-related measurements are carried out in Germany by many administrative and research institutions. These measurements are carried out in the context of various monitoring or research programmes and some are specific to individual federal states. Only if methods, measurement frequency and time periods are comparable is it possible to make statements about changes at a national or regional level in Germany.

Bringing measurement sites together in a climate impact soil monitoring network will make soil information more readily accessible across Germany. Measurement data will remain in the hands of the authority which collected them. Measured variables with which changes in soil condition can be observed and evaluated under known climate, use and management conditions will be established in the network. Account will be taken of study sites which provide measurement and modelling input variables for soil water balance and soil erosion and subsequently also for organic matter and soil biology. Participation in the network is voluntary. The network is composed of existing measurement sites which have been studied over an extended period and which, as far as is currently known, will continue in operation, and is open to the inclusion of newly established long-term monitoring sites.

A catalogue of criteria for participating measurement sites includes target measured variables, influencing factors and impact measured variables together with requirements for particularly suitable core sites and for core attributes for the sites. Technical fundamentals for drawing up network standards in relation to soil water balance and soil erosion are initially proposed. Methodological standards for soil water balance are derived from the standards for existing measurement programmes. No standards are available for soil erosion. Site data for the network measurement sites are in future set to be published in a map application on the internet. The starting concept for the initial phase of operation of the network from 2021 to 2024 includes technical requirements and organisational recommendations.

To date, around 5,900 measurement sites from ten programmes or activities have been registered for participation in the measurement network. The majority of the sites are part of soil condition surveys which are suitable for area-related observations of climate impact on soils using models. Measurement methodology at the sites was investigated in order to identify a common overlap among the registered monitoring and research sites. It is in principle possible to assess climate change impacts using measurements of soil water balance over a large proportion of Germany's territory, in particular for soils used for forestry and, with modelling assistance, also for soils in agricultural use. Measurement gaps remain in agriculturally used soils, in wetlands and for soil erosion.

In a technical discussion under the auspices of the UBA in October 2018, the project's specific proposals for the practical implementation of a climate impact soil monitoring network were discussed and further developed with representatives from institutions and research organisations at the German federal and state levels which are involved in long-term soil measurements. The suggestions and comments arising from the discussion have been fed into the present network concept (see section 8 of the report).

The climate impact soil monitoring network concept is in future set to expand to include organic matter and soil biology.

1 Anlass und Ziel

Es besteht eine zunehmende Nachfrage, belastbare Bodeninformationen in zuverlässigen Zeitreihen zur Verfügung zu stellen, um die in den nächsten Jahren vor uns liegenden fachlichen Herausforderungen zu bewältigen. Zu den Herausforderungen zählen z.B. die Anpassung an die erwarteten Klimaveränderungen, der vermehrte Pflanzenanbau zur Energiegewinnung und ein dem gegenüberstehender zunehmender Nahrungsmittelbedarf, die zunehmende Bodendegradation sowie Änderungen im Boden- und Landmanagement. Benötigt werden belastbare Aussagen über die Veränderungen des Bodenzustands, der Bodenqualität, der Bodenlebewesen und der Bodenfunktionen vor dem Hintergrund des Klimawandels, um geeignete Maßnahmen ergreifen, den Erfolg der Maßnahmen kontrollieren und um gegebenenfalls bestehende Maßnahmen anpassen zu können. Modellrechnungen können echte Messungen hierbei nicht vollständig ersetzen.

Am 31. August 2011 hat das Bundeskabinett den Aktionsplan „Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (APA)“ beschlossen. Der Aktionsplan untersetzt die am 17. Dezember 2008 verabschiedete Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) mit konkreten Aktivitäten des Bundes. Im Zusammenhang mit dem Klimafolgenmonitoring sieht die Bundesregierung laut APA folgende Maßnahme als vordringlich an: „Erhalt, Weiterentwicklung, Vernetzung und Anpassung der Instrumente des Bodenmonitoring und der Erhebung des Bodenzustands, um die für die Konzeption von Anpassungsmaßnahmen erforderlichen Daten zu langfristigen Prozessen im Boden und zu möglichen Veränderungen des Bodenzustands bereit zu stellen.“

Grundvoraussetzung für nutzbare Informationen ist die kontinuierliche und langfristige Fortführung von Messungen in Boden-Überwachungsprogrammen. Hier können auch Informationen über Klimafolgen in Böden gewonnen werden. Um das Potenzial der Daten aus Überwachungsprogrammen in vollem Umfang nutzen zu können, sind eine Anpassung der Programme des Bodenmonitorings für konkrete Fragestellungen und eine Verbesserung der Datenverfügbarkeit erforderlich. Nur so können die Programme den Anforderungen im Hinblick auf Datenqualität, -belastbarkeit, -vollständigkeit und -vergleichbarkeit gerecht werden. Notwendig sind zudem verstärkte Aktivitäten zur Vernetzung der Messprogramme untereinander.

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ (FKZ: 3716 48 203 0) besteht darin, auf Basis der Vorarbeiten der letzten zehn Jahre ein deutschlandweites Messnetz-Verbund auszugestalten und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung in die Praxis zu geben. Die Handlungsempfehlungen betreffen die Koordinierung sowie die Datenhaltung und -qualität der am Verbund teilnehmenden Standorte. Der fachliche Schwerpunkt liegt dabei auf den Themen „Bodenwasserhaushalt“ und „Bodenerosion“.

2 Hintergrund

Die wichtigsten Hintergrundprogramme, Aktivitäten und Vorarbeiten für die Bearbeitung des Vorhabens „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ waren

- ▶ die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) (Dezember 2008) (Bundesregierung 2008),
- ▶ das UBA-Forschungsvorhaben Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung (BO-KLIM) (FKZ: 3708 71 205 01, Laufzeit: 2009-2010) (Kaufmann-Boll et al. 2011),
- ▶ der Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (APA) (August 2011) (Bundesregierung 2011),
- ▶ eine Umfrage im Ständigen Ausschuss „Vorsorgender Bodenschutz“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO-BOVA) und der Beschluss zur Erarbeitung eines Konzepts für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund (Januar 2012),
- ▶ die Broschüre „Bodendaten in Deutschland – Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden“ (2011/2012) (UBA 2012),
- ▶ das UBA-Forschungsvorhaben „Bodendaten - Umsetzung und Handlungsempfehlungen aus dem BOKLIM Projekt“ (FKZ: 371 272 280, Laufzeit 2012-2013) (Lazar et al. 2014),
- ▶ der Beschluss zur Konkretisierung des Konzepts für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund in der 18. BOVA-Sitzung (Januar 2014) sowie
- ▶ die Studie zur Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel (Adelphi et al. 2015).

3 Aufgabenstellung

Im Ergebnis des vorangehenden Forschungsprojekts „Bodendaten - Umsetzung und Handlungsempfehlungen aus dem BOKLIM Projekt“ (FKZ 371 272 280) lag ein Konzeptentwurf für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund vor (Lazar et al. 2014). Dieser basierte auf der Nutzung, Vernetzung und Weiterentwicklung bestehender bodenbezogener Messnetze. Er baute auf der freiwilligen Bereitschaft der Messnetzbetreiber auf, ihre Standortdaten einzubringen und konzentrierte sich vorrangig auf das Intensiv-Monitoring. Mit dem Stand vom Januar 2014 lagen dem Umweltbundesamt Rückmeldungen für 50 Standorte deutschlandweit vor.

Aufgaben dieses Projektes waren im Einzelnen:

- a) Untersuchung der im vorliegenden Entwurf für ein Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund untersuchten Messnetze im Hinblick auf seit Januar 2014 eingetretene Änderungen sowie Einbeziehung bisher nicht untersuchter Messnetze
- b) Prüfung der getroffenen Aussagen zum weiteren Vorgehen und zur Eignung der Messnetze anhand dieser Vorarbeiten
- c) Dezidierte Prüfung der gemeldeten Standortdaten und gegebenenfalls Rückkopplung mit den Messnetzbetreibern
- d) Darauf aufbauende Abschätzung des Arbeitsaufwands (finanziell und fachlich) zur Umsetzung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds
- e) Ableitung der nächsten Arbeitsschritte zur Umsetzung des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds

Der fachliche Fokus der Arbeiten lag dabei auf den Themen „Wasserhaushalt“ und „Erosion“.

4 Vorgehensweise und Methoden

Die Bearbeitung des Vorhabens gliederte sich in folgende Schritte:

1. Untersuchung der Messnetze
 - ▶ Überprüfung von vorhandenen Messnetzbeschreibungen aus dem Vorgängerprojekt „Bodendaten - Umsetzung und Handlungsempfehlungen aus dem BOKLIM Projekt“ (FKZ 371 272 280) auf **Veränderungen seit 2014**
 - ▶ Recherche und Beschreibung weiterer Messprogramme und Aktivitäten mit Bezug zu den Themen „Bodenwasserhaushalt“ und „Bodenerosion“ (z.B. TERENO, ICOS-D, WRRL)
2. Überprüfung der Aussagen im Konzeptentwurf von Lazar et al. (2014) zur Bewertung der fachlichen Eignung von Messnetzen und zur Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds
3. Konkretisierung und Fortschreibung des Konzeptentwurfs von Lazar et al. (2014)
 - ▶ Dezierte **Standortprüfung** und -ergänzung der bisher gemeldeten Verbundstandorte im Hinblick auf Parameter, Messhäufigkeit und Methoden
 - ▶ Benennen von Handlungsempfehlungen mit Aufwandsschätzung und nötigen Arbeitsschritten

Eine projektbegleitende Arbeitsgruppe mit Vertretern von Länderbehörden und Forschungsinstituten unterstützte die Arbeiten durch die Diskussion von Zwischenergebnissen. In einem Fachgespräch im Oktober 2018 wurde das Konzept für den Start und die erste Umsetzungsphase des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds vorgestellt und diskutiert. Neben den Mitgliedern der Arbeitsgruppe waren im Fachgespräch weitere Akteure der Erhebung von Bodendaten aus Bund, Ländern und Forschung beteiligt.

Der vorliegende Bericht baut auf den Ergebnissen der in Kapitel 3 genannten Vorarbeiten auf. Dies sind insbesondere

- ▶ die im BOKLIM-Bericht (Kaufmann-Boll et al. 2011) aufgeführten potenziellen Parameter zur Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands für verschiedene Themenfelder,
- ▶ die Steckbriefe für Bodendaten der Broschüre „Bodendaten in Deutschland – Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden“ (UBA 2012),
- ▶ die Skizze eines Gesamtrahmens bodenbezogener Messungen für Fragestellungen zu Klimafolgen mit Einordnung einer Konzeption für einen Verbund auf Ebene des Intensiv-Monitorings (Freibauer et al. 2014 in: Lazar et al. 2014),
- ▶ die im Vorgänger-Vorhaben (Lazar et al. 2014) auf Basis des BOKLIM-Vorhabens formulierten Anforderungen an die Datenerhebung, die themenbezogene Bewertung von Messprogrammen nach allgemeinen Prüfkriterien für die Themen Bodenwasserhaushalt, Bodenerosion, organische Substanz und Bodenbiologie, die Formulare mit Eckdaten für ca. 50 für die Teilnahme am Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund gemeldete Standorte sowie die Vorschläge für die Umsetzung eines Messnetz-Verbunds mit Hinweisen zu Standortauswahl,

organisatorisch-technischen Randbedingungen und zur Verknüpfung mit weiteren Erhebungsaktivitäten,

- die Bewertungen des Teilfeldes Boden im UBA-Text 24/2015 „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Adelphi et al. 2015).

Im Folgenden sind die Methoden der einzelnen Arbeitsschritte dokumentiert.

Untersuchung der Messnetze

Die Beschreibungen von bundesweit langfristig betriebenen Messprogrammen und Messaktivitäten aus den genannten Vorarbeiten – die so genannten „Steckbriefe für Bodendaten“ (UBA 2012) – wurden fortgeschrieben. Zusätzlich zu den bereits vorhandenen Steckbriefen entstanden neue Steckbriefe für Messaktivitäten (TERENO SoilCan, ICOS-D, Erosionsmonitoring sowie ICP Integrated Monitoring). Die Bearbeitung erfolgte über eine Recherche publizierter Informationen über die Messaktivitäten in Literatur und Internet in Abstimmung mit den messenden Institutionen.

Für die Bodendauerbeobachtung führte das Umweltbundesamt im Jahr 2017 eine Umfrage zur Aktualität der Messnetzbeschreibung durch. Der Rücklauf aus den 14 BDF-betreibenden Bundesländern wurde in den Steckbrief „Bodendauerbeobachtung“ aufgenommen.

Dauermessstellen, die im Rahmen der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, Richtlinie 2000/60/EG) genutzt werden und den Bodenwasserhaushalt erfassen, wurden recherchiert und in den Steckbrief „Feldlysimeter“ und „Weitere Mess- und Erhebungsaktivitäten“ integriert. Ausgangspunkt für die Recherche war die bestehende Lysimeter-Kooperation der Länder Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern und Bayern. Nach der Recherche der an der Kooperation beteiligten Institutionen und Ansprechpartner/-innen wurden diese kontaktiert. Parallel dazu erfolgten Anfragen in weiteren Bundesländern.

Weitere Mess- und Erhebungsaktivitäten für Bodendaten und wichtige Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit dauerhaften Messungen wurden in Kurzform beschrieben. Dies sind LUCAS (Land Use and Coverage Area frame Survey), BonaRes (BMBF-Förderinitiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie“), Exploration zur funktionellen Biodiversitätserforschung, die DFG-Forschungsgruppe Cosmic Sense sowie ein regionales Monitoringprogramm für Nitrat in Nordrhein-Westfalen. Der aktuelle Stand der BonaRes-Aktivitäten ist zudem in den Steckbrief für „Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche“ eingeflossen.

In Tabelle 1 sind die im Forschungsvorhaben aktualisierten und neu erstellten Messnetzbeschreibungen aufgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Messnetze sind in Kapitel 5 dargelegt.

Tabelle 1: Übersicht der beschriebenen Messprogramme und -aktivitäten

Programm	Institution
ICP Forests Level I und II - International Co-Operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests' operating under the UNECE Convention on 'Long-range Transboundary Air Pollution'	Johann Heinrich von-Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme
BZE Wald I und II - Erste und zweite Bodenzustandserhebung Wald	Johann Heinrich von-Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme
BZE Landwirtschaft - Bodenzustandserhebung Landwirtschaft	Johann Heinrich von-Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz
BDF - Bodendauerbeobachtung	Umweltbundesamt, FG II 2.7
DFV - Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche	BonaRes Zentrum für Bodenforschung, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung
Feldlysimeter	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle
DWD-Agrarmeteorologie - Agrarmeteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes (insbesondere Bodendaten)	DWD, Abteilung Agrarmeteorologie
DWD-RADOLAN - Quantitative Radarniederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes	DWD, Abteilung Hydrometeorologie
Umweltprobenbank des Bundes (Probenart Boden)	Umweltbundesamt, FG II 2.4
Erosionsmonitoring	Umweltbundesamt, FG II 2.7
TERENO SoilCan - Terrestrial Environmental Observatories, Teilprojekt SoilCan	Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre
ICOS-D - Integrated Carbon Observation System – Deutschland	Johann Heinrich von-Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz
ICP Integrated Monitoring - International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystem	Umweltbundesamt, FG II 4.3
LUCAS - Land Use and Coverage Area frame Survey	European Statistical Office (EUROSTAT)
BonaRes - Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle
Exploratorien zur funktionellen Biodiversitätserforschung	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
DFG-Forschungsgruppe Cosmic Sense	Universität Potsdam
Humusmonitoring Ackerflächen Nordrhein-Westfalen	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Nitrat-Monitoring im Sickerwasser Nordrhein-Westfalen	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen

Die Steckbriefe der in Tabelle 1 genannten Messaktivitäten werden vom Umweltbundesamt in einer für das Jahr 2020 geplanten neuen Auflage der Broschüre „Bodendaten in Deutschland“ veröffentlicht. Für die Broschüre wurden zusätzlich weitere Steckbriefe und Beschreibungen von Bodendaten aktualisiert. Dies sind das Untersuchungsprogramm Hintergrunddeposition (Stickstoff und Schwefel), das Moosmonitoring, die Bodenschätzung, die Forstliche Standortkartierung (Bundesforst) sowie das Informationssystem Boden- und Grundwasserschutz/Kampfmittelräumung INSA. Auch wurden die Beschreibungen bundesweiter Kartenwerke der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe aktualisiert.

Überprüfung der Bereitschaft von Institutionen zur Teilnahme am Verbund

Aus den Vorarbeiten lagen bereits ca. 50 für eine Teilnahme am Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund gemeldete Intensiv-Messstandorte vor. In den Jahren 2017 und 2018 erfragte das Umweltbundesamt erneut die Bereitschaft für eine Teilnahme am Verbund bei Institutionen, die dauerhaft bodenbezogene Messungen durchführen. Angefragt wurden:

- ▶ DWD Agrarmeteorologie,
- ▶ Forschungszentrum Jülich (Koordination TERENO SoilCan),
- ▶ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (Datenzentrum BonaRes),
- ▶ TI, Institut für Waldökologie (Bodenzustandserhebungen, ICP Forests Level II, Lysimeter),
- ▶ TI, Institut für Agrarklimaschutz (Bodenzustandserhebungen, ICOS-D),
- ▶ Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Koordination Kooperation Lysimeter),
- ▶ Umweltbundesamt, FG II 2.4 (Umweltprobenbank) sowie
- ▶ Institutionen der Länder, die Bodendauerbeobachtung und/oder forstliches Umweltmonitoring betreiben.

In Kapitel 6 sind die Ergebnisse der Anfragen zusammengefasst.

Überprüfung der Aussagen im Konzeptentwurf

Auf Basis der aktuellen Beschreibungen der Messprogramme und -aktivitäten wurde die Bewertung der Eignung für Fragen der Klimafolgenforschung und -anpassung, die Lazar et al. (2014) in einem ersten Entwurf vorgenommen hatten, fortgeschrieben. Als Grundlage für die Eignungsbewertung für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund dienen die aktualisierten und seit 2012 neu erstellten Steckbriefe für Bodendaten. Die Überprüfung der Bewertungen wurde im Schwerpunkt für die Themen „Bodenwasserhaushalt“ und „Bodenerosion“ vorgenommen (siehe Kapitel 7). Beim Thema Bodenerosion stand im Gegensatz zum Thema Bodenwasserhaushalt die grundlegende Erfassung von Messprogrammen als Datengrundlage für die Bewertung der Auswirkungen von Klimaänderungen im Vordergrund. Aufgrund der sehr geringen Anzahl von Messstandorten musste die Auswahl repräsentativer Standorte und Messparameter als nachrangig bewertet werden. Einen Überblick über Mindestanforderungen an die Datenerhebung in Bezug auf Bodenerosion gibt Tabelle 9 in Kapitel 7.2.

Konkretisierung und Fortschreibung des Konzeptentwurfs und des Verbund-Designs

Die bisher für die Teilnahme an einem Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund gemeldeten Standortdaten waren dezidiert und durch eine Rückkopplung mit den Messnetzbetreibern zu prüfen und zu ergänzen. Darauf aufbauend ließen sich der Arbeitsaufwand zur Umsetzung des Monitoring-Verbunds und nächste Arbeitsschritte ableiten.

Zu klären war, ob die von Lazar et al. (2014) entworfene Konzeption anhand der bisher durch die Messnetzbetreiber an das Umweltbundesamt gemeldeten Standortdaten realisierbar ist. Hierzu erfolgte ein Abgleich der Standortdaten mit den im Konzept formulierten Anforderungen im Hinblick auf eine repräsentative Standortauswahl, -anzahl und -verteilung, den Parameterumfang sowie die Datenerhebung.

Folgende Überlegungen waren dabei maßgeblich:

- a) Standorte (Anzahl, Verteilung und Abdeckung klimasensibler Räume)
- b) Messparameter (Müssen an einzelnen Standorten zusätzliche Parameter erhoben werden? Wenn ja, welche? Wird eine Kontinuität von Parameterumfang und gleichwertigen Untersuchungsverfahren gewährleistet, um einen Mindeststichprobenumfang bei Zeitreihen zu erreichen?)
- c) Zeitplan der Datenerhebung (Bedarf es einer Anpassung bzw. Änderung der an den einzelnen Standorten bestehenden Messtermine und der Messhäufigkeit?)
- d) Sind Differenzierungen nach Nutzung sinnvoll?
- e) Welche Zielgrößen sind relevant? Auf welcher Messnetzdichte oder -skala?

Die methodischen Ansätze für „Bodenwasserhaushalt“ und „Bodenerosion“ sind ähnlich, passen sich jedoch an den sehr unterschiedlichen Umfang von Messaktivitäten an.

Für Standorte und Messflächen wurden jeweils in angepasster Form für „Bodenwasserhaushalt“ oder „Bodenerosion“ detaillierte Standortdaten bei den Betreibern angefragt. Die Ergebnisse gingen in Standortlisten ein, die die für die Bewertung erforderlichen Angaben enthalten (z.B. Parameterumfang, Methoden, Messhäufigkeit). Die Listen ermöglichen Abfragen von Teilmengen wie z.B. Standorte, an denen der Bodenwassergehalt gemessen wird. Diese Teilmengen wurden dann gezielt auf die Erfüllung bestimmter Kriterien geprüft, z.B. Messhäufigkeiten, Begleitparameter etc. Anhand von Karten der Standorte bestimmter Themen und Messgrößen oder deren Kombinationen ließ sich die räumliche Verteilung beurteilen. Dabei wurde auch auf die Betroffenheit von Klimaänderungen Bezug genommen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 7 beschrieben.

Standortprüfung Bodenwasserhaushalt

Für die Ermittlung detaillierter Standortdaten bei den messenden Institutionen dienten Formulare in Tabellenform. Sie berücksichtigen neben gängigen Angaben zum Standort wie z.B. Lagekoordinaten, Nutzung und Bodentyp (siehe Tabelle 2) auch Angaben zu den einzelnen Messgrößen für die Beobachtung des Bodenwasserhaushalts wie z.B. Messprinzip und -instrument, Anzahl der Parallelen, Messtiefen und Messhäufigkeit (siehe Tabelle 3). Um die Angaben der Betreiber vergleichen zu können, sind in den Formularen Begriffe definiert und Listeneinträge standardisiert.

Tabelle 2: Datenfelder für Standorte des Bodenwasserhaushalts

Felder	Beispiel
ID	46
Kennung	HE-609
Name des Standortes*	Level II 608 Krofdorf
Level II Plot-Nummer	609
Bundesland*	HE
Messprogramm(e)*	Level II, BDF (Basis)
Lagekoordinaten*	9,268° O, 51,371° N; UTM
Institution und Ansprechpartner, Telefon, E-Mail*	NW-FVA und HLNUG, Dr. Henning Meesenburg, Henning.meesenburg@nw-fva.de , 0551 / 69401 170
Bodentyp (nach KA5)*	Pseudogley
Ausgangsgestein (nach KA5)	äolische Schluffe
Bodenart (nach KA5)	sandig-lehmiger Schluff, schluffiger Lehm
Nutzung*	Forst
Bewuchs	Buche
Bewirtschaftung Land- und Forstwirtschaft	-
Nutzungswechsel in der Vergangenheit	-
messtechnisch relevante Besonderheiten des Bodenwasserhaushalts	Bezug zu Wassereinzugsgebiet mit Messwehr
Bodenwasserrelevante Begleitparameter und abgeleitete Größen	pot. Evapotranspiration nach FAO Referenz, reale Evapotranspiration mittels Bodenwassermodell, Sickerwasser-rate berechnet; pF-WG-Kurve vorhanden, Klimaparameter (Niederschlag, Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, Globalstrahlung)
Allgemeine Anforderungen und Eignung für Themen erfüllt?*	Ja (allgemeine Anforderungen, Bodenwasserhaushalt, Organische Substanz, z.T. Bodenbiologie); Nein (Erosion, Bodentemperatur)
Einrichtungsjahr des Standorts*	1984
Meldung für den Verbund	2013
Bemerkungen zum Standort	Humusform nach KA5: F-Mull, Bezug zu hydrol. Einzugsgebiet (bzgl. Bodenwasserhaushalt)
Gemessene Größen für Bodenwasserhaushalt*	Bodenwassergehalt, Bodenwasserspannung, Stoffkonzentration im Bodenwasser

* Felder aus Eckdatenformularen des Konzeptentwurfs für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund (Lazar et al. 2014)

Tabelle 3: Datenfelder für Messgrößen des Bodenwasserhaushalts an jedem Standort

Felder	Beispiel
Messprinzip	FDR
In-situ	Ja
Messgerät	Profilsonde PR2/6
Qualitätsrelevante Eigenschaften des Messgeräts	-
Genauigkeit (Präzision) des Messgeräts	6 % Abweichung,
Anzahl Parallelen	3 pro Tiefe
Messtiefe(n)	10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm, 100 cm
Dimension der Messgröße	Volumen-%
Messhäufigkeit*	15 minütlich
Messbeginn der Messgröße*	28.10.2009
chemische Analysen: Stoff(e) mit Angaben zu Bestimmungsmethoden	-
Bemerkungen zur Messgröße	-

* Felder aus Eckdatenformularen des Konzeptentwurfs für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund (Lazar et al. 2014)

Eine erste Befüllung der Formulare erfolgte aus den Eckdaten, die für ca. 50 Messstandorte des Vorgängerprojekts vorlagen (Lazar et al. 2014). Hier hatten die messenden Institutionen bereits allgemeine Eigenschaften der Standorte angegeben und eine Einschätzung der Standorteignung für Klimafolgen und -anpassung für die Themen Bodenwasserhaushalt, Erosion, Bodenbiologie und/oder Organische Substanz vorgenommen. Weitere Detailangaben wurden bei allen Messnetzbetreibern angefragt, die ihre Standorte 2017/18 meldeten und diese für den Bodenwasserhaushalt oder für Bodenerosion als geeignet befunden haben. Die von den Betreibern zur Verfügung gestellten Detailangaben wurden auf Plausibilität geprüft, ggf. in Absprache mit den Betreibern angepasst und schließlich zu einem Gesamtdatenbestand zusammengeführt.

Bei den Level II-Standorten des forstlichen Umweltmonitorings haben teilweise die Betreiber der Länder die Formulare ausgefüllt. Teilweise wurden die methodischen Angaben für die Level II-Standorte aus einem Datenbankauszug des Thünen Instituts, Institut für Waldökologie mit Stand 07.05.2018 in Verbindung mit Angaben zu Standards in den ICP Forests Manualen übernommen (Raspe et al. 2016 und Nieminen et al. 2016, vgl. Kap. 7.1.2). Dies trifft auf insgesamt 24 Standorte zu. Die aus den Eckdatenformularen des Vorgänger-Vorhabens stammenden Angaben von 11 Level II-Flächen in Baden-Württemberg, Saarland und Sachsen wurden nicht von den jeweiligen Länderinstitutionen überprüft. Daher konnten hier keine konkreteren methodischen Angaben erfasst werden. Eine einzelstandortbezogene Prüfung der jeweiligen Länderinstitution fehlt weiterhin bei fünf Intensiv-BDF in Niedersachsen sowie bei 13 Standorten in Mecklenburg-Vorpommern, Berlin, Brandenburg und Baden-Württemberg, die sowohl BDF als auch Level-II Flächen sind. Die Angaben dieser Standorte beruhen auf den Eckdatenformularen nach Lazar et al. (2014) und ggf. den ICP Forests Level II Manualen, wenn sie zum Level II-Programm gehören. Zu den Intensiv-BDF in Niedersachsen wurden allgemeine mündliche Angaben der betreibenden Institution eingearbeitet.

Anhand der vorliegenden Informationen über die gemeldeten Standorte wurden Kriterien für die Eignung von Standorten für das Thema Bodenwasserhaushalt formuliert und Überlegungen zur Auswahl von Kernstandorten angestellt. Kernstandorte im Verbund sollen vorrangig dazu dienen können, die Fragestellung des Verbunds zu beantworten: „Wie verändert sich der Bodenwasserhaushalt im Rahmen des Klimawandels?“ Dazu müssen sie prinzipiell in Bezug auf Messmethodik, Messhäufigkeit und Messtiefen vergleichbare Messdaten liefern.

Die Kriterien für Kernstandorte des Bodenwasserhaushalts wurden so gewählt, dass sie bestimmte Qualitätsanforderungen an die Messungen widerspiegeln. Sie sind einerseits fachlich begründet (Messgröße und Messtechnik, Häufigkeit der Messung), andererseits pragmatisch gesetzt, um die in Deutschland vorhandenen Messstandorte optimal zu nutzen und möglichst viele Standorte in der Fläche einzubeziehen (Messtiefen, Länge der Zeitreihe). Die Bodenfeuchte und die Sickerwassermenge wurden bereits im BOKLIM-Bericht (Kaufmann-Boll et al. 2011) als zentrale Parameter für die Frage nach Veränderungen im Boden aufgrund von Klimaänderungen benannt. Somit müssen an Kernstandorten des Bodenwasserhaushalts eine oder beide Größen erfasst und die in Tabelle 4 aufgeführten Kriterien erfüllt sein.

Tabelle 4: Kriterien für Kernstandorte des Bodenwasserhaushalts im Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund

Kriterium	Bemerkungen
Messung von Bodenwassergehalt (BWG) oder/und Bodenwasserspannung (BWS) mit den Messmethoden FDR, TDR, Tensiometer oder gravimetrischer Messung	Die Messgrößen bilden die Bodenfeuchte ab. Wären beide Messgrößen obligatorisch, würden die Standorte in Bayern nicht als Kernstandorte benannt werden (keine Messung der Bodenwasserspannung).
+ Wasserspannungskurve liegt vor (gemessen oder abgeleitet).	In der Regel wird eine pF-WG-Kurve bei Einrichtung von Bodenmonitoringstandorten einmalig im Labor ermittelt.
+ Die Messung erfolgt in mindestens einer Bodentiefe.	Bei einer Anforderung von mindestens drei Bodentiefen für die Bodenfeuchte würden 16 Standorte, u.a. in Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein, aus dem Bestand der Kernstandorte entfallen.
+ Die Messung erfolgt mindestens täglich.	Die gravimetrisch gemessenen Wassergehalte der gemeldeten Standorte erfüllen dieses Kriterium nicht.
Messung der Sickerwassermenge im Feldlysimeter	
+ Die Messung erfolgt kontinuierlich* (lückenlos).	Alle gemeldeten Feldlysimeter erfüllen nach derzeitigem Kenntnisstand diese Anforderung.
Messung des Grundwasserstands bei Moorstandorten	Bisher wurden keine Standorte in Mooren für den Verbund gemeldet.
+ Die Messung erfolgt kontinuierlich (lückenlos).	
Die Messung erfolgt seit mindestens 10 Jahren .	Bei einer Anforderung von mindestens 20 Jahren wären die Messstandorte für Bodenfeuchte sehr lückenhaft in Deutschland verteilt.
Für den Standort liegen für den vorliegenden Messzeitraum Klimadaten vor (gemessen oder abgeleitet).	Die Anforderung wird an allen Intensiv-Monitoring- und Forschungsstandorten erfüllt.

* Auch kumulierte Messungen (z.B. alle 14 Tage) werden hier als kontinuierlich angesehen.

Weitere Anforderungen an ein Messnetz für den Bodenwasserhaushalt liegen in der Berücksichtigung von Feucht- und Trockenstandorten und verschiedenen Nutzungen (Acker, Grünland, Forst, Moor, Feuchtgebiete).

Als Kriterien für Kernstandorte wurden weiterhin das Vorhandensein der Messgrößen „Bodentemperatur“ und „chemische Zusammensetzung der Bodenlösung“ sowie die potenzielle Eignung für den Themenbereich „Organische Bodensubstanz“ geprüft. Bei Anwendung der genannten Kriterien entfallen jedoch z.B. die Messstandorte von ganzen Bundesländern oder diejenigen des DWD aus dem Bestand der Kernstandorte, so dass sie schließlich verworfen wurden.

Standortprüfung Bodenerosion

Ausgehend von den Ergebnissen und Standortabfragen der „Konzeption eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ (Lazar et al. 2014) wurde eine Aktualisierung der Beschreibung der Bodendauerbeobachtungsprogramme der Länder mit den im Jahr 2014 gemeldeten Erosionsmonitoringflächen in vier Bundesländern vorgenommen. Anhand der Rückmeldungen und weiterer Recherchen erfolgte die Fortschreibung nach der folgenden Vorgehensweise:

- ▶ Bewertung der im Jahr 2014 gemeldeten Standorte,
- ▶ Literatur- und Internetrecherchen sowie Befragung der verantwortlichen Institutionen zur Erfassung neuer Messprogramme, -methoden und -standorte,
- ▶ Bewertung, Beschreibung und Kartendarstellung gemeldeter Standorte und Messprogramme (Monitoring, Schadensfallkartierung),
- ▶ Erarbeitung und Versand eines Abfrageformulars an die Standortbetreiber als Grundlage für die Definition von Anforderungen an die Standorteigenschaften und die Datenerhebung (siehe Anhang C.2),
- ▶ Fortschreibung der Anforderungen an die Standorteigenschaften und die Datenerhebung aus den Befragungen der Standortbetreiber,
- ▶ Bewertung des Erosionsmessnetzes vor dem Hintergrund der Klimavulnerabilität (Kartendarstellung).

Benennen von Handlungsempfehlungen

Es war zu formulieren, welche Anpassungs- und Ergänzungsmaßnahmen gegebenenfalls noch erforderlich sind, damit der Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund in die Praxis überführt werden kann. Hier war auch die Bereitschaft der Daten erhebenden Stellen, Daten zur Verfügung zu stellen, zu berücksichtigen und gegebenenfalls bestehende Lücken waren zu benennen. Nach Möglichkeit sollten Aussagen zu anfallenden Kosten gemacht werden, damit die einzelnen Messnetzbetreiber einschätzen können, was an zusätzlichen finanziellen und personellen Belastungen auf sie zukommt. Weiterhin stellten sich Fragen nach Wegen zur Gewährleistung der Datenvergleichbarkeit im Hinblick auf die eingesetzten Probenentnahme- und Untersuchungsmethoden sowie der technischen Konzeptumsetzung und Herstellung einer Datenkompatibilität.

Auf der Grundlage der Vorarbeiten und Erfahrungen aus dem BOKLIM-Projekt (Kaufmann-Boll et al. 2011) und den Ansätzen von Lazar et al. (2014) sind konkrete Vorschläge für Arbeitsschritte zur Umsetzung der Konzeption in die Praxis in einem „Arbeitspapier“ formuliert worden. Dieses Papier wurde im Oktober 2018 in einem Fachgespräch mit Vertretern von Bund- und Länderinstitutionen sowie Forschungseinrichtungen, die mit dauerhaften bodenbezogenen Messungen befasst sind, diskutiert und weiterentwickelt. Das daraus resultierende

konkretisierte „Konzept für den Start des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ ist das wichtigste Ergebnis der Forschungsarbeit und findet sich unter Berücksichtigung der Hinweise und Vorschläge der Teilnehmenden des Fachgesprächs in Kapitel 8 wieder. Die Angaben zu erwarteten Aufwänden beruhen auf Schätzungen der Autorinnen und Autoren.

5 Ergebnisse der Messnetzuntersuchung

Nach der in diesem Projekt erfolgten Untersuchung der bodenbezogenen Messnetze liegen gegenüber dem Stand von 2014 neue Informationen vor. Dazu gehören beschreibende Steckbriefe für Bodendaten, die Metadaten für dauerhaft angelegte Programme enthalten. Sie liefern einen Überblick über den Zweck, den Messumfang und die Methoden der Bodenuntersuchungen. Die beteiligten Institutionen und eine fachverantwortliche Person als Ansprechpartner/-in sind ebenfalls benannt. Die Aktualisierung der Steckbriefe ist in Anhang A.1 dokumentiert.

Aktualisierte und neue Steckbriefe für Bodendaten

Neunzehn bodenbezogene Messprogramme sind in Form von Steckbriefen beschrieben (siehe Tabelle 1 in Kapitel 4). Zusammenfassend lässt sich Folgendes feststellen:

- ▶ Die in der 2. Auflage der Broschüre „Bodendaten in Deutschland“ (UBA 2012) beschriebenen bundesweiten Mess- und Erhebungsaktivitäten bestehen weiterhin und haben sich in ihren Messkonzeptionen nicht wesentlich verändert. Der Messzeitraum hat sich um sechs Jahre verlängert, so dass – je nach Parametern und deren Messhäufigkeiten – ein oder mehrere Messzyklen hinzugekommen sind.
- ▶ Innerhalb der Programme hat sich teilweise das Untersuchungsspektrum verändert, d.h. die gemessenen Parameter (BZE LW: Nahes Infrarot (NIR)-Spektren, bodenkundliche Profilsprache, BDF: Ergänzung dl-PCB in Hessen und PBSM in Brandenburg, Wegfall von Bodenwasseruntersuchungen in Bayern (LfU) an allen fünf Intensiv-BDF, Wegfall bodenbiologischer Untersuchungen in Thüringen; Einstellung von Erosionsmessungen im Rahmen der BDF in Bayern (LfL), Hessen und im Saarland) und die Methoden (BZE LW: Ergänzung von horizontbezogener Probenentnahme, BDF: neue Messmethode für Körnung in Bayern).
- ▶ Die Anzahl der Messstandorte hat sich bei den BDF seit dem Jahr 2012 verändert: Bundesweit liegt die Anzahl bei rund 850. In Bayern sind 5 Intensiv-BDF entfallen, die aber weiterhin als Basis-BDF betrieben werden (LfU). Hinzugekommen ist hier 1 neue BDF mit Bodenklimastation, an der Bodenfeuchte und -temperatur gemessen werden (LfU) sowie 3 Basis-BDF (LfL). In Hessen sind 3 Basis-Flächen entfallen und 1 ist hinzugekommen; in Sachsen sind 4 Basis-BDF entfallen und 3 hinzugekommen, in Schleswig-Holstein jeweils 1. In Niedersachsen sind 2 neue Forst-Intensiv-BDF ergänzt worden und 2 Forst-Basis-Flächen entfallen. In Sachsen wurden die Intensiv-Messeinrichtungen an einer Fläche abgebaut. In Sachsen-Anhalt sind 8 Basis-BDF und 1 Intensiv-BDF entfallen und 1 Intensiv-BDF hinzugekommen. Neue Flächen wurden auch in Baden-Württemberg (1) und Brandenburg (3) eingerichtet, während in Nordrhein-Westfalen und im Saarland jeweils 1 BDF entfallen ist. In Nordrhein-Westfalen wurden 45 neue Flächen des Humusmonitoring ins BDF-Programm integriert. In Berlin sind neue BDF in Planung.
- ▶ Die Anzahl von Lysimeter-Stationen hat sich gegenüber der Beschreibung aus dem Jahr 2014 erhöht. Aufgenommen wurden Lysimeter des ZALF und des Forschungsprogramms TERENO sowie die Ökologische Versuchsanlage des Thünen Instituts in Britz und eine Messstation für die Endabdeckung auf der Industriellen Absetzanlage Culmitzsch. Zudem wurden Lysimeter der mittel- und nordostdeutschen Kooperation beschrieben, die insbesondere Fragestellungen des Grundwasserschutzes (Nitrat) behandeln (siehe Anhang A.2). Zwei

Lysimeteranlagen sind an andere Orte verlegt worden (in Berlin von Dahlem nach Marienfelde und in Sachsen von Leipzig-Möckern nach Nossen). Alle anderen Lysimeteranlagen sind nach unserem Kenntnisstand weiterhin in Betrieb.

- ▶ Landnutzungsänderungen auf BDF liegen in Bayern (LfL), Brandenburg, Hessen, Niedersachsen (LBEG), Saarland, Schleswig-Holstein, Sachsen und Sachsen-Anhalt vor. Gemessene Parameter und Messhäufigkeiten auf BDF wurden – detaillierter als in UBA (2012) – für die einzelnen Länder aufgegliedert. Die Messhäufigkeiten auf BDF haben sich in einigen Ländern geändert, so in Hessen von alle fünf auf alle zehn Jahre; in Schleswig-Holstein wurden Hauptinventuren (alle zwölf Jahre) und Zwischeninventuren (versetzt alle sechs Jahre) eingeführt, letztere mit reduziertem Parameterspektrum.
- ▶ Die Nutzungsbedingungen für die Daten haben sich bei der BZE LW geändert; hier sind nun eine Kooperationsvereinbarung und die datenschutzrechtliche Unbedenklichkeit Voraussetzung für die Weitergabe von Daten. Die erste BZE LW wurde im Dezember 2018 abgeschlossen.
- ▶ Maßgebliche Änderungen ergeben sich aus den Aktivitäten im BonaRes-Förderprogramm für die Daten der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche. Hier wird eine zentrale Verfügbarkeit von Metadaten, Methoden und perspektivisch auch von qualitätsgesicherten Messdaten über ein Internetportal angestrebt. Eine zentrale Datenhaltung wird seit dem Jahr 2015 im BonaRes Zentrum für Bodenforschung erarbeitet; eine übergreifende Koordination erfolgt seit 2018 innerhalb von BonaRes. Weitere Ziele sind die Erhaltung, Ergebnisdokumentation und Auswertung der Versuche unter Mitwirkung aller an Dauerfeldversuchen beteiligten Einrichtungen. Bei den Feldlysimetern besteht weiterhin eine dezentrale Datenhaltung. Eine länderübergreifende Kooperation bündelt jedoch Auswertungen hinsichtlich Nitrats im Grundwasser.
- ▶ Die Messprogramme / Datenbestände des ICP Forests, der BZE Wald, des DWD, die Umweltprobenbank sowie TERENO SoilCan haben sich im Grundsatz gegenüber 2014 nicht verändert. ICOS-D (Integrated Carbon Observation System – Deutschland) wurde neu beschrieben und ist für das Thema Bodenwasserhaushalt interessant, da u.a. die Bodenfeuchte gemessen wird. Es gibt Überschneidungen mit den Messflächen von TERENO SoilCan (5 der 13 TERENO SoilCan Standorte sind im ICOS-D-Programm integriert).

Bei fast allen Programmen wurden die Fachverantwortlichen und/oder Zuständigkeiten sowie Quellen oder Publikationen aktualisiert bzw. ergänzt.

Weitere aktuelle Aktivitäten

Bei der Untersuchung der Messnetze wurden weitere Aktivitäten ermittelt, die für die Konzeption eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds von Interesse sind.

Ein aktueller Bericht aus dem BonaRes-Forschungsprogramm fasst Informationen über Bodendaten für landwirtschaftlich genutzte Flächen in Deutschland zusammen (Stein et al. 2019). Dazu gehören Bodendaten verschiedener Quellen, z.B. von Behörden, staatlichen Stellen oder Forschungseinrichtungen. Unterschieden werden Punktmessungen (Oberboden oder Bodenprofile) und flächenhafte Vektor- und Rasterdaten (Karten). Karten mit Maßstab bis 1:1.000.000 sind enthalten, ein Bundesland bildet die kleinste räumliche Bezugsskala. Die Daten werden nach den folgenden Kriterien bewertet: Auffindbarkeit, Zugänglichkeit, Interoperabilität und

Wiederverwendbarkeit (die FAIR-Prinzipien nach Wilkinson et al. 2016) sowie dahingehend, ob ein freier Zugang zu den Daten besteht. Für die aufgeführten Punktdaten liegt die Information vor, ob sich die Daten auf die Horizonte des Bodenprofils beziehen, und ob es eine oder mehrere Angaben pro Bodenprofil gibt. Aufgeführte Messprogramme sind das Internationale Bodenfeuchte Netzwerk (Soil Moisture Network ISMN), das Netzwerk FluxNet für Eddy Kovarianz-Messungen, ICOS, LUCAS, die Wetterstationen mit Bodentemperaturmessungen des Deutschen Wetterdienstes, TERENO, Edaphobase und die Exploratorien zur funktionellen Biodiversitätsforschung sowie internationale, europäische und deutsche Bodenprofil-Datenbanken (Bund, Länder), die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft und die Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) der Länder. Die aufgeführten Karten der Publikation behandeln die Themen Bodeneigenschaften, Hydrologie, Erosion, Kohlenstoff und organische Substanz, Stoffeinträge, Bodenmanagement und Bodenfunktionen.

Im Jahr 2015 wurde auf Initiative der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eine Befragung zur Erfassung terrestrischer Observatorien in Deutschland und im Ausland bei Universitäten, Forschungseinrichtungen und Landesbehörden durchgeführt (Rötzer & Vereecken 2015). Die Observatorien, die deutschlandweite Langzeit-Bodendaten liefern, lassen sich dabei den in Tabelle 1 genannten Monitoring- und Erhebungsnetzwerken zuordnen (z.B. ICP Forests Level II, BZE Wald und Landwirtschaft). Unter anderem wird auch die agrarmeteorologische Forschung des DWD genannt, die seit 1952 besteht und insbesondere für das Fokusthema Bodenwasserhaushalt eine wertvolle deutschlandweite Datenbasis für die Untersuchung von Klimafolgen bietet (Böttcher & Schmidt 2016).

Das Forschungsnetzwerk LTER-D (Long term ecological research) ist der deutsche Beitrag zur langfristigen ökologischen Ökosystemforschung in Europa (LTER-Europe). Die darin integrierten Bodenmessstandorte sind Teil der in Tabelle 1 genannten Programme (ICP Forests Level II, TERENO, BDF). Die Standorte des LTER-D sind im Auskunftssystem DEIMS-SDR (Dynamic Ecological Information Management System - Site and dataset registry) enthalten (<https://deims.org/>). Hier können Standort- und Messdaten des Longterm Ecological Research abgerufen werden.

Das International Soil Moisture Network (ISMN) ist eine internationale Kooperation zur Einrichtung und Pflege einer globalen In-Situ-Bodenfeuchtigkeitsdatenbank. Diese Datenbank ist ein wesentliches Instrument zur Validierung und Verbesserung globaler Satellitenprodukte sowie von Klima- und hydrologischen Modellen. In dem offenen Netzwerk sind derzeit Daten des Deutschen Wetterdienstes (Station Lindenberg), des Forschungszentrums Jülich (5 TERENO-Standorte) und der Ludwig-Maximilians-Universität München (11 Bodenfeuchte-Messstationen des Departments für Geographie) (ismn.geo.tuwien.ac.at) integriert.

Weitere Recherchen nach bodenbezogenen Messaktivitäten fanden in der Datenbank der Europäischen Innovationspartnerschaft „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“ (EIP-Agri) statt. Inhaltlich liegt der Projektfokus auf betriebswirtschaftlichen, pflanzenbaulichen und anderen agrarwirtschaftlichen Themen. Die Datenbank beinhaltet keine langfristigen Messaktivitäten im Bereich Bodenmonitoring und Bodenwasserhaushalt.

Die 2018 gegründete DFG-Forschungsgruppe „Cosmic Sense“ erforscht die noch junge Methode Cosmic Ray Neutron Sensing (CRNS). Sie dient der flächenhaften Erfassung des Bodenwassergehalts und schließt die Lücke zwischen Punktmessungen und Fernerkundung. Ziel der Forschung ist die Entwicklung von speziellen Neutronendetektoren und das tiefere Verständnis von Bodenhydrologie und Neutronentransport, um daraus die Bodenfeuchte ableiten zu können. Die Methode soll auf größeren Flächen (10 bis 20 ha) eingesetzt werden, um die Bodenfeuchte bspw. auf Äckern bestimmen zu können. Die vorgesehenen Feldkampagnen finden in TERENO-Observatorien statt.

Die Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Allianz der Wissenschaftsorganisationen verfolgt das Ziel, ein Vernetzungskonzept zu entwerfen, das in Umsetzungsvorschläge zur Stärkung der terrestrischen Langzeitforschung in Deutschland einfließen soll. Dies schließt alle Umweltkompartimente mit Bezug auf die Landoberfläche (Luft, Gewässer, Boden, Pflanzen und Tiere) ein. Es wird ein systemorientiertes Observatorien-Netz angestrebt, das die weitgehend fragmentierte Langzeitforschung zu Umweltfragestellungen integriert. Die Koordination und ein geregelter Zugang zu den Forschungsergebnissen sind weitere Ziele des Vorhabens. Grund für das Projekt ist die mangelnde Abstimmung und Koordination in der terrestrischen Umweltforschung. Denn neben den fachspezifischen Hürden erschweren die unterschiedlichen Zuständigkeiten von Bund und Ländern die Netzwerk-Strukturen. An der Arbeitsgruppe der Allianz sind 15 Personen beteiligt, die unterschiedlichen Institutionen angehören: TU München, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Universität Köln, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Georg-August-Universität Göttingen, Friedrich-Schiller-Universität in Jena, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Ludwig-Maximilians-Universität München, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und angewandte Ökologie (IME), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Forschungszentrum Jülich (FZJ) und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Die Federführung der Arbeitsgruppe liegt bei der Helmholtz-Gemeinschaft und der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Der Abschlussbericht „Empfehlung zur Einrichtung eines nationalen Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung“ wurde 2017 vom UFZ veröffentlicht (Kögel-Knabner et al. 2017).

Das F+E-Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“ (Projektlaufzeit: 2015-2018, FKZ 3715 48 1030) diente zur Unterstützung der behördenübergreifenden Zusammenarbeit im Rahmen der Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel und knüpft an die Vulnerabilitätsstudie Adelphi et al. (2015) an. Im Ergebnis des Vorhabens wird die Sickerwasserrate als eine besonders wichtige Größe angesehen. Die Kopplung von Klimaszenarienrechnungen mit hydrologischen und bodenkundlichen Daten wird als technisch und methodisch gut möglich angesehen. Als Forschungsbedarf wird unter anderem die Entwicklung von Ansätzen zur Regionalisierung vorhandener Parameter u.a. für die Erfassung von Bodeneigenschaften formuliert.

Das Deutsche Klimavorsorge-Portal (Klivo, www.klivoportal.de) wurde 2018 von der Bundesregierung initiiert. Es beinhaltet Klimavorsorge-, Klimainformations- und Klimaanpassungsdienste, die von Kommunen, Länder und Bund zur Vorsorge und Anpassung an den Klimawandel genutzt werden können. Das Portal bündelt verschiedene Karten, Datenquellen und Leitfäden und erleichtert dadurch die Recherche für spezifische Fragestellungen zum Thema.

6 Bereitschaft zur Teilnahme am Verbund

Eine Vielzahl von Institutionen beabsichtigt, Standorte in den Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund einzubringen. Dazu gehören Institutionen des Bundes (UBA, TI und DWD), Länderinstitutionen, die BDF- und Level II-Flächen betreiben, sowie Forschungseinrichtungen des TERENO-Programms. Die Bereitschaft zur Bereitstellung von Standort- und Messdaten für interessierte Anwender ist hier gegeben. Die betreibenden Institutionen bewerten die gemeldeten Einzelstandorte als geeignet für die Bearbeitung von Fragestellungen in Bezug auf Veränderungen des Bodenzustands durch Klimaveränderungen und haben sie jeweils den Themen Bodenwasserhaushalt, Organische Substanz, Bodenbiologie und/oder Bodenerosion zugeordnet. Insgesamt haben 10 Messprogramme bzw. -aktivitäten ihre Bereitschaft bekundet, am Verbund teilzunehmen. Rund 5.900 bodenbezogene Standorte wurden in diesem Zusammenhang bisher gemeldet:

- ▶ rund 5.100 der Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft,
- ▶ 526 agrarmeteorologische Standorte des DWD für Wirkmodellierungen (ohne bodenbezogene Messungen),
- ▶ 93 Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), davon 54 Intensiv-BDF,
- ▶ 74 Level II-Plots des ICP Forests-Programms,
- ▶ 51 Bodentemperatur-Messstationen des DWD,
- ▶ 15 Feldlysimeter-Anlagen (TERENO SoilCan, Versuchsstation Britz des TI-Wald, Großlysimeter Colbitz der NW-FVA),
- ▶ 11 Standorte der Umweltprobenbank des UBA,
- ▶ 4 Bodenfeuchte-Messstationen des DWD,
- ▶ 13 Erosionsmessflächen bzw. -beobachtungsgebiete; darüber hinaus existieren schadensfallabhängige Kartierungen.

Auch signalisierte das TI die Bereitschaft, die Standorte der Ende 2018 abgeschlossenen ersten BZE Landwirtschaft in den Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund einzubringen, ebenso wie die Standorte des Programms ICOS-D. Alle 14 BDF-betreibenden Bundesländer haben in einer Umfrage des Umweltbundesamtes von 2017 ihre grundsätzliche Bereitschaft zur Mitwirkung im Verbund bekundet. Daher können – ergänzend zu den oben aufgeführten 5.900 Standorten – über 700 weitere Basis-BDF im Verbund berücksichtigt werden (vgl. Kap. 8.2.5).

Die Tabellen 5 und 6 führen die bisher für die Teilnahme am Verbund gemeldeten Standorte der erhebenden Institutionen bzw. Bundesländer im Einzelnen auf. Ein Teil der Standorte ist Bestandteil verschiedener Programme (z.B. Level II und BDF); die Gesamtzahl der Intensiv-Monitoringstandorte beträgt aktuell 192. Neben den standortbezogenen Messaktivitäten werden in vier Ländern schadensfallabhängige Erosionskartierungen durchgeführt, deren Relevanz in Kapitel 7.2 beurteilt wird.

Angefragt hinsichtlich der Bereitschaft zur Teilnahme von Standorten am Verbund wurden weiterhin das BonaRes-Datenzentrum beim Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) und die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) als federführende Institution der Kooperation Lysimeter, die Stationen in Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern und Bayern vernetzt.

Tabelle 5: Von Bundesinstitutionen gemeldete Standorte des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds, Stand: Dezember 2018

Institution des Bundes	Anzahl und Art der Messstandorte
DWD, Abt. Agrarmeteorologie*	Insg. 526 Stationen der agrarmeteorologischen Modellierung, davon folgende mit besonderen Merkmalen: 4 Messstationen Bodenfeuchte (BY, SN, NI, BB) 51 Messstationen Bodentemperatur 132 Messstationen mit Klimadaten ab mind. 1961
Forschungszentrum Jülich	13 TERENO SoilCan (Lysimeterstationen)
Johann Heinrich von-Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme	ca. 2.000 Standorte der BZE Wald I und II 74 ICP Forests Level II-Plots Versuchsstation Britz bei Eberswalde (Großlysimeter)
Johann Heinrich von-Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz	ca. 3.100 Standorte der BZW Landwirtschaft**
Umweltbundesamt, FG II 2.4	14 Standorte der Umweltprobenbank

* Die über 500 Stationen vom DWD Agrarmeteorologie werden alle für Modellierungen genutzt. An einem Teil dieser Stationen werden zusätzliche Messgrößen erhoben (Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Messstationen mit Klimadaten ab mind. 1961).

** Bereitschaft zur Teilnahme am Verbund wurde bekundet.

Tabelle 6: Von Länderinstitutionen gemeldete Standorte des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds, Stand: Dezember 2018

Land	Anzahl und Art der Messstandorte
Baden-Württemberg	5 Intensiv-BDF 1 Basis BDF 2 Erosions-BDF 10 Level II-Plots ¹
Bayern	14 Basis-BDF 13 Level II-Plots ² 3 UPB 1 DWD Bodenfeuchte 5 TERENO SoilCan schadensfallabhängige Erosionskartierung
Berlin	1 Level II-Plot/Basis-BDF
Brandenburg	6 Level II-Plots/Basis-BDF 1 DWD Bodenfeuchte 1 Versuchsstation Britz (TI-Wald) 1 TERENO SoilCan
Bremen	-
Hamburg	3 Basis-BDF
Hessen	7 Level II-Plots 1 Intensiv-BDF 2 Basis-BDF ³

Land	Anzahl und Art der Messstandorte
Mecklenburg-Vorpommern	2 Level II-Plots/Basis-BDF 1 TERENO SoilCan schadensfallabhängige Erosionskartierung
Niedersachsen	13 Intensiv-BDF 4 Umweltprobenbank ⁴ 8 Level II-Plots ⁵ 1 DWD Bodenfeuchte
Nordrhein-Westfalen	4 Intensiv-BDF/Level II-Plots 3 TERENO SoilCan
Rheinland-Pfalz	17 Intensiv-BDF 10 Level II-Plots ⁵ 1 Umweltprobenbank
Saarland	1 Level II-Plot 2 Umweltprobenbank
Sachsen	5 Intensiv-BDF ⁵ 2 Umweltprobenbank 4 Level II-Plots 1 DWD Bodenfeuchte schadensfallabhängige Erosionskartierung
Sachsen-Anhalt	4 Intensiv-BDF 2 Basis BDF 3 Level II-Plots ⁵ 3 TERENO SoilCan 1 Feldlysimeter 1 Intensiv-BDF an DFV-Standort (Bad Lauchstädt) schadensfallabhängige Erosionskartierung
Schleswig-Holstein	3 Basis-BDF 2 Basis- und Intensiv-BDF 1 Intensiv-BDF 2 Umweltprobenbank 1 Level II-Plot ⁶
Thüringen	5 Level II-Plots 3 Basis-BDF ³

¹ Drei Level II-Plots sind auch BDF (Intensiv / Basis).

² Die Level II-Plots sind auch Basis-BDF.

³ Die Basis-BDF sind auch Level II-Plots.

⁴ Zwei Flächen sind auch Level II-Plots bzw. Intensiv-BDF.

⁵ Die Intensiv-Messeinrichtungen an einer BDF (23, Ehrenfriedersdorf) werden 2019 abgebaut (mündl. Mittlg. LfULG Sachsen).

⁵ Die Level II-Plots sind auch Intensiv-BDF.

⁶ Der Level II-Plot ist auch UPB-Standort.

7 Eignungsbewertung der Messprogramme

Nachdem die bodenbezogenen Messprogramme und -aktivitäten beschrieben sind, stellte sich die Frage nach der Eignung der Messstandorte und der dort gewonnenen Messdaten für die Bearbeitung von Fragen der Wirkung von Klimafolgen auf die Böden in Deutschland. Die gegenüber 2014 aktualisierte und um weitere Messaktivitäten ergänzte Eignungsbewertung ist in Abbildung 1 zusammengefasst. Die Bewertung basiert auf den aktualisierten Steckbriefen für Bodendaten (siehe Kapitel 5). Bewertet wurden bundesweit betriebene Messaktivitäten. Länderspezifische oder regionale Beobachtungsprogramme, wie z.B. das Nitrat-Monitoring im Sickerwasser und das Humusmonitoring in Nordrhein-Westfalen, sind nicht in Abbildung 1 aufgeführt, werden jedoch in den Kapiteln 7.1.2 und 7.3 mitbewertet.

Der linke Teil der Abbildung 1 beschreibt die räumliche Verteilung der Untersuchungsstandorte, die Einheitlichkeit der eingesetzten Methoden, die Art der Datenhaltung und die aktuelle Datenverfügbarkeit. Als für das gesamte Bundesgebiet flächenrepräsentativ werden Programme angesehen, deren Untersuchungsstandorte das Bundesgebiet oder definierte Teilflächen (z.B. nach Nutzung, Leitbodengesellschaft) flächenhaft in Form eines Rasters oder mittels Standorten, die für eine definierte Region repräsentativ sind, abdecken. Im rechten Teil sind Programme, die für die bundesweite Untersuchung von klimabedingten Änderungen des Bodenzustands geeignet sind, farblich gekennzeichnet. Dies sind zunächst Programme, die eine dauerhafte Beobachtung in Form von Messungen durchführen. Für die Schwerpunktthemen Bodenerosion und Bodenwasserhaushalt (BWH) ist darüber hinaus gekennzeichnet, welche Programme an den Untersuchungsstandorten Eingangsdaten für Modelle zur Verfügung stellen. Nähere Informationen zur Bewertung finden sich in den themenbezogenen Kapiteln 7.1 bis 7.4.

Bewertet wurde hier die aktuelle Eignung. Die Standorte der genannten Messprogramme eignen sich potenziell auch für Datenerhebungen zu anderen Themen, wenn entsprechende Größen aufgenommen und langfristig untersucht werden (z.B. bodenbiologische Untersuchungen auf Level II-Plots).

Keine der Messaktivitäten erfüllt allein alle inhaltlichen und organisatorischen Anforderungen. Daher ist es wichtig, die jeweiligen Stärken der Programme in einem gemeinsamen Ansatz zu kombinieren. Nur so lässt sich eine robuste Datenlage herstellen, die es erlaubt, Klimafolgen aus den komplexen Wechselwirkungen mit Standortfaktoren und Nutzungseinflüssen zu erkennen (Lazar et al. 2014).

Für die Aussagen zur Eignung der Programme sind die Konzeption (Landnutzungen, Mess- und Erhebungsgrößen, Standortauswahl und -verteilung, Untersuchungshäufigkeiten) und die Organisation (zentral koordiniert oder dezentral betrieben) ausschlaggebend.

In Dauerbeobachtungs- und Monitoringprogrammen werden Messungen an festen Standorten land- und forstwirtschaftlicher Nutzung in regelmäßigen Zeitintervallen (z.B. minütlich bis alle 10 Jahre) und langfristig (mindestens 30 Jahre) fortgeführt. Die Bodenzustandserhebungen in Wald und Landwirtschaft liefern in periodischer Wiederholung (ca. alle 15 Jahre) flächenrepräsentative Daten zum Bodenzustand. Weitere flächenrepräsentative Beobachtungsmessnetze betreiben der Deutsche Wetterdienst und das European Statistical Office (EUROSTAT). Forschungsaktivitäten an einzelnen oder einer Gruppe von Einzelstandorten befassen sich mit Prozessfragen und sind i.d.R. dezentral organisiert.

Abbildung 1: Eignung vorhandener Messnetze für die Erfassung und Modellierung von klimabedingten Änderungen des Bodenzustands

	Flächen-repräsentativ für BRD	Homogene Methoden	Zentrale Daten-haltung	Datenverfüg-barkeit	Eignung für Themen			
					Erosion	BWH	OS	Biologie
ICP Forests Level II		X	X	TI				
ICP Forests Level I / BZE Wald	X	X	X	TI				
BZE Landwirtschaft	X	X	X	TI				
Intensiv-BDF		z.T.	z.T.	Land				
Basis-BDF		z.T.	z.T.	Land, UBA				
Erosions-Messflächen				Land				
Landw. Dauerfeldversuche				Standort, BonaRes				
Feldlysimeter inkl. TERENO			z.T.	Standort, TERENO				
DWD Agrarmet. Modellierung	X	X	X	DWD				
DWD RADOLAN	X	X	X	DWD, Online-Portal				
DWD Bodenfeuchte		X	X	DWD				
Umweltprobenbank		X	X	UBA, z.T. Online-Portal				
ICOS-D		X	X	TI, Online-Portal				
ICP Integrated Monitoring		X	X	Standort, UBA				
LUCAS	X	X	X	EUROSTAT, Online-Portal				
Biodiversitäts-Exploration		X	X	Uni Jena, z.T. Online-Portal				

Alle Standorte Teil der Standorte

Messdaten (dauerhafte Beobachtung)

Eingangsdaten für Modelle (Erosion und BWH)

Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Hinweis: Für die Themen Organische Substanz (OS) und Biologie (Bodenzoologie und Mikrobiologie) handelt es sich um eine vorläufige Eignungsbewertung. Eine vertiefende Prüfung der Messkonzepte und Daten auf Vergleichbarkeit steht noch aus.

Zeitreihen, maximal seit 1956, oder Wiederholungsbeprobungen liegen für alle Messprogramme außer für die BZE Landwirtschaft vor; letztere wurde bisher einmalig durchgeführt. Die Datenhaltung erfolgt in vielen Programmen dezentral auf Seiten der Betreiber der einzelnen Messstandorte und parallel zentral durch eine koordinierende Stelle (vgl. Abbildung 1). Ein Datenaustausch zwischen Betreibern und Koordination erfolgt regelmäßig (z.B. ICP Forests Level II) oder anlassbezogen (z.B. BDF). Daten zur Standortcharakterisierung liegen in allen Messprogrammen vor, für DWD-Standorte jedoch eingeschränkt in Bezug auf Bodeneigenschaften. Für die Programme der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche, Feldlysimeter, BZE Wald,

BZE Landwirtschaft und Umweltprobenbank sowie der Bodendauerbeobachtung liegen (teilweise) Angaben zur Bewirtschaftung vor.

Die Standorte der Messprogramme liegen in klimasensiblen Räumen gemäß der Vulnerabilitätsstudie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (Adelphi et al. 2015) (siehe Kapitel 7.5). Klimadaten liegen nicht für alle Standorte vor. Eine Zuweisung von Daten einer nahegelegenen DWD-Station ist prinzipiell möglich (dies betrifft z.B. Basis-BDF, BZE Wald, BZE Landwirtschaft, Umweltprobenbank). Für die Gewinnung von Klimadaten für beliebige Bodenmessstationen sind die Daten des Deutschen Klimaatlas (www.deutscher-klimaatlas.de) geeignet. Hier ist eine langfristige Datenverfügbarkeit gegeben. 132 Stationen weisen eine vollständige und homogene Messreihe seit mindestens 1961 auf.

In dezentral organisierten Programmen bestehen methodische Unterschiede, die die Vergleichbarkeit erhobener Messdaten einschränken.

Die Messdaten der meisten in Abbildung 1 genannten Programme sind frei verfügbar, d.h. sie können bei den betreibenden Institutionen angefragt werden oder sind in einem Online-Portal abrufbar. Ausnahmen kann es bei einzelnen Standorten forschungsorientierter Programme geben (Feldlysimeter, Dauerfeldversuche). Die Messdaten werden in der Regel auf Seiten der betreibenden Institutionen qualitätsgesichert und die Methodik ist dort dokumentiert. Die Methodendokumentationen sind nur zum Teil kompatibel zu vorhandenen Methoden-Codes (Handbuch Forstliche Analytik (5. Ergänzung) / König 2014; BDF-Methoden-Code / Schilli et al. 2011). Die für eine Beurteilung der Vergleichbarkeit von Messdaten erforderlichen Standortdaten und Angaben zu Messgrößen und Methoden sind derzeit auf Anfrage bei den einzelnen Betreiberinstitutionen bzw. koordinierenden Stellen verfügbar.

Eine Datenkompatibilität der Messdaten zum eBIS des Umweltbundesamtes (elektronisches Bodeninformationssystem, siehe: https://www.enda.eu/ebis_bodeninformationssystem) ist für einen Teil der BDF gegeben. Die Kompatibilität der Datenbestände anderer Programme wäre im Einzelnen zu prüfen; dies erfolgte in diesem Vorhaben nicht. Für den Austausch von Bodeninformationen hat das Umweltbundesamt ein XML-Schema veröffentlicht, das die Anforderungen der Bodendauerbeobachtung und weiterer Fragestellungen berücksichtigt (Umweltbundesamt; ENDA GmbH & Co. KG 2010). Der Austausch von Messdaten aus der Bodendauerbeobachtung zwischen Ländern und Bund erfolgt anlassbezogen, z.B. im Rahmen von F+E-Vorhaben.

Im Folgenden erfolgt eine vertiefende Bewertung der Eignung der Messaktivitäten für die Themen Bodenwasserhaushalt (Kapitel 7.1) und Bodenerosion (Kapitel 7.2). Neue Erkenntnisse für die Themen organische Substanz und Bodenbiologie werden in Kapitel 7.3 zusammengefasst, in Kapitel 7.5 wird die Betroffenheit von Klimaänderungen behandelt.

7.1 Bodenwasserhaushalt

Veränderungen des Bodenwasserhaushalts können mit Hilfe verschiedener Messgrößen beobachtet werden. Diese umfassen die Bodenfeuchte (Bodenwassergehalt, Wasserspannung), den Grundwasserflurabstand und die Sickerwasserrate. Chemische Veränderungen lassen sich anhand gemessener Stoffkonzentrationen im Bodenwasser beobachten. Die Wasserhaushaltsgrößen sind von bodenphysikalischen Eigenschaften wie Körnung, Gefüge und Lagerungsdichte abhängig. Weitere Begleitparameter, die teilweise gemessen oder modelliert werden, sind z.B. Bodentemperatur oder Evapotranspiration. Durch diese Größen lassen sich mögliche Veränderungen im Wasserhaushalt erklären oder bilanzieren. Wirkungs- oder Response-Messgrößen für einen veränderten Bodenwasserhaushalt sind z.B. die Baumvitalität oder der landwirtschaftliche Ertrag. Die genannten Wasserhaushaltsgrößen können auch mit Modellen berechnet werden,

die klimatische und bodenphysikalische Eingangsdaten verarbeiten, z.B. Bodenfeuchte mit AM-BAV (Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung) (Löpmeier 1983).

Der Bodenwasserhaushalt wird wegen des Wasserentzugs der Pflanzen maßgeblich von der Vegetation beeinflusst. Daher sind klimabedingte Veränderungen am besten unter konstanten Bewirtschaftungsbedingungen erkennbar, die ausschließlich in entsprechend konzipierten Dauerversuchen und in Modellansätzen abgebildet werden. Werden Messdaten des Bodenwasserhaushalts von Untersuchungsstandorten mit unterschiedlicher oder sogar unbekannter Bewirtschaftung betrachtet, bedarf es großer Stichprobenumfänge oder Maßnahmen zur Effektbereinigung, um Tendenzen oder Trends erkennen zu können.

Auswertungsansätze, die mit geeigneten Mess- oder Modellwerten verfolgt werden können, sind in Tabelle 7 skizziert. Wichtig ist dabei der Blick auf die Bewertbarkeit von Veränderungen, d.h. es müssen Maßstäbe vorliegen, mit denen sich die Veränderungen als kritisch oder unkritisch – z.B. für die Forstwirtschaft¹ oder den Nutzpflanzenanbau – einstufen lassen (Wirkungs- oder Alarmschwellen). Ansonsten bleibt es bei einer Beschreibung der Entwicklung, z.B. „Zu- oder Abnahme hat stattgefunden“.

Tabelle 7: Aus- und Bewertungsansätze für Veränderungen des Bodenwasserhaushalts

Auswertungsansätze	Bewertungsbeispiele*
Zeitreihenanalyse kontinuierlicher Messdaten der Bodenfeuchte über mindestens 10 Jahre unter konstanter (oder realer) Bewirtschaftung und realen Klimabedingungen Zeitreihenanalyse kontinuierlicher Modelldaten der Bodenfeuchte unter konstanten oder verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien und realen Klimabedingungen	Abnahme oder Zunahme der Bodenfeuchte Wachstumsfördernde Effekte Sauerstoffmangel für Kulturpflanzen bei > 80 % nFK Trockenstress Kulturpflanzen < 30/50 % nFK je nach Zeitraum und Entwicklungsphase der Kultur Trockenstress Pflanzen bei Überschreitung des permanenten Welkepunktes an sieben aufeinanderfolgenden Tagen Häufigkeit von Frühjahrstrockenheit Mrz-Mai, künftig Apr-Jun
Zeitreihenanalyse von kontinuierlichen Messungen der Infiltration (Lysimeter) Zeitreihenanalyse von kontinuierlichen Ergebnissen von Wasserhaushaltsmodellen zur Berechnung von Sickerwasserraten (z.B. TUB-BGR / Wessolek et al. 2009 mit nutzungsspezifischer Berücksichtigung der Evapotranspiration (ETa), Grasreferenzverdunstung (ET0), pflanzenverfügbare Wassermenge (nFKWE, Vkap und Sommer-niederschläge)	Abnahme oder Zunahme der Sickerwassermenge Anzahl der Tage mit Sickerwasserbildung Änderung des kapillaren Aufstiegs Änderung der Verdunstung

* Quellen: %-nFK-Richtwerte aus Böttcher & Schmidt (2016), Häufigkeit von Frühjahrstrockenheit aus Schultz-Sternberg et al. (2012).

¹ Im Level-II-Programm des Forstlichen Umweltmonitorings werden hinsichtlich der Wasserhaushaltsfunktion folgende Zustands-/Wirkungsindikatoren betrachtet (Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) (Hrsg.) (o.J.): Naturnähestufe der Bodenfeuchte, Wasserspeicherkapazität (BZE) (rel. stabile bodenphysikalische Größe, langfristige Veränderungen durch Humusdynamik möglich), Trockenstressindikator Level II, Sickerwasserspende Level I, Frachten Stoffaustrag. Im Intensiv-BDF-Programm in Sachsen wird der permanente Welkepunkt als geeigneter Indikator für ein Klimafolgenmonitoring angesehen (Barth 2016).

Zuverlässige Ergebnisse und lückenlose Zeitreihen erfordern ständige Plausibilitätsprüfungen der Messwerte. Ausfälle und Fehlfunktionen von Sensoren sind möglich und müssen dokumentiert sein. Auf Seiten der Datenerhebung sind alle Umstände, die zu einer Beeinträchtigung oder Veränderung der Messung führen können, während der Installation von Messtechnik zu dokumentieren. Dies ist beispielsweise Standard im ICP Forests Programm (z.B. sind das genutzte Material, hoher Grundwasserstand, Dimensionen des genutzten Equipments, Bohrwinkel im Data Accompanying Report Form (DAR) aufzuführen) (aus ICP Forests Manual, Part XI Soil solution, Nieminen et al. 2016).

Für die Auswertung von Messdaten zu Bodenwasser gelten prinzipiell wissenschaftliche Grundanforderungen, die z.B. eine Mindestzahl von Parallelmessungen und eine fachgerechte Validierung (z.B. Bodenwasserchemie unter Berücksichtigung von Probenvolumina und Niederschlagsmengen) voraussetzen. Messergebnisse neu eingerichteter Lysimeter sind mit besonderer Sorgfalt zu interpretieren, da durch das neue Material oder den veränderten Boden die Messergebnisse der ersten zwei bis drei Messungen möglicherweise verfälscht sind. Trichterlysimeter brauchen ca. ein Jahr, bis die Messwerte genutzt werden können. In dieser Zeit erholen sich z.B. die Wurzeln von dem Eingriff. Da die Bodenlösung von vielen unterschiedlichen Parametern beeinflusst werden kann (z.B. Niederschlag, Deposition, Baumbestand, Bodeneigenschaften) sollten die Datenreihen Plot für Plot interpretiert werden (aus ICP Forests Manual, Part XI Soil solution, Nieminen et al. 2016). Für überregionale Langzeitbetrachtungen ist die räumliche Variabilität am Standort zu berücksichtigen. Erst wenn zeitliche Veränderungen die räumliche Variabilität übersteigen, sind Veränderungen erkennbar.

Im Folgenden werden zunächst Begriffe und messtechnische Grundlagen ausgeführt (Kapitel 7.1.1). Es schließt sich eine vertiefende Bewertung der Eignung von Messprogrammen an (Kapitel 7.1.2), bevor schließlich die einzelnen gemeldeten Standorte dezidiert geprüft werden (Kapitel 7.1.3).

7.1.1 Messgrößen und Grundlagen der Messtechnik

Die verschiedenen Parameter des Bodenwasserhaushalts wie die Bodenfeuchte, die Menge und stoffliche Zusammensetzung des Sickerwassers sowie der Grundwasserstand werden durch unterschiedliche Messprinzipien ermittelt. Mit Hilfe von Modellen für den Bodenwasserhaushalt oder den Stofftransport können sie unter Berücksichtigung von Klima- und Bodeneigenschaften auch berechnet werden; dies setzt eine valide Kalibrierung für den jeweiligen Bodenstandort voraus.

Begriffe des Bodenwasserhaushalts nach Kuntze et al. (1994)

Bodenfeuchte: Der Teil des Wassers, welches nicht frei im Boden ist, sondern von der Bodenmatrix beeinflusst wird; repräsentiert durch Bodenwassergehalt und Bodenwasserspannung.

Sickerwasser: Das frei bewegliche Wasser im Boden.

Grundwasserstand: Unterirdisches Wasser, das sich über einer tiefer als 1,3 m unter Geländeoberfläche liegenden Grundwassersohle im Grundwasserleiter ansammelt und dessen Hohlräume zusammenhängend ausfüllt.

Eine Möglichkeit, die Sickerwassermenge unter Freilandbedingungen zu messen, sind **Lysimeter**. Bei wägbaren Lysimetern wird ein Bodenmonolith auf eine automatische Präzisionswaage aufgebracht, sodass alle Ereignisse, die mit der Zu- oder Abfuhr von Wasser und dem Monolithen zusammenhängen, erfasst werden können (Hintermaier-Erhard; Zech 1997). Das im Lysimeter gewonnene Sickerwasser kann zudem für die Analyse der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers genutzt werden.

Die Bodenwasserspannung, auch Matrixpotential genannt, wird in cm Wassersäule (WS) oder hPa ausgedrückt. Da das Matrixpotenzial von der Porengröße und -verteilung abhängig ist, ist es für jeden Horizont unterschiedlich. Die Bodenwasserspannung kann mittels **Tensiometern** kontinuierlich (lückenlos) gemessen werden. Sie bestehen meist aus Keramik-Zellen, die mit Druckmessgeräten in Verbindung stehen. Der Raum zwischen den Zellen und den Manometern sowie die Zellen selbst sind mit Wasser gefüllt. Wenn der Boden trocken ist und Wasser aus der porösen Keramikzelle zum Ausgleich in den Boden strömen müsste, wird dies vom Manometer erfasst und daraus das Matrixpotential ermittelt. Die logarithmische Darstellung des Matrixpotentials ist der pF-Wert (Scheffer et al. 2002).

Der Bodenwassergehalt kann durch direkte und indirekte Messverfahren bestimmt werden. Ein verbreitetes direktes Messverfahren ist die **gravimetrische Messung**. Durch die Trocknung einer Bodenprobe bei 105 °C kann der Bodenwassergehalt gravimetrisch bestimmt werden. Die Methode findet für periodisch wiederholende Erhebungen Anwendung. Für Freilandmessungen eignen sich indirekte Verfahren besser. Sie erfassen Bodeneigenschaften, die in möglichst engem Zusammenhang mit der Bodenfeuchte stehen. Durch die Laufzeit oder die Kapazität von Impulsen kann indirekt auf den Wassergehalt der Bodenmatrix geschlossen werden, da sie von dem umgebenden Medium abhängig sind. Die **Time-Domain-Reflectometry (TDR)-Methode** kann kontinuierlich den Wassergehalt des umgebenden Mediums durch die Dielektrizitätszahl (DEZ) erfassen. Diese misst die Ausbreitungsgeschwindigkeit des ausgesendeten hochfrequenten elektromagnetischen Impulses durch das Medium. Die DEZ ist umso höher, je mehr Wasser sich im Medium befindet. Eine ähnliche Funktionsweise nutzt die **Frequenzy-Domain-Reflectometry (FDR)-Methode**. Diese misst jedoch nicht den zeitlichen Aspekt des Impulses, sondern die Frequenz, in der er ankommt. Da der Boden als elektrisch isolierendes Material (Dielektrikum) fungiert, schwächt er das ausgesendete Signal ab. Die Stärke dieser Abschwächung wird erfasst und ausgewertet (Scheffer et al. 2002). Da beide Sensoren die dielektrischen Eigenschaften des Mediums bestimmen, gelten die Methoden als vergleichbar. FDR- und TDR-Sonden reagieren unterschiedlich auf temperatur- und frequenzabhängige bodenphysikalische Faktoren und elektromagnetische Faktoren: TDR-Messungen sind in Nähe der Bodenoberfläche und bei stark tonigen Böden von der Temperatur abhängig; FDR-Sonden reagieren allgemein empfindlich auf geringe Temperaturveränderungen. Der Einfluss durch den Salzgehalt wird je nach Messverfahren mehr oder weniger kompensiert, die Messabweichung ist dabei sehr gering (Gimper 2010).

Prinzipiell ist bei dauerhaften Bodenfeuchtemessungen mit Unsicherheiten zu rechnen, da die Messgeräte in Wechselwirkung mit dem Boden stehen. Wenn im Boden eingebaute Geräte ersetzt werden müssen, ist die Anknüpfung an die bisherigen Ergebnisse oft nicht gegeben. Zudem stellen In-Situ-Messwerte immer nur eine Punktaufnahme im Raum dar und die Bodenfeuchte weist generell eine sehr ausgeprägte räumliche Variabilität auf (Western et al. 2002). Für Rückschlüsse von Punktmessungen in das Umfeld von Messstellen ist eine Verdichtung des Messnetzes notwendig. Anhand von konsistenten punktuellen Messungen über einen längeren Zeitraum an einer ausreichenden Anzahl von Standorten können jedoch Entwicklungstrends der Bodenfeuchte beobachtet werden.

Der Zusammenhang zwischen Bodenwasserspannung und -gehalt wird mit der pF-Kurve dargestellt (pF-Wert = $\log$ cm WS) und beschreibt die Wasserbindung im Boden. In der pF-Kurve steht jedem pF-Wert eine bestimmte Wassermenge gegenüber und beschreibt dadurch die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Kenngrößen wie die Feldkapazität und das Totwasser können aus der pF-Kurve abgelesen werden (Gisi et al. 1990).

Zur Gewinnung der Bodenlösung für eine Analyse der chemischen Zusammensetzung stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. **Saugkerzen** und **Lysimeterplatten** arbeiten mit einem leichten Unterdruck, der die Bodenlösung kontinuierlich ansaugt. Dabei wird v.a. die Bodenlösung aus den Grobporen (pF < 2,5) und weiten Mittelporen (pF 2,5-2,8) gewonnen. **Gravitationslysimeter** arbeiten ohne Unterdruck und es wird nur die Bodenlösung der Grobporen (pF > 1,8) erfasst. Sind diese Lysimeter aus Keramik, eignen sie sich nicht zur Untersuchung von wechselwirkenden Kationen oder Anionen. Saugkerzen aus Nylon-Membranen, Polyethylen oder PTFE sind dafür deutlich besser geeignet (Scheffer et al. 2002; Nieminen et al. 2016).

Der Grundwasserspiegel kann mit Hilfe von **Pegeln**, Brunnen, Röhren oder Bohrlöchern nach vorherigem Druckausgleich gemessen werden (Scheffer et al. 2002 und Kuntze et al. 1994).

Eine noch junge Methode zur Erfassung des Bodenwassergehalts, die zum jetzigen Zeitpunkt (noch) nicht auf den gemeldeten Verbundstandorten eingesetzt wird, ist **Cosmic Ray Neutron Sensing** (CRNS). Für die Zukunft wird dieser Methode eine hohe Bedeutung beigemessen, da sie die Lücke zwischen Punktmessungen und Fernerkundung schließt. Durch die Messungen der Neutronendichte aus der kosmischen Strahlung kann der Wasserstoffgehalt im Boden (die Bodenfeuchte) für Flächen von 10 bis 20 ha abgeschätzt werden. Die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschungsgruppe „Cosmic Sense“ befasst sich mit der Weiterentwicklung und Anwendung von CRNS. Ziele der Forschung sind u.a. die Entwicklung von speziellen Neutronendetektoren und der Einsatz der Methode auf landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen, um die Bodenfeuchte auch auf größeren Flächen messen zu können (TERENO 2018).

7.1.2 Programmbezogene Bewertung

Die Recherchen zur Aktualisierung der Beschreibungen von Mess- und Erhebungsaktivitäten haben gezeigt, dass seit dem Jahr 2014 keine maßgeblichen Änderungen der Messkonzeptionen stattgefunden haben. Die Programme des ICP Forests Level II, Intensiv-Bodendauerbeobachtung, der Agrarmeteorologie des DWD sowie die Feldlysimeter und ein (bislang nicht abschließend zu benennender) Teil der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche erheben die Parameter des Bodenwasserhaushalts in Form eines Intensiv-Monitorings mit hoher Messintensität bis hin zur Prozessforschung an wenigen, ausgewählten Standorten. Forschungsansätze wie TERENO SoilCan, ICOS-D und Biodiversitäts-Exploratorien betreiben Monitoring auf einer vertiefenden Ebene; dies gilt jedoch auch i.d.R. für andere Feldlysimeter und für die Dauerfeldversuche. Das ICP Integrated Monitoring umfasst Untersuchungen der Sickerwasserchemie an zwei Standorten in Deutschland. Die Bodenzustandserhebungen in Wald und Landwirtschaft, z.T. auch die Basis-BDF, stellen flächenrepräsentative Daten zu Bodeneigenschaften zur Verfügung, die für Modellierungen von Bodenwasserhaushaltsgrößen in geographischen Klima- oder Bodeneinheiten geeignet sind. Auch liegen für eine Vielzahl von Standorten des Deutschen Wetterdienstes agrarmeteorologische Modellierungen vor (vgl. Abbildung 1).

Alle genannten Messaktivitäten sind im Grundsatz dauerhaft angelegt und verfolgen das Ziel, kontinuierlich Messwerte zu gewinnen. Dennoch unterliegen sie in Zukunft Veränderungen, da aus fachlichen, organisatorischen oder finanziellen Gründen Schließungen oder Verlegungen von Messstandorten unumgänglich sind, gleichwohl aber auch neue Standorte eingerichtet werden können.

ICP Forests Level II

Die Level II-Untersuchungsflächen sind repräsentativ über die Waldflächen des gesamten Bundesgebietes verteilt. An den Level II-Plots werden für den Bodenwasserhaushalt relevante Größen gemessen (ICP Forests Manual Part II, Ferretti et al. 2017). Zusätzlich sind an den Plots Klimastationen installiert, die Niederschlag, Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung und Globalstrahlung messen (ICP Forests Manual Part IX, Raspe et al. 2016). Zu den Messungen des Bodenwasserhaushalts gehören der Bodenwassergehalt, die Wasserspannung, die Bodentemperatur und die Stoffkonzentrationen im Bodenwasser. Die ICP Forests Manuale (Parts IX und XI) machen Vorgaben für die Messmethodik.

Der Bodenwassergehalt wird gemäß Manual mittels TDR-Sonden gemessen, real auch mittels FDR-Sonden; die Wasserspannung durch Tensiometer. Beide Größen sollen am Standort erhoben werden. Ist dies nicht möglich, so wird die Messung des Wassergehalts durch TDR-Sonden empfohlen. Die Wasserspannung kann nachträglich anhand der Wasserspannungskurve (SWRC, Soil Water Retention Characteristics) und des Wassergehalts bestimmt werden (Manual IX, Raspe et al. 2016). Zusätzlich zu den genannten Messgrößen wird die Wasserspannungskurve an den Level II-Plots im Labor ermittelt. Die dazu notwendigen Stechzylinderproben sollen nahe der Messsensoren entnommen werden, um den Bezug zur gemessenen Bodenfeuchte zu wahren (Manual X, Cools & De Vos 2016).

Die Gewinnung der Bodenlösung zur chemischen Analyse des Sickerwassers auf pH, Leitfähigkeit, DOC, Nährstoffe und z.T. auf Schwermetalle erfolgt gemäß Manual Part XI (Nieminen et al. 2016) durch Saugkerzen oder -platten oder Platten- oder Trichterlysimeter. Die Flächen sollten 14-tägig oder wöchentlich beprobt werden. Wenn eine häufige regelmäßige Beprobung nicht möglich ist, sollte eine Beprobung monatlich oder in Zeitintervallen von zwei bis drei Wochen stattfinden, abhängig vom Klima, Standorteigenschaften und Methode.

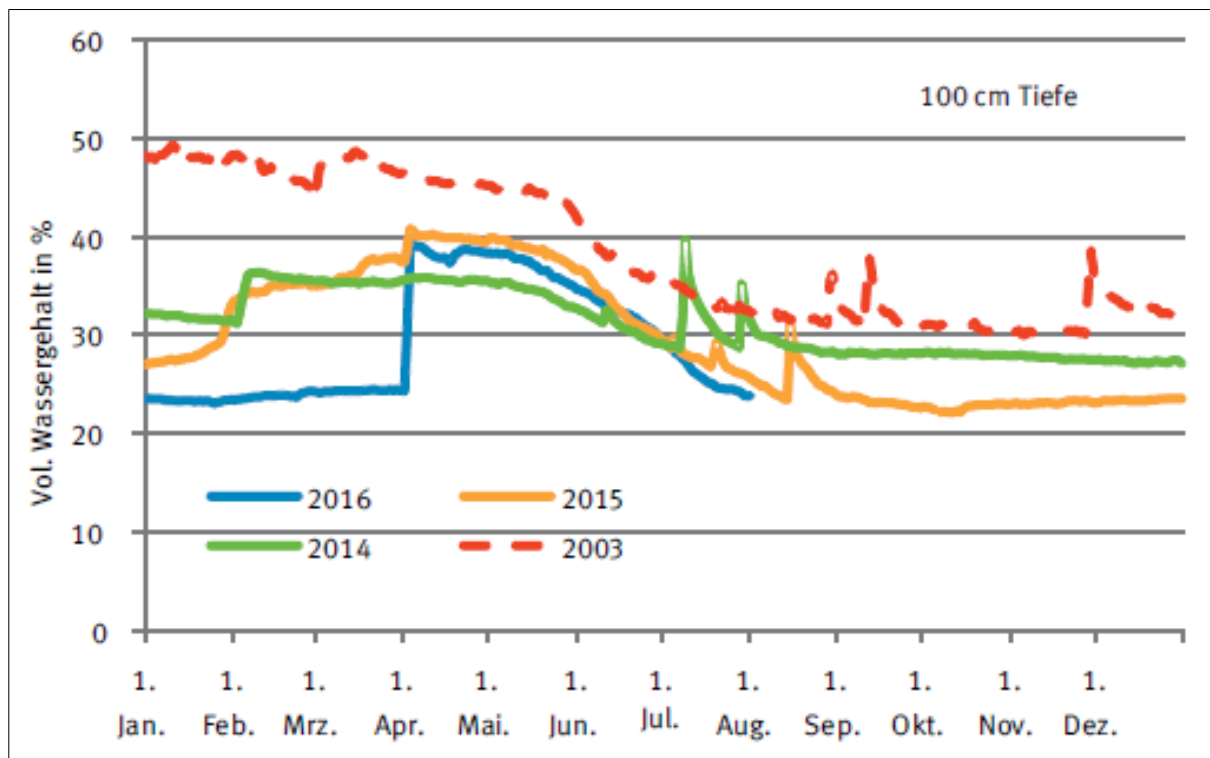
Die vorgegebenen Tiefenintervalle der installierten Messsensoren (TDR-Sonde, Tensiometer, Saugkerze o.ä.) liegen bei 0 bis 20 cm, 20 bis 40 cm und 40 bis 80 cm unter der Bodenoberfläche; an einigen Standorten werden mehr Tiefen und auch Tiefen über 80 cm bis max. 120 cm erfasst. Wenn der organische Horizont des Standortes mächtiger als 5 cm ist, sollte dort zusätzlich die Bodenfeuchte gemessen werden. Zudem sollten pro Tiefenstufe drei Messwiederholungen durchgeführt werden. Die Bodentemperatur sollte in mindestens zwei Tiefen gemessen werden, die denen der Bodenfeuchtemessungen entspricht. De facto wird sie oftmals in drei oder vier Tiefen gemessen. Pro Tiefe sind mindestens zwei Parallelmessungen zu installieren (Manual IX, Raspe et al. 2016).

Die von den Betreiberinstitutionen der Bundesländer durchgeführten Messungen richten sich nach den Vorgaben der ICP Forests Manuale. Die Bodenlösung wird an allen Level II-Plots chemisch analysiert, Bodenfeuchte und Bodenwasserspannung werden an den meisten Level II-Standorten gemessen, während die Bodentemperatur an etwa der Hälfte der Standorte ermittelt wird. Die vom ICP-Forests-Programm geforderten drei Parallelen pro Messtiefe sowie die drei unterschiedlichen Messtiefen werden i.d.R. realisiert, an einzelnen Standorten werden auch mehr Messtiefen als gefordert untersucht. In Rheinland-Pfalz werden die Sickerwasserproben vierteljährlich als Quartalsmischproben auf die enthaltenden Stoffe analysiert. Die Messgeräte wurden in den meisten Ländern bodenspezifisch kalibriert. Häufig sind die Level II-Plots in andere Messprogramme, insbesondere in die Bodendauerbeobachtung integriert, sodass über die die ICP-Forests-Vorgaben hinaus weitere Messungen durchgeführt werden (z.B. Bodenbiologie).

Messungen der Bodenfeuchte an Level II-Plots werden i.d.R. in Kombination mit der standortbezogenen Modellierung des Wasserhaushalts ausgewertet (z.B. Russ et al. 2016). In Perioden mit zunehmender Wasserknappheit sind Auswirkungen auf die Vitalität und Produktivität der Bestände zu beobachten (Martens 2014). An einer Messstation im Thüringer Becken zeigte sich,

dass nach einem niederschlagsarmen Beginn der Vegetationszeit im Jahr 2016 (April/Mai) der Wasservorrat des Bodens nicht ausreichte, um den Bedarf der Vegetation vollständig zu decken. Im Hauptwurzelraum stand den Bäumen hier weniger Wasser zur Verfügung als im Extremsommer 2003 und bereits Mitte Juli waren erste Trockenschäden sichtbar (vgl. Abbildung 2, TMIL 2016).

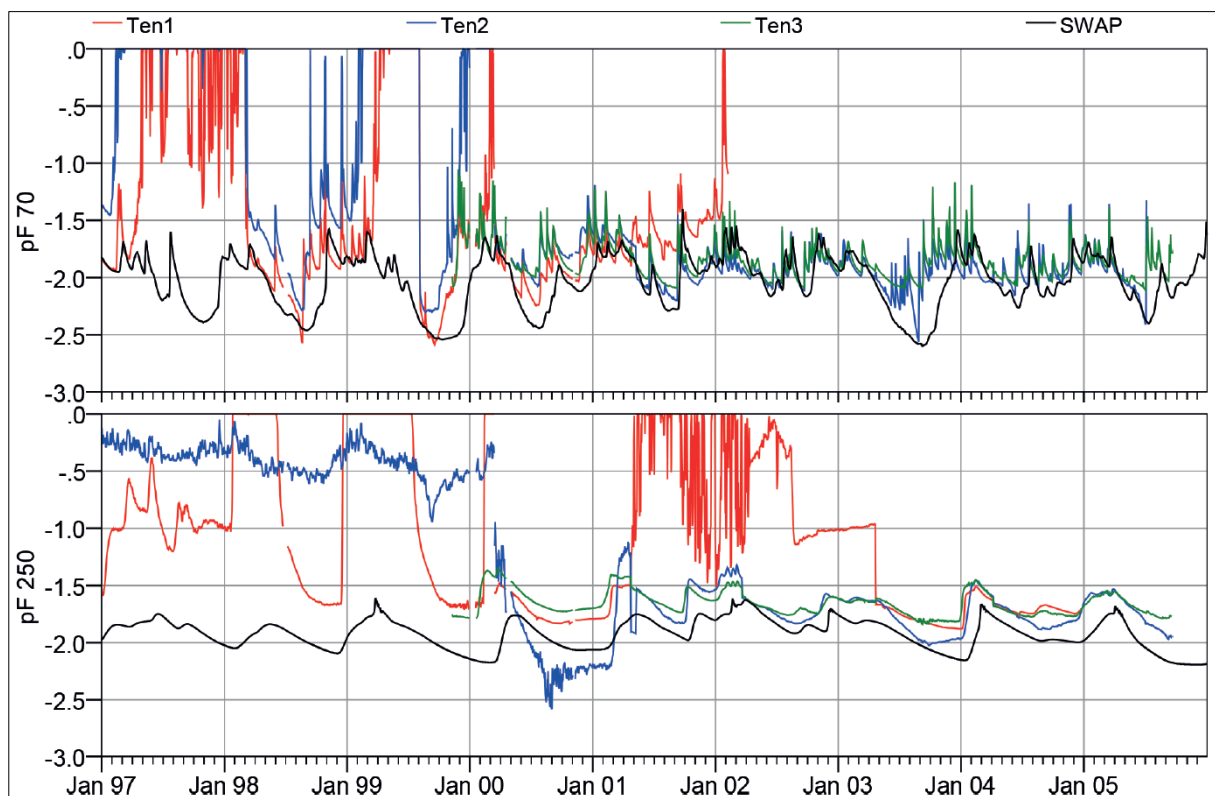
Abbildung 2: Bodenwassergehalte an der Waldmessstation Steiger (Thüringer Becken) in 100 cm Tiefe



Quelle: TMIL (2016)

In Russ et al. (2016) werden die Messunsicherheiten der Bodenfeuchtesensoren thematisiert. Beispielsweise muss auf einem Level II-Plot in Brandenburg zu Beginn der Messperiode drei Jahre lang aufgrund nicht plausibler Messwerte von fehlerbehafteten Messungen ausgegangen werden. In Abbildung 3 sind die fehlerbehafteten Messdaten (1997 bis 2000) der eingebauten Tensiometer dargestellt. Die Ergebnisse der Tensiometermessungen werden in Russ et al. (2016) neben der Validierung von Wasserhaushaltsmodellen auch zusammen mit pflanzenphysiologischen Parametern, wiebeispielsweise Xylemflussmessungen, ausgewertet. Die Tensiometermessungen bestätigen u.a. die Ergebnisse der Feinwurzelzählung und validieren die maximale Durchwurzelungstiefe von Kiefern von 2 m Tiefe sowie die Reduktion der Wurzelwasseraufnahme bei abnehmender Bodenwasserspannung.

Abbildung 3 Tensiometermessungen (Tens1, Tens2, Tens3) und modellierte Wassergehalte (Wasserhaushaltsmodell: SWAP 3.2.36) an der Level II-Fläche 1203 (Kiefer) in den Bodentiefen 70 cm und 250 cm



Quelle: Russ et al. (2016)

Die Dynamik der gemessenen Bodenwasserspannung wird deutlich: In der durchwurzelten Zone von 70 cm unterliegt die Bodenwasserspannung deutlich größeren Schwankungen als in 250 cm Tiefe. In dieser Tiefe bilden Kiefern keine Wurzeln aus und die Entwässerung ist der Schwerkraft geschuldet. Von 1997 bis 2000 lieferten die Sensoren fehlerhafte Messwerte.

Anhand der Messdaten der Level II-Flächen sind Auswertungen zum Bodenwasserhaushalt und dessen Veränderung im Wald unter den Bedingungen des Klimawandels möglich. Die Vergleichbarkeit zwischen Standorten ist aufgrund bundesweiter Standards zu Flächeneinrichtung, Messtechnik, Untersuchungstiefen und Messhäufigkeit (Messhäufigkeit für Bodenfeuchte und Gewinnung der Bodenlösung: kontinuierlich, chemische Beprobung der Bodenlösung wöchentlich bis maximal monatlich) prinzipiell gegeben; geringfügige Unterschiede sind möglich und dokumentiert. Es ist eine länderübergreifende Datenverfügbarkeit gegeben (zentrale Datenhaltung beim Johann Heinrich von-Thünen Institut – Abt. Waldökologie).

Intensiv-BDF

In allen Flächenländern sind Intensiv-Bodendauerbeobachtungsflächen eingerichtet (Ausnahme Mecklenburg-Vorpommern). Die Schwerpunkte der Verteilung der aktuell betriebenen Intensiv-BDF mit Untersuchung von Bodenwasser und Wasserhaushaltsgrößen liegen in Niedersachsen und Rheinland-Pfalz. Insgesamt herrscht forstliche Nutzung vor, es werden aber auch Flächen unter Ackerbau und einzelne unter Grünland-Nutzung betrieben. In Bayern sind die Messungen auf Intensiv-BDF eingestellt worden.

Auf Intensiv-BDF sind TDR- oder FDR-Sonden eingebaut, die in maximal wöchentlichem, häufig in mindestens stündlichem Intervall den volumenbezogenen Bodenwassergehalt in mindestens drei horizontbezogenen Bodentiefen mit mindestens drei Parallelen erfassen. Bundesweite Mindestanforderungen sind zusätzlich die tensiometrische Messung der Wasserspannung und die

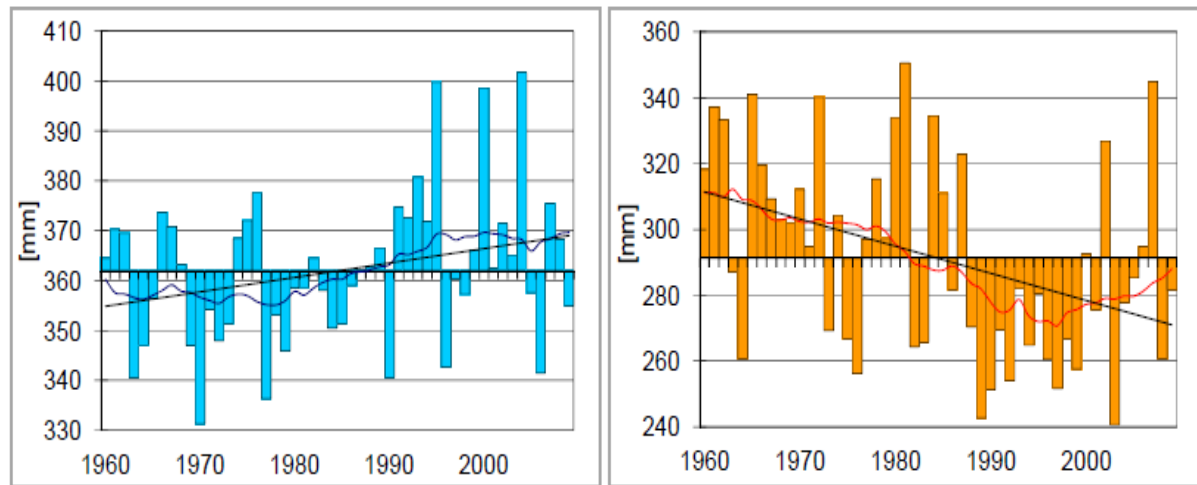
Erfassung der Niederschlagsmenge mit einer Auflösung von 0,2 mm und einer zeitlichen Auflösung von ≤ 1 Stunde. Zusätzlich erfolgt 14-tägig bis monatlich die chemische Analyse von Bodenwasser auf Nähr- und Schadstoffe, das mit Saugkerzen oder -platten in drei festgelegten Tiefen (40 cm bzw. unter Pflugsohle, 60 bis 80 cm und ≥ 120 cm) mit mindestens 4-facher Wiederholung gewonnen wird (Barth et al. 2000). An einem Teil der Flächen sind Thermometer in verschiedenen Bodentiefen installiert. Die BDF-Programme der Bundesländer orientieren sich an den in Barth et al. (2000) genannten Mindestanforderungen und weichen im Einzelfall davon ab (z.B. keine tensiometrische Messung der Saugspannung, keine Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts, geringere Anzahl von Messtiefen oder Parallelen, größeres Messintervall bei Stoffkonzentrationen). Grundwassermessstellen im Umfeld der BDF bestehen nur zum Teil.

Bei der Bewertung der Intensiv-BDF muss zwischen Flächen ohne Bodenbearbeitung (meist Forst- und teilweise Grünlandflächen) und Flächen mit Bodenbearbeitung (Acker- und teilweise Grünlandflächen) unterschieden werden. Auf Flächen mit Bodenbearbeitung sind kontinuierliche Messungen durch fest installierte Messgeräte nur unterhalb der Pflugsohle möglich. Auf den Flächen in Baden-Württemberg werden die Tensiometer auch unter Ackernutzung eingebaut. Sie werden hierbei unterhalb der Pflugsohle am Rand der Bearbeitungsfläche eingebaut. Bei der Betrachtung des Wasserhaushalts an Intensiv-BDF auf Ackerstandorten ist sowohl die Erfassung von klimatologischen Daten als auch von Bewirtschaftungsdaten (hier auch die Bewässerungszeiten und -mengen) notwendig. Vor dem Hintergrund der deutlichen Beeinflussung der zu messenden Parameter durch die Flächenbewirtschaftung können Intensiv-BDF unter forstwirtschaftlicher Nutzung als besser geeignet bewertet werden. Die Eignung von Flächen mit Bodenbearbeitung ist im Einzelfall zu prüfen. Auf Intensiv-BDF unter forstwirtschaftlicher Nutzung konnten bereits gerichtete, signifikante Änderungen von zu messenden Parametern des Wasserhaushalts festgestellt werden. An der Intensiv-BDF/Level II-Fläche im Solling wurde – in einem Zeitraum von über 50 Jahren – ein Anstieg der Bodenfeuchte im Winter und eine Abnahme im Sommer nachgewiesen (Fleck et al. 2012) und lässt Rückschlüsse auf einen möglichen Einfluss von klimatischen Veränderungen zu.

Die In-Situ-Messungen der Bodenwasserhaushaltsgrößen auf den BDF in Niedersachsen fließen in Modelle für die Sickerwasserrate ein, z.B. LWF-Brook90 (Hammel & Kennel 2001) für Forststandorte, und dienen zur Validierung der Modellergebnisse. Der fachliche Fokus liegt auf der Quantifizierung von Nährstoffausträgen mit dem Sickerwasser. Ein weiterer Aspekt ist die Identifizierung von Phasen mit eingeschränkter Wasserverfügbarkeit. Aus langzeitlichen Untersuchungen können Auswirkungen unterschiedlicher Nutzung und möglicher Grundwasserbelastung erfasst und bewertet werden. Der mögliche Messzeitraum, der für die BDF in Niedersachsen gemeinsam ausgewertet werden kann, ist derzeit noch zu kurz, um signifikante Aussagen zur langfristigen Ab- oder Zunahme der Sickerwasserrate treffen zu können. Auf einzelnen Standorten reichen die Zeitreihen aus, um statistisch signifikante Veränderungen darzustellen (s. BDF Solling Buche in Abbildung 4). Daraus lässt sich die Aussage ableiten, dass es durch den Klimawandel und den damit verbundenen Niederschlagsänderungen zu erhöhten Nährstoffauswaschungen im Winter kommen kann (Fleck et al. 2012).

Da die Messung der Sickerwasserrate aufwändig ist, wird sie vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ebenfalls mittels tagesbasiertem Modell BROOK90 für die Intensiv-BDF Frankfurt Flughafen modelliert. Boden- und Pflanzen-Parameter wurden anhand der gemessenen Wassergehalte durch eingebaute FDR-Sonden kalibriert. Die Abbildung 5 zeigt eine exemplarische Darstellung der Anpassung der Modell- an die Messwerte. Der Schwerpunkt wurde auf eine gute Übereinstimmung bei hohen Wassergehalten gelegt, trockene Phasen wurden aufgrund der nicht oder kaum stattfindenden Sickerwasserbildung nicht weiter beachtet (Borho 2016).

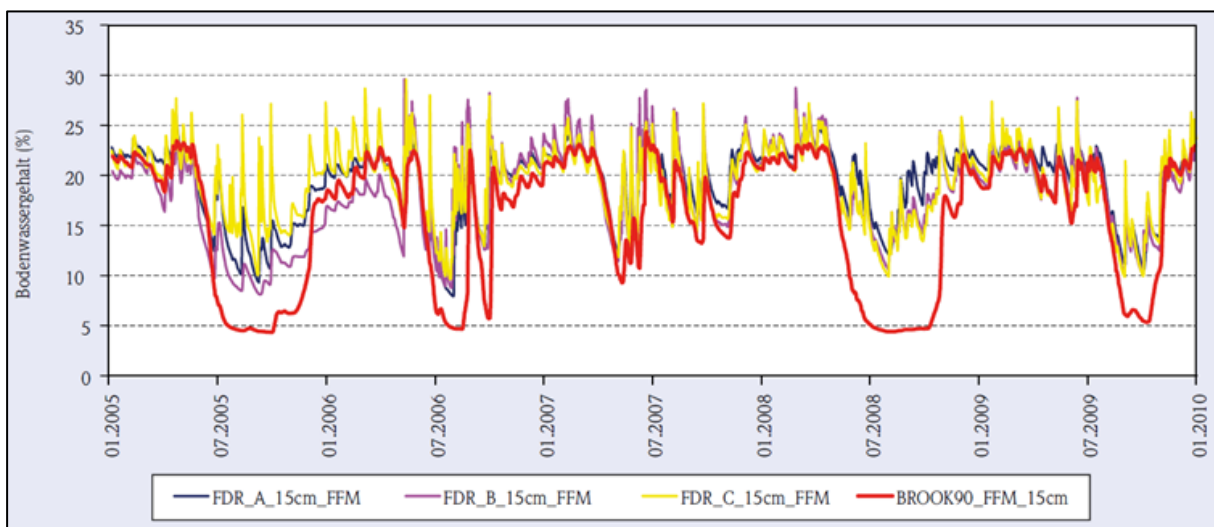
Abbildung 4: Pflanzenverfügbares Bodenwasser bis in 1 m Tiefe in den Winter- und Sommermonaten auf der BDF Solling Buche



Quelle: Fleck et al. (2012)

Darstellung der Wintermonate Dezember bis Februar (blau) und der Sommermonaten Juni-August (orange) mit langfristigen Mittelwert, linearem Trend und gleitendem Mittel

Abbildung 5: Vergleich der in 15 cm Tiefe in drei Parallelen mit FDR-Sonden gemessenen mit den mit BROOK90 modellierten Bodenwassergehalten



Quelle: Borho (2016)

Exemplarischer Auszug 2005-2009. Die Glättung der Modellkurve resultiert aus dem homogenen Matrixfluss, der für tagesbasierte Modelle typisch ist.

In Sachsen wird die langfristige Entwicklung des Bodenwasserhaushalts anhand des permanenten Welkepunkts (PWP) im Oberboden beobachtet. Der PWP der BDF-Standorte wird an Stechzylinderproben im Labor ermittelt und anhand der Messdaten von den Bodendauerbeobachtungsflächen, den DWD Bodenfeuchte-Messstationen und der Lysimeterstation Brandis (s. auch Anhang A.2) ausgewertet. Wenn der PWP an sieben aufeinanderfolgenden Tagen überschritten wird, sind irreversible negative Folgen für die Pflanzen unausweichlich (Barth 2016).

In allen Bundesländern liegt der Hauptanwendungsbereich der Bodenwasseruntersuchungen auf Intensiv-BDF auf den Stoffen im Sickerwasser und der stofflichen Belastung des Grundwassers.

Die Daten der Intensiv-BDF ermöglichen bei langjährigem Monitoring von Wasserhaushaltsparametern gemäß den Mindestanforderungen nach Barth et al. (2000) Auswertungen zu Änderungen des Bodenwasserhaushalts bei land- und forstwirtschaftlicher Nutzung unter den Bedingungen des Klimawandels in einem Teil des Bundesgebietes; dabei sind landwirtschaftliche Nutzungen unterrepräsentiert. Die Vergleichbarkeit von Messdaten des Bodenwassers verschiedener Beobachtungsflächen ist grundsätzlich aufgrund bundesweiter Standards zu Messprinzipien, Untersuchungstiefen und Messhäufigkeit gegeben und ist jeweils am Einzelstandort konkret zu prüfen, genau wie die Repräsentativität des Standortes und der Ergebnisse für klima- oder bodengeografische Flächeneinheiten. Teilweise ist die Interpretation von Messergebnissen aufgrund fehlender oder unvollständiger Bewirtschaftungsdaten nur eingeschränkt möglich. Klimadaten müssen teilweise von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet werden. Die Daten von Intensiv-BDF sind bei den betreibenden Länderinstitutionen auf Anfrage verfügbar.

Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche

Aus der aktuellen Karte der Dauerfeldversuche (DFV) in Deutschland (BonaRes Zentrum für Bodenforschung 2019) geht hervor, dass aktuell an zehn Versuchsstandorten laufend Daten zur Bodenfeuchte oder zur Wasserinfiltration erhoben werden (siehe Anhang B.1). Es handelt sich um Versuche in Berlin, Brandenburg, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und Thüringen mit einer Laufzeit von 3 bis 65 Jahren. Untersucht werden je nach Standort der Einfluss des Witterungsverlaufs auf Pflanzenwachstum und -entwicklung verschiedene Bearbeitungssysteme (konservierend vs. konventionell) sowie Agroforst. Der Betrieb der Dauerfeldversuche liegt in der Hand von Universitäten, Landwirtschaftskammern oder Landesanstalten für Landwirtschaft. Die DFV stellen eine besonders wertvolle Datenquelle dar, da sie langfristig unter standardisierten Bedingungen durchgeführt und beprobt werden. Sie eignen sich in der bestehenden Struktur nicht alleinstehend für ein systematisches, möglichst einheitliches Monitoring über das gesamte Bundesgebiet, können jedoch für landwirtschaftliche Flächen wertvolle Daten mit konstanten und gut dokumentierten Versuchsbedingungen, zum Teil auch lange Zeitreihen liefern.

Feldlysimeter

Aussagen über den Bodenwasserhaushalt eines einzelnen Standortes von besonders hoher Qualität sind an Messstandorten mit wägbaren Feldlysimetern möglich. Hier können alle Eingangs- (Niederschlag) und Ausgangsgrößen (Sickerwasser und Evapotranspiration) gemessen werden; häufig sind auch Feuchtsensoren eingebaut. Laterale Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt und die besonderen Bedingungen hydromorph geprägter Standorte lassen sich jedoch durch den eingefassten Bodenmonolithen nicht berücksichtigen.

Im Prinzip sind alle dauerhaft betriebenen Lysimeteranlagen geeignet, um Veränderungen der Infiltration unter sich wandelnden Klimabedingungen zu beobachten. Zu prüfen sind jeweils das anlagenspezifische Untersuchungskonzept, die Messmethodik und die Repräsentativität des Standortes und der Ergebnisse für klima- oder bodengeografische Flächeneinheiten. Die Feldlysimeter sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt und in der Forschungslandschaft an verschiedensten Stellen angesiedelt. Sie untersuchen ganz unterschiedliche Fragestellungen: Im TERENO-Teilprojekt SoilCan werden z.B. Langzeitfolgen des Klimawandels auf die Wasserflüsse im Boden in 13 Lysimeteranlagen untersucht. An der waldökologischen Großlysimeteranlage des Johann Heinrich von-Thünen-Instituts in Britz wird der Wasserverbrauch von aufwachsenden Hauptbaumarten und deren Einfluss auf Grundwasserneubildung und Landschaftswasserhaushalt quantifiziert. Hier finden sich ca. 40-jährige Bestände von Buche, Kiefer, Lärche und Douglasie sowie Mischungen mit Unterbau von Eiche und Buche.

Die Verfügbarkeit von Messdaten ist unterschiedlich (wissenschaftliche Erstverwertung); Daten sind jeweils beim Betreiber der einzelnen Anlage anzufragen, es sein denn, die Lysimeteranlagen sind in Kooperationen organisiert (z.B. TERENO, Kooperation Lysimeter in Mittel- und Nordostdeutschland).

Feldlysimeter allein eignen sich nicht für ein systematisches, möglichst einheitliches Monitoring über das gesamte Bundesgebiet, da die Untersuchungskonzepte forschungsorientiert sind und die Einrichtung und der Betrieb sehr hohe finanzielle Aufwendungen erfordern. Für die Validierung von Modellen und zur Prozessforschung haben sie eine wichtige Bedeutung.

Agrarmeteorologische Stationen des DWD

Aktuell werden im Bereich der Agrarmeteorologie für 526 Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes Wirkmodellierungen z.B. zur Bodenfeuchte oder zum Bestandsklima mit Bodentemperaturen unter verschiedenen Fruchtarten durchgeführt. Die Standorte sind repräsentativ über die Ackerflächen des Bundesgebietes verteilt. Die Länge der Messreihen klimatologischer Größen an diesen Stationen liegt i.d.R. bei über 10 Jahren. Eine bodenkundliche Standortbeschreibung liegt für die Stationen nicht oder nur eingeschränkt vor. Dabei ist zu beachten, dass der örtliche Boden zwar verwendet werden soll, aber eventuelle anthropogene Überformungen bei der Anlage der Messeinrichtungen und im Vorfeld in der Regel nicht oder nicht genau dokumentiert sind (Böttcher/DWD, mündl. Mittlg.).

Im Ergebnis der Modellierung wird die Bodenfeuchte im Rückblick der letzten Woche und in der Vorausschau für die nächsten sieben Tage angegeben. Es liegen Stundenwerte der Bodenfeuchte (bis 60 cm Tiefe) und der tatsächlichen Verdunstung sowie der Tagesniederschlag vor. Das pflanzenverfügbare Wasser (nFK) in Vol.-% ist als Vertikalprofil über die obersten 60 cm des Bodens dargestellt und bezieht sich auf Gras und sandigen Lehm. Zur Berechnung von Bodenfeuchte und Verdunstung wird das Modell AMBAV eingesetzt (Löpmeier 1983). Die Messwerte von Bodenfeuchte-Messstandorten des DWD (s.u.) werden in das Bodenwassermode einbezogen. Als weitere Eingangsparameter kommen pflanzenseitig der phänologische Entwicklungsstand und wasserseitig eine eventuelle Beregnungsmenge hinzu. Der Boden wird in einem Schichtmodell (10 cm mächtige Schichten) bis in 60 cm Tiefe beschrieben. Grundwasseranschluss und kapillarer Aufstieg fließen ein.

Ein Teil der agrarmeteorologisch eingesetzten Klimastationen verfügt über zusätzliche Messeinrichtungen: 51 Stationen verfügen über Messreihen der Bodentemperatur in i.d.R. fünf Tiefen bis 1 m unter der Geländeoberfläche, die bis mindestens ins Jahr 1961 zurückreichen. An den vier Stationen Braunschweig, Leipzig-Holzhausen, Lindenberg und Weihenstephan-Dürnast werden Bodenfeuchtemessungen auf landwirtschaftlichen Flächen im nahen Umfeld der Klimastationen durchgeführt (hier bezeichnet als „DWD-Programm Bodenfeuchte“). Diese werden vorwiegend für die agrarmeteorologische Forschung genutzt. Die Art der Messungen ist hier unterschiedlich: Während an der Station Lindenberg TDR-Sonden eingebaut sind, erfolgt an den anderen Standorten wöchentlich eine gravimetrische Bestimmung des Wassergehalts an Bodenproben. Die Untersuchungen erfolgen tiefenstufenbezogen (alle 10 cm bis 60 cm Bodentiefe) zum Teil unter unterschiedlichen landwirtschaftlichen Fruchtarten. Zeitweise existieren auch Messreihen von TDR- oder FDR-Sonden. An allen vier Stationen liegen bodenphysikalische Kennwerte vor.

Die agrarmeteorologischen Daten des DWD bilden eine unverzichtbare Ergänzung für flächendeckende Auswertungen der modellierten Bodenfeuchte. Das Messnetz des DWD kann durch die höhere Anzahl der Messpunkte und die regelhafte Erfassung der Bodentemperatur in einheitlichen Tiefen zu flächendeckenden und repräsentativeren Aussagen kommen als einzelne Messstandorte. Zusätzlich kann das Programm auf einen langen Messzeitraum (teilweise > 50 Jahre) zurückblicken. Die vier Standorte mit Erhebungen der Bodenfeuchte sind aufgrund ihrer Konzeption nicht unmittelbar mit anderen Standorten anderer Programme vergleichbar; dennoch

können sie für standortdifferenzierte Auswertungen verwendet werden. Daten der agrarmeteorologischen Modellierung und der Bodentemperaturmessungen sind digital beim Deutschen Wetterdienst, Abt. Agrarmeteorologie verfügbar. Auch Bodenfeuchte-Messdaten der vier o.g. Stationen können dort angefragt werden.

ICOS-D

Die Forschungsinfrastruktur ICOS ist ein Netzwerk auf europäischer Ebene, welches eine für Europa einheitliche, kontinuierliche und standardisierte Messung von Treibhausgasen garantieren soll. In Deutschland gehören 15 Ökosystemstationen in Agrar-, Grünland-, Wald- und Moor-Ökosystemen zum Netzwerk ICOS-D, an denen unter anderem die Bodenfeuchte mit TDR-Sonden sowie die Bodentemperatur kontinuierlich gemessen werden. Die Stationen sind unsystematisch über Deutschland verteilt. An jedem Standort befindet sich eine Klimastation. Die kontinuierlichen Bodenfeuchte-Messungen werden prinzipiell als geeignet angesehen, um Messdaten für die Beobachtung von Veränderungen aufgrund von Klimawirkungen zu liefern. Die untersuchten Bodentiefen und die Bewirtschaftung der Stationen wären dafür zu prüfen, ebenso wie ihre Repräsentativität für Klima- oder Bodenregionen.

ICP Integrated Monitoring

Das Programm der Genfer Luftreinhaltekonvention befasst sich mit den Wirkungen von Luftverschmutzungen auf Ökosysteme. An zwei Messstellen in Deutschland (DE01 Forellenbach in Bayern und DE02 Neuglobsow in Brandenburg) werden die Boden-, Sickerwasser-, Grundwasser- und Oberflächenwasserchemie sowie meteorologische Daten erhoben. Die Sickerwasserchemie umfasst im Wesentlichen pH-Wert, Leitfähigkeit, basische Kationen, Nitrat, Sulfat, Phosphat, Chlorid, DOC, Aluminium, Eisen und Mangan. Die Integrated-Monitoring-Stationen in Deutschland liefern aufgrund der Ausrichtung auf Stoffbilanzen ausschließlich stoffliche Daten für das Sickerwasser. Wasserhaushaltsbilanzen auf der Ebene der Wassereinzugsgebiete sollen an den Messstationen erstellt werden. Aufgrund der thematischen Ausrichtung, des Fehlens von Messeinrichtungen für weitere Bodenwasserhaushaltsgrößen und der kleinen Anzahl von Stationen kann das ICP Integrated Monitoring eine bundesweite Beobachtung von Veränderungen ausschließlich hinsichtlich stofflicher Veränderungen des Bodenwassers ergänzen. Die Vergleichbarkeit mit anderen Programmen wäre hier zu prüfen, das gilt auch für die Repräsentativität der Stationen für Klima- und Bodenregionen.

Biodiversitäts-Exploratorien

In drei Exploratorien zur funktionellen Biodiversitätsforschung (Schorfheide-Chorin in Brandenburg, Hainich in Thüringen und Schwäbische Alb in Baden-Württemberg) werden seit rund 10 Jahren beispielhaft großskalige Langzeituntersuchungen mit unterschiedlichen Landnutzungsdichten durchgeführt. An 3.000 Gridplots werden Standarddaten zu Vegetation, Landnutzung (Art und Intensität) und Bodenart erfasst; an 300 Experiment-Plots sind dauerhafte Messinstrumente installiert, die u.a. die Bodenfeuchte und -temperatur sowie die Lufttemperatur aufzeichnen. Diese Forschungsansätze können einen Beitrag zur Validierung von Modellen und zur Prozessforschung leisten. Bei langfristig gesicherter Laufzeit können die Messdaten der Bodenfeuchte auch ein bundesweites Monitoring-Netz ergänzen. Hier sind jeweils die Repräsentativität der Stationen für Klima- und Bodenregionen und die Vergleichbarkeit der Messdaten mit anderen Programmen zu prüfen.

Regionale Programme

In Nordrhein-Westfalen besteht seit dem Jahr 2016 ein Programm zum Nitrat-Monitoring im Sickerwasser. Hier werden landesweit flächendeckend Nitrat-Austräge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in Gebieten mit besonders hohen Nitratgehalten im Grundwasser beobachtet (Landwirtschaftskammer NRW 2016). An 12 Standorten sind Saugplattenanlagen installiert,

ergänzt durch Wetterstationen in unmittelbarer Nähe und Sensoren im Boden, die in drei Tiefen die Bodenfeuchte (Saugspannung) und -temperatur messen. Die Stationen versenden ihre Daten vollautomatisch an einen Server des Geologischen Dienstes NRW. Von diesem Server werden die Daten verrechnet, grafisch aufbereitet und auf der Homepage des GD NRW allen Interessierten zugänglich gemacht (<http://bodenkunde.gd.nrw.de/sickerwasser/anzeigen.html>). Entsprechende Programme oder auch einzelne Dauermessstationen können einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund sinnvoll ergänzen.

Basis-BDF, Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft, LUCAS

An Basis-Bodendauerbeobachtungsflächen und den Rasterstandorten der Bodenzustandserhebungen werden einmalig oder in periodischer Wiederholung (5 bis 15 Jahre) Eingangsdaten für Modellbetrachtungen zu Klimafolgen zur Verfügung gestellt. Hier liegen alle bodenphysikalischen Kennwerte und z.T. Daten zur Bewirtschaftung vor. Im Europäischen Landnutzungs- und Landbedeckungs-Programm LUCAS werden alle drei Jahre Bodenparameter wie z.B. Textur, Lagerungsdichte und Humusgehalt in einem 2x2 km-Raster über Deutschland erhoben. Zum Bodenwasserhaushalt liefern diese Programme keine Messdaten.

7.1.3 Prüfung gemeldeter Standorte

Der größte Teil der in Kapitel 6 aufgeführten Messstandorte, die für eine Teilnahme am Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund gemeldet worden sind, liefert Eingangsdaten für Bodenwasserhaushaltsmodelle und zum Teil auch modellierte Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts. Dies sind die 526 agrarmeteorologischen Standorte des DWD für Wirkmodellierungen, die Bodenzustandserhebungen in Wald und Landwirtschaft mit rund 5.100 Untersuchungsstandorten, die rund 780 Basis-BDF und die 11 Standorte der Umweltprobenbank (siehe Abbildung 14).

Der andere Teil der gemeldeten Standorte liefert Messdaten für das Thema Bodenwasserhaushalt mit den Messgrößen Bodenfeuchte, Sickerwassermenge, Stoffkonzentration im Bodenwasser und/oder Grundwasserstand. Diese Standorte gehören zu den Forschungs- und Monitoringprogrammen und verteilen sich auf alle Bundesländer mit Ausnahme der Stadtstaaten Bremen und Hamburg (s. Tabelle 8 und Abbildung 15). Viele Standorte sind sowohl in das ICP Forests Level II-Programm als auch in die Bodendauerbeobachtung der Länder integriert.

Die insgesamt 122 Messstandorte sind in Anhang B.2 mit Zuordnung zum Bundesland, der Betreiber-Institution und den jeweiligen Messprogrammen aufgelistet. Angegeben sind dazu die Landnutzung, das Jahr des Messbeginns am Standort und die jeweils gemessenen Größen mit Zusatzkriterien in Bezug auf Messhäufigkeit und -dauer. Es handelt sich um 85 Forst-, 19 Acker- und 18 Grünland-Standorte.

Für die insgesamt 122 Standorte mit Messeinrichtungen für den Bodenwasserhaushalt liegen Detailangaben der Betreiber zum Standort (siehe Tabelle 2) und zu Messgrößen mit Messprinzip, Gerät, Parallelen, Tiefenstufen und Messzeitraum (siehe Tabelle 3) vor (vgl. Kapitel 4). Aus diesen Angaben lässt sich ableiten, dass die Untersuchungskonzepte und die Messtechnik für die Größen Bodenfeuchte, Sickerwassermenge und Bodenlösungsschemie prinzipiell vergleichbar sind. Die erforderlichen Begleitdaten zu Klima und Nutzung sowie eine Wasserspannungskurve liegen in aller Regel vor. Wenn Klimadaten fehlen, lassen sich diese aus Modellen des Deutschen Wetterdienstes ableiten. Aufgrund der für den Bodenwasserhaushalt spezifischen, i.d.R. sehr hohen Messhäufigkeit der relevanten Größen (mindestens täglich) ist eine Vergleichbarkeit von Messdaten verschiedener Untersuchungsstandorte durch zeitliche Datenaggregation auf z.B. Monats-, Jahreszeiten oder Halbjahresniveau herstellbar. Einschränkungen der Vergleichbarkeit ergeben sich aus der Standortcharakteristik mit der jeweiligen forstlichen oder landwirtschaftlichen Nutzung und der realen (nicht konstanten) Bewirtschaftung; teilweise auch aus unterschiedlichen Messtiefen.

Tabelle 8: Gemeldete Standorte des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds mit Messungen für das Thema Bodenwasserhaushalt

Bundesland	Anzahl Standorte	Messprogramme (Anzahl Standorte)
Bayern	20	BDF (Basis) und Level II (13) BDF (Basis) (1) DWD Bodenfeuchte (1) TERENO SoilCan (5)
Baden-Württemberg	15	BDF (Basis/Intensiv) und Level II (3) Level II (7) BDF (Intensiv) (3) BDF (Erosion) (2)
Rheinland-Pfalz	15	BDF (Intensiv) und Level II (9) BDF (Intensiv) (6)
Niedersachsen	14	BDF (Intensiv) und Level II (6) BDF (Intensiv) und Level II und UPB (2) BDF (Intensiv) (5) DWD Bodenfeuchte (1)
Sachsen	10	Level II (4) BDF (Intensiv) (5*) DWD Bodenfeuchte (1)
Brandenburg	9	BDF (Basis) und Level II (6), DWD Bodenfeuchte (1), Feldlysimeter (1) TERENO SoilCan (1)
Hessen	8	BDF (Basis) und Level II (2) Level II (5) BDF (Intensiv) (1)
Sachsen-Anhalt	8	BDF (Intensiv) und Level II (3) BDF (Intensiv) und DFV (1) TERENO SoilCan (3), Feldlysimeter (1)
Nordrhein-Westfalen	7	BDF (Intensiv) und Level II (4) TERENO SoilCan (3)
Schleswig-Holstein	6	BDF (Basis und Intensiv) (2) BDF (Intensiv) (3) Level II und UPB (1)
Thüringen	5	BDF (Basis) und Level II (3) Level II (2)
Mecklenburg-Vorpommern	3	BDF (Basis) und Level II (2) TERENO SoilCan (1)
Berlin	1	BDF (Basis) und Level II (1)
Saarland	1	Level II (1)
Gesamtanzahl	122	

* Die Intensiv-Messeinrichtungen an einer BDF (23, Ehrenfriedersdorf) werden 2019 abgebaut (mündl. Mittlg. LfULG Sachsen).

Die Kontinuität des Parameterumfangs und der eingesetzten Untersuchungsverfahren ist gewährleistet. Eine Anpassung der Messtermine und der Messhäufigkeit an den Standorten ist nicht notwendig. Die Standards der Programme Level II und Bodendauerbeobachtung weichen in Bezug auf Bodenwasserhaushaltsuntersuchungen nicht wesentlich voneinander ab und können als maßgeblich angesetzt werden. Eine Vereinheitlichung der Messtiefen an bestehenden Untersuchungsstandorten ist nicht zielführend; hier sollte jeweils standortbezogen anhand der Profilbeschreibung auf Vergleichbarkeit geprüft werden. Ergebnisse von Bodenfeuchtemessungen sind messtechnisch bedingt mit Unsicherheiten behaftet. Grundsätzlich besteht hier ein besonderer Anspruch an die Plausibilitätsprüfung, insbesondere unmittelbar nach dem Einbau oder Ersatz von Sensoren.

Die gemeldeten Standorte repräsentieren vorrangig forstliche Landnutzung und nur in untergeordnetem Maß Ackerbau und Grünland. Hier könnten landwirtschaftliche Dauerversuche ggf. Lücken schließen (vgl. Kapitel 7.1.2). Grundwasserbeeinflusste Standorte sind ebenfalls unterrepräsentiert (nur 3 BDF in Schleswig-Holstein), Moore sind gar nicht vertreten. Die LABO weist in ihrem Positionspapier „Bedeutung und Schutz von Moorböden“ auf die Notwendigkeit hin, die Auswirkungen der Klimaveränderung, der Nutzung und von Renaturierungsmaßnahmen auf Moore im Rahmen des Bodenmonitorings zu erfassen (LABO 2017). Neben der Neueinrichtung von Bodenmonitoringstandorten stellt sich hier jedoch auch die Frage nach alternativen Überwachungsansätzen für besonders empfindliche Feuchtstandorte (z.B. im Rahmen der Grundwasserstandsüberwachung oder der Langzeit-Moorforschung). Anforderungen können aus der Effizienzkontrolle von Wiedervernässungsprojekten übernommen werden, wie z.B. Grundwasserflurabstandskarten, Durchflussmengen der Oberflächengewässer, Niederschlag und Verdunstung. (Tiemeyer et al. 2017).

Ein weiteres Kriterium für die Bewertung der Eignung der gemeldeten Standorte ist deren Lage in klimavulnerablen Regionen. Standorte oder Messprogramme, die sich hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des Wasserhaushalts in als besonders sensitiv ausgewiesenen Gebieten befinden, wurden als prioritär geeignet eingestuft. Auf Grundlage der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel (Adelphi et al. 2015) wurde die Lage der Standorte und Messprogramme vor dem Hintergrund klimavulnerabler Regionen bewertet. Dabei wurde die Klimawirkung des Indikators ‚Sickerwasserrate‘ als Bewertungsgrundlage genutzt. Auf Basis der in Kapitel 7.5 detailliert vorgenommenen Auswertung können alle Standorte als potenziell geeignet bewertet werden, da nahezu alle Regionen Deutschlands – in unterschiedlichem Maß – als vulnerabel gegenüber Veränderungen des Wasserhaushalts gelten.

Bei Anwendung der in Kapitel 4 genannten Kriterien für Kernstandorte eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds (vgl. Tabelle 4) wurden 51 Standorte identifiziert, die seit mindestens 10 Jahren Messdaten für Bodenfeuchte und/oder Sickerwassermengen liefern und weiterhin langfristig weiterbetrieben werden. An einem Teil dieser Standorte erfolgt zusätzlich eine Beobachtung der Bodenwasserchemie (Kohlenstoff, Stickstoff, Metalle). Die Standorte sind vorwiegend forstlich (42) und untergeordnet ackerbaulich (5) oder als Grünland (4) genutzt. Lücken im Bundesgebiet zeigen sich vor allem in West- und Norddeutschland. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein in jüngerer Zeit Beobachtungsflächen eingerichtet wurden, die derzeit noch keine Messreihe von 10 Jahren erreichen. In den Kernstandorten enthalten sind zwei forstliche Lysimeteranlagen in Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt.

Die Anzahl von Kernstandorten, die für die Messung von klimabedingten Veränderungen des Bodenwasserhaushalts in Frage kommen, ist für landwirtschaftliche Nutzungen und Hotspots (Feuchtstandorte) nicht ausreichend. Hier sind zusätzliche Messstandorte notwendig, sofern nicht andere Programme wie Dauerfeldversuche, Grundwasserstands- und Moorüberwachung Alternativen darstellen. Konstante Bewirtschaftungsbedingungen

bzw. zumindest lückenlos dokumentierte Bewirtschaftungsdaten sind im landwirtschaftlichen Bereich von Vorteil bzw. notwendig.

7.2 Bodenerosion

In der Konzeption eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds (Lazar et al. 2014) wurde bei der themenbezogenen Betrachtung der Messprogramme der Begriff „Erosions-BDF“ (Boden-Dauerbeobachtungsfläche zur Erosion) verwendet. Die Abkürzung BDF bzw. der Begriff Bodendauerbeobachtungsfläche ist in Deutschland fachlich eng mit dem Bodenmess- und Bodenmonitoringnetz verbunden, welches auf dem Konzept der Sonderarbeitsgruppe „Informationsgrundlagen Bodenschutz der Umweltministerkonferenz, Unterarbeitsgruppe Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ (1991) basiert und im Bundes-Bodenschutzgesetz verankert ist. Da für die Bewertung der Messprogramme für die Bodenerosion auch ausgewiesene Erosionsmonitoringflächen außerhalb des BDF-Programms berücksichtigt wurden, wird nachfolgend der übergreifende Begriff „Boden-Erosionsmonitoringfläche (Boden-EMF)“ genutzt.

Mit Stand 2014 waren Boden-EMF in vier Bundesländern (Baden-Württemberg, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein) beschrieben worden. Aus den Erkenntnissen mit Stand 2014, den Rückmeldungen zur Aktualisierung der BDF-Messnetzbeschreibung (Stand 09/2018) und den im Projekt durchgeführten Literatur- und Onlinerecherchen lässt sich aktuell zusammenfassen, dass in Deutschland in folgenden Bundesländern ein Erosionsmonitoring erfolgt bzw. potenzielle Erosionsmonitoringflächen eingerichtet sind:

- ▶ **Baden-Württemberg:** Hier bestehen zwei Intensiv-BDF, die mit Beginn des Erosionsmonitorings im Jahr 2011 eingerichtet wurden (LUBW 2015).
- ▶ **Niedersachsen:** Es erfolgt ein Monitoring in fünf Referenzgebieten (Größe 33 bis 106 ha) sowie in zwei Beobachtungsgebieten zur Erfolgskontrolle von Schutzmaßnahmen (LBEG 2012, aktualisiert 2016).
- ▶ **Sachsen-Anhalt:** An zwei auf einer Catena befindlichen BDF wird im 10-Jahresrhythmus ein Feinnivellement betrieben. Zusätzlich erfolgt durch die Unteren Behörden für Bodenschutz und Altlasten eine schadensfallabhängige Kartierung.
- ▶ **Schleswig-Holstein:** Das durch die Universität in Kiel betriebene Erosionsmonitoring wird aktuell nicht durchgeführt. Auf BDF Goldelund (Erosion durch Wind) und Gut Maasleben (Erosion durch Wasser) stehen zwei Messstandorte zur Verfügung, die als Potenzialstandorte in den Verbund aufgenommen werden können.
- ▶ **Mecklenburg-Vorpommern:** Seit dem Jahr 2011 wird ein landesweites Erosionsereigniskataster geführt. Es erfolgt eine schadensabhängige Kartierung und eine qualitativ-quantitative Erfassung von Wasser- und Winderosionsereignissen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Zwischen 2011 und 2015 wurden an 35 Standorten aktuelle Wassererosionsereignisse auf Ackerflächen erfasst (MLUV 2016).
- ▶ **Bayern:** In Bayern erfolgt eine schadensfallabhängige Kartierung von Erosionsereignissen, z.T. unterstützt durch aktuelle Luftaufnahmen. Das auf dem Helmholtz-Versuchsgut Scheyern durch die TU München ab 2009 betriebene Erosionsmessfeld wurde im Jahr 2015 aufgegeben.

- **Sachsen:** In Sachsen erfolgt durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfULG) ein unregelmäßiges Monitoring auf Flächen mit Erosionsschäden. Zusätzlich wird auf den Versuchsflächen für ökologischen Landbau durch das LfULG die Bodenerosion durch Wasser als Sekundärparameter aufgenommen. Außerdem wird durch das LfULG eine Kleinberegnungsanlage betrieben, mit der auf Ackerflächen Wasserinfiltration, Oberflächenabfluss und der damit verbundene Bodenabtrag simuliert werden können. Zusätzlich wird auf einer 7 m² großen Parzelle Bodenerosion infolge natürlicher Niederschläge erfasst.

Abbildung 17 stellt die Standorte für die Erfassung der Bodenerosion sowie die Bundesländer, in denen eine schadensfallabhängige Kartierung vorgenommen wird, dar.

Bei der Bewertung der Messprogramme für die Bodenerosion lässt sich feststellen, dass trotz der immensen Folgen des Klimawandels auf den Bodenprozess der Erosion das Bodenerosionsmonitoring, welches auf vorhandenen BDF und EMF in Niedersachsen und Baden-Württemberg durchgeführt wird, weiterhin das einzige länderübergreifende Messnetz zur langfristigen Erfassung der Bodenerosion in Deutschland ist. Insofern können die im Konzeptentwurf von 2014 (Lazar et al. 2014) getroffenen Aussagen zur Bodenerosion bestätigt werden.

In Niedersachsen werden in den fünf Referenz- und zwei Beobachtungsgebieten Barum, Nette, Lamspringe, Adenstedt, Brüggen, Klein Ilde und Küingdorf jährlich zum Ende der Frostperiode Erscheinungen zur Ermittlung der Wintererosion erfasst. Im Frühjahr und Sommer (Sommererosion) finden Kartierungen nach Niederschlagsereignissen mit einer Regenintensität von mindestens 10 mm/h oder bei geringerer Regenmenge, wenn deutliche Erosionsspuren entstanden sind, statt. Die Dauerbeobachtung erfasst alle Erosionsformen in ihrer räumlichen Abgrenzung. Die linearen und flächenhaft-linearen Erosionsformen werden vermessen (Anzahl, Breite, Tiefe und Länge der Formen) und Offsite-Effekte erfasst. Aus diesen im Gelände erfassten Angaben wird der jährliche Bodenabtrag errechnet (LBEG 2012). Zur Erfassung der relevanten Bewirtschaftungsdaten erfolgt eine jährliche Befragung der Landwirte.

In Baden-Württemberg erfolgt auf beiden Messflächen seit dem Jahr 2012 nach Niederschlagsereignissen hoher Erosivität die Kartierung von Bodenabtrag und Bodenauftrag sowie der Erosionsformen.

In Sachsen-Anhalt wird ein anderer Weg gegangen, der die langjährige Bodenverlagerung am Hang dokumentiert, jedoch keine Rückschlüsse auf das jährliche Erosionspotential zulässt. Auf den BDF Leimbach und Lodersleben, die sich auf einer Hangcatena befinden, erfolgt im 10-Jahresrhythmus ein Feinnivellement. Die Erstmessung wurde im Jahr 2007 vorgenommen.

Mittels dieser Messung soll der Bodenabtrag bzw. Bodenauftrag vom Oberhangbereich in den Unterhangbereich dokumentiert werden. Im Jahr 2017 wurde die erste Wiederholungsmessung vorgenommen. Der Betrieb des im gleichen Einzugsgebiet befindlichen Erosionsmesshanges wurde im Jahr 2015 eingestellt.

Von zukünftig zunehmender Bedeutung könnten schadensfallabhängige Kartierungen in den Bundesländern zur Erfassung von Erosionsereignissen in Erosionskatastern sein. Vor dem Hintergrund einer möglichen klimabedingten Zunahme extremer Niederschlagsereignisse sind Schadenskartierungen zu Häufigkeit und räumlicher Verteilung von Erosionsereignissen ein wichtiges Hilfsmittel, um Messnetze und -standorte hinsichtlich ihrer Lage in vulnerablen Regionen Deutschlands zu priorisieren. Von Nachteil dürfte allerdings sein, dass die Erfassung der Erosionsereignisse länderspezifisch und somit nicht nach einheitlichen Kriterien erfolgt, was die Vergleichbarkeit der Länderdaten erschwert.

Neben den Boden-Erosionsmonitoringflächen und den schadensfallabhängigen Kartierungen auf Bundeslandebene existieren weitere Messkampagnen, die aber nur sekundär der Erfassung von Erosionserscheinungen dienen und somit nicht in den neu erarbeiteten Steckbrief für Bodendaten zu Erosion aufgenommen wurden. Im Rahmen des Projekts „TERENO Erosion Observation System“ werden im TERENO-Observatorium „Nordostdeutsches Tiefland“ seit Anfang 2015 kontinuierlich Messungen in vier kleinen repräsentativen Ackerbaugebieten zur Erfassung der Verlagerung von Kohlenstoff durch Bodenerosion vorgenommen. Die Ergebnisse aus dem Langzeitmonitoring werden gemeinsam mit Daten aus dem Projekt TERENO SoilCan für die Entwicklung gekoppelter Erosions- und Bodenkohlenstoffumsatzmodelle genutzt. In CarboZALF wird durch das Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) der Einfluss der Bodenerosion durch Wasser, Wind und Bearbeitung auf den landschaftsskaligen Kohlenstoffhaushalt untersucht und im Zeitraum 2009 bis 2019 Erosionserscheinungen in ausgewählten Ackerbaugebieten erfasst. Im Rahmen der LUCAS-Erhebung zur Landnutzung und Landbedeckung in der Europäischen Union erfolgte in zwei Phasen in den Jahren 2009 und 2015 die Erhebung bodenkundlicher Parameter, die der Bewertung der europaweiten Bodenerodierbarkeit dienen.

Für die länderspezifischen Programme der Boden-Erosionsmonitoringflächen wurde ein angepasster Steckbrief erarbeitet, um die Informationen systematisch aufzubereiten (siehe Anhang C.1). Für die Fortschreibung der Anforderungen an die Standorteigenschaften und die Datenerhebung diente ein Abfrageformular mit definierten Abfragen an die Standortbetreiber. Das Abfrageformular ist in Anhang C.2 enthalten.

Ausgehend von den Abfrageergebnissen wurden die im bisher vorliegenden Konzept für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund (Lazar et al. 2014) tabellarisch definierten Anforderungen an die Standorteigenschaften und die Datenerhebung übernommen und fortgeschrieben (vgl. Tabelle 9).

Für den Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund wird empfohlen, aufgrund der sehr geringen Anzahl gemeldeter Erosionsstandorte alle Standorte in den Verbund aufzunehmen und keine Kernstandorte, wie es für das Thema Bodenwasserhaushalt vorgenommen wird, zu definieren. Neu eingerichtete Standorte sollten in den Verbund aufgenommen werden. Ziel muss die Verdichtung des bestehenden Messnetzes mit kontinuierlichen und standardisierten Messungen sein. Zum jetzigen Zeitpunkt ist ein Horizontalvergleich der Erosion innerhalb Deutschlands für die Bewertung der Klimavulnerabilität nicht möglich.

Tabelle 9: Anforderungen an die Datenerhebung für Bodenerosion

Parameter und Methode (mögliche Einheit)	Bodenabtrag auf Schlag oder Messfläche-(Plot-)ebene auf ausgewählter Anzahl an Schlägen oder Teilschlägen ($t/ha * a$), z.B. Kartierung, Nivellement, Messung Bodenabtrag auf Einzugsgebiets-Ebene ($t/ha * a$) Bodenabtrag für einen längeren Zeitraum (periodisch) ($t/ha * a$) Profiltiefe (dm) Festsubstanz in der Abflusswelle natürliche Erosionsdisposition durch Wasser und/oder Wind (einmalig) Regenerosivität Messung von Bodenabträgen Kartierung aktueller Erosionsformen (Wind und/oder Wasser) (ereignisabhängig)
Messhäufigkeit (abhängig vom Parameter und von der Methode)	Schadensfallkartierung: ereignisabhängig auf Mess- und Beobachtungsflächen: turnusmäßig unterjährig Messung von Abtragsraten, während der klimaerosiven Jahreszeiten permanenter Messaufbau notwendig, tatsächliche Analytik und Auswertung der Messungen aber nur ereignisbezogen notwendig
Messtermine	monatlich oder ereignisabhängig

Parameter und Methode (mögliche Einheit)	Bodenabtrag auf Schlag oder Messfläche-(Plot-)ebene auf ausgewählter Anzahl an Schlägen oder Teilschlägen (t/ha * a), z.B. Kartierung, Nivellement, Messung Bodenabtrag auf Einzugsgebiets-Ebene (t/ha * a) Bodenabtrag für einen längeren Zeitraum (periodisch) (t/ha * a) Profiltiefe (dm) Festschubstanz in der Abflusswelle natürliche Erosionsdisposition durch Wasser und/oder Wind (einmalig) Regenerosivität Messung von Bodenabträgen Kartierung aktueller Erosionsformen (Wind und/oder Wasser) (ereignisabhängig)
	Termin kann an den einzelnen Standorten unterschiedlich sein
Bezugstiefe	Oberboden
Zielanzahl und Nutzung	bundesweit ca. 10 Standorte mit Ackerbau Maß der anthropogenen Beeinflussung sollte über den gesamten Betrachtungszeitraum gleichbleibend oder detailliert dokumentiert sein
Messinstitution	dezentral (Land/Standort)
Messprogramme, deren Standorte die Anforderungen erfüllen	Referenzgebiete in Niedersachsen „Erosions-BDF“ in Baden-Württemberg und Sachsen-Anhalt Schadensfallkartierung in Bayern, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Sachsen-Anhalt
Erfassung Mindestdatensatz	Bodenform, Bodenart, Niederschlagsmenge, Windgeschwindigkeit (nur für Winderosion), Hangneigung, wirksame Hanglänge, Bodenbewirtschaftung, Fruchtart, Bodenbedeckung

7.3 Organische Bodensubstanz

Relevante Größen für die Bewertung von Veränderungen der organischen Substanz in Böden aufgrund von Klimawirkungen sind die Kohlenstoffgehalte im Boden, dessen Konzentrationen im Sickerwasser und die mobilen Fraktionen im Boden, ebenso die Konzentrationen von Stickstoff, Phosphor und Schwefel (vgl. Kaufmann-Boll et al. 2011). Entsprechende dauerhafte Messungen und Erhebungen in Deutschland finden in folgenden Messprogrammen statt:

- ▶ **ICP Forests Level II:** regelmäßige Messung des Gehalts von organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff in Boden-Festphase und Bodenlösung an rund 70 Forststandorten
- ▶ **ICP Forests Level I / BZE Wald:** in ca. 15-jährigem Turnus wiederholte Messung der Gehalte von organischem Kohlenstoff (gelöst und gesamt) und Gesamtstickstoff in Boden-Festphase und Bodenlösung an rund 1.800 bis 2.000 Stichprobenpunkten unter Forst
- ▶ **BZE Landwirtschaft:** periodisch wiederholte Messung des Gesamtkohlenstoffs und Gesamtstickstoffs in der Boden-Festphase an ca. 3.000 landwirtschaftlich genutzten Raster-Stichprobenpunkten (bisher einmal durchgeführt)
- ▶ **BDF (Intensiv und Basis):** Messung der Gehalte von organischem Kohlenstoff, Gesamtkohlenstoff und -stickstoff, der gesamten und mobilisierbaren Phosphorgehalte im Boden an rund 850 Bodendauerbeobachtungsflächen in unterschiedlichen Abständen; an rund 100 Intensiv-BDF zusätzlich DOC und Gesamtstickstoff sowie Schwefel-Einträge durch Landwirtschaft

- ▶ **Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche:** je nach Fragestellung unterschiedliche Messungen, betrachtete Parameter: z.B. Humusgehalt und -qualität sowie C/N-Verhältnis
- ▶ **Feldlysimeter inkl. TERENO SoilCan:** fortlaufende Messung von Gesamtkohlenstoff, gelöstem organischen Kohlenstoff, Sulfaten und Stickstoffverbindungen im Boden-Feststoff, in der Boden-Lösung und im Sickerwasser in den TERENO Observatorien; An anderen Lysimeteranlagen oftmals Untersuchung der Bodenlösung auf Nährstoffe (u.a. Stickstoff)
- ▶ **Umweltprobenbank:** Messung des Gesamtkohlenstoffs im Turnus von 4 Jahren in Proben der Humusaufgabe sowie des Ober- und Unterbodens an 11 Standorten
- ▶ **ICOS-D Ökosystemmessnetz:** wiederholte Messung der Gehalte von organischem Kohlenstoff und organischem Stickstoff im Boden an 5 Standorten (Messturnus steht noch nicht fest) (z.T. kombiniert mit TERENO SoilCan)
- ▶ **ICP Integrated Monitoring:** Untersuchung der Gesamtgehalte von Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff und Phosphor in der Boden-Festphase im Turnus von 20 Jahren sowie der Gehalte von gelöstem Kohlenstoff und Stickstoff im Sickerwasser an 2 Stationen
- ▶ **LUCAS:** Bestimmung des Humusgehalts im Oberboden im 3-jährigen Turnus an 2.000 Standorten
- ▶ **Biodiversitäts-Exploration:** Messung von mineralisch assoziierter organischer Bodensubstanz und Nährstoffverfügbarkeit und -austrag auf 300 Plots in 3 Langzeituntersuchungsgebieten
- ▶ **Regionale Programme:** jährliche Untersuchung des Humusgehalts sowie weiterer chemischer Basisparameter des Bodens an 45 Standorten im Rahmen des Humusmonitoring Nordrhein-Westfalen (Bestandteil des BDF-Programms)

Detaillierte Angaben über die genannten Programme und die gemessenen Parameter sind in den aktualisierten Steckbriefen für Bodendaten enthalten, die in einer für das Jahr 2020 geplanten Neuauflage der Broschüre „Bodendaten in Deutschland“ (UBA 2012) erscheinen werden.

Die Eignung der Programme für die Erfassung und Modellierung von klimabedingten Änderungen der organischen Substanz in Böden wird in Abbildung 1 zunächst grob eingeschätzt. Für eine belastbare Bewertung ist eine vertiefende Prüfung der Messkonzepte und -standorte hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Daten aus einzelnen Programmen erforderlich. Dies erfolgt in einem Folgevorhaben des Umweltbundesamtes ab Herbst 2019.

118 Standorte, die für die Teilnahme am Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund gemeldet worden sind, eignen sich nach Angaben der Standortbetreiber für das Themenfeld Organische Substanz. Es handelt sich dabei um Standorte aus den Messprogrammen der Umweltprobenbank, der Bodendauerbeobachtung (Intensiv- und Basis-BDF) sowie des ICP Forests Level II.

7.4 Bodenbiologie

Relevante Spezies für die Betrachtung von Veränderungen der Bodenfauna sind Regenwürmer und mindestens ein weiterer Vertreter der Mesofauna. Gemessen werden können die Abundanz, das Artenspektrum, die Dominanz und Frequenz der Arten sowie die Biomasse von

Regenwürmern. Interessante mikrobiologische Messgrößen sind die mikrobielle Biomasse und Bodenzymaktivitäten (vgl. Kaufmann-Boll et al. 2011). Folgende bundesweite Programme liefern entsprechende Messdaten:

- ▶ **ICP Forests Level II:** an einigen ICP-Level II-Standorten in Baden-Württemberg, die teilweise gleichzeitig Basis- oder Intensiv-BDF sind: ab 2018 Erfassung von Regenwurmgemeinschaften, Raubarthropoden und Mykorrhiza,
- ▶ **BDF (Intensiv und Basis):** Zoologische und/oder mikrobiologische Untersuchungen im Turnus von 1 bis 6 Jahren an Bodendauerbeobachtungsflächen in Bayern, Brandenburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt (v.a. Regenwürmer und mikrobielle Biomasse sowie Basalatmung, z.T. auch Mesofauna und Enzymaktivitäten),
- ▶ **Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche:** Je nach Fragestellung sind die Parameter an den Versuchsstandorten unterschiedlich. Betrachtet werden z.B. die mikrobielle Diversität unter dem Einfluss der Bewirtschaftung und die Regenwurmkaktivität und -biomasse oder die Zusammensetzung der Bodenmikroorganismen,
- ▶ **Umweltprobenbank:** Messung von Stoffgehalten im Regenwurm an 11 Standorten im 4-jährigen Turnus (keine zoologische Erhebung),
- ▶ **ICOS-D Ökosystemmessnetz:** wiederholte Messung der Bodenatmung an 15 Standorten (Messturnus steht noch nicht fest),
- ▶ **ICP Integrated Monitoring:** Untersuchung der mikrobiellen Zersetzung anhand der Bodenrespiration, Stickstoff-Mineralisierung und Abbau der organischen Substanz an 2 Stationen im Turnus von 20 Jahren,
- ▶ **LUCAS:** Messungen der Bodenbiodiversität im Oberboden an 1.000 von 9.000 Standorten in Europa (nicht nur in Deutschland),
- ▶ **Biodiversitäts-Exploration:** Monitoring von Bodenmikroorganismen im Kernprojekt „Mikroorganismen“ im Bereich Bodenbiologie und Stoffkreisläufe (2014 bis 2020) sowie Messung u.a. von Bodenatmung und Enzymaktivität im Kernprojekt „Boden“ auf 300 Plots in 3 Langzeituntersuchungsgebieten.

Detaillierte Angaben über die genannten Programme und die gemessenen Parameter sind in den aktualisierten Steckbriefen für Bodendaten enthalten, die in einer für das Jahr 2020 geplanten Neuauflage der Broschüre „Bodendaten in Deutschland“ (UBA 2012) erscheinen werden.

Die Eignung der Programme für die Erfassung und Modellierung von klimabedingten Änderungen hinsichtlich der Bodenbiologie wird in Abbildung 1 zunächst grob eingeschätzt. Wie bei der organischen Substanz ist hier für eine belastbare Bewertung eine vertiefende Prüfung erforderlich, die ebenfalls in einem Folgevorhaben des Umweltbundesamtes ab Herbst 2019 erfolgen wird.

56 Standorte, die für die Teilnahme am Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund gemeldet worden sind, werden von den Betreibern als geeignet für das Themenfeld Bodenbiologie bewertet. Es handelt sich dabei um Standorte aus den Messprogrammen der Umweltprobenbank, der Bodendauerbeobachtung (BDF) und ICP Forests Level II.

7.5 Betroffenheit von Klimaänderungen

Eine Klimafolgenüberwachung ist vor allem an solchen Standorten sinnvoll, die mit hoher Wahrscheinlichkeit von Klimaänderungen betroffen sind. Hier lassen sich mit langjährigen Messreihen – für jeden Standort einzeln, aber auch als Tendenz für alle Standorte – Aussagen über vorhandene oder eben auch nicht vorhandene Veränderungen treffen, vorausgesetzt, sie sind nicht maßgeblich von anderen Einflussfaktoren überlagert.

Die Regionen in der Bundesrepublik sind unterschiedlich stark vom Klimawandel betroffen, wobei einige Gebiete wie z.B. Trockenstandorte in Brandenburg oder am Oberrhein bzw. Feuchtstandorte oder Moore als besonders klimasensibel eingestuft werden. Allerdings ist für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik eine (mehr oder weniger starke) Erwärmung prognostiziert, so dass die gesamte Bundesrepublik als potenziell beeinflusst eingestuft werden kann. Weiterhin sind regional unterschiedlich starke Veränderungen der Niederschlagsverteilung und -intensität prognostiziert. Generell können Standorte eines Klimafolgenmessnetzes in allen Gebieten Deutschlands liegen, es sollten jedoch insbesondere auch Standorte mit voraussichtlich besonders deutlichen Veränderungen der Niederschläge und Temperaturen einbezogen werden (vgl. Lazar et al. 2014).

Im Projekt wurden für die Bewertung der potenziellen Verbundstandorte hinsichtlich ihrer möglichen Betroffenheit von Klimaänderungen die Vulnerabilitätsstudie des Umweltbundesamtes (Adelphi et al. 2015) für das Themenfeld Bodenwasserhaushalt sowie die Arbeiten von Steininger & Wurbs (2017) bzw. Wurbs & Steininger (2011) für das Themenfeld Erosion herangezogen.

Themenfeld Bodenwasserhaushalt

Adelphi et al. (2015) bewerten in ihrer Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ die Klimawirkungen und die Vulnerabilität in verschiedenen Handlungsfeldern. Für die Einschätzung der Klimawirkungen im Handlungsfeld Boden wurden dabei acht Indikatoren verwendet, die u.a. über Wirkmodelle die Klimawirkungen im Handlungsfeld in Abhängigkeit vom Klimawandel bewerten. Für die Bewertung der Lage der potenziellen Standorte für das Klimafolgemesstnetz wurden die Klimawirkungen der Parameter ‚Bodenwassergehalt‘ und ‚Sickerwasser‘ ausgewählt. Der Indikator ‚Jährliche Sickerwasserrate‘ bildet hierfür eine geeignete Grundlage. Um die Konsistenz der Bewertung zu gewährleisten, wurden Verbundstandorte ausgewählt, die in ihrem Messprogramm ebenfalls die Messgrößen ‚Bodenwassergehalt‘ und ‚Sickerwasserrate‘ erfassen.

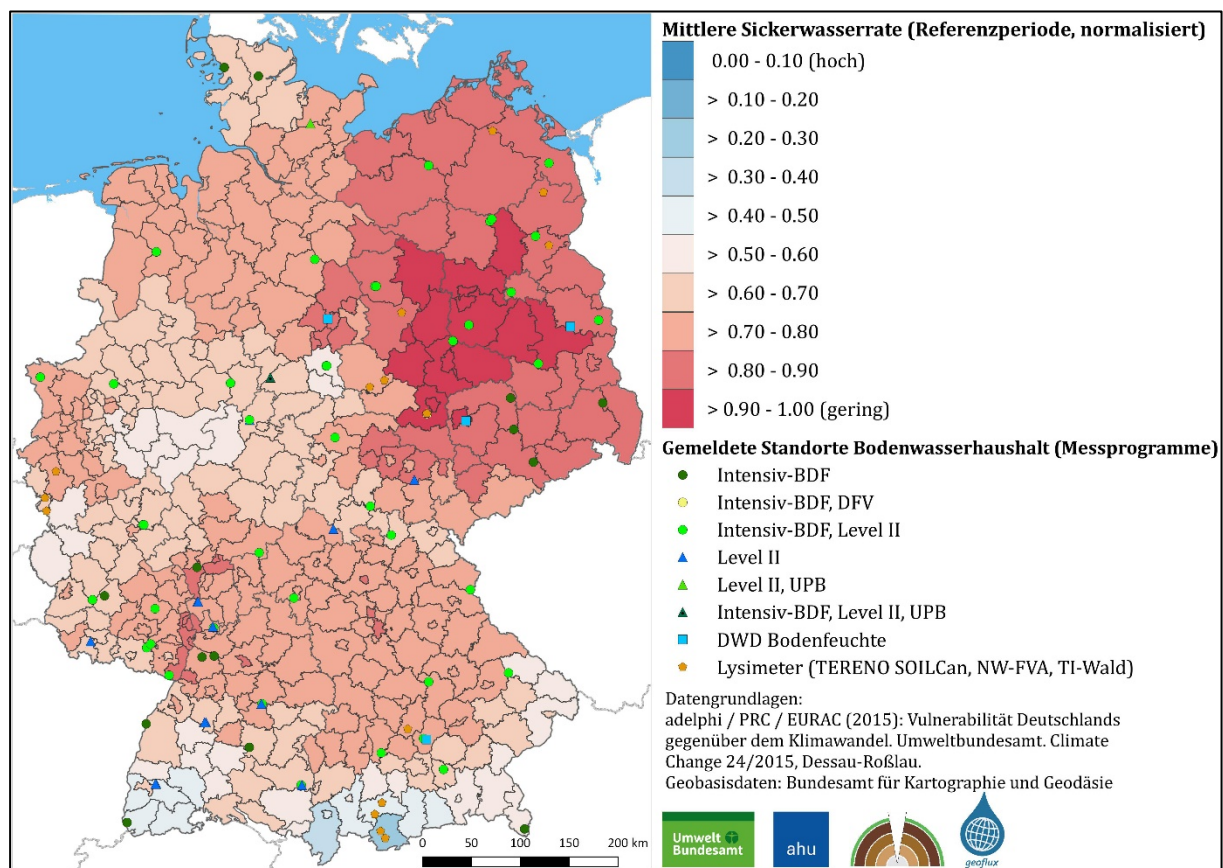
Adelphi et al. (2015) beschreiben die Klimawirkung für Bodenwassergehalt und Sickerwasser über die Verknüpfung eines Sensitivitätsfaktors (Anteil unversiegelter Flächen) mit der Veränderung der Indikatoren ‚Jährliche Sickerwasserrate‘ und ‚Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode‘. Als Referenzperiode gegenüber dem Szenarienzeitraum 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) dient die Periode 1961 bis 1990. Untersucht wurden dabei die Wirkungen bei einem starken und einem geringen Wandel des Klimas. Die Ergebnisse liegen aggregiert auf Landkreisebene vor. Für eine detaillierte methodische Beschreibung sowie die genauere Erläuterung der Parameter ‚starker Wandel‘ und ‚geringer Wandel‘ des Klimas wird auf Adelphi et al. (2015) verwiesen.

Für eine Standortbewertung wurde der Sensitivitätsfaktor nicht berücksichtigt, da der Anteil unversiegelter Flächen auf Kreisebene für standortbezogene Aussagen zu den Messungen des Bodenwassergehalts und des Sickerwassers als weniger relevant erscheint. Es wurde für die Einschätzung der Betroffenheit von Klimaänderungen die Veränderung des Klimasignals des Indikators ‚Jährliche Sickerwasserrate‘ betrachtet. Hierzu wurden durch das Umweltbundesamt die digitalen Daten auf Kreisebene zur Verfügung gestellt. Die durch Adelphi et al. (2015) mithilfe

eines Wirkmodells für den Referenz- und Szenarienzeitraum abgeschätzten Werte für die mittlere jährliche Sickerwasserrate im Boden liegen als normalisierte Werte zwischen 0 (hoch) und 1 (gering) vor. Für die Bewertung der Veränderung der Klimawirkung wurden die Differenzen zwischen den normalisierten Werten des Szenarienzeitraums 2021 bis 2050 (geringer und starker Wandel) und den Werten des Referenzzeitraums (1961 bis 1990) gebildet.

Abbildung 6 zeigt die gemeldeten Verbundstandorte aller Programme mit Messung des **Bodenwassergehalts**, der **Bodenwasserspannung** und/oder der **Sickerwassermenge** (Standortauswahl vgl. Kapitel 7.1.3, maßstabsbedingt überlagern sich nahegelegene Standorte) vor dem Hintergrund der normalisierten Werte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate auf Kreisebene. Aufgrund der klimatischen Bedingungen (geringe Niederschläge, geringe klimatische Wasserbilanz) sind bereits gegenwärtig vor allem die nordostdeutschen Regionen durch eine geringe Sickerwasserrate charakterisiert und potenziell sensibler gegenüber klimatisch bedingten Veränderungen.

Abbildung 6: Normalisierte Werte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate (1961-1990) auf Kreisebene und Verbundstandorte mit Messung der Bodenfeuchte und/oder der Sickerwassermenge



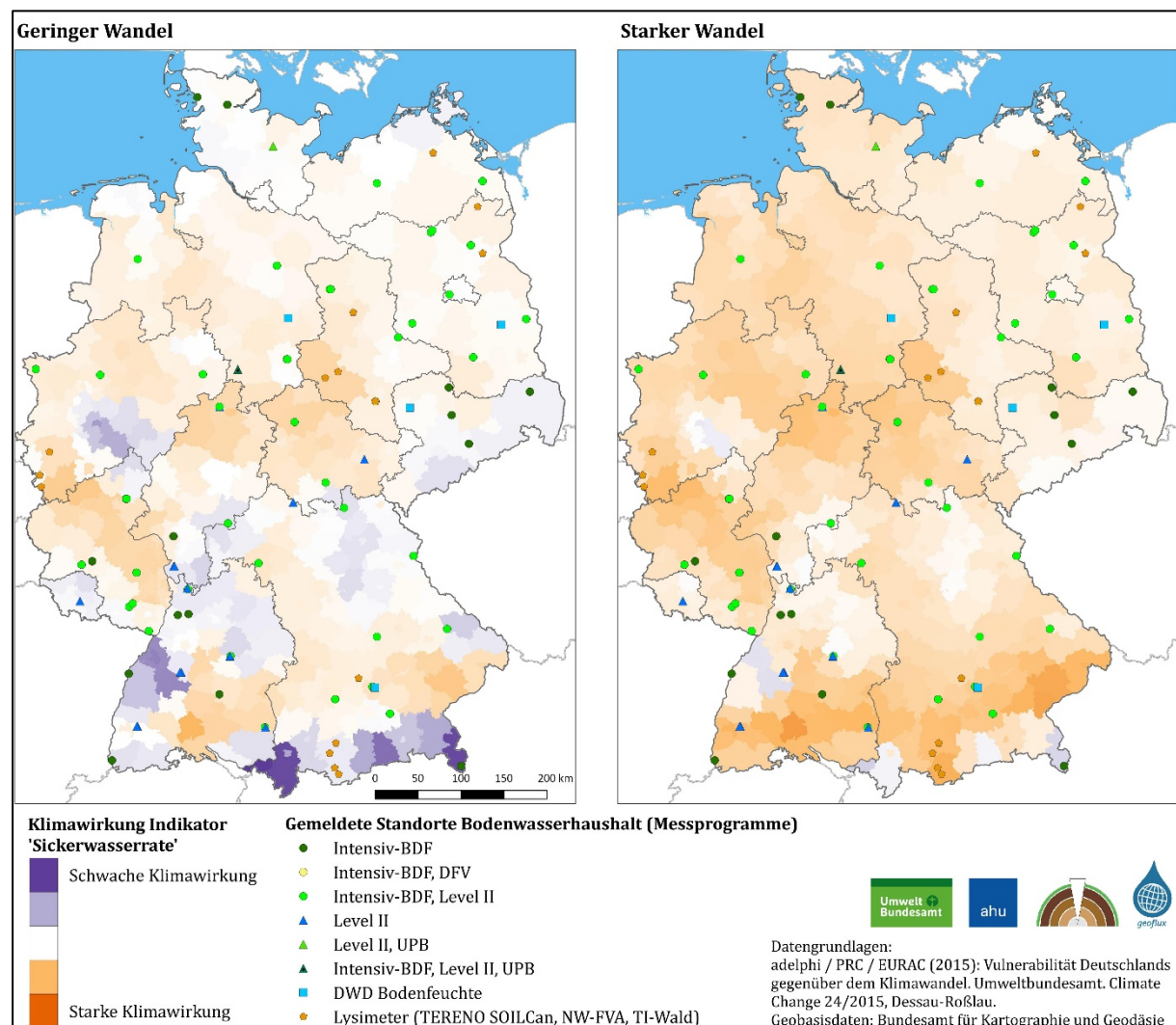
Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Abbildung 7 zeigt die Klimawirkung auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘ und die Verteilung der gemeldeten Verbundstandorte mit Messungen des **Bodenwassergehalts**, der **Bodenwasserspannung** und/oder der **Sickerwassermenge** (Standortauswahl vgl. Kapitel 7.1.3, maßstabsbedingt überlagern sich nahegelegene Standorte).

Bei einem geringen Wandel des Klimas (Karte links, Abbildung 7) zeigen im deutschlandweiten Vergleich vor allem das norddeutsche Tiefland, der Bereich der Mittelgebirgsschwellen sowie

Teile von Bayern, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg die stärksten Klimawirkungen auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘. Bei einem starken Wandel des Klimas (Karte rechts, Abbildung 7) sind nahezu alle Regionen der Bundesrepublik durch eine starke Klimawirkung auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘ betroffen. Überdurchschnittlich betrifft das vor allem das Alpenvorland, die deutsche Mittelgebirgsschwelle und das nordwestdeutsche Tiefland. Hier zeigt sich insbesondere in Nordwestdeutschland und dem nördlichen Teil von Bayern, dass Regionen mit stärkerer Klimawirkung durch Messstandorte unterrepräsentiert sind. Hier sind fast ausschließlich Standorte des ICP Forests Level II vorhanden, die z.T. auch in Bodendauerbeobachtungsprogramme integriert sind. Adelphi et al. (2015) bezeichnen den Nordosten Deutschlands als ‚Sensitivitäts-Hotspot‘ in Bezug auf die Sickerwasserrate. Aufgrund der gegenwärtig sehr geringen Sickerwasserraten ist die Sensitivität der Region bereits gegenüber geringen klimatischen Veränderungen als überdurchschnittlich hoch zu bewerten. Für den als besonders sensitiv in Bezug auf Veränderungen der Sickerwasserraten zu bezeichnenden nordostdeutschen Raum ist positiv zu bewerten, dass mit Level II, Intensiv-BDF sowie TEREÑO SoilCan bereits verschiedene Messprogramme zur Erfassung des Bodenwasserhaushalts vorhanden sind.

Abbildung 7: Verbundstandorte mit Messung des Bodenfeuchte und/oder Sickerwassermenge vor dem Hintergrund der Klimawirkung auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘

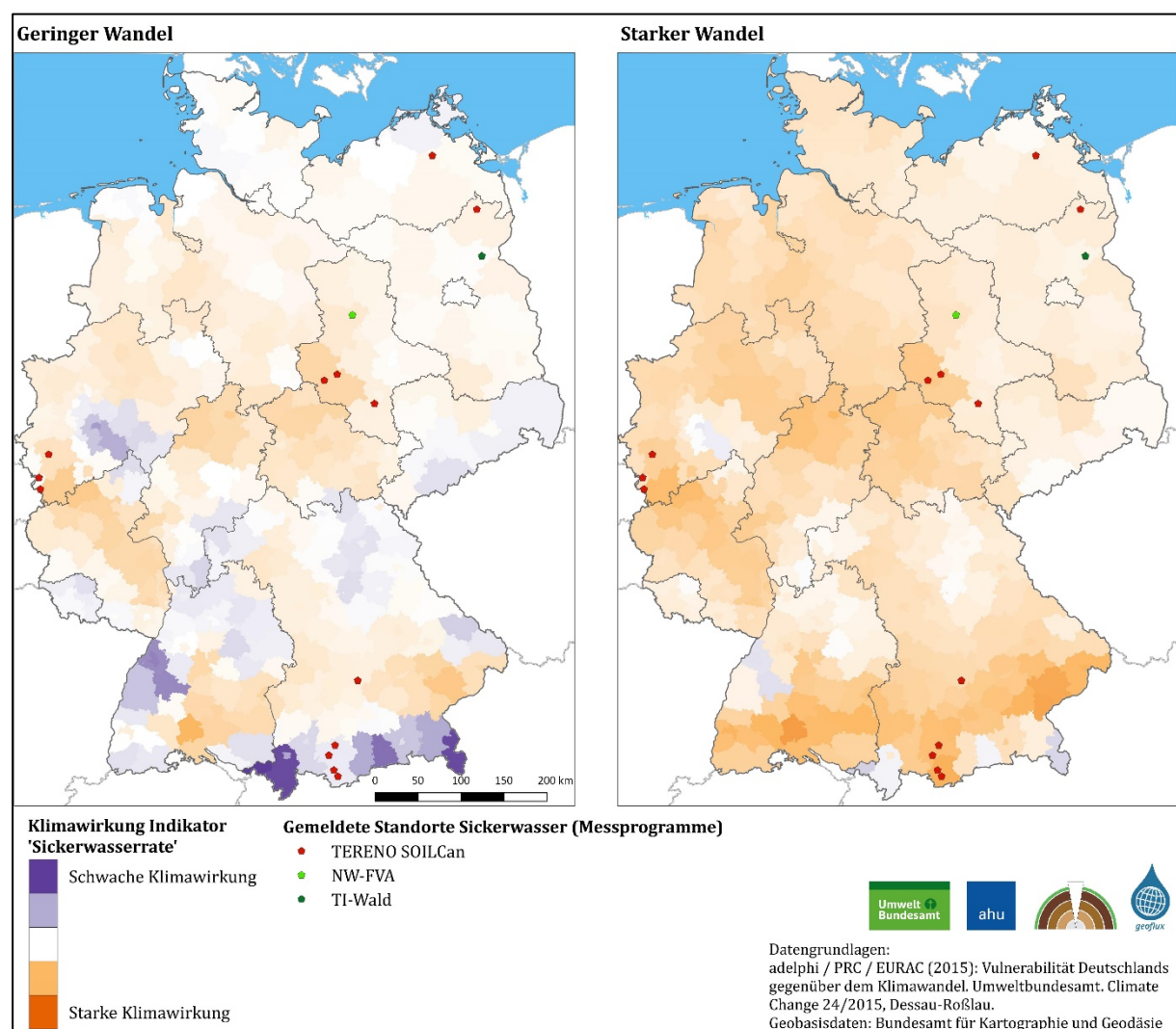


Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Ein deutliches Defizit wird hingegen deutlich, sofern eine Einschätzung der gemeldeten Standorte mit Messungen der Sickerwasserrate vor dem Hintergrund der Klimawirkung des Indikators ‚Sickerwasserrate‘ vorgenommen wird (Abbildung 8). Nur in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und im Süden Bayerns finden Messungen vorwiegend innerhalb des Programmes TERENO SoilCan statt.

Um messbare Veränderungen der Folgen des Klimawandels auf die Sickerwasserrate dokumentieren bzw. flächenhafte Modelle für ein breites Spektrum von Standorteigenschaften validieren zu können, ist die Einbeziehung weiterer Lysimeteranlagen in den Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund unbedingt empfehlenswert. Die bestehende Anzahl der Messstandorte reicht hierfür nicht aus.

Abbildung 8: Verbundstandorte mit Messung der Sickerwasserrate vor dem Hintergrund der Klimawirkung auf den Indikator ‚Sickerwasserrate‘



Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Themenfeld Bodenerosion

In der Studie Adelphi et al. (2015) wird die potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind und Wasser (und deren Veränderung durch geringen/starken Wandel) selbst als ein Indikator und Parameter für die Klimawirkung betrachtet. Zusätzlich dient der Anteil an Ackerfläche auf Landkreisebene als Sensitivitätsgröße. Die Berücksichtigung der Parameter ‚Starkregen‘ und

„Starkwinde“, wie sie in der Vulnerabilitätsstudie für andere Handlungsfelder genutzt wurden, erfolgt im Handlungsfeld Bodenerosion nicht.

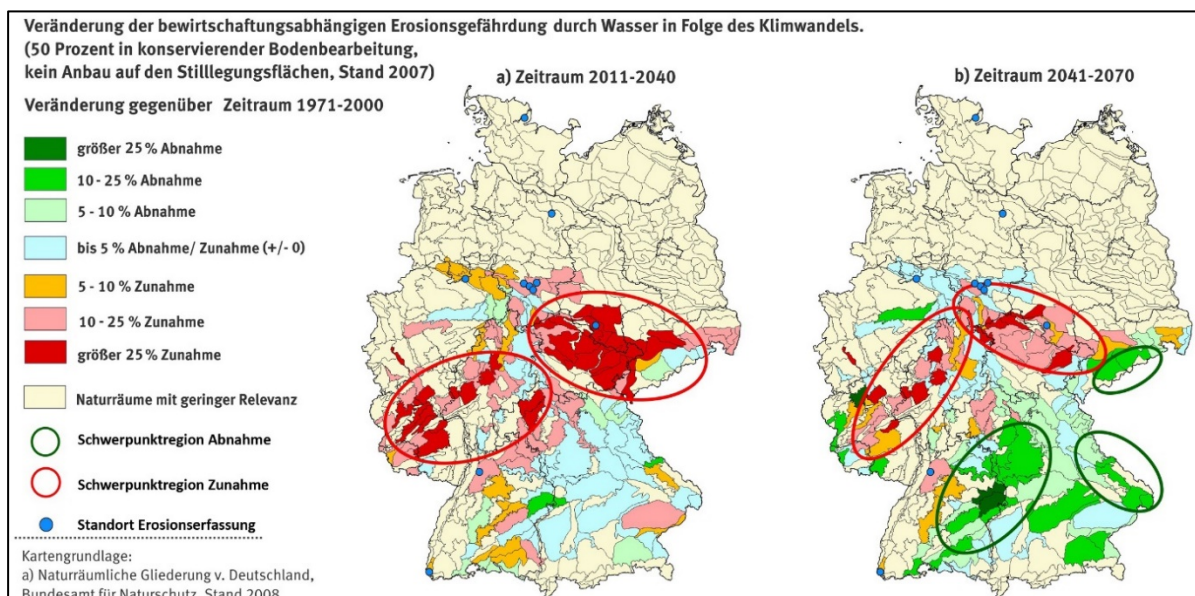
Durch Steininger & Wurbs (2017) sowie Wurbs & Steininger (2011) wurden für das Themenfeld Erosion auf Bundesebene detaillierte Modellierungen und Bewertungen einer möglichen Veränderung der Erosionsgefährdung durch den Klimawandel vorgenommen. Die wesentlichen Aussagen dieser Studien werden nachfolgend für die Bewertung der potenziellen Verbundstandorte herangezogen.

In Hinblick auf die Erosion durch Wasser wurden vor allem die durch größere Hangneigungen geprägten Naturräume im Bereich der Mittelgebirgsschwelle in Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen und Sachsen großräumiger als Regionen ausgewiesen, für die eine klimabedingte Zunahme der Erosionsgefährdung zu erwarten ist. Zusätzlich sind kleinere Regionen in Süddeutschland, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt betroffen. Abbildung 9 zeigt die ausgewiesenen Naturräume für die Szenarienzeiträume 2011 bis 2040 und 2041 bis 2070.

Die Lage der Erosionsmonitoringflächen für den Verbund repräsentiert Teile der als klimavulnerabel ausgewiesenen Naturräume in einem guten Maß. Zukünftig stärker erosionsgefährdete Regionen in Sachsen, Hessen, Rheinland-Pfalz und Thüringen sind jedoch nicht durch Messstandorte repräsentiert. Hier spiegelt sich die grundsätzlich unbefriedigende Situation im bundesweiten Vorhandensein geeigneter Erosionsmessflächen wider.

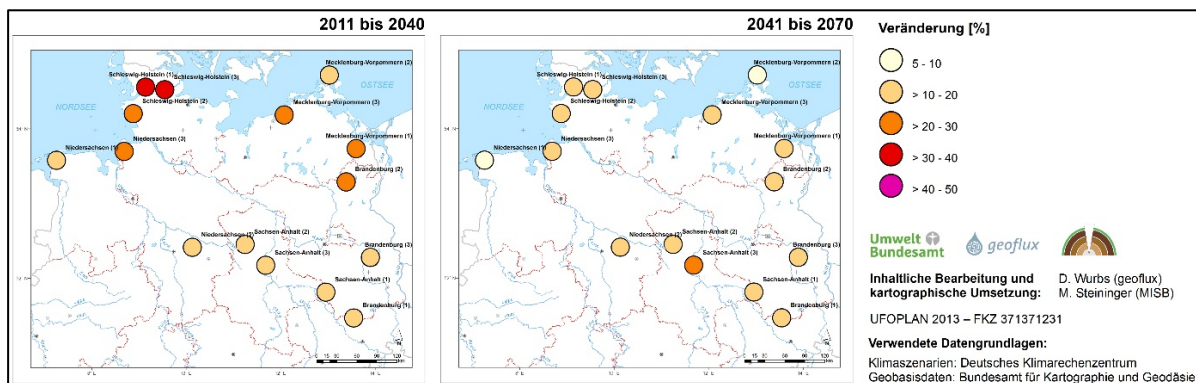
Die Bewertung einer klimabedingten Veränderung der Bodenerosion durch Wasser anhand repräsentativer Messdaten erfordert eine deutliche Verdichtung des bestehenden Messnetzes, wobei der Fokus auf den besonders gefährdeten, klimavulnerablen Naturräumen liegen muss.

Abbildung 9: Erosionsmonitoringflächen (Wasser) und Veränderung der Erosionsgefährdung



Quelle: Wurbs & Steininger (2011), verändert

Abbildung 10: Veränderung der natürlichen Erosionsgefährdung durch Wind



Quelle: Steininger & Wurbs (2017), verändert

Die Ergebnisse von Steininger & Wurbs (2017) zeigen, dass für die von Winderosion besonders betroffenen Regionen im Norden Deutschlands eine weitere Zunahme der natürlichen Erosionsgefährdung aufgrund des zukünftig zu erwartenden Anstiegs von Starkwinden und einer erhöhten Bodenerodierbarkeit (zunehmende Bodentrockenheit) möglich ist (vgl. Abbildung 10).

Eine Verifizierung von Aussagen hinsichtlich der Klimavulnerabilität für die Erosionsgefährdung durch Wind ist derzeit nicht möglich, da nur in Schleswig-Holstein eine Basis-BDF als potenzielle Winderosionsmessfläche vorhanden ist. Somit ist auch für die Bodenerosion durch Wind die Einrichtung langfristig betriebener Messstellen zu empfehlen.

8 Konzept für den Start des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds in Deutschland

Aufbauend auf den Ergebnissen der Messnetzuntersuchung und der Eignungsbewertung wurde das Konzept für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund aus dem Jahr 2014 fortgeschrieben. In diesem Kapitel wird das konkretisierte und weiterentwickelte Konzept mit Empfehlungen zur Umsetzung vorgestellt. Um das Konzept unabhängig von dem vorliegenden Forschungsbericht lesbar zu gestalten, erfolgt eine erneute Einführung in die Thematik und Erläuterung der Hintergründe. Auch werden Inhalte der Eignungsbewertung erneut aufgegriffen. So kann das Kapitel 8 alleinstehend in weitere Abstimmungs- und Entscheidungsprozesse eingebracht werden.

Fortschreibung des Konzeptentwurfs von 2014 (Lazar et al. 2014)

Der auf Initiative von BMU/UBA erarbeitete Entwurf aus dem Jahr 2014 konzentrierte sich aufgrund der Priorisierung der Handlungsempfehlungen durch die BOVA-Umfrage und der Machbarkeit im ersten Schritt auf die mittlere Ebene der Messintensitäten, auf das Intensiv-Monitoring (vgl. Abbildung 11). Im vorliegenden Konzept werden nun sowohl Aktivitäten des Extensiv-Monitorings mit geringerer Messintensität als auch Umweltforschungsinfrastrukturen, die detaillierte, prozessorientierte Daten liefern, gleichrangig mitberücksichtigt. Die 2014 formulierten Anforderungen an die Standortauswahl, -verteilung und -anzahl gelten weiterhin. Dazu gehören die Messung relevanter Größen, die Repräsentanz für Flächen, aber auch für besonders empfindliche Standorte sowie ein langjähriger Messzeitraum. Das fortgeschriebene Konzept berücksichtigt außerdem die 2014 ausgeführten Bedingungen für die Koordinierung und Datenhaltung. Die Rahmenbedingungen für die Datenbereitstellung haben sich insofern verändert, als eine neue Koordinierungsstelle für landwirtschaftliche Bodendaten besteht (BonaRes Datenzentrum), neue Standards bzw. Leitlinien für den Austausch von Daten vorliegen (z.B. Kunkel et al. 2014 für TERENO, Svoboda & Heinrich 2017 und Hoffmann et al. 2017 für BonaRes) und zunehmend Messdaten in Online-Portalen zur Verfügung stehen (z.B. Teodoor, DEIMS-SDR).

8.1 Ziele und Leistungen des Verbunds

Ziel des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds ist die bundesweite Erfassung, Überwachung und Dokumentation des Ist-Zustands der Böden in Deutschland sowie der aus dem Klimawandel resultierenden Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenqualität (vgl. Lazar et al. 2014). Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine Vergleichbarkeit der Methoden und Messdaten von unterschiedlichen Messprogrammen unbedingt erforderlich.

Der Verbund ermöglicht es, Messdaten auf Vergleichbarkeit zu prüfen und vergleichbare Messdaten zu recherchieren. Der Verbund bietet die Chance, eine seit Langem angestrebte länderübergreifende Vergleichbarkeit von Methoden und Messdaten aus Langzeitbeobachtungen von Böden herzustellen. Dazu sollen Standorte identifiziert werden, an denen Daten mit geeigneten Methoden erfasst werden. Eine Veränderung der in bestehenden Messprogrammen etablierten Methoden wird hingegen nicht angestrebt.

Der Fokus des Verbunds liegt auf den Themen: Bodenwasserhaushalt, organische Substanz, Bodenbiologie und Bodenerosion. Bei diesen Themen sind Veränderungen am ehesten zu erwarten bzw. werden derzeit diskutiert.

Die mit Unterstützung des Verbunds zu beantwortenden Fragestellungen sind:

- In welchem Maß ändern sich **bodenhydrologische Kenngrößen** (insbesondere Bodenfeuchte) unter den Bedingungen von Klimawandel und Bewirtschaftung?
- In welchem Maß ändert sich der Gehalt an **organischer Bodensubstanz** unter den Bedingungen von Klimawandel und Bewirtschaftung?
- In welchem Maß verändert sich die Bodenlebensgemeinschaft (**Bodenbiologie**) unter den Bedingungen von Klimawandel und Bewirtschaftung?
- In welchem Maß nimmt die **Bodenerosion** unter den Bedingungen von Klimawandel und Bewirtschaftung zu oder ab?

Bisher lagen aus Forschungsaktivitäten von BMU/UBA eine Zusammenstellung von Metadaten auf Bundesebene für bestehende Langfrist-Messprogramme für Bodendaten (vgl. UBA 2012) und eine Bewertung dieser Programme hinsichtlich ihrer Eignung für Fragen des Klimafolgen-Bodenmonitorings vor (vgl. Lazar et al. 2014). Damit sind beschreibende Informationen über Bodendaten zugänglich, die Hinweise auf eine Datenauswahl durch Forschung und Verwaltung zur Verwendung in Auswertungen geben. Nun sollen konkrete Messstandorte in Deutschland, die geeignete Messgrößen oder Modelleingangsdaten für ein Klimafolgen-Bodenmonitoring liefern, gebündelt und für Interessierte in Forschung und Verwaltung recherchierbar gemacht werden.

Nicht zur Zielsetzung des hier beschriebenen MessnetzVerbunds gehört die Bereitstellung von flächenhaften bzw. regionalisierten Daten zu Bodeneigenschaften und Daten zur Landnutzung und Vegetation, z.B. für die Klimamodellierung. Dies kann durch die in Bund und Ländern vorliegenden bodenkundlichen Kartenwerke erreicht werden (z.B. bundesweite Übersichtskarten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bodenflächendaten der staatlichen Geologischen Dienste).

Die im Forschungsprojekt „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“ erarbeiteten Vorschläge zur praktischen Umsetzung dieses Verbunds wurden in einem Fachgespräch im Oktober 2018 diskutiert und weiterentwickelt. An dem Gespräch nahmen auf Einladung des Umweltbundesamtes insbesondere Vertreter von Bund- und Länderinstitutionen sowie Forschungseinrichtungen teil, die mit dauerhaften bodenbezogenen Messungen befasst sind. Die aus dem Gespräch resultierenden Anregungen und Hinweise flossen in das vorliegende Verbundkonzept ein. Darüber hinaus hat ein Projektbeirat die Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben fachlich beratend unterstützt.

In einem ersten Schritt fokussiert sich der Verbund dabei auf zwei der vier o.g. Themen: Bodenwasserhaushalt und Bodenerosion. Diesen wurde im Jahr 2013 in einer LABO-BOVA-Umfrage die größte Bedeutung beigemessen.

Der Verbund

- leistet einen Beitrag zur bundesweiten Erfassung, Überwachung und Dokumentation des Ist-Zustands der Böden in Deutschland mit Bezug auf den Klimawandel und seine Folgen. (In Phase I: Wasserhaushalt und Erosion, in Phase II: organische Substanz und Bodenbiologie. Basis: länderübergreifende Auswertungen zu ausgewählten Fragestellungen der Klimawirkung und Anpassung),

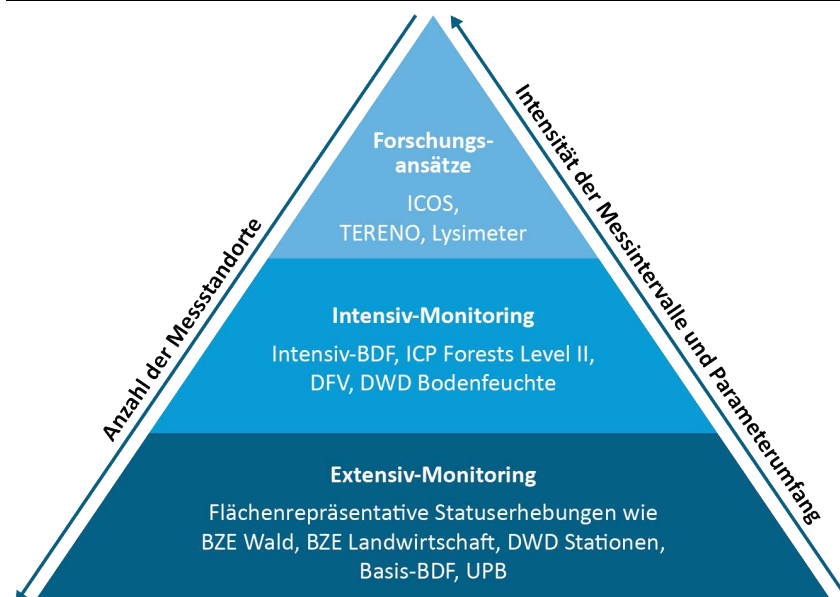
- ▶ schafft Strukturen, die über verschiedene Messprogramme hinweg belastbare und vergleichbare Daten für den Datennutzer garantieren,
- ▶ koordiniert und vernetzt Aktivitäten der Messstellenbetreiber und Anwender (Forderung aus der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel),
- ▶ macht Aktivitäten der Langzeitüberwachung von Böden besser bekannt,
- ▶ schafft Grundlagen, um die Datenqualität zu verbessern,
- ▶ vernetzt verschiedene Ebenen der Messintensität (Ebenen unterschiedlicher Messintensität in Abbildung 11 dargestellt.),
- ▶ dient als Plattform, indem er einen einfachen Zugang zu Informationen über bodenbezogene Messdaten für Anwender in Wissenschaft und Verwaltung schafft,
- ▶ bezieht Überwachungsdaten verschiedener Fragestellungen, Messnetze und Ressorts ein (vgl. Lazar et al. 2014),
- ▶ trägt zur verstärkten Nutzung und damit zur Wertschöpfung des Bodenmonitorings und der Bodenzustandserhebungen in Deutschland bei.

Im Verbund stehen künftig fortlaufend harmonisierte Standortdaten von langfristig betriebenen Messstellen an einer zentralen Stelle im Internet zur Verfügung, z.B. als Dienst in einer Kartenanwendung. Über diese Standortdaten lassen sich dann Stationen recherchieren, die bestimmte Messgrößen liefern.

Messdaten bleiben in der Hand der Daten erhebenden Stellen. Anwender fragen die entsprechenden Messdaten direkt bei diesen an.

Sofern es über die bestehenden Vereinbarungen zum Datenaustausch zwischen Bund und Ländern hinaus erforderlich ist, werden die Urheber- und Nutzungsrechte sowie die Qualitätssicherung über eine Kooperationsvereinbarung abgesichert.

Abbildung 11: Integration verschiedener Messebenen



Quelle: Lazar et al. (2014), ergänzt

Als Grundlage für den Start des Verbunds werden Standorte mit geeigneter Erhebungsmethodik in den Bereichen Probenentnahme-Design, Probenentnahme, Untersuchung und Messgeräteinsatz für erste Themen (Bodenwasser und Erosion) benannt. Damit lassen sich prinzipiell vergleichbare Daten identifizieren und vor Auswertungen vertiefend auf Vergleichbarkeit prüfen. Gleichwohl werden Lücken aufgezeigt. Teile der für den Verbund in Frage kommenden Programme verfügen bereits über einheitliche Erhebungsstandards (z.B. ICP Forests Level II Manuale für Bodenwasserhaushalt). Darauf aufbauend können Mindeststandards für die Datenerhebung (Messgrößen, Probenahme / Messtechnik) während des Betriebs und der Weiterentwicklung des Verbunds für alle relevanten Fragestellungen eines Klimafolgen-Bodenmonitorings gemeinsam mit den beteiligten Akteuren definiert werden. Die dafür erforderlichen, ressortübergreifenden Abstimmungsprozesse bedürfen eines Mandats und müssen außerhalb von F+E-Vorhaben stattfinden.

8.2 Aufbau des Verbunds

8.2.1 Grundkonzept

Die Teilnahme am Verbund erfolgt auf freiwilliger Basis und ist kostenfrei. Eine Kooperationsvereinbarung regelt die Aufgaben und Zuständigkeiten der Beteiligten sowie den Datenaustausch, sofern letzteres über bestehende Regelungen hinaus erforderlich ist.

Eine zentrale Stelle, z.B. das Umweltbundesamt, koordiniert künftig und dient als Kontaktstelle. Sie betreibt die Internetseite des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds mit Kartenanwendung und Verlinkungen zu beteiligten Messaktivitäten.

Eine Steuerungsgruppe mit Vertretern der beteiligten Akteure begleitet fortlaufend die Umsetzung und den Betrieb des Verbunds.

Der Verbund veröffentlicht keine Messwerte (Ausnahme: Öffentlichkeitsarbeit, siehe unten).

Der Verbund wird aus bestehenden, langfristig untersuchten Messstandorten aufgebaut, deren Weiterbetrieb nach aktuellem Stand gesichert ist. Er ist offen für die Aufnahme von neu eingerichteten Langzeit-Überwachungsstandorten. Der Verbund nimmt alle Standorte auf, die von ihren Betreibern als geeignet angesehen werden und themenspezifische Kriterien erfüllen (s. Tabelle 10). Neue Messstandorte, die sich mit Fragestellungen der Klimafolgen befassen, sollten nach den Qualitätsanforderungen des Verbunds konzipiert werden.

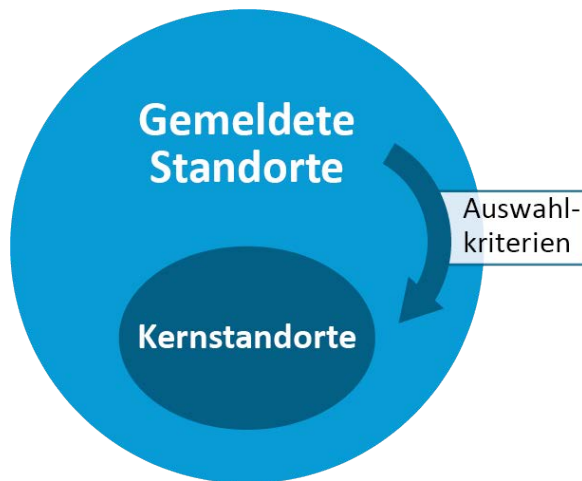
Im Verbund sind Messgrößen festgelegt, die es ermöglichen, Veränderungen des Bodenzustands unter bekannten Klima-, Nutzungs- und Bewirtschaftungsbedingungen zu bewerten. Für jede Fragestellung werden Ziel-Messgrößen (z.B. Bodenfeuchte) und mit diesen verbundenen Wirkungs-Messgrößen (z.B. Wasservorrat, Ertrag) benannt.

Standorte, die dem Intensiv-Monitoring und den Forschungsansätzen (s. Abbildung 11) zuzuordnen sind, erlauben Aussagen über Veränderungen, Wirkungen und Prozesse am jeweiligen Standort unter definierten Nutzungs- und Bewirtschaftungsbedingungen anhand gemessener Daten. Um ergänzend dazu flächenhafte Aussagen über Veränderungen des Bodenzustands treffen zu können, sind Standorte des Extensiv-Monitorings (Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft, Basis-BDF, Umweltprobenbank, DWD Agrarmeteorologie) Teil des Verbunds. Diese stellen einmalig oder in periodischer Wiederholung Eingangsdaten für Modellbetrachtungen zu Klimafolgen zur Verfügung. Perspektivisch liefern sie – je nach Messintervall – auch Daten für Ziel-Messgrößen.

Aus der Gesamtheit der Intensiv-Monitoring- und Forschungsstandorte werden durch die koordinierende Stelle nach vorab gemeinsam abgestimmten Kriterien „Kernstandorte“ benannt, die zusätzliche Auswahlkriterien erfüllen (s. Abbildung 12). So sind Standorte mit einer langen

Zeitreihe besonders geeignet für die Untersuchungen von Langfriständerungen vor dem Hintergrund der Klimavulnerabilität. Die Kernstandorte kommen insbesondere für überregionale und messnetz-übergreifende Auswertungen in Frage. Auch wenn Trendanalysen aufgrund einer eingeschränkten Vergleichbarkeit von Messdaten für einzelne Standorte vorgenommen werden müssen, sind Rückschlüsse für bestimmte Klima-, Nutzungs- und Bewirtschaftungsbedingungen möglich.

Abbildung 12: Auswahl von Kernstandorten aus Intensiv-Monitoring und Forschung



Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Im Verbund gilt künftig ein Kriterienkatalog für die teilnehmenden Messstandorte. Dieser umfasst für die verschiedenen Mess-Ebenen die in Tabelle 10 angegebenen Themen.

Tabelle 10: Kriterien für Verbund-Standorte

Kriterien	Mess-Ebene		
	Forschung	Intensiv-Monitoring	Extensiv-Monitoring
Relevante Ziel-Messgrößen, Einflussfaktoren und Wirkungs-Messgrößen für die Fragestellung des Verbunds: „In welchem Maß verändern sich Bodenzustand und Bodenqualität unter den Bedingungen von Klimawandel und Bewirtschaftung?“	obligatorisch	obligatorisch	fakultativ
Anforderungen an Kernstandorte (siehe für Bodenwasserhaushalt Kap. 8.2.5 und für Bodenerosion Kap. 8.2.6),	obligatorisch	obligatorisch	fakultativ
Kernattribute für die Standorte (siehe für Bodenwasserhaushalt Kap. 8.2.5 und für Bodenerosion Kap. 8.2.6).	obligatorisch	obligatorisch	obligatorisch
Bodenphysikalische Kennwerte, die für jeden Verbundstandort zum Zweck einer grundlegenden Charakterisierung erforderlich sind.	obligatorisch	obligatorisch	obligatorisch

Die Standortdaten der Verbundmessstellen inkl. Angaben zu Messgrößen und Messkonzept werden künftig in einer Kartenanwendung im Internet durch die Koordinierungsstelle öffentlich bereitgestellt. Bezüglich der Standortangaben (Lagegenauigkeit der Koordinaten) sind entsprechende Datenschutzerfordernisse zu beachten (z.B. Runden der Koordinaten).

Voraussetzung und Grundlage des Verbunds sind die Qualitätssicherung von Messdaten und die Standardisierung von Standortdaten. Nur so lassen sich Daten programmübergreifend vergleichen und belastbare Aussagen gewinnen. Für die Definition der Qualitätsstandards soll ein Verbund-Manual entwickelt werden. Dort sind die auf den Untersuchungsflächen (extensiv bis Forschungsansatz) für Ziel- und Wirkungsmessgrößen angewandten Methoden inkl. Messhäufigkeiten und Messtechnik dokumentiert. Für jeden Verbund-Standort müssen Messgrößen, Tiefenbezug, Messhäufigkeiten und die Länge der Zeitreihen bekannt sein. Längere Ausfälle von Messgeräten sind zu dokumentieren.

Öffentlichkeitsarbeit / Kommunikation des Verbunds nach außen

Der Verbund wirbt mit exemplarischen Auswertebeispielen für die Messgrößen und -werte an einzelnen Standorten (z.B. Zeitreihe der Bodentemperatur über 25 Jahre in Ober- und Unterboden). Damit sollen der Nutzen und der Wert der Messergebnisse direkt für die möglichen Datennutzer sichtbar gemacht werden. Um eine lebendige Informationskultur zu schaffen, wählt die Koordinierungsstelle in Abstimmung mit dem Betreiber des betreffenden Standortes regelmäßig eine oder mehrere neue Beispiel-Klimafolgenmessstation(en) aus (Vorschläge können eingebracht werden). Koordinierungsstelle und Betreiber des Standortes erarbeiten dabei gemeinsam geeignete Kurzbeschreibungen, Auswertungen und grafische Darstellungen, die auf der Internetseite des Verbunds platziert und über die Koordinierungsstelle verbreitet werden.

Der Verbund (die Koordinierungsstelle) sollte fortlaufend auf einschlägigen Tagungen und Symposien vertreten sein und dort für die wissenschaftliche Nutzung der Messdaten zu werben und Vernetzungsprozesse anzustoßen (z.B. BonaRes, TERENO).

8.2.2 Gremien und Beteiligte

Der Verbund setzt sich aus den folgenden Akteuren zusammen:

- ▶ Steuerungsgruppe,
- ▶ Koordinierungsstelle,
- ▶ Verbundmitglieder (Daten erhebende Stellen) und
- ▶ Datennutzer.

Aufgaben der Steuerungsgruppe

- ▶ Steuerung der Weiterentwicklung und des fachlichen Ausbaus der Verbund-Konzeption,
- ▶ Abstimmung und Festlegung der Ziel- und Wirkungs-Messgrößen, der Kriterien für Kernstandorte, der Qualitätsstandards und des Datenaustausch-Prozesses (ggf. Benennung von Themenverantwortlichen),
- ▶ Abstimmung der Kooperationsvereinbarung zur Mitarbeit im Verbund und der Nutzungsvereinbarung für Messdaten (sofern letztere erforderlich ist),
- ▶ Empfehlungen für den Verbundbetrieb anhand der Ergebnisse der Erfolgskontrolle,
- ▶ Wirkung als Multiplikatoren für die Verbundteilnahme und Datennutzung.

Aufgaben der Koordinierungsstelle

- ▶ Koordinierung bzw. Vernetzung von Aktivitäten, Erfolgskontrolle,
- ▶ Benennen von Forschungs- und Auswertungsbedarf für die Verbundfragestellungen,
- ▶ Kontaktstelle für Daten erhebende Stellen und Datennutzer, Betrieb der Internetseite
- ▶ Öffentlichkeitsarbeit,
- ▶ Weiterentwicklung und fachlicher Ausbau der Verbund-Konzeption in Abstimmung mit der Steuerungsgruppe,
- ▶ Vorschlag von Ziel- und Wirkungsmessgrößen sowie von Kernstandorten aus Intensiv-Monitoring und Forschung nach vorab abgestimmten Kriterien (zur Abstimmung mit Steuerungsgruppe)
- ▶ Vorschlag von Qualitätsstandards für Messdaten (zur Abstimmung mit Steuerungsgruppe) und Bereitstellung von Prüfroutinen,
- ▶ Erstellung und Pflege (Fortschreibung) eines Verbund-Manuals mit Standards für Datenerhebung und Datenaustausch (in Abstimmung mit der Steuerungsgruppe),
- ▶ Vorlage einer Kooperationsvereinbarung (in Abstimmung mit Steuerungsgruppe),
- ▶ Bereitstellung einer Muster-Vereinbarung für die Nutzung von Messdaten (Nutzungsvereinbarung für die Verbundmitglieder), sofern diese über bestehende Regelungen hinaus erforderlich ist,
- ▶ Bereitstellung eines Datenaustauschformats für Standort-Geodatenätze und Metadaten,
- ▶ Pflege des bundesweiten Geodatenatzes der Verbundstandorte und Pflege der Kartenanwendung,
- ▶ Gewährleistung des Einhaltens der aus dem Datenschutz resultierenden Anforderungen,
- ▶ Bereitstellung von Hintergrundinformationen zur Klimavulnerabilität in Deutschland.

Aufgaben der Verbundmitglieder (Daten erhebende Stellen)

- ▶ Unterzeichnung einer Kooperationsvereinbarung zwischen Betreibern und Koordinierungsstelle, welche die Aufgaben der Koordinierungsstelle und der Verbundmitglieder festlegt,
- ▶ regelmäßige Meldung definierter Standortdaten (Erheber-Geodatenätze der Verbundstandorte) an die koordinierende Stelle für die Kartenanwendung,
- ▶ Erfüllung der Mindestanforderungen an zu meldende Standortdaten (zunächst für Bodenwasserhaushalt und Erosion) für aktuelle und künftig neu einzurichtende Standorte,
- ▶ regelmäßige Mitteilung von eingegangenen Anfragen von Datennutzern an die koordinierende Stelle zur Erfolgskontrolle,

- ▶ Bereitstellung von qualitätsgesicherten Messdaten auf Anfrage an Nutzer, Abschluss von Nutzungsvereinbarungen,
- ▶ Bereitstellung exemplarischer Messergebnisse für die Öffentlichkeitsarbeit, für einzelne Standorte (Auswertungsergebnisse, ähnlich der Dokumentation von Messergebnissen der Bodendauerbeobachtungsflächen²).

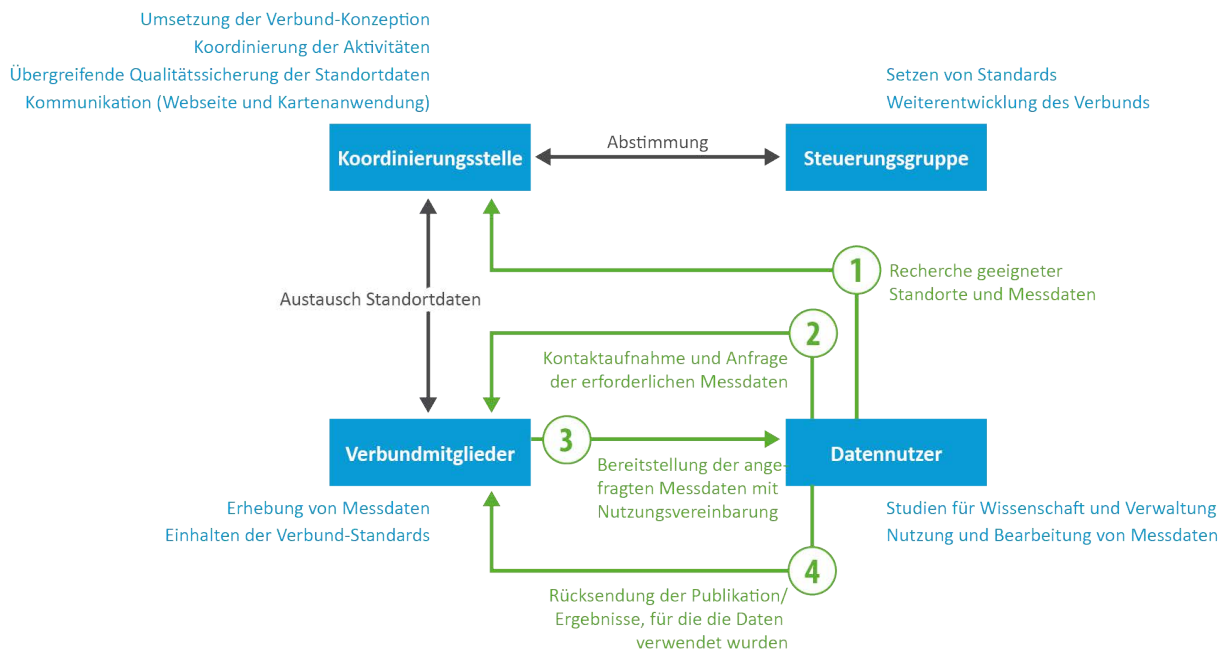
Aufgaben und Verpflichtungen der Datennutzer

- ▶ Auswahl von Standorten aus dem Verbund für die jeweilige Fragestellung,
- ▶ Kontaktaufnahme mit den Betreibern der Standorte und Anfrage der benötigten Messdaten (Messgrößen, Begleitdaten, Zeitraum) mit Benennung von Fragestellung, Zeitplan und erwarteten Ergebnissen,
- ▶ Unterzeichnung einer Vereinbarung mit den Daten erhebenden Stellen über Art und Umfang der Datennutzung sowie Berichtspflicht von Ergebnissen an die Daten erhebenden Stellen (Nutzungsvereinbarung),
- ▶ Prüfung auf Vergleichbarkeit, Zusammenführung und ggf. Aufbereitung von Messdaten für die Auswertung sowie Auswertung nach wissenschaftlichem Standard,
- ▶ Rücklauf der Ergebnisse sowie Benennen von weiterem Forschungs- und Auswertungsbedarf an Daten erhebende Stellen und Koordinierungsstelle (z.B. Publikationen).

In Abbildung 13 sind die Struktur, die Kommunikationswege und die Aufgaben der Beteiligten im Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund zusammengefasst.

² Beispiel BDF 1: Kandel/Schaidt in Rheinland-Pfalz: https://www.lgb-rlp.de/fileadmin/service/lgb_downloads/boden/bodendauerbeobachtungsflaechen/1_bdf_kandel_schaidt.pdf.

Abbildung 13: Struktur, Kommunikationswege und Aufgaben der Beteiligten im Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund



Quelle: ahu, Geoflux, MISB

8.2.3 Datenaustausch

Definierte Angaben zu den Verbundstandorten und zu den dort erhobenen Messgrößen werden nach Gründung des Verbunds regelmäßig (z.B. einmal im Jahr) zwischen Daten erhebenden Stellen und der Koordinierungsstelle ausgetauscht. Gemäß dem INSPIRE-Grundprinzip sollen Geodaten nur einmal gesammelt und nur dort verwaltet werden, wo dies am effektivsten geschehen kann. Demnach sollten die Daten erhebenden Stellen ihre Verbundstandorte in einem festgelegten Datenschema beschreiben und diesen Geodatenatz fortlaufend pflegen (Erheber-Geodatenatz inkl. Metadaten). Ggf. können bei den Daten erhebenden Stellen verfügbare Standortdaten auch von der Koordinierungsstelle in das Datenschema des Verbunds überführt werden.

Der Erheber-Geodatenatz der Verbundstandorte ...

- ... enthält die Messstandorte einer Daten erhebenden Stelle in Form von Punkt-Geoobjekten,
- ... enthält beschreibende Attribute für die Messstandorte einer Daten erhebenden Stelle wie z.B. Landnutzung, Messgrößen, Messhäufigkeit (siehe Kap. 8.2.5 und 8.2.6),
- ... wird von der Daten erhebenden Stelle gepflegt,
- ... wird mit Metadaten beschrieben, z.B. Titel, Kurzbeschreibung, Datum (Stand des Datensatzes), verantwortliche Stelle, Referenzsystem, Datenstruktur (Punktdaten), Sprache,
- ... wird Teil eines bundesweiten Geodatenatzes aller Verbundstandorte.

Das Datenschema soll an bestehende Metadaten-Strukturen für Geoobjekte (ISO) anknüpfen und diese um die für spezielle Nutzeranfragen notwendigen Attribute (z.B. Messgrößen, Startjahr) ergänzen. Das Datenschema ist für jedes Verbund-Thema zu überprüfen und ggf. anzupassen. Für den Datenaustausch ist das Datenschema in einer geeigneten technischen Form vorzuhalten, die eine wiederkehrende Datenübermittlung unterstützt. Mit den im laufenden F+E-Vorhaben eingesetzten Formularen für den Bodenwasserhaushalt und Bodenerosion sind die fachlichen Anforderungen an den Datenaustausch weitgehend definiert (s.u. Tabelle 12 und Tabelle 13).

Die Koordinierungsstelle erstellt künftig nach jedem Austausch aus den gelieferten Teil-Geodaten-sätzen der Verbundmitglieder einen bundesweiten Geodatensatz für jedes Verbundthema (Bodenwasserhaushalt, Bodenerosion) mit den notwendigen, den Gesamt-Datensatz beschreibenden Metadaten.

Vor dem Start des Verbunds ist der Prozess des Datenaustauschs zu konkretisieren und in die Kooperationsvereinbarung aufzunehmen. Dabei sind bestehende Regelungen zum Datenaustausch zu berücksichtigen (z.B. Bund-/Länder-Verwaltungsvereinbarungen).

8.2.4 Kartenanwendung und Geodatendienst

Die Kartenanwendung soll es künftig ermöglichen, Messstandorte nach Themen zu recherchieren und Suchanfragen über Messgrößen und Zeitreihenlängen durchführen zu können. Damit wird ein leichter und schneller Zugriff auf die Information über Messdaten unterschiedlicher Programme und Ressorts erreicht. Querverweise zu anderen Kartenanwendungen mit verwandten Inhalten oder die Einbindung von entsprechenden Geodaten sollen dabei vorgesehen werden (z.B. BonaRes, TERENO).

Für die Konzeption der Kartenanwendung ist von Bedeutung, dass an jedem Standort mehrere Messgrößen erhoben werden und den Messgrößen weitere Sachdaten zuzuordnen sind (z.B. Messbeginn, Messhäufigkeit) Diese 1:n-Beziehung ist in den zugrundeliegenden Geodatensätzen abzubilden. Die Kartenanwendung muss Funktionalitäten für entsprechende Abfragen bereitstellen.

Außerhalb der Kartenanwendung des Verbunds kann der bundesweite Geodatendienst der Verbundstandorte (als gekürzte Fassung ohne Messgrößenangaben) in gängige Geoportale integriert werden, z.B. Geodatenportal des Bundes, Geographisches Informationssystem Umwelt GISU).

8.2.5 Verbund-Thema Bodenwasserhaushalt

Messgrößen des Bodenwasserhaushalts werden an einer Vielzahl von Standorten in Deutschland dauerhaft erhoben, sowohl durch Bund- und Länderbehörden als auch durch Forschungsinstitutionen. Zielrichtungen, Messumfang und -konzepte sind unterschiedlich; jedoch bestehen Verknüpfungen zwischen den Messprogrammen (vgl. Lazar et al. 2014).

Für Standorte, die künftig für das Thema Bodenwasserhaushalt in den Verbund einbezogen werden, gelten bestimmte Anforderungen. Für Kernstandorte gibt es noch zusätzliche Auswahlkriterien. Zudem wird definiert, welche Angaben für die Verbundstandorte benötigt werden, um schließlich den Zugang für Nutzer zu ermöglichen.

Die wichtigsten Einflussfaktoren und Steuergrößen für den Bodenwasserhaushalt, sowie die im Verbund relevanten Ziel- und Wirk-Größen sind in Tabelle 11 genannt. Die genannten Größen beruhen entweder auf direkten/In-Situ-Messungen oder können berechnet, modelliert oder abgeleitet werden. Die Anforderungen an Verbund-Standorte für das Thema Bodenwasserhaushalt sind nachfolgend im Text aufgeführt.

Tabelle 11: Einflussfaktoren und relevante Größen für den Bodenwasserhaushalt

Einflussfaktoren	Infiltration, Evaporation, Versickerung, kapillarer Aufstieg Wurzelaufnahme Laterale Wasserflüsse, Oberflächenabfluss, Drainage
Steuergrößen	Meteorologische Faktoren wie Niederschlag, Verdunstung, Wind Bewirtschaftung Körnung, Gefüge, Skelettgehalt, Dichte und Humusgehalt des Bodens Grundwasserstand Vegetation, Durchwurzelungstiefe und -intensität, Transpiration
Ziel-Größen	Bodenfeuchte Sickerwassermenge Grundwasserstand (Moore)
Wirk-Größen* (Beispiele)	Baumvitalität Ertrag

* im Verbund festzulegen, z.B. durch Steuerungsgruppe

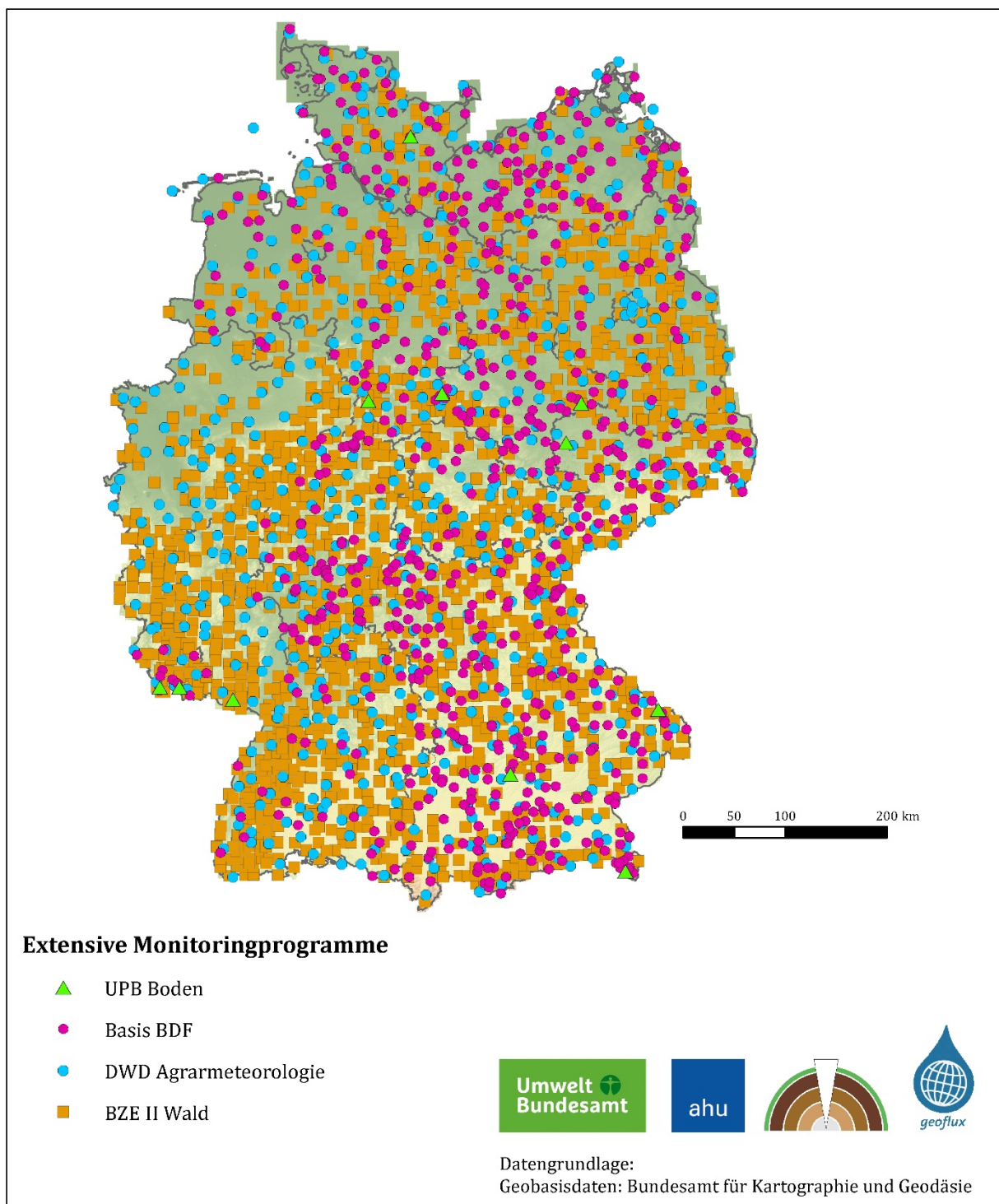
Anforderungen an Verbund-Standorte für das Thema Bodenwasserhaushalt

- Der Betreiber bewertet den Standort und die erhobenen Daten als geeignet für die Fragestellung „In welchem Maß ändern sich bodenhydrologische Kenngrößen unter den Bedingungen von Klimawandel und Bewirtschaftung?“
- Die Untersuchungsmethoden sind vollständig dokumentiert und können Datennutzern zur Verfügung gestellt werden. Eine vollständige Methodendokumentation ist erforderlich, um im Vorfeld von Auswertungen die Vergleichbarkeit von Messwerten prüfen zu können.
- Die Standortdaten und Angaben zu Messgrößen (s. Tabelle 12) liegen der Koordinierungsstelle vollständig und aktuell vor.

Für den Verbund / Bodenwasserhaushalt wurden bisher vier Messprogramme des Extensiv-Monitoring³ (siehe Abbildung 14) sowie 122 Intensiv-Monitoring- und Forschungsstandorte (siehe Abbildung 15) an das Umweltbundesamt gemeldet.

³ Die BZE Landwirtschaft kann in den Verbund integriert werden, wenn die Daten der 1. Erhebung 2011-2017 verfügbar sind.

Abbildung 14: Für die Ermittlung des Bodenwasserhaushalts gemeldete Verbundstandorte aus Extensiv-Monitoring

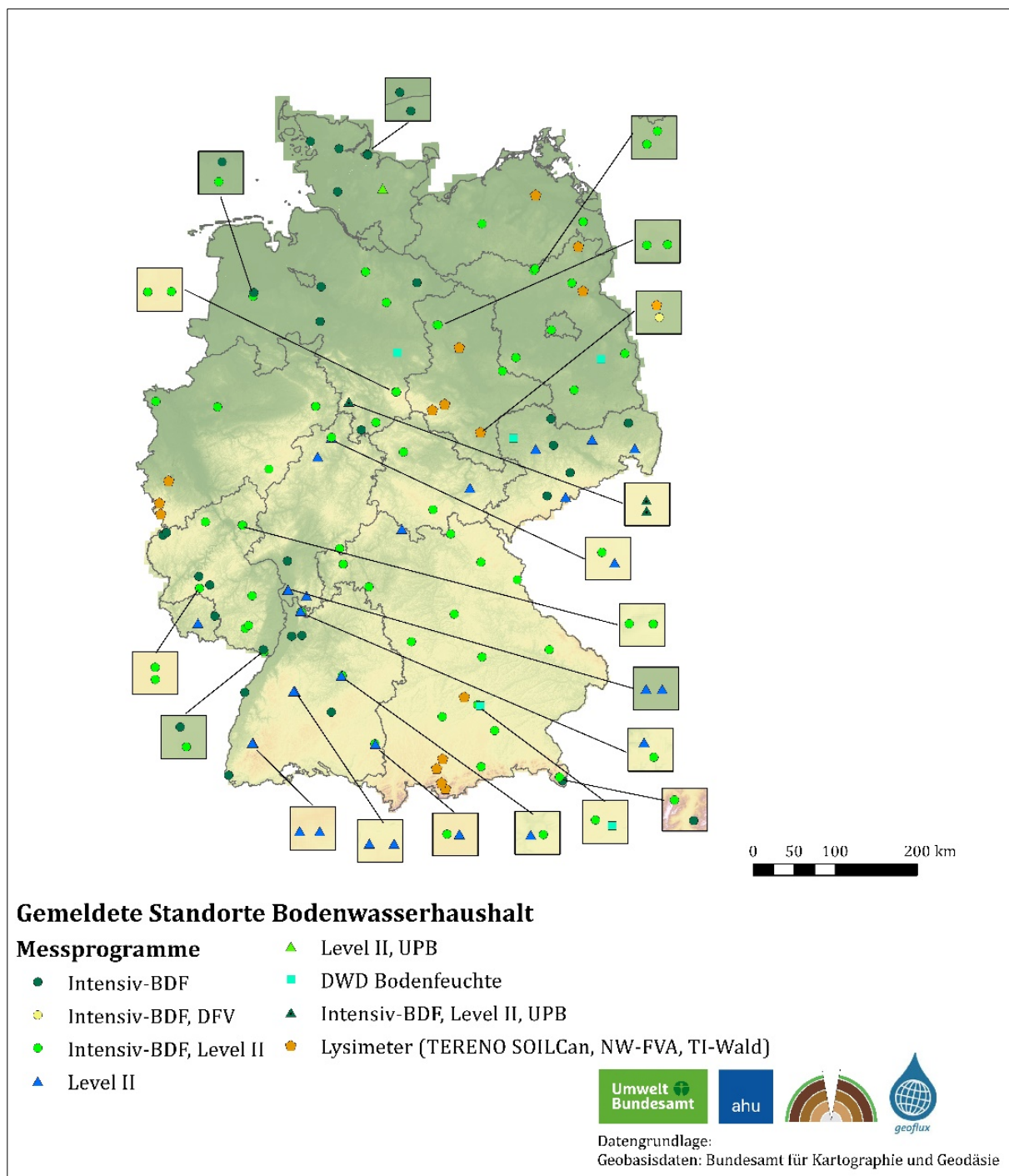


Quelle: ahu, Geoflux, MISB

UPB = Umweltprobenbank, BDF = Bodendauerbeobachtung, DWD Agrarmeteorologie = Stationen des Deutschen Wetterdienstes für Agrarmeteorologische Modellierung, BZE = Bodenzustandserhebung.

Hinweise: Nicht dargestellt sind die Standorte der BZE I Wald (größtenteils deckungsgleich mit den Standorten der BZE II Wald). Die Standorte der BZE Landwirtschaft sind nicht dargestellt, da die Daten der 1. Erhebung 2011-2017 noch nicht verfügbar waren. Von der Gesamtheit der Basis-BDF ist ein Teil explizit für das Thema Bodenwasserhaushalt gemeldet; 45 Flächen des Humusmonitoringprogramms in Nordrhein-Westfalen sind nicht dargestellt.

Abbildung 15: Für die Ermittlung des Bodenwasserhaushalts gemeldete Verbundstandorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung



Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Level II = ICP Forests Level II; BDF = Bodendauerbeobachtung, BDF, DFV = BDF an einem Dauerfeldversuchsstandort, DWD = DWD, UPB = Umweltprobenbank

Anforderungen an Standorte des Extensiv-Monitorings

- Es liegen Daten vor, die eine berechnete oder modellgestützte Ermittlung von mindestens einer der in Tabelle 11 aufgeführten Ziel-Größen des Bodenwasserhaushalts ermöglichen; dies sind insbesondere bodenphysikalische Kennwerte oder meteorologische Eingangsgrößen.

- Die Standorte erfüllen Anforderungen einer Flächenrepräsentativität, z.B. durch ein Raster-Messnetz und/oder eine Repräsentativität für einen definierten Raum.

Diese Anforderungen werden erfüllt von den Stationen der Agrarmeteorologischen Modellierung des Deutschen Wetterdienstes, den Bodenzustandserhebungen (BZE) für Wald und Landwirtschaft, von Basis-Boden-Dauerbeobachtungen (Basis-BDF) und den Untersuchungsstandorten der Umweltprobenbank des Bundes (vgl. Abbildung 14).

In den Bodenzustandserhebungen werden bodenkundliche Kenngrößen an einer Vielzahl von Standorten erhoben und mit Nutzungs- und Bewirtschaftungsdaten verknüpft. Sie liefern daher wichtige Daten für das Klimafolgen-Monitoring, die eine Abgrenzung von Klimafolgen und Bewirtschaftungsfolgen mit Modellen erlauben. Die Anforderung der Flächenrepräsentativität erfüllen sie durch das stichpunktartige Probenahmemuster, deren Standorte sich in einem 8 x 8 km-Raster über Waldflächen in Deutschland verteilen (BZE Wald rund 1.900 Probenahmepunkte, BZE Landwirtschaft rund 3.000 Probenahmepunkte). Ebenfalls gleichmäßig über Deutschland verteilt liegen die über 500 agrarmeteorologischen Messstationen des Deutschen Wetterdienstes. Hierfür hat der Deutsche Wetterdienst Wirkmodelle entwickelt, aus denen Bodenwasserhaushaltsdaten und Bestandsklimainformationen abgerufen werden können. Für ausgewählte Regionen bzw. Bodenlandschaften sind die Basis-BDF der Bundesländer und die Standorte der Umweltprobenbank repräsentativ. Hier liegen bodenphysikalische Kennwerte vor, die in Modellbetrachtungen eingehen können.

Beispiele für die Datennutzung aus der Bodenzustandserhebung

Die Ergebnisse der BZE Wald werden für unterschiedliche Fragestellungen genutzt, u.a. zum Einfluss des Klimawandels auf den Bodenzustand und zur Veränderung der Biodiversität durch Klimawandel und Umwelteinflüsse. Der bodenbezogene Datensatz der BZE Wald beinhaltet eine horizontbezogene Profilansprache und eine tiefenbezogene Beprobung (u.a. Bodenart, Grobbodenanteil, Trockenrohdichte, Humusgehalt). Auf dieser Basis ist die Anwendung unterschiedlicher Pedotransferfunktionen möglich. Im Rahmen der Auswertung der BZE II wurden unterschiedliche Funktionen angewendet und auf Plausibilität überprüft. Zur Modellierung der pF-Kurve hat sich die DIN 4220 (2008-11)⁴ als solide Methode für eine große Spannweite unterschiedlicher Bodenarten erwiesen. Bodenhydrologische Kenngrößen wie die FK, der PWP und die nFK können mit der Gleichung nach Wessolek et al. (2009) abgeschätzt werden. Weitere kapazitive und dynamische Wasserhaushaltsgrößen werden aus Wasserhaushaltsmodellierungen mittels LWF-Brook90⁵ für alle Profile der BZE Wald II abgeleitet. Es beruht auf meteorologischen Eingangsdaten in täglicher Auflösung, Profilaufnahme- und Laboranalysen der BZE II-Standorte und den Ergebnissen der Pedotransferfunktionen. Ein Ergebnis der BZE II ist z.B., dass der Trockenstress in Wäldern zunimmt. Der gebietsweise schlechte Zustand der Baumkronen ist nicht mehr durch erhöhte Schwefel-Gehalte im Boden zu erklären, sondern durch Wassermangel und Insektenbefall, beides Folgen des Klimawandels.

⁴ DIN 4220:2008-11: Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen).

⁵ Prozessorientiertes, forsthydrologisches Modell, entwickelt von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Anforderungen an Kern-Standorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung

- ▶ Die Bodenfeuchte (Bodenwassergehalt und/oder Bodenwasserspannung) wird mit einer mindestens täglichen Messung in mindestens einer Bodentiefe gemessen und/oder die Sickerwassermenge wird kontinuierlich (lückenlos) gemessen (Lysimeter) oder bei Moorstandorten: der Grundwasserstand wird kontinuierlich (lückenlos) gemessen.
- ▶ Die Messreihe am Standort weist eine Zeitreihenlänge von mindestens 10 Jahren auf.
- ▶ Für Standorte mit Bodenfeuchtemessung liegt eine Wasserspannungskurve vor (gemessen oder abgeleitet).
- ▶ Für den Standort liegen für den Messzeitraum Klimadaten vor.

Weitere von Datennutzern je nach Auswertungsziel zu prüfende Kriterien sind z.B. Messtechnik, Analysemethoden, Vorhandensein weiterer Daten wie Bodentemperatur am Standort, Flächennutzung, Bewirtschaftung, Grundwasserstand oder Stoffkonzentrationen im Bodenwasser sowie die Lage in von Klimaänderungen besonders betroffenen Räumen. Die gemeldeten Verbundstandorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung für den Bodenwasserhaushalt sind in Abbildung 15 dargestellt.

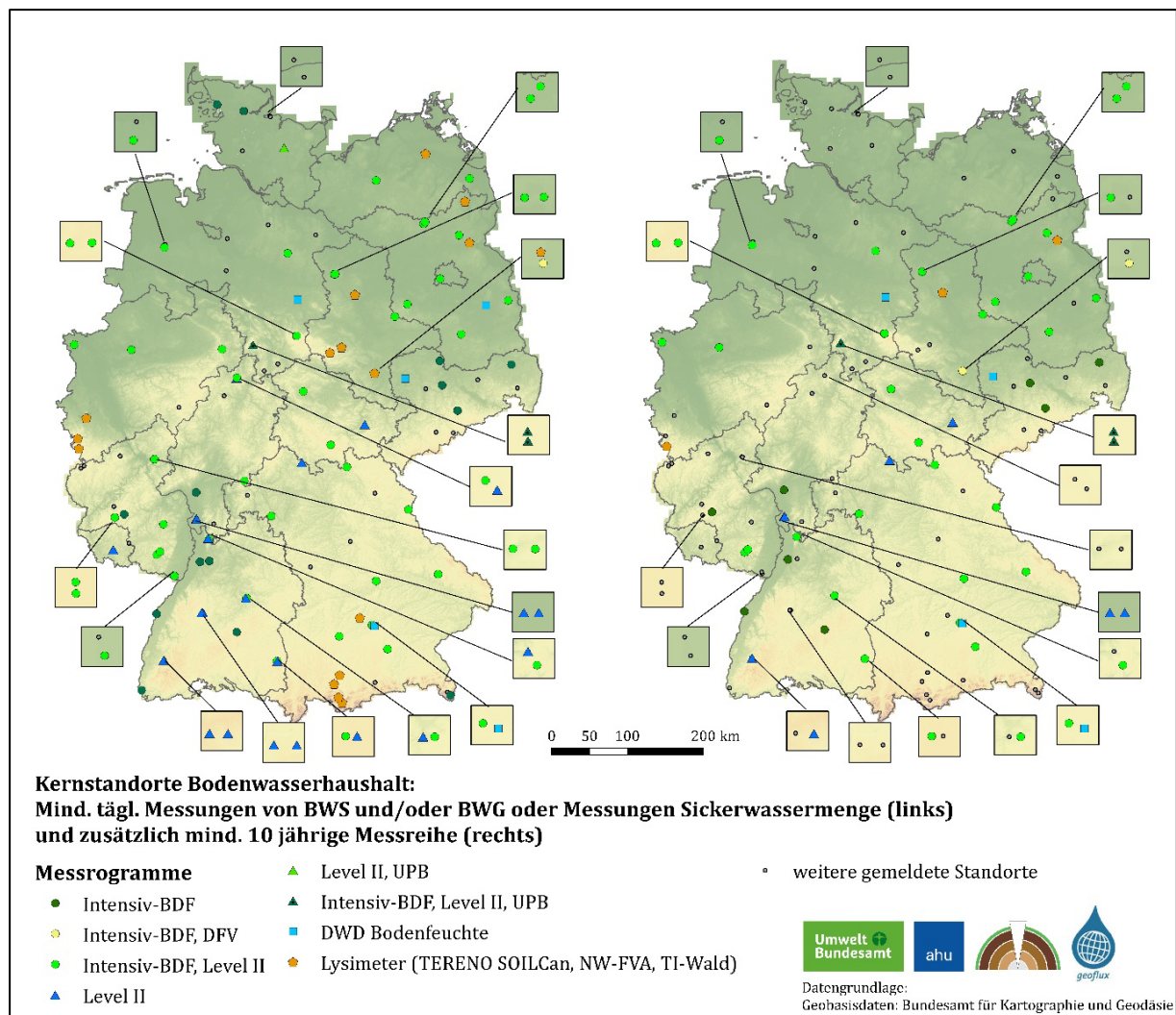
Abbildung 16 zeigt links eine Auswahl von 92 Standorten aus den bis Ende 2018 vorliegenden Meldungen für den Bodenwasserhaushalt. Hier werden die Bodenfeuchte in mindestens einer Bodentiefe mindestens täglich und/oder die Sickerwassermenge kontinuierlich erhoben. Auf der rechten Seite der Abbildung 16 sind die daraus ausgewählten 51 Kernstandorte für den Bodenwasserhaushalt dargestellt. Hier liegen heute bereits Messreihen mit einer Länge von mindestens 10 Jahren vor.

Im Verbund können fortlaufend Standorte als Kernstandort des Intensiv-Monitorings und der Forschung definiert werden, wenn die Zeitreihen eine Länge von 10 Jahren erreichen. Auf der linken Seite der Abbildung 16 sind neben den Kernstandorten die Messflächen dargestellt, die die Messkriterien erfüllen, die Mindestlänge des Messzeitraums jedoch noch nicht erreichen. Diese Standorte sind potentielle Kernstandorte, wenn sich die Methodik auf diesen Flächen nicht verändert und der Betrieb in den nächsten Jahren fortgeführt wird.

Anforderungen an bereitzustellende Standortdaten

Die Standortdaten und Messdaten von Bodeninventuren sind zum Teil bereits bei den Daten erhebenden Institutionen abrufbar (z.B. BZE Wald). Die für den Verbund mindestens erforderlichen Angaben für das Intensiv-Monitoring und Forschungsansätze sind in Tabelle 12 aufgeführt. Mit den Angaben werden individuelle Abfragen der Verbundstandorte nach Kriterien wie Messgröße und Messbeginn möglich, die in der Kartenanwendung auch für Regionen vorgenommen werden können.

Abbildung 16: Aktuelle und künftige Kernstandorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung für die Ermittlung des Bodenwasserhaushalts



Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Level II = ICP Forests Level II; BDF = Bodendauerbeobachtung, BDF, DFV = BDF an einem Dauerfeldversuchsstandort, DWD = DWD, UPB = Umweltprobenbank

Fazit zum Verbund-Thema Bodenwasserhaushalt

Für flächenhafte Modellbetrachtungen liegen Bodeninventuren vor, die flächenrepräsentative Daten für Bodeneigenschaften, z.B. Wasserspeichervermögen, liefern und mit Klimadaten Auswertungen zu Veränderungen des Bodenwasserhaushalts – sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft – ermöglichen (Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft). Basis-Bodendauerbeobachtung und Umweltprobenbank bieten sich weiterhin als Standorte für Modellierungen an, da sie bodenkundlich hinreichend charakterisiert sind. An den Stationen der agrarmeteorologischen Modellierung werden Wirkmodellierungen des Bestandsklimas mit bspw. Bodentemperaturen unter verschiedenen Fruchtarten, Bodenfeuchtemodellierungen u.v.a.m. durchgeführt. Diese berücksichtigen jedoch nicht die standortspezifischen Bodeneigenschaften.

Die gemeldeten Standorte des Intensiv-Monitorings liefern für große Teile Deutschlands kontinuierliche Messdaten für die Bodenfeuchte in unterschiedlichen Bodentiefen, in vielen Regionen zusätzlich auch für Stoffe im Sickerwasser. Diese werden im Rahmen des ICP Forests-Programms und der Bodendauerbeobachtung (z.T. kombiniert mit Umweltprobenbank oder

landwirtschaftlichem Dauerfeldversuch) oder im Rahmen der Agrarmeteorologie des Deutschen Wetterdienstes langfristig betrieben.

Sickerwassermengen werden an forschungsorientierten Lysimeteranlagen überwacht, die ausgewählte Regionen der Bundesrepublik und definierte Bewirtschaftungsbedingungen repräsentieren. Im Verbund gemeldet sind bisher Lysimeter des Forschungsprogramms TERENO, des TI für Waldökosysteme und der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt.

Der überwiegende Anteil der Standorte wird unter forstlicher Nutzung betrieben. Das ist als Vorteil für die Bewertung von Klimafolgen zu sehen, da Forststandorte mit Dauerkulturen gute Langzeitzeiger sind. Sie unterliegen weniger einem wechselnden Anbauspektrum als z.B. Ackerstandorte. Mit einer messtechnisch bedingten Variabilität der Ergebnisse ist dennoch zu rechnen.

Unter den für den Verbund gemeldeten Standorten existieren diverse Überschneidungen von Programmen (52 Standorte sind mehreren Programmen zugeordnet). Beispielsweise kooperieren Bodendauerbeobachtungprogramme mit dem forstlichen Umweltmonitoring und der Umweltprobenbank.

Grundwasserbeeinflusste Standorte und Moorstandorte sind gegenwärtig nicht ausreichend vertreten. Gerade solche als Hotspots besonders von Klimaänderungen betroffenen Standorte sollten neu eingerichtet werden, sofern nicht bereits im Rahmen der Moorforschung oder an Grundwassermessstellen entsprechende Dauerbeobachtungen stattfinden. In Deutschland befassen sich unterschiedliche Projekte mit dem Wasserhaushalt von Moorflächen (z.B. Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen); die Laufzeit überschreitet jedoch nur in Ausnahmefällen 10 Jahre (25 Jahre Moorschutzprogramm Niedersachsen) und der Bodenwasserhaushalt ist oftmals nur ein Nebenaspekt. Der Schwerpunkt liegt beispielsweise auf der Nutzung und Renaturierung, der organischen Substanz und dem Austritt klimarelevanter Gase in Mooren. Für Moore sollten ausgewählte Standorte in den Verbund aufgenommen werden, die langfristig ohne den Einfluss von Entwässerungsmaßnahmen bestehen. Als wesentliche Messgröße ist hier der Wasserstand in den Mooren anzusehen.

In Norddeutschland (Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein) sind die Messreihen der Bodenfeuchte an den gemeldeten Standorten derzeit noch zu kurz für Trendbetrachtungen. Sobald diese Standorte eine Zeitreihenlänge von 10 Jahren erreichen, können diese als Kernstandorte im Verbund gekennzeichnet werden.

Landwirtschaftlich genutzte Messstandorte sind in vielen Regionen nicht ausreichend vorhanden. Auch hier sind Standorte neu einzurichten. Vorab sollte geprüft werden, inwieweit landwirtschaftliche Dauerversuche Lücken schließen können (Anfrage BonaRes-Datenzentrum ist erfolgt).

An den Verbundstandorten liegen Klimadaten vor oder lassen sich aus Modellen des Deutschen Wetterdienstes ableiten, so dass diese mit den gemessenen Bodenwasserhaushaltsgrößen in Beziehung gesetzt werden können. Wirkungsanalysen für Ökosystem- und Nutzungsfunktionen von Böden sind an vielen Standorten anhand von Größen wie z.B. Baumvitalität oder landwirtschaftliche Erträge möglich.

Die fachliche Grundlage für ein Austauschformat für Standortdaten des Intensiv-Monitorings und der Forschung liegt vor mit Angaben zu den Standorten selbst sowie zu Messtechnik, Messunsicherheiten und analytischer Qualitätssicherung (siehe Tabelle 12). Wenn modellgestützt erhobene Größen an den Standorten mit angegeben werden sollen, sind diese als solche zu kennzeichnen, um Angaben zum verwendeten Modell zu ergänzen (z.B. unter „abgeleitete Größen“). Klärungsbedarf besteht hinsichtlich der Angaben zu Nutzung und Bewirtschaftung der einzelnen Standorte. Hier bestehen ggf. besondere Anforderungen an den Datenschutz.

Für Langzeitmessungen von Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts ist ein Methoden-Code wünschenswert (im Rahmen der HFA- und BDF-Methoden-Codes bisher nicht enthalten, vgl. Schilli et al. 2011 und GAFA 2014).

Tabelle 12: Standortdaten für Bodenwasserhaushalt

Standortdaten	Angaben zu Messgrößen und Messkonzept (je Standort)
- ID - Name des Standortes - Plot-Nummer, z.B. Level II - Bundesland - Rechtswert, Hochwert, Bezugssystem - Betreiber-Institution und Ansprechpartner/-in (Abk., Name, E-Mail, Telefon) - Messprogramm(e) - Art des Standorts (für BDF: Basis/Intensiv) - Meldung im Verbund (Jahr) - Meldung für Verbund-Themen (BWH, Erosion, Org. Bodensubstanz, Bodenbiologie, Bodentemperatur) - Standort wird betrieben seit (Jahr) - Bemerkungen zum Standort - Ausgangsgestein nach KA 5 - Bodentyp nach KA 5 - Bodenart nach KA 5 - Nutzung nach KA 5 - Bewuchs - Bewirtschaftung Land- und Forstwirtschaft (z.B. Ackerbau, konventionelle Anbauweise, intensiv; geschlossenes Fichtenbaumholz) - Nutzungswechsel in der Vergangenheit - messtechnisch relevante Besonderheiten des Bodenwasserhaushalts (z.B. zeitweise überflutet, hoher Skelettgehalt, Bezug zu Wassereinzugsgebiet mit Messwehr) - bodenwasserrelevante Begleitparameter und abgeleitete Größen (z.B. Bodenwasserhaushalts-simulationen (Tageswerte), Trockenrohdichte, Korngrößenverteilung, Porengrößenverteilung, Niederschlags- und Depositionsmessung, Wasserspannungskurve) - bodenwasserrelevante Wirk-Größen (z.B. Ertrag)	- Messgröße* - Messprinzip - In situ (ja/nein) - Messgerät - qualitätsrelevante Eigenschaften des Messgeräts (z.B. nicht selbstnachfüllendes Tensiometer) - Genauigkeit (Präzision) des Messgeräts - Anzahl Parallelen - Messtiefe(n) - Dimension Messgröße - Messhäufigkeit - Messbeginn der Messgröße (Datum oder Jahr) - chemische Analysen: Stoff(e) mit Angaben zu Bestimmungsmethoden - Bemerkungen zur Messgröße

*Messgröße = Zielmessgröße wie Bodenfeuchte und Sickerwassermenge (liegen vor) und Wirk-Messgröße z.B. Baumvitalität und Ernteertrag (noch nicht definiert), dokumentierte Einflussfaktoren gehen aus den Standortdaten hervor (vgl. Tabelle 11).

8.2.6 Verbund-Thema Erosion

Aktuelle Standortsituation

Aus den Ergebnissen der Untersuchung der Messnetze und den Standortabfragen lässt sich für das Thema Bodenerosion feststellen, dass trotz der immensen Folgen des Klimawandels auf den Bodenprozess der Erosion ein regelmäßiges Monitoring einschließlich einer Erosionsschadenskartierung nur in wenigen Bundesländern betrieben wird. Bundesweite Aussagen zur

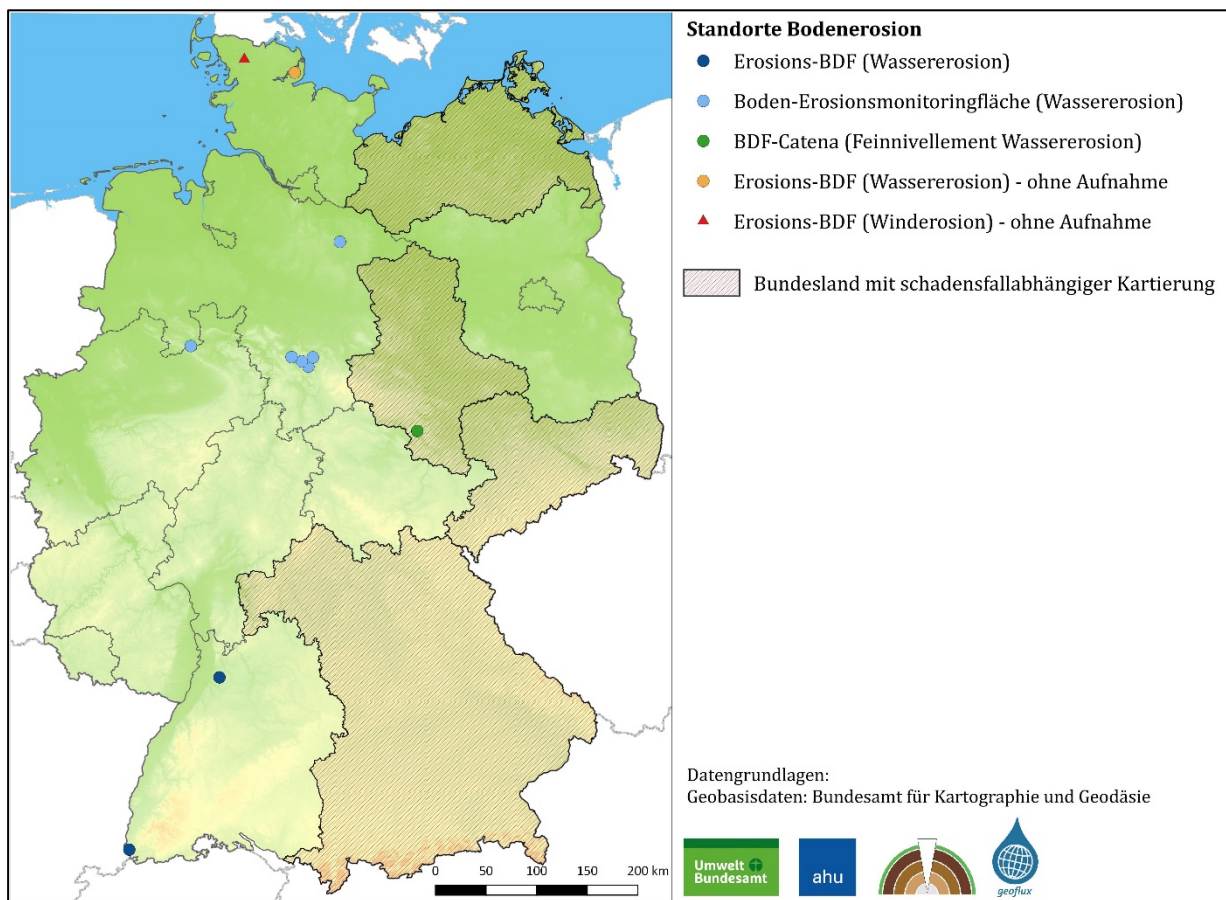
Bodenerosion sind demzufolge gegenwärtig anhand der bekannten Erosionsmessflächen und Schadensfallkartierungen nicht möglich.

Dennoch lässt sich feststellen, dass das Bodenerosionsmonitoring, welches auf vorhandenen BDF in einzelnen Bundesländern durchgeführt wird, weiterhin das einzige länderübergreifende Messnetz zur langfristigen Erfassung der Bodenerosion in Deutschland ist. Vorgehensweise und Intensität sind dabei nicht einheitlich. Erfasst werden Mess-, Kartierungs- und Bewirtschaftungsdaten, die Rückschlüsse auf die Erosionsprozesse ermöglichen. Der Fokus liegt dabei auf der Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Aus den Standortabfragen ergibt sich mit Stand September 2018 für die Bundesländer folgendes Bild (vgl. Abbildung 17):

- ▶ **Baden-Württemberg:** Es werden 2 Intensiv-BDF im Rahmen des Erosionsmonitorings (Wassererosion) ereignisbezogen betrieben.
- ▶ **Niedersachsen:** Es erfolgt ein Monitoring in 6 Referenzgebieten zur Erfassung des ganzjährigen, ereignisbezogenen Erosionsgeschehens durch Wasser und der erosionssteuernden Faktoren zum Ende der Frostperiode und nach intensiven Niederschlagsereignissen. Hierbei handelt es sich nicht um Flächen und Untersuchungen im Rahmen des BDF-Programmes.
- ▶ **Sachsen-Anhalt:** An 2 auf einer Catena befindlichen BDF wird im 10-Jahresrhythmus ein Feinnivellement zur Dokumentation des Bodenabtrags und -auftrags durchgeführt. Die klassische Erfassung von Erosionserscheinungen erfolgt nicht. Zusätzlich erfolgt durch die Unteren Behörden für Bodenschutz und Altlasten eine schadensfallabhängige Kartierung.
- ▶ **Schleswig-Holstein:** Ein spezielles Monitoring der Bodenerosion durch Wind und Wasser besteht seit dem Ende des Monitorings durch den Kooperationspartner des LLUR nicht (mehr). An einer BDF werden erosionsbegleitende Kennwerte für die Winderosion, an einer zweiten BDF für die Wassererosion erfasst. Eine kontinuierliche Fortführung der Messungen ist erstrebenswert.
- ▶ **Mecklenburg-Vorpommern:** Seit dem Jahr 2011 wird ein landesweites Erosionsereigniskataster geführt. Es erfolgt eine schadensabhängige Kartierung und eine qualitativ-quantitative Erfassung von Wasser- und Winderosionsereignissen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein regelmäßiges Monitoring an eingerichteten Standorten wird nicht vorgenommen.
- ▶ **Bayern:** Es erfolgt eine schadensfallabhängige Kartierung von Erosionsereignissen, z.T. unterstützt durch aktuelle Luftaufnahmen.
- ▶ **Sachsen:** In Sachsen erfolgt durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfULG) ein unregelmäßiges, schadensfallbezogenes Monitoring auf Flächen mit Erosionsschäden.

Abbildung 17: Mögliche Verbundstandorte zur Erfassung von Bodenerosion



Quelle: ahu, Geoflux, MISB

Stationen für den Verbund – Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Bei der Erosion durch Wasser und Wind ist hinsichtlich der Standortauswahl für den Verbund aufgrund der deutlich geringeren Stationsdichte grundsätzlich ein anderer Weg zu wählen als beim Bodenwasserhaushalt. Es wird vorgeschlagen, zunächst alle gemeldeten Standorte (Abbildung 17) in den Verbund aufzunehmen und nicht nach Verbund- und Kernstandorten zu differenzieren. Dabei sollten Informationen über alle Mess- und Begleitgrößen erfasst werden. Neu eingerichtete Messstandorte können in den Verbund aufgenommen werden.

Durch die Koordinierungsstelle und die Verbundmitglieder muss das Ziel formuliert werden, das Messnetz vor dem Hintergrund klimasensitiver Räume und erosionsgefährdeter Gebiete deutlich zu verdichten und auch für Erosionsstandorte ein Datenschema für den Austausch von Standortdaten zu definieren. Der Minstdatensatz ist in Tabelle 13 aufgeführt. Bei den Angaben zu Nutzung und Bewirtschaftung der einzelnen Standorte können besondere Anforderungen an den Datenschutz bestehen.

Tabelle 13: Standortdaten für Bodenerosion

Standortdaten	Ergänzende Angaben zu Messgrößen und Messkonzept (je Standort)
- ID - Name des Standortes - Plot-Nummer - Bundesland - Rechtswert, Hochwert, Bezugssystem - Betreiber-Institution und Ansprechpartner/-in (Abk., Name, E-Mail, Telefon) - Messprogramm(e) - Art der Erosionsaufnahme (z.B. BDF, Messfläche, Beobachtungsgebiet) - Standort wird betrieben seit (Jahr) - Bemerkungen zum Standort - Bodeneigenschaften - mittlere Klimaeigenschaften mit Bezugsperiode (Niederschlagsmenge, Windgeschwindigkeit) - Reliefeigenschaften (Hangneigung) - Nutzung	- Bewirtschaftung Landwirtschaft (Art, Fruchtart, Stadien der Pflanzenentwicklung) - Klimaparameter (z.B. Niederschlag, Temperatur) mit Messintervallen - erfasste Begleitgrößen mit Bezug Erosion (z.B. Abtrags- und Akkumulationserscheinungen, Off-Site-Schäden) - Messgrößen (Erosionsformen, Menge von Bodenauftrag und Bodenabtrag, Menge Oberflächenabfluss) - Messhäufigkeit, -intervall - Messbeginn der Messgröße (Datum oder Jahr)

Von zukünftig zunehmender Bedeutung könnten schadensfallabhängige Kartierungen in den Bundesländern zur Erfassung von Erosionsereignissen in Erosionskatastern sein, wie sie konzeptionell bereits in Mecklenburg-Vorpommern, Bayern, Sachsen und Sachsen-Anhalt durchgeführt werden. Vor dem Hintergrund einer möglichen klimabedingten Zunahme extremer Niederschlagsereignisse sind Schadenskartierungen zu Häufigkeit und räumlicher Verteilung von Erosionsereignissen ein wichtiges Hilfsmittel, um Messnetze und Messstandorte hinsichtlich ihrer Lage in vulnerablen Regionen Deutschlands zu priorisieren. Es wird in diesem Zusammenhang vorgeschlagen, nach Einrichtung des Verbunds die Möglichkeit der Einbindung schadensfallabhängiger Kartierungen zu prüfen, die nicht an fest definierte Standorte gebunden sind. Derzeit reicht die räumliche Dichte erfasster Schadereignisse nicht aus, um Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Erosion zu beschreiben.

Die Modellierung der Bodenerosion und zunehmend die Auswertung von Fernerkundungsdaten sind Methoden, die für die Abschätzung der Bodenerosion genutzt werden. Die Erosionsmessflächen und –beobachtungsgebiete können zur Verifizierung von Erosionsmodellen genutzt werden.

8.3 Empfehlungen zur Umsetzung des Verbunds

Für den Aufbau und die Umsetzung des Verbunds liegt in Tabelle 14 eine Aufstellung der notwendigen Arbeitsschritte mit Zeitplan bis 2024 vor. Nach Gründung des Verbunds ist eine Erweiterung möglich, da er als offenes System für Kenngrößen und Standorte fungiert. Schritt für Schritt können weitere Informations- und Messebenen angeknüpft werden. Ein schrittweiser Ansatz wird der Situation, dass Messdaten für unterschiedliche Bodennutzungen und Themen aus verschiedenen Institutionen, Ressorts und Messebenen zusammenzubringen sind und dort begrenzte Kapazitäten vorhanden sind, am ehesten gerecht. Im Umsetzungsprozess ist sicherzustellen, dass Parallelaktivitäten vermieden werden (z.B. Kartenanwendungen von Verbund und BonaRes), sondern vielmehr Kooperationen gesucht werden, die sich sinnvoll ergänzen.

Tabelle 14: Schritte und Zeitplan für den Aufbau des Verbunds

Vorbereitungsphase	
18.10.2018	Meilenstein „Fachgespräch im F+E-Vorhaben Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“, FKZ 3716 48 203 0
5./6.6.2019	Vorstellung des Konzepts in der Sitzung des LABO-Fachausschusses Vorsorgender Bodenschutz BOVA
Q3 2019 – Q4 2020	Weiterentwicklung der Konzeption: Erweiterung für die Themen organische Substanz und Bodenbiologie (UBA F+E)
Q1 2021	Einrichtung Koordinierungsstelle und Gründung der Steuerungsgruppe (BMU/UBA)
Q3 2021	Vorlage Meilensteinplan für Verbundgründung und Abstimmungstermin (UBA, Steuerungsgruppe)
Q2 2021 – Q3 2021	Anlaufprojekt / Masterarbeit: Exemplarische Datenauswertungen aus dem Verbund (BWH/Klimafolgen) zur Vorbereitung einer ersten Beispiel-Klimafolgen-Messstation (UBA, NN)
Q1 2021 – Q3 2021	Erarbeitung des Verbund-Manuals mit fachlichen Qualitätsstandards für die Datenerhebung (UBA, Steuerungsgruppe)
Q1 2021 – Q4 2021	Definition des Datenaustauschprozesses, Erarbeitung des technischen Austauschformats für Standortdaten und des technischen Konzepts für die Kartenanwendung (UBA)
30.09.2021	Meilenstein „Fachliche und technische Standards liegen vor“
Q2 2021 – Q4 2021	Aufbau Internetseite und Kartenanwendung anhand der Standortmeldungen von 2018 und der Ergebnisse von Anlaufprojekt / Masterarbeit (UBA)
Q4 2021 – Q1 2022	Testphase Kartenanwendung (UBA)
Q4 2021 – Q2 2022	Vorbereitung und Abstimmung der erforderlichen Vereinbarungen: - Kooperationsvereinbarung zur Teilnahme am Verbund - Muster-Vereinbarung für die Nutzung von Messdaten, sofern erforderlich (Nutzungsvereinbarung) (UBA, Steuerungsgruppe)
Q2 2022	Unterzeichnung der Kooperationsvereinbarungen im Rahmen einer Festveranstaltung und Präsentation einer Beispiel-Klimafolgen-Messstation (BMU, Koordinierungsstelle, Verbundmitglieder)
01.07.2022	Meilenstein „Start des Verbunds“
Erstes Betriebsjahr	
Q3 2022 – Q2 2023	Koordinierung, Öffentlichkeitsarbeit zur Förderung der Datennutzung (Koordinierungsstelle)
Q3 2022 – Q2 2023	Weiterentwicklung der Konzeption, weitere Anlauf-Projekte (UBA (F+E))

Zweites Betriebsjahr	
Q3 2023 (dann jährlich)	Datenaustausch zwischen Daten erhebenden Stellen und Koordinierungsstelle: - neue oder aktualisierte Standortdaten (Erheber-Geodatensätze) - eingegangene Messdaten-Anfragen von Datennutzern (Koordinierungsstelle, Verbundmitglieder)
Q3 2023 – Q2 2024	Koordinierung, Öffentlichkeitsarbeit zur Förderung der Datennutzung, Evaluation (Koordinierungsstelle)
Q3 2023 – Q2 2024	Vorschlag und Vorbereitung weiterer Beispiel-Klimafolgen-Messstationen mit Anfrage exemplarischer Messergebnisse für die Öffentlichkeitsarbeit (Koordinierungsstelle, Verbundmitglieder)

Für die Umsetzung des Verbunds werden weiterhin folgende Maßnahmen empfohlen:

- ▶ UMK-Beschlüsse zur Gründung und zum Betrieb des Verbunds, zum Betrieb der Koordinierungsstelle und Auftrag an die Daten erhebenden Stellen, die Messung der Verbund-Kenngrößen langfristig fortzuführen,
- ▶ Ergänzung der Bund-/Länder-Verwaltungsvereinbarung zum Datenaustausch um Standortdaten des Verbunds (sofern erforderlich),
- ▶ Finanzierung der Koordinierungsstelle (geschätzter Aufwand: mind. eine Vollzeitstelle mit Assistenz),
- ▶ Finanzierung für Anlauf- und Begleitprojekte (geschätzter Aufwand: ca. 100-250 TE pro Jahr in den ersten 5 Jahren, danach ca. 75 TE pro Jahr), z.B.
 - technische und organisatorische Ausgestaltung des Datenaustauschprozesses,
 - Aufbau Kartenanwendung,
 - Harmonisierung von Standortdaten der Verbundstandorte,
 - Harmonisierung von Messdaten für ausgewählte Projekte und Unterstützung von Datenaufbereitungen,
 - Maßnahmen für die Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzung (z.B. Kampagnen, Veranstaltungen),
 - Definition von Standards für die Datenerhebung in einem Manual (aufbauend auf Bestehendem),
- ▶ Durchführung von Forschungsvorhaben, die die Auswertung von Daten der Verbundstandorte zum Gegenstand haben und sich mit der bundesweiten Erfassung, Überwachung und Dokumentation des Bodenzustands in Deutschland sowie der aus dem Klimawandel resultierenden Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenqualität befassen,
- ▶ Durchführung von Forschungsvorhaben zur fachlichen Weiterentwicklung des Verbund-Konzepts (z.B. zur Einbindung schadensfallabhängiger Kartierungen von Erosion) und zur Weiterentwicklung von Werkzeugen zur Methodendokumentation,

- ▶ Schaffung von personellen Kapazitäten für Mitglieder der Steuerungsgruppe (geschätzter Aufwand: Fachliche Bearbeitung von Verbundaufgaben (je nach Aufgabe abschätzbar) und zwei Termine pro Jahr),
- ▶ Schaffung von personellen Kapazitäten bei den Daten erhebenden Stellen für Anfragenbearbeitung und Austausch mit Koordinierungsstelle sowie Teilnahme an Veranstaltungen (Aufwand ist abhängig vom Austausch-Turnus und der Anzahl von Nutzeranfragen).

Im Rahmen des Verbundbetriebs ist es ggf. erforderlich, bestehende Messaktivitäten an einzelnen Stellen an Qualitätsstandards des Verbunds anzupassen. Der Verbund verfolgt jedoch nicht das Ziel einer breiten und aufwändigen Anpassung von etablierten Methoden in Langfrist-Programmen.

Darüber hinaus sind neue Messaktivitäten auf Ebene des Intensiv-Monitoring und der Forschung bzgl. Bodenerosion und Bodenwasserhaushalt auf landwirtschaftlich genutzten Böden und an grundwasserbeeinflussten Standorten einzurichten, sofern bestehende, bisher nicht für eine Teilnahme am Verbund gemeldete Messstandorte die Lücken nicht schließen. Für diese Aufgaben sind die Zuständigkeiten und Finanzierungsfragen zu klären.

Für den Austausch von Standortdaten, aber auch von Messdaten zwischen den Daten erhebenden Stellen und Nutzern sind nach Möglichkeit bestehende Dateninfrastrukturen zu nutzen. Hinsichtlich Standards für Daten und Metadaten sowie für Untersuchungskonzepte und -methoden kann auf bestehenden Standards aufgebaut werden (z.B. ICP Forests Manuale, TERENO- und BonaRes-Standards, Barth et al. 2000 für BDF, DOI-Nummer für Forschungsdaten).

Für die Prüfung von Messdaten sind vorliegende Vergleichbarkeitsstudien zu berücksichtigen (z.B. Höhle et al. 2018; GAFA 2014, Schilli et al. 2011).

9 Fazit und Ausblick

Das vorgelegte Konzept für den Start eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds schafft die Grundlage für die Umsetzung der von der Bundesregierung im Aktionsplan Anpassung (APA) 2008 als vordringlich formulierten Maßnahme: „Den Erhalt, die Weiterentwicklung, die Vernetzung und Anpassung der Instrumente des Bodenmonitoring und der Erhebung des Bodenzustands, um Daten zu langfristigen Prozessen im Boden und zu möglichen Veränderungen des Bodenzustands bereitzustellen“. Durch das Bündeln von Messstandorten verschiedener Untersuchungsprogramme in einem Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund werden Informationen zum Bodenzustand und dessen Veränderung deutschlandweit leichter zugänglich. Das unterstützt die Beobachtung von Auswirkungen des Klimawandels und die Konzeption nötiger Anpassungsmaßnahmen. Messdaten bleiben dabei in der Hand der Daten erhebenden Stellen. Das Konzept für den Messnetzverbund baut auf Vorarbeiten von BMU/UBA der letzten 10 Jahre und der Bereitschaft für eine Teilnahme am Verbund von einer Vielzahl von Institutionen und Personen aus Verwaltung und Forschung in den Fachbereichen Umwelt, Land- und Forstwirtschaft auf.

Der Fokus des Verbunds liegt auf den Themen Bodenwasserhaushalt, organische Substanz, Bodenbiologie und Bodenerosion. Bei diesen Themen sind Veränderungen am ehesten zu erwarten bzw. werden derzeit diskutiert. Das Konzept für den Start des Messnetzverbunds befasst sich zunächst mit den Themen Bodenwasserhaushalt und Bodenerosion. Es umfasst sowohl Fachanforderungen als auch Handlungsempfehlungen für die Koordinierung und die Datenhaltung in der ersten Betriebsphase von 2021 bis 2024 sowie für die Vorbereitung ab 2019. Insgesamt haben bisher zehn Messprogramme bzw. -aktivitäten ihre Bereitschaft bekundet, am Verbund teilzunehmen. Fast 5.900 bodenbezogene Standorte wurden in diesem Zusammenhang gemeldet. Das Umsetzungskonzept sieht vor, dass der Verbund offen für die Aufnahme weiterer Standorte ist. Interesse an zwei weiteren Programmen wurde in diesem Zusammenhang bereits bekundet.

Wie für alle langfristig angelegten Bodenmessprogramme gelten auch im Verbund Anforderungen an die Berücksichtigung der standörtlichen Heterogenität und der messtechnisch bedingten Ungenauigkeiten. Für überregionale Fragestellungen ist die Vergleichbarkeit der gemessenen Bodendaten im Hinblick auf die eingesetzten Probenentnahme- und Untersuchungsmethoden (Berücksichtigung Probenentnahmefehler, Laborfehler, Methodenwechsel) von entscheidender Bedeutung. Diese ist sicherzustellen, wenn Standorte und absolute Änderungen miteinander verglichen werden sollen. Dies ist im Konzept durch klare Anforderungen an die Untersuchungsstandorte, Methoden und an die Dokumentation sichergestellt (definierte Standortdaten).

Das Konzept sieht vor, dass auf einer öffentlichen Internetseite künftig Standortdaten mit Angaben zu Messgrößen und Methoden von interessierten Nutzern abgerufen und recherchiert werden können. Die Anfrage der konkreten Messdaten obliegt dem Nutzer. Eine Steuerungsgruppe übernimmt die Pflege, Weiterentwicklung und die Formulierung von Standards für den Verbund. Die Koordinierungsstelle betreibt die Internetseite mit einer Kartenanwendung und übernimmt Aufgaben der Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzung. Auch stellt die Koordinierungsstelle den Verbundmitgliedern in Abstimmung mit der Steuerungsgruppe formale und fachliche Instrumente zur Verfügung (z.B. Kooperationsvereinbarung, Nutzungsvereinbarung für Daten, Verbund-Manual mit abgestimmten Standards für Messung und Erhebung sowie den Austausch von Standortdaten) und bringt Vorschläge für die Weiterentwicklung und den fachlichen Ausbau des Verbunds in die Steuerungsgruppe ein. Die Betreiber von Messungen und Erhebungen sind gefordert, diese an den Verbundstandorten langfristig fortzuführen, ggf. weitere Messstandorte einzurichten oder bestehende je nach Thema methodisch anzupassen. Weiterhin stellen die Betreiber auf Anfrage Messdaten für Auswertungen in Wissenschaft und Verwaltung zur Verfügung und nehmen am Austausch von Standortdaten teil.

Während der Startphase des Messnetzverbunds sind Anlauf- und Begleitprojekte erforderlich, die den Datenaustauschprozess und die Kartenanwendung vorbereiten, Aufbereitungen und Harmonisierungen von Messdaten bei den Betreibern unterstützen, Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzungsveranstaltungen umsetzen und für fachliche Weiterentwicklung sorgen.

Der Betrieb des Messnetzverbunds bedarf eines Mandats für die beteiligten Stellen und Gremien sowie der langfristigen Bereitstellung finanzieller Mittel für Koordination und Steuerung des Verbunds. Um den im Konzept angelegten inhaltlich umfassenden Ansatz in die Praxis zu bringen, sind ressortübergreifende Abstimmungsprozesse notwendig. Erforderlich ist ein von Verwaltung und Forschung in den betroffenen Ressorts (Umwelt, Land- und Forstwirtschaft) getragener Prozess, der ausreichende Kapazitäten für die Koordinierung, die Datenintegration und Datenbereitstellung schafft.

Bodenwasserhaushalt

Für das Thema Bodenwasserhaushalt liefern verschiedene Programme Messdaten oder Modelleingangsdaten. Standorte mit Modelleingangsdaten sind flächenrepräsentativ über das gesamte Bundesgebiet und die klimavulnerablen Regionen verteilt (Indikator Sickerwasserrate nach Adelphi et al. 2015). Wirkmodellierungen der Bodenfeuchte liegen für die landwirtschaftlichen Nutzflächen vor. Standorte mit Messungen relevanter Größen – dies sind im Wesentlichen Bodenfeuchte- und Sickerwassermessflächen sowie Lysimeteranlagen – decken Deutschland je nach Nutzung und Sensitivität in unterschiedlichem Maß ab.

Die Untersuchungskonzepte und die Messtechnik für die Größen Bodenfeuchte, Sickerwassermenge und Bodenlösungsschemie der bestehenden Messstandorte sind prinzipiell vergleichbar. Erforderliche Daten zu Bodenphysik und Klima liegen i.d.R. vor. Einschränkungen der Vergleichbarkeit ergeben sich aus der Standortcharakteristik und der realen Bewirtschaftung; teilweise auch aus unterschiedlichen Messtiefen. Die Kontinuität des Parameterumfangs und der eingesetzten Untersuchungsverfahren ist gewährleistet. Eine Anpassung der Messtermine und der Messhäufigkeit an den Standorten ist nicht notwendig. Eine Vereinheitlichung der Messtiefen an bestehenden Untersuchungsstandorten ist nicht zielführend; hier sollte jeweils standortbezogen anhand der Profilbeschreibung auf Vergleichbarkeit geprüft werden. Ergebnisse von Bodenfeuchtemessungen sind messtechnisch bedingt mit Unsicherheiten behaftet. Grundsätzlich besteht hier ein besonderer Anspruch an die Plausibilitätsprüfung, insbesondere unmittelbar nach dem Einbau oder Ersatz von Sensoren.

Die gemeldeten Messstandorte aus Intensiv-Monitoring und Forschung repräsentieren vorrangig forstliche Landnutzung und nur in untergeordnetem Maß Ackerbau und Grünland. Als Kernstandorte eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds wurden 51 Standorte identifiziert, die seit mindestens 10 Jahren Messdaten für Bodenfeuchte und/oder Sickerwassermengen liefern. Die Anzahl von Kernstandorten, die für die bundesweite Beobachtung von klimabedingten Veränderungen des Bodenwasserhaushalts in Frage kommen, ist für landwirtschaftliche Nutzungen und Hotspots (Feuchtstandorte) nicht ausreichend. Hier sind zusätzliche Messstandorte erforderlich, sofern nicht andere Programme wie Dauerfeldversuche, Grundwasserstands- und Moorüberwachung Alternativen darstellen. Konstante Bewirtschaftungsbedingungen bzw. zumindest lückenlos dokumentierte Bewirtschaftungsdaten sind im landwirtschaftlichen Bereich von Vorteil bzw. notwendig.

Bodenerosion

Trotz der zu erwartenden Folgen des Klimawandels für die Bodenerosion ist nur in zwei Bundesländern ein Messnetz zur langfristigen Erfassung der Bodenerosion vorhanden. Ein bundesweiter Horizontalvergleich ist derzeit nicht möglich. Das bestehende Messnetz sollte verdichtet werden. Kontinuierliche, standardisierte Messungen sind zu definieren. Von zunehmender Bedeutung könnten schadensfallabhängige Kartierungen zur Erfassung von Erosionsereignissen sein. Vor dem Hintergrund einer möglichen klimabedingten Zunahme extremer Niederschlagsereignisse sind Schadenskartierungen zu Häufigkeit und räumlicher Verteilung von Erosionsereignissen ein wichtiges Hilfsmittel, um Messnetze und -standorte hinsichtlich ihrer Lage in vulnerablen Regionen Deutschlands zu priorisieren.

Die Umsetzung des Konzepts und der dauerhafte Betrieb eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds tragen zu einer vermehrten Nutzung und damit zu einer besseren Wertschöpfung des Bodenmonitorings und der Bodenzustandserhebungen in Deutschland bei. Darüber hinaus werden die Beobachtung und Erforschung von Klimawandelfolgen durch flächendeckende Mess- und Erhebungsdaten erleichtert und langfristig verbessert. Mit dem Einsatz aktueller technischer Werkzeuge kann der große Fortschritt einer öffentlich transparenten Darstellung von Mess- und Erhebungsaktivitäten in Verwaltung und Forschung erreicht werden, ohne die Messdaten selbst öffentlich freizugeben. Wenn die Verbundmitglieder langfristig auch ausgewählte Messdaten öffentlich zur Verfügung stellen möchten, lassen sich technische Lösungen dafür anbinden. Selbstverständlich ergeben sich durch den Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund auch Synergien für andere Fragestellungen hinsichtlich der Veränderung des Bodenzustands, beispielsweise aufgrund von Bewirtschaftung.

Prinzipiell empfiehlt sich die Anknüpfung des Messnetzverbunds an verwandte Aktivitäten anderer Akteure. Zu nennen ist hier z.B. das BonaRes-Datenzentrum, das Daten aus der Bodenforschung, insbesondere der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche, zusammenfasst und diese für die allgemeine Nutzung zur Verfügung stellt. Weiterhin spielt die Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Allianz der Wissenschaftsorganisationen eine Rolle, die das Ziel verfolgt, ein Vernetzungskonzept zu entwerfen, das in Umsetzungsvorschläge zur Stärkung der terrestrischen Langzeitforschung in Deutschland einfließen soll. Sinnvoll wäre es weiterhin, den Nutzen der Monitoring- und Erhebungsstandorte zur Validierung oder Kalibrierung von Fernerkundungsdaten zu prüfen, da diese insbesondere für Bodenfeuchte zunehmend Anwendung finden (z.B. Satellitenmessungen mit Mikrowellen). Der DWD-Standort Lindenberg sowie die TERENO-Messstellen des Forschungszentrums Jülich sind beispielsweise in das International Soil Moisture network (ISMN) eingebunden, das Bodenfeuchte-Zeitreihen zu diesem Zweck online bereitstellt.

Die Integration von Daten und Messergebnissen aus Monitoring und Erhebung in Forschungsaktivitäten sollte selbstverständlich sein. Dazu gehört auch, dass thematisch relevante Ausschreibungen von Forschungsprojekten (BMU, BMEL, BMBF, DFG) auf bestehende Messstandorte und laufende Beobachtungsprogramme hinweisen und diese nach Möglichkeit einbeziehen.

Die vorgelegten Forschungsergebnisse wurden im Juni 2019 im Ständigen Ausschuss „Vorsorgender Bodenschutz“ der Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO-BOVA) vorgestellt. Der BOVA hält die Einrichtung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für sinnvoll.

Zu empfehlen ist die Vorbereitung eines UMK-Beschlusses für Gründung und Betrieb des Messnetzverbunds mit einem Auftrag an die Daten erhebenden Stellen, die Messung der Verbund-Kenngrößen langfristig fortzuführen.

Die Ergebnisse aus der in diesem Projekt vorgenommenen Untersuchung der Messnetze finden sich in Form aktualisierter Steckbriefe in einer für das Jahr 2020 vom Umweltbundesamt geplanten neuen Auflage der Broschüre „Bodendaten in Deutschland“. Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden“ (UBA 2012) wieder.

Nach Inbetriebnahme des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds ist dieser fortlaufend weiterzuentwickeln, indem weitere Messprogramme und -standorte themenspezifisch geprüft und in den Verbund integriert werden.

Darüber hinaus empfehlen die Autoren, neue Messaktivitäten auf Ebene des Intensiv-Monitoring und der Forschung bzgl. Bodenerosion sowie Bodenwasserhaushalt auf landwirtschaftlich genutzten Böden und an grundwasserbeeinflussten Standorten einzurichten, sofern bestehende, bisher nicht für eine Teilnahme am Verbund gemeldete Messstandorte die Lücken nicht schließen.

10 Quellenverzeichnis

Adelphi / PRC / EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel, Umweltbundesamt, Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau.

Barth, N. (2016): Klimafolgenmonitoring Sachsen - Langfristige Entwicklung des Bodenwassergehalts.

<https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/IB2Bodenwasservorrat.pdf>

Barth, N.; Brandtner, W.; Cordsen, E.; Dann, T.; Emmerich, K.-H.; Feldhaus, D.; Kleefisch, B.; Schilling, B. & Utermann, J. (2000): Boden-Dauerbeobachtung – Einrichtung und Betrieb von Bodendauerbeobachtungsflächen, Ad-hoc-AG Bodendauerbeobachtung des Ständigen Ausschusses Informationsgrundlagen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), in: Loseblattwerk Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser 32. Lfg. XI/00, 33. Lfg. III/01, hg. v. Prof. Dr. Günther Bachmann, Prof. Dr. Wilhelm König und Dr. Jens Utermann.

BonaRes Zentrum für Bodenforschung (2019): Karte der Dauerfeldversuche in Deutschland. https://b-web-e.bonares.de/uebersichtskarteDFV_de/ (21.02.2019).

Borho, W. (2016): Stoffdynamik an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. In: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Hrsg.): Umwelt und Geologie - Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 13, Wiesbaden.

Böttcher, F. & Schmidt, M. (2016): Der Boden aus Sicht der Agrarmeteorologie – Bodentemperatur und Bodenwasserhaushalt. Beitrag Deutscher Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, Leipzig.

<https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Boden/Texte/Boden.html?docId=7911392>

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bundesregierung.

https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf

Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bundesregierung. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan_anpassung_klimawandel_bf.pdf

Cools, N. & De Vos, B. (2016): Part X: Sampling and Analysis of Soil. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Josef Heinrich von Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde.

DIN 4220:2008-11: Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen).

Ferretti, M.; Fischer, R.; Mues, V.; Granke, O.; Lorenz, M.; Seidling, W. (2017): Part II: Basic Design Principles for ICP Forests Monitoring Networks. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Josef Heinrich von Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde.

Fleck, S.; Meesenburg, H.; Wagner, M.; Ahrends, B.; Hassdenteufel, M.; Höper, H.; Schäfer, W. (2012): Klimafolgenmonitoring. In: LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen – Tagungsband, Geoberichte 23, Hannover.

GAFA (2014): Handbuch Forstliche Analytik HFA, Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich, Hg. vom Gutachterausschuss Forstliche Analytik, 5. Ergänzung 2014.

Gimper, S. (2010): Evaluierung bestehender Messsensoren zur Ermittlung des Matrixpotenzials in Böden, Diplomarbeit Fachhochschule Jena, University of Applied Sciences.

Gisi, U.; Schenker, R.; Schulín, R.; Stadelmann, F. X.; Sticher, H. (1990): Bodenökologie, 1. Auflage, Stuttgart.

Hammel, K. & Kennel, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushaltes von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90, Forstl. Forschungsber. München 185.

Hintermaier-Erhard, G. & Zech, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde, Stuttgart.

Hoffmann, C., Schulz, S., Eberhardt, E., Grosse, M., Daedlow, K., Russell, D.J., Kühnert, T., Stein, S., Zoarder, M.A.M., Specka, X., Gärtner, P., Svoboda, N., Heinrich, U. (2017): Overview of relevant standards for the BonaRes-Program, BonaRes Series 2017/2, DOI: 10.20387/BonaRes-FK84-PCR9.

Höhle, J.; Bielefeldt, J.; Dühnelt, P.; König, N.; Ziche, D.; Eickenscheidt, N.; Grüneberg, E.; Hilbrig, L.; Wellbrock, N. (2018): Bodenzustandserhebung im Wald. Dokumentation und Harmonisierung der Methoden, Thünen Working Paper 97, Braunschweig, Mai 2018.

Hund-Rinke, K.; Simon, M.; Lukow, T. (2003): Abschlussbericht: Eignung von Bodenproben aus der Umweltprobenbank für mikrobiologische Untersuchungen. Einfluss des aktuellen Klimas (Niederschlag) zum Zeitpunkt der Probenahme auf die Ergebnisse, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, Schmallenberg, https://www.umweltprobenbank.de/upb_static/fck/download/ab_boden_mikrobio.pdf

Kaufmann-Boll, C.; Kappler, W.; Lazar, S.; Meiners, G.; Tischler, B.; Baritz, R.; Düwel, O., Hoffmann, R.; Utermann, J.; Makeschin, F.; Abiy, M.; Rinklebe, J.; Prüß, A.; Schilli, C.; Beylich, A.; Graefe, U. (2011): Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung, UBA-Text Nr. 65/2011, Dessau-Roßlau.

Kögel-Knabner, I.; Teutsch, G.; Adrian, R.; von Blanckenburg, F.; Flügge, U.-I.; Kolle, O.; Kleinn, C.; Küsel, K.; Lischke, G.; Löw, A.; Schäfers, C.; Schmid, H. P.; Simmer, C.; Vereecken, H.; Walz, R. (2017): Abschlussbericht der Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Allianz der Wissenschaftsorganisationen – Empfehlung zur Einrichtung eines nationalen Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ), Leipzig, <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/ueber-fraunhofer/wissenschaftspolitik/abschlussbericht-infrastrukturen-terrestrische-forschung.pdf>

König, N. (2014): Handbuch Forstliche Analytik (5. Ergänzung). Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich, hg. vom Gutachterausschuss Forstliche Analytik Grundwerk, Juni 2005, mit Ergänzungen 1 bis 5 (Oktober 2014), https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/Bodenzustandserhebung/Handbuch/HandbuchForstanalytikKomplett.pdf;jsessionid=F8E21DAF6EEDCD705FEE14F8C8B40248.1_cid288?_blob=publicationFile

Kunkel, R.; Abbrent, M.; Devaraju, A.; Friesen, J.; Gasche, R.; Klump, J.; Neidl, F.; Rink, K.; Schnicke, T.; Schroeder, M.; Sorg, J.; Stender, V.; Wollschläger, U.; Zacharias, S. (2014): Terrestrial Environmental Observatories (TERENO) Data Policy, Document Version 2.0.

Kuntze, H.; Roeschmann, G., Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde, 5. Auflage, Stuttgart.

LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (Hrsg.) (2017): Bedeutung und Schutz von Moorböden – Positionspapier, Kiel, https://www.labo-deutschland.de/documents/171222_LABO_Positionspapier_Moorbodenschutz.pdf

Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) (Hrsg.) (o.J.): Monitoring-Bericht (Zustands-/Wirkungsindikatoren), http://www.forstliche-umweltkontrolle-bb.de/r5_bericht_2.php

Landwirtschaftskammer NRW (2016): Jahresbericht 2016 der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Dezember 2016, <https://www.landwirtschaftskammer.de/wir/pdf/lwk-nrw-2016.pdf>

Lazar, S.; Kaufmann-Boll, C.; Kastler, M.; Molt, C., Rinklebe, J.; Schilli, C. Freibauer, A.; Wellbrock, N. (2014): Konzeption eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds. Bodendaten – Umsetzung der Handlungsempfehlungen aus dem BOKLIM-Projekt, hg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2012): Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen, Hannover, aktualisiert 2016.

Löpmeier, F.-J. (1983): Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung (AMBAV). In: Beiträge zur Agrarmeteorologie, Dt. Wetterdienst, Zentrale Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braunschweig, Braunschweig.

LUBW – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015): Umweltdaten 2015, Baden-Württemberg, Stuttgart.

Martens, S. (2014): Klimafolgenmonitoring Sachsen - Ausprägung und Auswirkung physiologisch wirksamer Trockenheit, <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/IF3Trockenheit.pdf>

MLUV – Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (2016): Erosionsereigniskataster Mecklenburg-Vorpommern - Bodenerosion durch Wasser, Schwerin.

Nieminen, T.M.; De Vos, B.; Cools, N.; König, N.; Fischer, R.; Iost, S.; Meesenburg, H.; Nicolas, M.; O’Dea P.; Cecchini, G.; Ferretti, M.; De La Cruz, A.; Derome, K.; Lindroos, A.J.; Graf Pannatier, E. (2016): Part XI: Soil Solution Collection and Analysis. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Josef Heinrich von Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde.

Raspe, S.; Beuker, E.; Preuhsler T.; Bastrup-Birk, A. (2016): Part IX: Meteorological Measurements. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Josef Heinrich von Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde.

Rötzer, K. & Vereecken, H. (2015): Ergebnisse der Befragung zur Erfassung terrestrischer Observatorien. Wissenschaftliche Begleitung: Expertengruppe Governance der Allianz Arbeitsgruppe „Terrestrische Forschungsinfrastrukturen“.

Russ, A.; Riek, W.; Kallweit, R.; Einert, P.; Jochheim, H.; Lüttschwager, D.; Hannemann, J.; Becker, F. (2016): Wasserhaushalt von Standorten des Level II-Programms in Brandenburg. In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. In: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 63, S. 136-157.

Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; et al. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage, Heidelberg.

Schilli, C.; Lischeid, G.; Kaufmann-Boll, C.; Lazar, S.; Rinklebe, J. (2011): Methoden-Code und Umgang mit Verfahrenswechseln. Teil A des Abschlussberichts zum F+E-Vorhaben Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze, UBA-Text Nr. 90/2011, Dessau-Roßlau.

Schultz-Sternberg, R.; Bartsch, R.; Schleier, C. (2012): Brandenburg-spezifische Boden-Indikatoren für ein Klimamonitoring im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS). In: Fachbeiträge des LUGV Heft Nr. 126. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Potsdam.

Stein, S.; Eberhardt, E.; Grosse, M.; Helming, K.; Hierold, W.; Hoffmann, C.; Kühnert, T.; Liess, M.; Russel, D.J.; Schulz, S.; Specka, X.; Svoboda, N.; Zoader, M.A.M.; Heinrich, U. (2019): Report on available soil data for German agricultural areas (2018), BonaRes Series 2019/1, DOI: 10.20387/BonaRes-CD4Q-1PEM.

Steininger, M. & D. Wurbs (2017): Bundesweite Gefährdung der Böden durch Winderosion und Bewertung der Veränderung infolge des Wandels klimatischer Steuergrößen als Grundlage zur Weiterentwicklung der Vorsorge und Gefahrenabwehr im Bodenschutzrecht, UBA-Texte 13/2017, Dessau-Roßlau.

Svoboda, N. & Heinrich, U. (2017): The BonaRes Data Guideline, BonaRes Series 2017/1, DOI: 10.20387/BonaRes-E1AZ-ETD7.

TERENO (2016): Verlagerung von Kohlenstoff durch Bodenerosion, TERENO-Newsletter 2/2016, S. 6.

TERENO (2018): Wenn das Wasser kommt und geht, TERENO-Newsletter 2/2018, S. 12.

TLL – Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) (2008): Lysimeterstation Buttelstedt - Wasserhaushaltsmessstation und Modellanlage für standortabhängige Schwellenwerte für N-Salden, Jena, <http://www.tll.de/www/daten/publikationen/merkblaetter/lysi0508.pdf>

Tiemeyer, B.; Bechtold, M.; Belting, S.; Freibauer, A.; Förster, C.; Schubert, E.; Dettmann, U.; Frank, Fuchs, D.; Gelbrecht, J.; Jeuther, B.; Laggner, A.; Rosinski, E.; Leiber-Sauheitl, K.; Sachteleben, J.; Zak, D.; Drösler, M. (2017): Moorschutz in Deutschland - Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren, BfN-Skripten 462, Bonn-Bad Godesberg, http://www.moorschutz-deutschland.de/fileadmin/user_upload/ghg/Home/01_Projekt_Moorschutz_in_Dtl/BfN-Skript_462_Moorschutz_internet.pdf

TMIL – Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (2016): Waldzustandsbericht 2016, Forstliches Umweltmonitoring in Thüringen, Dezember 2016.

Umweltbundesamt & ENDA GmbH & Co. KG (2010): Allgemeine Beschreibung der Dateien für die Festlegung des XML Datenaustauschformats zur Übermittlung von Daten für die Bodendauerbeobachtung in Deutschland, Rev. 3, 2010-09-27, Berlin und Dessau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/beschreibung_xml_schema_uba.pdf

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2012): Bodendaten in Deutschland. Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden, Dessau-Roßlau.

Wessolek, G.; Kaupenjohann, M.; Renger, M. (Hrsg.) (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. In: Bodenökologie und Bodengenese, Heft 40, Technische Universität Berlin.

Western, A.W.; Grayson, B.; Blöschl, G. (2002) Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 30, 149–180.

Wilkinson, M. D.; Dumontier, M. et al. (2016): The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship, Sci. Data 3:160018, DOI: 10.1038/sdata.2016.18.

Wurbs, D. & M. Steininger (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden – Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser, UBA-Texte 16/2011, Dessau-Roßlau.

A Anhang Beschreibung der Messaktivitäten

A.1 Dokumentation der Aktualisierung von Steckbriefen für Bodendaten

Tabelle A-1: Aktualisierung der Steckbriefe für Bodendaten

Messprogramm / Steckbrief	Aktualisierungen
ICP Forests Level I und II International Co-Operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests' operating under the UNECE Convention on 'Long-range Transboundary Air Pollution' (CLRTAP)	Karte für die Level II-Standorte (aufgeschlüsselt nach Hauptbaumarten), Erläuterungen zu bodenchemischen Parametern und weitere Ergänzungen bei der Untersuchungshäufigkeit, Kontaktdaten
BZE Wald I Erste Bodenzustandserhebung Wald	Verantwortliche Institutionen, Quellen, Kontaktdaten
BZE Wald II Zweite Bodenzustandserhebung Wald	Angaben zur Wiederholungsbeprobung im Zeitraum 2022-2024, Quellenangabe zur Probenahmemethode, Quellen, Kontaktdaten
BZE Landwirtschaft Bodenzustandserhebung Landwirtschaft	Überarbeitung nach Abschluss der BZE im Dezember 2018: Bezugszeitraum, Kontaktdaten, methodische Aspekte, Karte, Parameter und Publikationen
BDF Boden-Dauerbeobachtung	Aktualisierung durch UBA Umfrage 2017 und Rückmeldung aus 14 Bundesländern: Parameterumfang, Messzyklen, Standortanzahl, Kontaktdaten
DFV Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche	Institutionen und Zuständigkeiten, u.a. BonaRes für Methodendokumentation und Datenzugang, ZALF als nationale Koordinationsstelle, Gremium „European soil organic matter network (Somnet)“
Feldlysimeter	Ergänzung Lysimeter Britz (TI Waldökosysteme); Ergänzung Industrielle Absatzanlage der Wismut-AG; Ergänzung Lysimeterkooperation im Rahmen der WRRL-Umsetzung
DWD-Agrarmeteorologie (insbesondere Bodendaten)	Karte für Agrarmeteorologische Messstationen, Kontaktdaten
DWD-RADOLAN Quantitative Radarniederschlagsdaten des DWD	Kontaktdaten, Quellen
Umweltprobenbank des Bundes (UPB) – Probenart Boden	Verfügbarkeit Parameter über die Internetseite
Erosionsmointoring	Steckbrief wurde auf Basis der Ergebnisse einer bundesweiten Recherche und einer Umfrage bei den betreibenden Institutionen neu erstellt
TERENO SoilCan	Datenverfügbarkeit, Methoden, Untersuchungshäufigkeit, Quellen
ICOS-D	Steckbrief wurde anhand veröffentlichter Informationen neu entworfen und durch die koordinierende Institution ergänzt
ICP Integrated Monitoring	Steckbrief wurde anhand veröffentlichter Informationen neu entworfen und durch die koordinierende Institution ergänzt

Messprogramm / Steckbrief	Aktualisierungen
Weitere Messaktivitäten	LUCAS, Exploration zur funktionellen Biodiversitätserforschung, Nitrat-Monitoring im Sickerwasser Nordrhein-Westfalen, Humusmonitoring Ackerflächen Nordrhein-Westfalen aktualisiert, BonaRes-Projekte und DFG-Forschungsgruppe Cosmic Sense ergänzt

A.2 Beschreibung der Lysimeter-Kooperation in Mittel- und Nordostdeutschland

- **Beteiligte Länder:** Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern und Bayern
- **Start:** 2009 (Bayern später)
- **Messmethoden:** Lysimeteranlagen, Saugkerzenanlagen, Trichterlysimeter und Dränmessfelder
- **Anlass:** gemeinsame Auswertung von Daten aus den Dauermessstellen unter ähnlichen klimatischen Randbedingungen (geringe bis mittlere Niederschläge)
- **Landwirtschaftliche und hydrologische Fragestellungen:** N-Verlagerung unter verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungen, Umsetzung WRRL, Klimaänderungen und Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt, Nährstoffauswaschungen im Vergleich verschiedener Ackerböden, Parametrisierung und Anwendung von Simulationsmodellen

Die an der Kooperation beteiligten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Sie sind überwiegend auch Teil der Arbeitsgruppe Lysimeter Graz (<http://www.lysimeter.at/de>).

Tabelle A-2: Versuchsanlagen der Lysimeter-Kooperation

Versuchsanlage	Institution	Betrieb seit	Ansprechpartner
Lysimeter Buttstedt	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft	1981	Dr. Steffi Knoblauch (Federführung)
Lysimeter Brandis	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen	1980	Stefan Werisch Anke Winkler
Lysimeter Möckern, Trichterlysimeter Methau	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	2000	Dr. Erhard Albert Dr. Michael Grunert
Dränmessfeld Altmark	Landesanstalt für Landwirtschaft, Forst und Gartenbau Sachsen-Anhalt		Dr. Matthias Schrödter Dr. Nadine Tauchnitz Claudia Strauß
Lysimeter Kassel	Landesbetrieb für Landwirtschaft Hessen	1995	Dr. Johannes Heyn Dierk Koch
Lysimeter Großlüsewitz	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern	1973	Dr. Eckhard Lehmann Constanze Ramp Jana Lorenz
Lysimeter Falkenberg (mit einem Teil der Lysimeter)	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ	1993	Prof. Dr. Ralph Meißner
Saugkerzenanlage Kempten	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft	1977	Dr. Michael Diepolder Lorenz Heigl

Beispielhaft werden im Folgenden die Lysimeter Brandis und Buttstedt detailliert beschrieben:

Lysimeter Brandis (Sachsen)

Die Anlage ist seit dem Jahr 1980 in Betrieb und besteht aus 28 Lysimetern und zwei bodenhydrologischen Messplätzen. Erfasst werden Klima- und Niederschlagsdaten, Bodentemperatur, Bodenfeuchte sowie stoffliche Parameter des Bodensickerwassers (siehe Tabelle A-3).

Lysimeter Butteltstedt (Thüringen)

Der Standort Butteltstedt ist seit dem Jahr 1982 in Betrieb. Es handelt sich um zwei Anlagen mit je zwei wägbaren und sechs nicht wägbaren Lysimetern. Die Lysimeter sind monolithisch befüllt. Die Sickerwassersammlung erfolgt tensionsgesteuert bzw. gravitativ über eine Filterschicht aus inertem Quarzschluff und -sand.

Die Ziele der Messungen in Butteltstedt waren und sind:

1982 bis 2004:

- ▶ Wasserverbrauch, Wassernutzungseffizienz und Bodenwasseraneignungsvermögen landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen für die Berechnungsberatung,
- ▶ Bodenwasserhaushalt und Nährstoffverlagerung auf einem tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löss unter landwirtschaftlicher Nutzung,
- ▶ Verifizierung von Verdunstungsmodellen, Entwicklung von pflanzenabhängigen Korrekturfaktoren für PET-Schätzverfahren.

2005 bis > 2015:

- ▶ unvermeidbare N-Auswaschung und N-Saldo unter der Bedingung eines optimierten Bewirtschaftungsregimes für die Ableitung von standortabhängigen Schwellenwerten für N-Salden,
- ▶ Parameter des Abflussregimes von Böden für die Übertragung standort-abhängiger Schwellenwerte für N-Salden auf andere Böden für den Schutz der Gewässer und die Umsetzung der Ziele der EU-WRRL,
- ▶ Wassernutzungseffizienz, Bodenwasseraneignungsvermögen landwirtschaftlicher Kulturen und Wasserverbrauch unterschiedlicher Verfahren der Bodenbearbeitung für die Entwicklung von Anpassungsstrategien an mögliche Klimaänderungen.

(Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2008)

Tabelle A-3: Messeinrichtungen und Parameter der Lysimeterstation Brandis

Messeinrichtungen	Parameter / Geräte	Anzahl	Messbeginn	Aufgabenstellung
Klimastation	Lufttemperatur ¹	3	1992	Erfassung der klimatischen Eingangsgrößen, Statistik, Bewerten signifikanter Änderungen
	Luftfeuchte ²	2	1992	
	Luftdruck	1	2007	
	Windrichtung ³	1	1992	
	Windgeschwindigkeit ³	2	1992	
	Globalstrahlung	1	1992	
	Sonnenscheindauer	1	1984	
Bodenmessplätze	Bodentemperatur ⁴	6	1995	Vergleichsmessungen in der Freifläche
	Bodenfeuchte ⁵	6	1995	
	Saugkerzen ⁶	5	1995	
Niederschlagsmesser	Sammelkanne	4	1980	Erfassung des Wasserdargebots und der atmosphärischen Deposition
	Kippwaage, Ombrometer	2	1992	
	Bulk-Sammler	3	1992	
Wägbare Lysimeter	Sickerwasserauslauf	24	1980	Ermittlung der realen Verdunstung, Bodenfeuchte, Sickerwassermenge, Stoffverlagerung und potenzielle Stoffeinträge in das Grundwasser
	Saugkerzen ⁷	33	1994	
	Bodenfeuchte ⁷	33	2000	
	Bodentemperatur ⁷	33	2011	

Quelle: BfUL Sachsen

¹ in den Höhen 200 cm, 50 cm und 5 cm über Gelände² in den Höhen 200 cm und 50 cm über Gelände³ in den Höhen 2 m und 10 m über Gelände⁴ in den Tiefen 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm und 250 cm unter Gelände⁵ in den Tiefen 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm und 100 cm unter Gelände⁶ in den Tiefen 30 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm und 200 cm unter Gelände⁷ in den Tiefen 50 cm, 150 cm und 250 cm unter Gelände

B Anhang Bodenwasserhaushalt

Tabelle B-1: Laufende Dauerfeldversuche mit Daten zur Speicherung und Filterung von Wasser

Versuchsstand-ort	Versuchsname	Versuchs-beginn	Versuchs-ende	Institution	Forschungsthema	Landnut-zung	Untersuchungsparameter
Göttingen	Garte-Süd-Bodenbear-beitung (Reinshof)	1970	laufend	Georg-August-Universität Göt-tingen	Der Vergleich der beiden Bodenbearbeitungssysteme "Lockerbodenwirtschaft" und "Festbodenmulchwirt-schaft" über einen langen Zeitraum	Acker	Pflanze: Ertrag und Qualität; Bo-den: Feuchte, Corg, Bodengefüge, biologische und chemische Eigen-schaften, Wurzelverteilung, Ver-unkrautung
Reiffenhausen	Acker-Agroforst	2015	laufend	Georg-August-Universität Göt-tingen	Nachhaltige Intensivierung in der Landwirtschaft durch Agroforst	Acker-Ag-roforst	Pflanze: Biomasse etc.; Boden: Feuchte und -temperatur, pflan-zenverfügbare Nährstoffe, Nmin, pH-Wert, C/N-Verhältnis, P, Cmik, Nmik, Regenwürmer, LD etc.
Welschbillig (Ei-fel)	Bodenbearbeitungsver-such Welschbillig	1999	laufend	Landwirtschafts-kammer Rhein-land-Pfalz	Bodenbearbeitung (vier Verfahren der konservie-renden Bodenbearbeitung vs. konventioneller Pflugfur-che)	Acker	Pflanze: Feldaufgang, Ertrag, Roh-zuckergehalt; Boden: P, Corg, CO ₂ , LD, Wasserinfiltration, Re-genwürmer, Mikroorganismen, Nmin, Grundnährstoffe, Nt, Ct, etc
Dichtelbach (Hunsrück)	Bodenbearbeitungsver-such Dichtelbach	1999	laufend	Landwirtschafts-kammer Rhein-land-Pfalz	Bodenbearbeitung (vier Verfahren der konservie-renden Bodenbearbeitung vs. konventioneller Pflugfur-che)	Acker	Pflanze: Feldaufgang, Ertrag, Roh-zuckergehalt; Boden: P, Corg, CO ₂ , LD, Wasserinfiltration, Re-genwürmer, Mikroorganismen, Nmin, Grundnährstoffe, Nt, Ct, etc.

Versuchsstand-ort	Versuchsname	Versuchs-beginn	Versuchs-ende	Institution	Forschungsthema	Landnut-zung	Untersuchungsparameter
Wintersheim (Rheinhausen)	Bodenbearbeitungsversuch Wintersheim	1999	laufend	Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz	Bodenbearbeitung (vier Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung vs. konventioneller Pflugfurche)	Acker	Pflanze: Feldaufgang, Ertrag, Rohzuckergehalt; Boden: P, Corg, CO ₂ , LD, Wasserinfiltration, Regenwürmer, Mikroorganismen, Nmin, Grundnährstoffe, Nt, Ct, etc
Ludwigshafen/Ruchheim	Bodenbearbeitungsversuch	1973	eingestellt (nach 2000)	Landwirtschaftliche Versuchsstation der BASF AG	Düngung, Bodenbearbeitung	Acker	Pflanze: Ertrag, Qualität; Boden: Nmin, Bodenwiderstand, Wassergehalt, Luftgehalt, Luftpermeabilität, Humusgehalt, N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, pH-Wert
Dornburg	Agroforstsystem Dornburg	2007	laufend	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft	Nachhaltige Intensivierung in der Landwirtschaft durch Agroforst	Acker-Agroforst	Pflanze: Ertrag Korn, Stroh, TKG, TS, jährlicher Laubfall, jährliche Zuwachsraten der Bäume; Boden: Feuchte und -temperatur, pflanzenverfügbare Nährstoffe, Nmin, pH-Wert, C/N-Verhältnis, P, Cmik, Nmik, LD etc.
Bernburg-Strenzfeld	Bodenbearbeitung und Bestelltechnik in der Fruchtfolge	1996	laufend	Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG)	Bodenbearbeitung und Bestelltechnik in der Fruchtfolge	Acker	Boden: LD, Luftleitfähigkeit, gesättigte Wasserleitfähigkeit, nutzbare Feldkapazität, Durchdringungswiderstand, Grobporenvolumen, etc.
Bernburg-Strenzfeld	Grundbodenbearbeitung und Distelbekämpfung, ökologisch viehlos (ursprünglich Grundbodenbearbeitung und	1994	laufend	Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG)	Grundbodenbearbeitung und Distelbekämpfung in der Fruchtfolge, ökologisch viehlos	Acker	Pflanze: Feldaufgang, Bestandesdichte, Ertrag, N, P, K und Mg, Qualität; Boden: Nmin, LD, Wasser (M%, V%, nFK), pH-Wert, P, K,

Versuchsstand-ort	Versuchsname	Versuchs-beginn	Versuchs-ende	Institution	Forschungsthema	Landnut-zung	Untersuchungsparameter
	Düngung, ökologisch viehlos)						Mg, Ct, CaCO ₃ , Corg, Nt, C/N-Verhältnis
Berlin-Dahlem	Agrarmeteorologisches Intensivmessfeld (BDa_E-Feld)	1953	laufend	Humboldt-Uni- versität zu Berlin	Einfluss des Witterungsver- laufs auf Pflanzenwachstum und -entwicklung und Er- tragsbildung von landwirt- schaftlichen Nutzpflanzen.	Acker	Pflanze: Ertrag Haupt-/Koppelpro- dukt, TS, Phänologische Bonitur, Witterungsdaten; Boden: Feuchte in 3 Tiefen
Forst (Lausitz)	Alley-Cropping System Forst	2010	laufend	Brandenburgi- sche Technische Universität Cott- bus-Senftenberg in Kooperation mit der Agrarge- nossen-schaft Forst	Nachhaltig produktive Land- wirtschaft durch Agroforst	Acker-Ag- roforst	Pflanze: Ertrag etc.; Boden: Nähr- stoffe, Humus, Feuchtigkeit

Quelle: BonaRes Zentrum für Bodenforschung. Karte der Dauerfeldversuche in Deutschland. https://b-web-e.bonares.de/uebersichtskarteDFV_de/, 21.2.2019

Tabelle B-2: Liste der gemeldeten Messstandorte zum Thema Bodenwasserhaushalt

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Baden-Württemberg	Ochsenhausen 2 (Fichte), Level II 808	LUBW, FVA-BWBWL	BDF, Level II	1994	ja	nein	ja	F
Baden-Württemberg	Bruchsal/Forst	LUBW	BDF	1992	ja	nein	ja	F
Baden-Württemberg	Baltmannsweiler, Level II 812 Esslingen Fichte	LUBW, FVA-BWBWL	BDF, Level II	1998 (BWL) / 1995 (LUBW)	ja	nein	ja	F
Baden-Württemberg	Wilhelmsfeld, Heidelberg Fichte, Level II 802	LUBW, FVA-BWBWL	BDF, Level II	1983 (BWL) / 1995 (LUBW)	ja	nein	ja	F
Baden-Württemberg	Kehl	LUBW	BDF	1998	ja	nein	ja	G
Baden-Württemberg	Trochtelfingen	LUBW	BDF	2002	ja	nein	ja	A
Baden-Württemberg	Markgräflerland	LUBW	BDF	2011	ja	nein	nein	G
Baden-Württemberg	Kraichgau/Odenheim	LUBW	BDF	2011	ja	nein	nein	G
Baden-Württemberg	Conventwald Fichte, Level II 806	BWLFVA-BW	Level II	1994	ja	nein	ja	F
Baden-Württemberg	Altensteig Fichte, Level II 819	FVA-BWBWL	Level II	2009	ja	nein	nein	F
Baden-Württemberg	Heidelberg Buche, Level II 852	FVA-BWBWL	Level II	2009	ja	nein	nein	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Baden-Württemberg	Conventwald Buche, Level II 856	FVA-BWBWL	Level II	2009	ja	nein	nein	F
Baden-Württemberg	Ochsenhausen Buche, Level II 858	BWL	Level II	2009	ja	nein	nein	F
Baden-Württemberg	Altensteig Buche, Level II 859	BWL	Level II	2009	ja	nein	nein	F
Baden-Württemberg	Esslingen Buche, Level II 862	BWL	Level II	2010	ja	nein	nein	F
Bayern	Würzburg, Level II 921	LfU, LWF	BDF, Level II	1995	ja	nein	ja	F
Bayern	Riedenburg, Level II 913	LfU, LWF	BDF, Level II	1990	ja	nein	ja	F
Bayern	Altdorf, Level II 901	LfU, LWF	BDF, Level II	1990	nein	nein	nein	F
Bayern	Schönau am Königssee (Gotzenalm), BDF0279	LfU	BDF	1987	ja	nein	nein	G
Bayern	Berchtesgaden, Level II 904	LWF	BDF, Level II	1991	nein	nein	nein	F
Bayern	Dinkelsbühl, Level II 905	LWF	BDF, Level II	1990	nein	nein	nein	F
Bayern	Ebersberg, Level II 906	LWF	BDF, Level II	1990	ja	nein	ja	F
Bayern	Flossenbürg, Level II 908	LWF	BDF, Level II	1993	ja	nein	ja	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Bayern	Goldkronach, Level II 909	LWF	BDF, Level II	1993	nein	nein	nein	F
Bayern	Mitterfels, Level II 911	LWF	BDF, Level II	1990	ja	nein	ja	F
Bayern	Rothenbuch, Level II 914	LWF	BDF, Level II	1993	nein	nein	nein	F
Bayern	Freising, Level II 919	LWF	BDF, Level II	1994	ja	nein	ja	F
Bayern	Kreuth, Level II 922	LWF	BDF, Level II	1995	nein	nein	nein	F
Bayern	Höglwald, Level II 923	LWF	BDF, Level II	2010	ja	nein	nein	F
Bayern	Weihenstephan-Dürnast	DWD	DWD Bodenfeuchte	2000	ja	nein	ja	G
Bayern	Scheyern	Forschungszentrum Jülich	TERENO SOILCan	k.A.	ja	ja	nein	G
Bayern	Fendt	KIT	TERENO SOILCan	k.A.	ja	ja	nein	G
Bayern	Garmisch	KIT	TERENO SOILCan	k.A.	ja	ja	nein	G
Bayern	Rottenbuch	KIT	TERENO SOILCan	k.A.	ja	ja	nein	G
Bayern	Graswang	KIT	TERENO SOILCan	k.A.	ja	ja	nein	G
Berlin	Grunewald, Level II 1101	LfB	BDF, Level II	1987	ja	nein	ja	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Brandenburg	Beerenbusch Kiefer, Level II 1202	LfB	BDF, Level II	1996	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Kienhorst, Level II 1203	LfB	BDF, Level II	1995	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Weitzgrund, Level II 1204	LfB	BDF, Level II	1995	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Neusorgefeld, Level II 1205	LfB	BDF, Level II	1995	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Beerenbusch Buche, Level II 1207	LfB	BDF, Level II	2001	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Fünfeichen, Level II 1208	LfB	BDF, Level II	2003	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Lindenberg (Observatorium Grenzsichtmessfeld Falkenberg)	DWD	DWD Bodenfeuchte	2013	ja	nein	nein	G
Brandenburg	Versuchsstation Britz bei Eberswalde, Lysimeter	TI für Waldökosysteme	Wald-Wasser-Baumwachstum	2008 (Wasserflussmessungen)	ja	nein	ja	F
Brandenburg	Dedlow	Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF)	TERENO SOILCan	2014	ja	ja	nein	A
Hessen	Spessart, Level II 604	NW-FVA, HLNUG	BDF, Level II	1985	ja	nein	nein	F
Hessen	Zierenberg, Level II 606	NW-FVA, HLNUG	Level II	1989	ja	nein	nein	F
Hessen	Krofdorf, Level II 609	NW-FVA, HLNUG	BDF, Level II	1984	ja	nein	nein	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Hessen	Kellerwald, Level II 608	NW-FVA, HLNUG	Level II	2006	nein	nein	nein	F
Hessen	Level II 611 Hessisches Ried, Eiche	NW-FVA	Level II	1998	ja	nein	ja	F
Hessen	Level II 613 Hessisches Ried, Buche	NW-FVA	Level II	1998	ja	nein	ja	F
Hessen	Fürth, Fichte, Level II 610	NW-FVA, HLNUG	Level II	1984	nein	nein	nein	F
Hessen	Intensiv-Messstelle Flughafen Frankfurt	HLNUG	BDF	1992	ja	nein	ja	F
Mecklenburg-Vorpommern	Sandhof, Level II 1302, BDF 2504	LFOA	BDF, Level II	1996	ja	nein	nein	F
Mecklenburg-Vorpommern	Rothemühl, Level II 1303, BDF 3701	LFOA	BDF, Level II	1996	ja	nein	nein	F
Mecklenburg-Vorpommern	Demmin	DLR	TERENO SOILCan	2012	ja	ja	nein	A
Niedersachsen	Ehrhorn, Eiche, Level II 308, BDF 2	NW-FVA	BDF, Level II	1981	nein	nein	nein	F
Niedersachsen	Lüss, Level II 301, BDF 3	NW-FVA	BDF, Level II	1993	ja	nein	ja	F
Niedersachsen	Lange Bramke, Südhang, Level II 302, BDF 22	NW-FVA	BDF, Level II	1974	ja	nein	ja	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Niedersachsen	Lange Bramke, Kamm, Level II 303, BDF 23	NW-FVA	BDF, Level II	1986	ja	nein	ja	F
Niedersachsen	Solling (Buche), Level II 304, BDF 6	NW-FVA	BDF, Level II, UPB	1966	ja	nein	ja	F
Niedersachsen	Solling (Fichte), Level II 305, BDF 7	NW-FVA	BDF, Level II, UPB	1966	ja	nein	ja	F
Niedersachsen	Göttinger Wald, Level II 306, BDF 9	NW-FVA	BDF, Level II	1980	nein	nein	nein	F
Niedersachsen	Augustendorf, Level II 307, BDF 21	NW-FVA	BDF, Level II	1993	ja	nein	ja	F
Niedersachsen	Uesen, BDF 10	LBEG	BDF	1998	nein	nein	nein	G
Niedersachsen	Markhausen, BDF 32	LBEG	BDF	1993	nein	nein	nein	A
Niedersachsen	Glissen, BDF 49	LBEG	BDF	1995	nein	nein	nein	A
Niedersachsen	Hohenzethen, BDF 64	LBEG	BDF	1999	nein	nein	nein	A
Niedersachsen	Jühnde, BDF 65	LBEG	BDF	1999	nein	nein	nein	A
Niedersachsen	Braunschweig	DWD	DWD Bodenfeuchte	1961	ja	nein	ja	G
Nordrhein-Westfalen	Kleve Tannenbusch /Tannenbusch, Level II 502	LANUV	BDF, Level II	1995 (BDF), 1996 (Level II)	ja	nein	ja	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Nordrhein-Westfalen	Elberndorf, Level II 506	LANUV	BDF, Level II	1995 (BDF), 1984 (Level II)	nein	nein	nein	F
Nordrhein-Westfalen	Haard, Level II 503	LANUV	BDF, Level II	1995	ja	nein	ja	F
Nordrhein-Westfalen	Schwaney, Level II 508	LANUV	BDF, Level II	1995	ja	nein	nein	F
Nordrhein-Westfalen	Selhausen	Forschungszentrum Jülich	TERENO SOILCan	2009	ja	ja	nein	A
Nordrhein-Westfalen	Rollesbroich	Forschungszentrum Jülich	TERENO SOILCan	2009	ja	ja	nein	G
Nordrhein-Westfalen	Wüstebach	Forschungszentrum Jülich	TERENO SOILCan	2008	ja	ja	ja	F
Rheinland-Pfalz	Adenau, BDBF 8, Level II 702	KliWald	BDF, Level II	1988	nein	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Hagenbach / Eiche, BDF 15, Level II 706	KliWald	BDF, Level II	1988	ja	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Hermeskeil 1, BDF 9, Level II 701	KliWald	BDF, Level II	1991; 1988 (Boden-Wasser-haushalt-Simulation)	ja	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Hermeskeil 2, BDF 10, Level II 701	KliWald	BDF, Level II	1991; 1988 (Boden-Wasser-haushalt-Simulation)	ja	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Kirchheimbolanden, BDF 5, Level II 703	KliWald	BDF, Level II	1988	ja	nein	nein	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Rheinland-Pfalz	Leisel, BDF06	KliWald	BDF	1988	ja	nein	ja	F
Rheinland-Pfalz	Merzalben, Level II 705, BDF 2	KliWald	BDF, Level II	1986; 1988 (Boden-Wasser-haushalt-Simulation)	ja	nein	ja	F
Rheinland-Pfalz	Morbach, BDF07	KliWald	BDF	1988	nein	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Neuhäusel 1 (Quarzit), Level II 704, BDF 14	KliWald	BDF, Level II	1991	ja	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Neuhäusel 2 (Bims), Level II 704, BDF 13	KliWald	BDF, Level II	1991	ja	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Schaidt, Kandel / Kiefer, BDF01	KliWald	BDF	1991; 1988 (Boden-Wasser-haushalt-Simulation)	nein	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Schneifel 1 / Fichte, BDF12	KliWald	BDF	1988	nein	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Schneifel 2 / Buche, BDF11	KliWald	BDF	1988	nein	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Waldmohr, BDF04	KliWald	BDF	1991	nein	nein	nein	F
Rheinland-Pfalz	Johanniskreuz, Level II 707, BDF 3	KliWald	BDF, Level II	1989	ja	nein	ja	F
Saarland	Fischbach Level II 1001	LUA	Level II	1989	ja	nein	nein	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Sachsen	Köllitsch, BDF17	LfULG	BDF	2017	ja	nein	nein	A
Sachsen	Ehrenfriedersdorf, BDF23 (Intensiv-Messanrichtungen 2019 abgebaut)	LfULG	BDF	2004	nein	nein	nein	A
Sachsen	Schmorren, BDF24	LfULG	BDF	2001	ja	nein	ja	A
Sachsen	Hilbersdorf, BDF43	LfULG	BDF	1996	ja	nein	ja	A
Sachsen	Olbernhau, Level II 1402	SF	Level II	1994	nein	nein	nein	F
Sachsen	Bautzen, Level II 1404	SF	Level II	1994	nein	nein	nein	F
Sachsen	Laußnitz, Level II 1405	SF	Level II	1994	nein	nein	nein	F
Sachsen	Colditz, Level II 1406	SF	Level II	1995	nein	nein	nein	F
Sachsen	Leipzig-Holzhausen	DWD	DWD Bodenfeuchte	2006	ja	nein	ja	G
Sachsen	Lippen, BDF12	LfULG	BDF	1998	ja	nein	ja	A
Sachsen-Anhalt	Klötze Kiefer, Level II 1501, BDF 5.1	NW-FVA, LAU	BDF, Level II	1996	ja	nein	ja	F
Sachsen-Anhalt	Klötze Douglasie, Level II 1503, BDF 5.2	NW-FVA, LAU	BDF, Level II	2012	ja	nein	nein	F
Sachsen-Anhalt	Nedlitz, Level II 1502, BDF 11	NW-FVA	BDF, Level II	1996	ja	nein	ja	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Sachsen-Anhalt	Bad Lauchstädt DFV, BDF	LAGB, UFZ	BDF, DFV	1998	ja	nein	ja	A
Sachsen-Anhalt	Bad Lauchstädt	UFZ	TERENO SOILCan	2011	ja	ja	nein	A
Sachsen-Anhalt	Sauerbach	UFZ	TERENO SOILCan	2012	ja	ja	nein	A
Sachsen-Anhalt	Schäfertal	UFZ	TERENO SOILCan	2012	ja	ja	nein	G
Sachsen-Anhalt	Großlysimeter Colbitz	NW-FVA, LAU	Feldlysimeter	1973	ja	ja	ja	F
Schleswig-Holstein	Sönke-Nissen Koog, BDF06	LLUR	BDF	1989 (Basis), 2007 (Intensiv)	ja	nein	nein	A
Schleswig-Holstein	Schuby, BDF09	LLUR	BDF	1990 (Basis), 2005 (Intensiv)	ja	nein	nein	A
Schleswig-Holstein	Bokhorst, BDF23	LLUR	BDF	1992 (Basis), 2011 (Intensiv)	nein	nein	nein	A
Schleswig-Holstein	Bornhöved, Level II 101	LLUR, NW-FVA	Level II, UPB	1983	ja	nein	nein	F
Schleswig-Holstein	Lindhof 1, BDF35	LLUR	BDF	2001 (Basis), 2003 (Intensiv)	nein	nein	nein	G
Schleswig-Holstein	Lindhof 2, BDF36	LLUR	BDF	2001 (Basis), 2003 (Intensiv)	nein	nein	nein	A
Thüringen	Steiger, Level II 1608	TLUG, FFK	BDF, Level II	2000	ja	nein	ja	F

Bundesland	Name des Standorts	Betreiber-Institution (Abk.)	Messprogramm(e)	Startjahr Standort	Bodenfeuchte (BWS und/oder BWG, <1Tag)	Sickerwassermenge (kontinuierlich)	Kernstandort Verbund (mind. 10 J. Messdauer)	Nutzung (Abk.)
Thüringen	Possen, Level II 1606	TLUG, FFK	BDF, Level II	1996	ja	nein	ja	F
Thüringen	Lehesten, Level II 1609	TLUG, FFK	BDF, Level II	2000	ja	nein	ja	F
Thüringen	Großer Eisenberg, Level II 1605	FFK	Level II	1994	ja	nein	ja	F
Thüringen	Holzland, Level II 1607	FFK	Level II	2000	ja	nein	ja	F

F: Forst; A: Acker; G: Grünland

FVA-BW: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg; DLR: Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt; DWD: Deutscher Wetterdienst; FFK: Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha; FZ Jülich: Forschungszentrum Jülich; HLNUG: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie; KIT: Karlsruhe Institut für Technologie; KliWald: Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen bei der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft; LAGB: Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt; LANUV: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen; LBEG: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie; LfB: Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde; LFOA: Landesforst Mecklenburg-Vorpommern; LfU: Bayerisches Landesamt für Umwelt; LfULG: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie; LLUR: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein ; LUA: Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland; LUBW: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg; LWF: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; NW-FVA: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; SF: Staatsbetrieb Sachsenforst, Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft, Referat 43 Standorterkundung, Bodenmonitoring, Labor; TI Waldökosysteme: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme; TLUG: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie; UFZ: Umweltforschungszentrum Leipzig Halle; ZALF: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung

C Anhang Bodenerosion

C.1 Steckbrief für Bodendaten „Erosionsmonitoring“

1 Kurzbeschreibung

In Deutschland erfolgt in sechs Bundesländern ein Erosionsmonitoring. Zusätzlich sind in einem Bundesland potenzielle Standorte vorhanden, die derzeit nicht in Betrieb sind. Die Vorgehensweise und Intensität sind nicht einheitlich. Erfasst werden Mess-, Kartierungs- und Bewirtschaftungsdaten, die Rückschlüsse auf die Erosionsprozesse ermöglichen. Der Fokus liegt dabei auf der Bodenerosion durch Wasser auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Die jeweils unterschiedlichen Aufgabenstellungen liegen im Bereich der vertiefenden und i.d.R. zeitlich hochauflösenden Prozessforschung sowie der Bewertung von landwirtschaftlichen, landeskulturellen und technischen Schutzmaßnahmen.

2 Zweck

- ▶ Beobachtung und Quantifizierung des Erosionsprozesses und des Bodenabtrags
- ▶ Ableitung und Bewertung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen
- ▶ Quantifizierung der Stoffverlagerung in aquatische Nachbarsysteme

3 Nutzung/Anwendungsbereiche

- ▶ Ökologie/Umweltschutz/Forschung: Boden- und Gewässerschutz, Einfluss von Klimaveränderungen auf den Boden, Evaluierung und Entwicklung von Erosionsmodellen
- ▶ Landwirtschaft: Vergleich verschiedener Bewirtschaftungsformen, Beurteilung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen
- ▶ Umwelt- und Landwirtschaftsverwaltung: Festlegung von Erheblichkeitsschwellen, Umsetzung rechtlicher Vorgaben zum Boden- und Gewässerschutz, Umsetzung Cross Compliance

4 Anwender der Ergebnisse

- ▶ Agrar- und Umweltforschung
- ▶ Landwirtschaftsbetriebe
- ▶ Umwelt- und Landwirtschaftsbehörden des Bundes und der Länder

5 Anwendungs-, Zugriffs- und Nutzungseinschränkungen

Eingeschränkte Vergleichbarkeit der gewonnenen Daten durch unterschiedliche Methodik der Erhebung und des Raumbezuges

Datenzugriff obliegt in erster Linie den jeweiligen Bundesländern.

6 Räumliche Ausdehnung

Bundesrepublik Deutschland

Baden-Württemberg: 2 Intensiv-BDF

Bayern: Schadensfallabhängige Kartierung

Berlin: Keine Aktivität

Brandenburg: Keine Aktivität

Bremen: Keine Aktivität

Hamburg: Keine Aktivität

Hessen: Keine Aktivität

Mecklenburg-Vorpommern: Schadensfallabhängige Kartierung

Niedersachsen: Schadensfallabhängige und mindestens jährliche Kartierung in 5 Referenz- und 2 Beobachtungsgebieten

Nordrhein-Westfalen: Keine Aktivität

Rheinland-Pfalz: Keine Aktivität

Saarland: Keine Aktivität

Sachsen: Schadensfallabhängige Kartierung

Sachsen-Anhalt: Feinnivellement an BDF-Catena, Schadensfallabhängige Kartierung

Schleswig-Holstein: Potenzielle Beobachtungsstandorte (BDF) vorhanden, aber nicht in Betrieb

Thüringen: keine Aktivität

7 Karte der Untersuchungsstandorte

Siehe Abb. 17

8 Zeitbezug

Je nach Bundesland unterschiedlich, in Niedersachsen seit 2000, in den anderen Bundesländern deutliche kurze Erfassungszeiträume.

9 Anzahl/Dichte der Untersuchungsstandorte

-

10 Verteilung der Untersuchungsstandorte

- ▶ Systematische Festlegung jedes Einzelstandortes in Abhängigkeit des jeweiligen Monitoring-ansatzes
- ▶ Schadensfallabhängige Festlegung

11 Parameter

- ▶ Erosionsauslösende Niederschlagsmenge und -intensität
- ▶ Relief
- ▶ Erosionsformen
- ▶ Bodenabtrag
- ▶ Nutzung
- ▶ Bewirtschaftungssysteme

12 Untersuchungsmedium(en)

-

13 Probenahmemethode(n)

Je nach Bundesland unterschiedlich und abhängig von der jeweiligen Fragestellung

14 Entnahmetiefe(n)

-

15 Untersuchungsmethode(n)

Je nach Bundesland unterschiedlich und abhängig von der jeweiligen Fragestellung

16 Untersuchungshäufigkeit

Je nach Bundesland unterschiedlich und abhängig von der jeweiligen Fragestellung

17 Methodendokumentation

Je nach Bundesland unterschiedlich und abhängig von der jeweiligen Fragestellung

18 Verantwortliche Institutionen

Baden-Württemberg: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Bayern: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Mecklenburg-Vorpommern: LMS Agrarberatung GmbH

Niedersachsen: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG)

Sachsen: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG Sachsen)

Sachsen-Anhalt: Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB), Untere Behörden für Bodenschutz und Altlasten

Schleswig-Holstein: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein

19 Arbeitsgruppen / Gremien

-

20 Dateninhalt, Objektartenkatalog, Darstellungskatalog

-

21 Wichtige Quellen und Publikationen

- ▶ UBA-Abfrage der Metadaten zu den Bodendauerbeobachtungsflächen in Deutschland vom 26.05.2017
- ▶ LBEG (2012 aktualisiert 2016): Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover
- ▶ LUBW (2015): Umweltdaten 2015 Baden-Württemberg. - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart
- ▶ MLUV (2016): Erosionsereigniskataster Mecklenburg-Vorpommern - Bodenerosion durch Wasser. - Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin 2016

22 Fachverantwortliche(r)

Frau Kirstin Marx, Umweltbundesamt, FG II 2.7

23 Datum des Steckbriefs

18.01.2019

24 Datenzugang

keine Angabe

C.2 Abfrage der Standortdaten zum Themenfeld Bodenerosion (2018)

Abbildung C-1: Abfrageformular der Standortdaten zum Themenfeld Bodenerosion (2018)

					
F&E-Vorhaben „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds“					
Abfrage der Standortdaten zum Themenfeld 'Erosion'					
1. Allgemeine Standortinformationen					
Kennung:			Name des Standortes:		
Bundesland:			Gemarkung/Gemeinde:		
X-Koordinate:			Y-Koordinate:		
Koordinatenbezugssystem:					
Betreiber/ Institution:					
Adresse:					
Ansprechpartner (1):					
Telefon (1):					
E-Mail (1):					
Ansprechpartner (2):					
Telefon (2):					
E-Mail (2):					
Art der Erosionsaufnahme:					
☐ Messfläche (fester Standort) ☐ Schadfallkartierung (wechselnde Standorte)					
Art des Standortes (z.B. Bodendauerbeobachtungsfläche, unabhängige Messfläche):					
Beginn der Aufnahmen (Monat/ Jahr):					
Unterbrechungen (von/ bis – Monat/Jahr):					
Ergänzende Anmerkungen zu Standort/ Messprogramm:					

Abbildung C-1: Abfrageformular der Standortdaten zum Themenfeld Bodenerosion (2018)
(Fortsetzung)

2. Basisdaten zur Standortkennzeichnung			
Naturraum:			
Bodenform:			
Bodenarten:			
Niederschlagssumme (langjähriges Mittel):		Bezugsperiode:	
Windgeschwindigkeit (langjähriges Mittel):		Bezugsperiode:	
Typ der Messflächen (Schlag, Messhang, Messparzelle): 			
Anzahl Messflächen:		Gesamtfläche [m²]:	
Mittlere Hangneigung [%]:			
3. Welche Begleitgrößen werden erfasst?			
	ja	nein	
Art der Bewirtschaftung (Konventionell, pfluglos, Direktsaat):	☐	☐	
Angebaute Fruchtart:	☐	☐	
Stadien der Pflanzenentwicklung:	☐	☐	
Klimagrößen am Standort:	☐	☐	
Welche Klimagrößen werden erfasst (z.B. Niederschlag, Temperatur u.a.)? 			
Messgerät(e) Klimagrößen:			
Messintervall Klimagrößen:	☐ täglich ☐ stündlich ☐ minütlich		
	Andere Intervalle:		
Weitere Begleitgrößen (Bezug Erosion):			
Anmerkungen/ Ergänzungen zu Begleitgrößen: 			

Abbildung C-1: Abfrageformular der Standortdaten zum Themenfeld Bodenerosion (2018)
(Fortsetzung)

4. Welche Messgrößen werden erfasst?				
	ja	nein	gemessen/ kartiert	abgeleitet/ modelliert
Erosionsform:	☐	☐	☐	☐
Menge des Bodenabtrages (je Messfläche):	☐	☐	☐	☐
Menge des Bodenauftrages (je Messfläche):	☐	☐	☐	☐
Menge des Oberflächenabflusses (je Messfläche):	☐	☐	☐	☐
Gerät/ Messmethode zur Erfassung der Erosionsparameter (z.B. Nivellement, Kartierung, Auffanggerät o.a.):				
	ja	nein		
Profilmessungen innerhalb der Messfläche?	☐	☐		
Korngrößenbestimmung des verlagerten Materials?	☐	☐		
Welche Parameter werden bestimmt (z.B. Feinbodenart, Grobbodenart, Skelettgehalt)?				
	ja	nein		
Chemische Analyse des verlagerten Materials ?	☐	☐		
Welche Parameter werden bestimmt?				
Weitere Messgrößen:				
Anmerkungen/ Ergänzungen zu Messgrößen:				
Messintervall (Mehrfachauswahl möglich):				
☐ ereignisbezogen ☐ kontinuierlich (wöchentlich, monatlich, jährlich) ☐ diskontinuierlich				
Beschreibung des Messintervalls:				

Abbildung C-1: Abfrageformular der Standortdaten zum Themenfeld Bodenerosion (2018)
(Fortsetzung)

Weiterverarbeitung (Angaben zu Datenhaltung der erfassten Größen, Datenbank, GIS-System, Modell, Software):	
Sonstige Anmerkungen/ Ergänzungen zum Messprogramm:	
Ausgefüllt von:	
Ort, Datum:	